

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik

**Funktions- und belastungsgerechte Auslegung additiv gefertigter Wabenkerne
für Sandwichbauteile**

Fabian Karl Eberhard Reiß

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 23.03.2016 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 08.09.2016 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme	V
Verzeichnis der Formelzeichen.....	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.2.1 Ziel der Arbeit.....	2
1.2.2 Eingrenzung des Betrachtungsraums.....	3
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Wissenschaft und Technik	7
2.1 Aufbau des Kapitels.....	7
2.2 Leichtbau	7
2.2.1 Produktentwicklung im Leichtbau.....	7
2.2.2 Leichtbaustrategien	8
2.2.3 Bauweisen im Leichtbau.....	12
2.3 Sandwichbauweise.....	14
2.3.1 Mechanische Grundlagen	14
2.3.2 Kerne für Sandwichbauteile	18
2.3.3 Deckschichten.....	25
2.3.4 Verbindung von Kern und Deckschichten.....	26
2.4 Additive Fertigung.....	26

2.4.1	Verfahrensbeschreibung	26
2.4.2	Bauteilgestaltung in der additiven Fertigung	28
2.5	Gestaltung und Auslegung von Sandwichbauteilen.....	30
2.5.1	Konstruktionsansätze für strukturierte Kerne.....	30
2.5.2	Strukturoptimierung von Kernen.....	39
2.5.3	Funktions- und Verbindungselemente für Sandwichbauteile ..	53
2.6	Zusammenfassung	55
3	Identifikation des Handlungsbedarfs.....	57
3.1	Defizite	57
3.2	Anforderungen.....	59
3.2.1	Anforderungen an die Methodik	59
3.2.2	Anforderungen an das Bauteil	61
4	Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung additiv gefertigter Wabenkerne	65
4.1	Aufbau des Kapitels	65
4.2	Struktur der Methodik	65
4.3	Randbedingungen der Methodik	67
4.3.1	Zentrales Datenmanagement in einer Spezifikationsliste	67
4.3.2	Zielfunktion	68
4.3.3	Entwurfsvariablen.....	69
4.3.4	Nebenbedingungen	76
4.3.5	Funktionsintegration.....	78
4.3.6	Materialien und Fertigungsverfahren	78
4.4	Zusammenfassung	80

5	Methode zur Anpassung von Wabenstrukturen an eine Fläche... 81
5.1	Aufbau des Kapitels..... 81
5.2	Struktur der Methode..... 81
5.2.1	Generierung der Netzlinien..... 82
5.2.2	Parkettierung der Fläche mit Waben 86
5.2.3	Berechnung der Normalenvektoren..... 88
5.2.4	Extrusion entlang der Normalenvektoren..... 90
5.3	Zusammenfassung 92
6	Methode zur Funktionsintegration in Wabenkernen 93
6.1	Aufbau des Kapitels..... 93
6.2	Struktur der Methode..... 93
6.2.1	Integration von Funktionselementen 94
6.2.2	Aufteilung und Verbindung von Wabenkernen..... 97
6.3	Zusammenfassung 101
7	Methode zur belastungsgerechten Auslegung 103
7.1	Aufbau des Kapitels..... 103
7.2	Struktur der Methode..... 103
7.2.1	Startentwurf und Berechnung der Bauteilspannungen 106
7.2.2	Überprüfung der Änderungs- und Abbruchkriterien 108
7.2.3	Änderung der Wabenwandstärke..... 109
7.2.4	Änderung des Wabendurchmessers..... 110
7.3	Zusammenfassung 112

8	Validierung der Methodik	115
8.1	Aufbau des Kapitels	115
8.2	Block Insert des Sentinel 1 Spacecraft Satelliten.....	115
8.3	Anwendung der Methodik.....	118
8.4	Zusammenfassung	125
9	Bewertung der entwickelten Methodik.....	127
9.1	Aufbau des Kapitels	127
9.2	Technisch-wirtschaftliche Bewertung.....	127
9.3	Beurteilung der Anforderungen.....	130
10	Schlussbetrachtung.....	133
10.1	Zusammenfassung	133
10.2	Ausblick.....	135
11	Literaturverzeichnis	137
12	Anhang.....	147
13	Studienarbeiten	151

Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

%	Prozent
€	Euro
3-D	dreidimensional
3DP	engl.: 3-D-Printing für dt.: 3-D-Drucken
al.	lat.: alii für dt.: andere
AM	engl.: Additive Manufacturing für dt.: Additive Fertigung
bzw.	beziehungsweise
CAD	engl.: Computer Aided Design für dt.: Computer-unterstütztes Design
CAE	engl.: Computer Aided Engineering für dt.: Computer-unterstützte Auslegung
CAO	engl.: Computer Aided Optimization für dt.: Computer-unterstützte Optimierung
CFK	Carbon-faserverstärkter Kunststoff
CLS	Conformal Lattice Structures TM
dt.	deutsch
EBM	engl.: Electron Beam Melting für dt.: Elektronenstrahlschmelzen
engl.	englisch
ESA	European Space Agency
et	und
FDM	engl.: Fused Deposition Modeling für dt.: Schmelzschichtung

Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

FEM	Finite-Elemente-Methode
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
GEH	Gestaltänderungshypothese
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
lat.	lateinisch
LBM	engl.: Laser-Beam-Melting für dt.: Laserstrahl-schmelzen
NASTRAN	NASA Structural Analysis System
PA	Polyamid
PLZ	Produktlebenszyklus
PU	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
SAR	Synthetic Aperture Radar
SKO	Soft-Kill-Option
SMS	Size Matching and Scaling Method
STL	Standard Triangulation Language
VDI	Verband Deutscher Ingenieure

Verzeichnis der Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
$A(t, d_s)$	mm^2	<i>Querschnittsfläche eines regelmäßigen n-Ecks in Abhängigkeit von Wandstärke und Durchmesser</i>
$A(\text{Trapez})$	mm^2	<i>Querschnittsfläche eines Trapezes</i>
$A(\text{Wabe})$	mm^2	<i>Querschnittsfläche einer Wabe</i>
B_{Bauteil}	mm	<i>Bauteilbreite</i>
B_y	Nm	<i>Biegesteifigkeit um die y-Achse</i>
C	-	<i>Extrusionskurve</i>
D_x	N/mm	<i>Dehnsteifigkeit in x-Richtung</i>
E	-	<i>Menge aller Ecken</i>
E_H	MPa	<i>E-Modul der Deckschicht</i>
E_{HK}	MPa	<i>E-Modul eines homogenen Kerns</i>
E_K	MPa	<i>E-Modul des Kerns</i>
$E\text{-Modul}$	MPa	<i>Elastizitätsmodul</i>
E_{n+1}	MPa	<i>E-Modul nach der Anpassung</i>
$E_{SK\text{Druck}}$	MPa	<i>E-Modul eines strukturierten Kerns, der auf Druck belastet wird</i>
F	N	<i>Kraft</i>
G_{HK}	MPa	<i>Schubmodul eines homogenen Kerns</i>
G_K	MPa	<i>Schubmodul eines Kerns</i>
$G_{SK\text{Längs}}$	MPa	<i>Längsschubmodul eines strukturierten Kerns</i>

Verzeichnis der Formelzeichen

H	mm	<i>Höhe des Wabenkerns (Hight)</i>
$H_{Bauteil}$	mm	<i>Bauteilhöhe</i>
I	m^4	<i>Flächenträgheitsmoment</i>
J	-	<i>Ebene</i>
K^K	-	<i>Menge aller Kanten</i>
L	mm	<i>Länge des Wabenkerns (Length)</i>
$L_{Bauteil}$	mm	<i>Bauteillänge</i>
L_{Kurve}	-	<i>Leitkurve</i>
M	-	<i>Menge</i>
\vec{N}_{P_q}	-	<i>Normalenvektor am Punkt P_q</i>
V	-	<i>Menge aller Netzlinien in v-Richtung</i>
$P(u_p, v_p)$		<i>Punkt P auf Fläche</i>
P_q	-	<i>Vereinfachte Schreibweise: Schnittpunkt der Netzlinien bzw. Eckpunkt eines regelmäßigen n-Ecks</i>
P_q'	-	<i>Korrespondierender Punkt verschoben entlang des Normalenvektors</i>
Q	N	<i>Querkraft</i>
R_e	MPa	<i>Streckgrenze</i>
R_m	MPa	<i>Maximale Zugfestigkeit</i>
S	-	<i>Sicherheitsfaktor</i>
T	K	<i>Aktuelle Temperatur in Kelvin</i>
T_{ref}	K	<i>Referenztemperatur in Kelvin</i>
U	-	<i>Menge</i>
O	-	<i>Menge aller Netzlinien in u-Richtung</i>

Verzeichnis der Formelzeichen

W	mm	<i>Breite des Wabenkerns (Width)</i>
W, L, H	-	<i>Kartesisches Koordinatensystem einer hexagonalen Wabe</i>
X_1, X_2, X_3	-	<i>Kartesisches Koordinatensystem</i>
$\vec{X}(u, v)$	-	<i>Ortsvektor</i>
\vec{Y}	-	<i>Entwurfsvektor</i>
\vec{Y}^*	-	<i>Optimale Lösung des Entwurfsvektors</i>
Z	mm	<i>Abstand zur neutralen Faser</i>
\mathbb{R}^3	-	<i>Dreidimensionaler Euklidischer Raum</i>

Kleine lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
a_1	mm	<i>Kante eines Trapezes</i>
a_{11}	mm	<i>Ankathete zu Winkel α</i>
a_2	mm	<i>Kante eines Trapezes</i>
b	-	<i>Startwert für Netzlinien in u-Richtung</i>
b_{Haken}	mm	<i>Hakenbreite</i>
c	-	<i>Variable zur Teilung des Wabendurchmessers</i>
d_q	mm	<i>Horizontaler Wabendurchmesser</i>
d_s	mm	<i>Senkrechter Wabendurchmesser</i>
$d_{s,initial}$	mm	<i>Initialer Wabendurchmesser</i>
$d_{s,ug}$	mm	<i>Minimaler Wabendurchmesser</i>
$d_{s\Omega alt}$	mm	<i>Wabendurchmesser vor der Anpassung</i>
$d_{s\Omega neu}$	mm	<i>Wabendurchmesser nach der Anpassung</i>
f	mm	<i>Insert-Wanddicke</i>

Verzeichnis der Formelzeichen

$f(t, d_s)$	-	Zielfunktion für belastungsgerechte Auslegung
$f(Y)$	-	Zielfunktion
$f_{C,x}(u)$	-	Funktion der Extrusionskurve in x -Richtung
f_{Hinter}	mm	Hinterschnitt
$f_{L,x}(u)$	-	Funktion der Leitkurve in x -Richtung
$g_j(Y)$	-	Nebenbedingung (Ungleichung)
h	mm	Hakenhöhe
i	-	Laufvariable horizontale Netzlinien
j	-	Laufvariable vertikale Netzlinien
k	-	Steuerungsfaktor
l	mm	Hakenlänge
l_0	mm	Ausgangslänge
$l_j(Y)$	-	Nebenbedingung (Gleichung)
m	-	Endwert für Netzlinien in u -Richtung
m_{Bauteil}	kg	Bauteilmasse
m_y	Nm	Biegemoment um die y -Richtung
n	-	Anzahl der Ecken einer Fläche
n_x	N	Kraft
o	-	Zählervariable für Nebenbedingungen
p	-	Anzahl der Nebenbedingungen (Gleichungen)
q	-	maximale Entwurfsnummer
r	-	Startwert für Netzlinien in v -Richtung
$s_{c,0}$	-	Endwert der Extrusionskurve
$s_{c,1}$	-	Startwert der Extrusionskurve

Verzeichnis der Formelzeichen

$s_{L,0}$	-	<i>Endwert der Leitkurve</i>
$s_{L,1}$	-	<i>Startwert der Leitkurve</i>
t	<i>mm</i>	<i>Wabenwandstärke</i>
t_H	<i>mm</i>	<i>Höhe Deckschicht</i>
$t_{initial}$	<i>mm</i>	<i>Initiale Wabenwandstärke</i>
t_K	<i>mm</i>	<i>Höhe Kern</i>
t_{og}	<i>mm</i>	<i>Maximale Wabenwandstärke</i>
\vec{t}_v	-	<i>Tangentenvektor einer v-Netzlinie</i>
t_{ug}	<i>mm</i>	<i>Minimale Wabenwandstärke</i>
\vec{t}_u	-	<i>Tangentenvektor einer u-Netzlinie</i>
$t_{\Theta \text{ alt}}$	<i>mm</i>	<i>Wabenwandstärke vor der Anpassung</i>
$t_{\Theta \text{ neu}}$	<i>mm</i>	<i>Wabenwandstärke nach der Anpassung</i>
u	-	<i>Laufvariable auf gekrümmter Fläche</i>
u, v	-	<i>Koordinatensystem entlang der gekrümmten Fläche</i>
u_b	-	<i>Erste Netzlinie in u-Richtung</i>
u_i	-	<i>Netzlinie in u-Richtung</i>
u_m	-	<i>Letzte Netzlinie in u-Richtung</i>
v	-	<i>Laufvariable auf gekrümmter Fläche</i>
v_j	-	<i>Netzlinie in v-Richtung</i>
v_r	-	<i>Erste Netzlinie in v-Richtung</i>
v_z	-	<i>Letzte Netzlinie in v-Richtung</i>
w	-	<i>Biegelinie</i>
w''	-	<i>Zweite Ableitung der Biegelinie</i>
x,y,z	-	<i>Kartesisches Koordinatensystem</i>

Verzeichnis der Formelzeichen

$x_{ ,j}$	-	<i>vertikale Netzlinie</i>
$x_{=,i}$	-	<i>horizontale Netzlinie</i>
y	<i>mm</i>	<i>halber horizontaler Wabendurchmesser</i>
z	-	<i>Endwert für Netzlinien in v-Richtung</i>

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	10^{-6}K^{-1}	<i>Wärmeausdehnungskoeffizient und Überhöhungsfaktor</i>
α_1	°	<i>Fügewinkel</i>
α_2	°	<i>Lösewinkel</i>
$\alpha_{n\text{-Eck}}$	°	<i>Winkelvariable</i>
γ_{Ist}	<i>mm</i>	<i>Ist-Steifigkeit im Bauteil</i>
γ_K	<i>kg</i>	<i>Spezifisches Kerngewicht</i>
$\gamma_{optimiert}$	<i>mm</i>	<i>Bauteilverschiebung nach der Leichtbauoptimierung</i>
$\gamma_{Original}$	<i>mm</i>	<i>Bauteilverschiebung des Ausgangsbauteils</i>
γ_{ziel}	<i>mm</i>	<i>Vorgegebene Zielverschiebung im Bauteil</i>
Δ	-	<i>Differenz</i>
$\Delta\sigma$	<i>MPa</i>	<i>Örtliche Spannungsdifferenz</i>
ε_x	%	<i>Dehnung in x-Richtung</i>
$\varepsilon_x(z)$	%	<i>Dehnung in x-Richtung in Abhängigkeit von z</i>
ζ	-	<i>Anzahl der Netzlinien in u-Richtung</i>
Θ	-	<i>Zählervariable für die Wabenwände</i>
ϑf	-	<i>Partielle Ableitung von f</i>
λ	-	<i>Menge aller Schnittpunkte</i>

Verzeichnis der Formelzeichen

$\sigma_{H,x}$	MPa	Deckschichtspannung in x -Richtung
$\sigma_{H,x}(z)$	MPa	Deckschichtspannung in z -Richtung
$\sigma_{HKDruck}$	MPa	Druckfestigkeit in einem homogenen Kern
σ_{HKZug}	MPa	Zugfestigkeit in einem homogenen Kern
σ_{Ist}	MPa	Ist-Spannung
$\sigma_{Ist}(t, d_s)$	MPa	Ist-Spannung in Abhängigkeit von t und d_s
$\sigma_{K,x}$	MPa	Kernspannung in x -Richtung
$\sigma_{K,x}(z)$	MPa	Kernspannung in x -Richtung in Abhängigkeit von z
σ^{lokal}	MPa	Ortsabhängige Referenzspannung
σ_{Ref}	MPa	Referenzspannung
σ_{Ref}^{global}	MPa	Globale Referenzspannung
$\sigma_{SKDruck}$	MPa	Druckfestigkeit in einem strukturierten Kern
σ_V	MPa	Vergleichsspannung nach von-Mises
σ_x	MPa	Spannung in x -Richtung
σ_y	MPa	Spannung in y -Richtung
σ_z	MPa	Spannung in z -Richtung
σ_{Ziel}	MPa	Zielspannung
τ_{HK}	MPa	Schubspannung im homogenen Kern
$\tau_{SKLängs}$	MPa	Längsschubspannung im strukturierten Kern
τ_{xy}	MPa	Schubspannung in xy -Richtung
τ_{xz}	MPa	Schubspannung in xz -Richtung
τ_{yz}	MPa	Schubspannung in yz -Richtung
φ	°	Winkel im regelmäßigen n -Eck
ϕ	-	Bezeichnung einer Fläche im Raum

Verzeichnis der Formelzeichen

φ_{Abb}	-	<i>Abbildung der Originalfläche</i>
ψ	-	<i>Originalfläche</i>
ω	-	<i>Anzahl der Netzlinien in v-Richtung</i>
Ω	-	<i>Zählvariable für den Wabendurchmesser</i>

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Das stetige Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum verstärkt die Nachfrage an Rohstoffen und Primärenergieträgern (ABELE & REINHART 2011). Unter Berücksichtigung der limitierten Förderkapazitäten resultiert daraus eine Verknappung der Ressourcen in wenigen Jahren (ABELE & REINHART 2011; RIB ET AL. 2013). Um einen ökologischen und ökonomischen Umgang mit vorhandenen Rohstoffen zu gewährleisten, besteht für Entwickler täglich die Herausforderung, Produkte effizienter und massereduzierter zu gestalten (HENNING & MOELLER 2011).

Eine Möglichkeit zur erfolgreichen Umsetzung dieser Aufgabe bietet die Verwendung von bionischen Gestaltungsansätzen, wie z. B. Gitter- oder Wabenstrukturen. Diese Leichtbaustrategien eröffnen neue Potenziale zur Massenreduktion in Bauteilen und Produkten (REINHART & TEUFELHART 2011). Der Grundgedanke hierbei ist, massive Bauteilbereiche durch filigrane Strukturen zu substituieren, wodurch bei gleichbleibender Steifigkeit, eine Reduktion des Materialfüllgrads erreicht wird (DEGISCHER & LÜFTL 2009). Ansätze hierzu sind bereits seit Jahrtausenden in der Natur vorhanden. Das wahrscheinlich bekannteste Prinzip, welches eine breite Anwendung in der Tier- und Pflanzenwelt findet, ist die Sandwichbauweise (DEGISCHER & LÜFTL 2009; KERZ 1988; KOPP ET AL. 2009; NACHTIGALL & BLÜCHEL 2000). Ein Beispiel hierzu bildet das Blatt einer Alge. Durch die hier angewandte Verbundbauweise, bei der ein zellular strukturierter Kern zug- und schubfest mit den äußeren Blattschichten verbunden ist, wird eine hohe Biegefestigkeit bei minimaler Masse erreicht (KLEIN 2009).

Im Gegensatz zur Natur kann der Mensch das Potenzial der Sandwichbauweise nur bedingt ausnutzen, was im Wesentlichen auf den gegenwärtigen fertigungstechnischen Einschränkungen basiert. Hierbei sind unter anderem die bestehenden Werkzeugzugänglichkeiten zu nennen, welche die Komplexität von Kernen für Sandwichbauteile limitieren (REINHART & TEUFELHART 2011; RIB ET AL. 2013). Dies hat zur Folge, dass meist nur ebene Sandwichbauteile mit strukturiertem Wabenkern und homogenem Materialfüllgrad Anwendung finden. Unter Berücksichtigung vorhandener Fertigungsprozesse, existieren gegenwärtig keine Möglichkeiten zur Weiterentwicklung einer Konstruktionsmethode, welche das Leichtbaupotenzial für Sandwichbauteile besser ausschöpft.

1 Einleitung

Neue Potenziale für die Produktentwicklung stehen mit den additiven Fertigungsverfahren zur Verfügung, die nahezu keine Limitierungen bei der Gestaltung von Bauteilen aufweisen (GEBHARDT 2013; GIBSON ET AL. 2010). Der schichtweise Aufbau von Werkstücken ermöglicht die wirtschaftliche Fertigung von äußerst komplexen Bauteilen (GEBHARDT 2013). Unter Verwendung dieser Verfahren können Komponenten gefertigt werden, die aufgrund der Bauteilgeometrie, z. B. durch Funktionsintegration oder dünnwandigen Leichtbaustrukturen, nicht mit spanenden oder urformenden Verfahren hergestellt werden können (REHME 2009; ZÄH & HAGEMANN 2006).

Erfolgt die Herstellung von Sandwichbauteilen unter Verwendung der additiven Fertigungsverfahren, ergeben sich neue Möglichkeiten zur Gestaltung von äußerst massereduzierten Komponenten (BREUNINGER ET AL. 2013). Dadurch können beispielsweise doppelt-gekrümmte und belastungsgerecht ausgelegte Sandwichbauteile mit strukturierten Kernen realisiert werden. Dieses Potenzial kann jedoch nicht durch eine reine Substitution des Fertigungsverfahrens gelingen, da hieraus in den meisten Fällen nur erhöhte Bauteilkosten entstehen. Grund hierfür ist, ähnlich wie bei den bestehenden Verfahren, dass entsprechende Konstruktionsmethoden existent sein müssen, um unter Anwendung dieser das beschriebene Leichtbaupotenzial ausschöpfen zu können. Zusammenfassend kann daher abgeleitet werden, dass die Notwendigkeit darin besteht, eine neue Konstruktionsmethodik zur Gestaltung von additiv gefertigten Sandwichbauteilen zu entwickeln.

1.2 Zielsetzung

1.2.1 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin Konstrukteurinnen und Konstrukteuren eine Methodik zur Verfügung zu stellen, mit der eine gesteigerte Massenreduktion in Sandwichbauteilen, unter Anwendung der additiven Fertigungsverfahren, erfolgen kann. Zur Zielerreichung sind, auf Basis der Ausgangssituation und des Stands der Wissenschaft und Technik, zunächst die Anforderungen an eine derartige Methodik zu analysieren und festzulegen. Hieraus ist eine Vorgehensweise zur Gestaltung von Sandwichbauteilen zu entwickeln, die bestehende Einschränkungen zur Ausschöpfung des Leichtbaupotenzials, wie beispielsweise die belastungsgerechte Auslegung von Kernen für gekrümmte Sandwichbauteile, auflöst. Des Weiteren sind die Möglichkeiten zur Funktionsintegration zu betrachten,

1.3 Aufbau der Arbeit

welche unter anderem den Montageaufwand von Sandwichbauteilen sowie zusätzliche Bauteilmassen reduzieren können. Die Anwendung der entwickelten Konstruktionsmethodik an einem Bauteil soll das Potenzial der Nutzung von additiven Fertigungsverfahren für Sandwichbauteile aufzeigen.

1.2.2 Eingrenzung des Betrachtungsraums

Basierend auf der beschriebenen Ausgangssituation kann festgehalten werden, dass vor allem der Kern die Limitierungen bei der Ausnutzung des Leichtbaupotenzials in Sandwichbauteilen darstellt. Für eine ganzheitliche Betrachtung des Sandwichbauteils ist es notwendig, dass zunächst detaillierte Erkenntnisse zur Gestaltung des Kerns vorliegen müssen. Daher fokussiert diese Arbeit die Konstruktion und Auslegung des Sandwichkerns. Für den anschließenden Vergleich der unterschiedlichen Leichtbauansätze besteht somit die Notwendigkeit, dass die Abmessungen des Wabenkerns und die Parameter der Deckschichten konstant gehalten werden. Nur dadurch ist am Ende dieser Arbeit eine aussagekräftige Bewertung des Leichtbaupotenzials möglich. Des Weiteren wird die Verbindung von Kern und Deckschichten bei der Berechnung so modelliert, dass ein Bauteilversagen im Kern erfolgt und nicht von der Güte der Fügestelle abhängig ist.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in zehn Kapitel. Der wissenschaftliche Kern dieser Dissertation ist in Abbildung 1-1 schematisch dargestellt. In den vorangegangenen Abschnitten (*Kapitel 1*) wurden bereits die Motivation sowie die daraus abgeleitete Zielsetzung mit den Teilzielen beschrieben.

Kapitel 2 beschreibt den Stand der Wissenschaft und Technik zu den relevanten Themen dieser Arbeit. Neben der Betrachtung bestehender Vorgehensweisen zur Auslegung von Sandwichbauteilen, werden im Rahmen dieses Kapitels auch Ansätze zur Anwendung additiver Fertigungsverfahren im Leichtbau beleuchtet.

Kapitel 3 befasst sich mit der Darlegung des Handlungsbedarfs in diesem Bereich. Nach einer Zusammenfassung der Defizite des Stands der Wissenschaft und Technik, erfolgt die Ableitung des Handlungsbedarfs zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung von Wabenkernen für Sandwichbauteile. Auf Basis des Handlungsbedarfs werden allgemeine und technische Anforderungen für die zu entwickelnde Methodik abgeleitet.

1 Einleitung

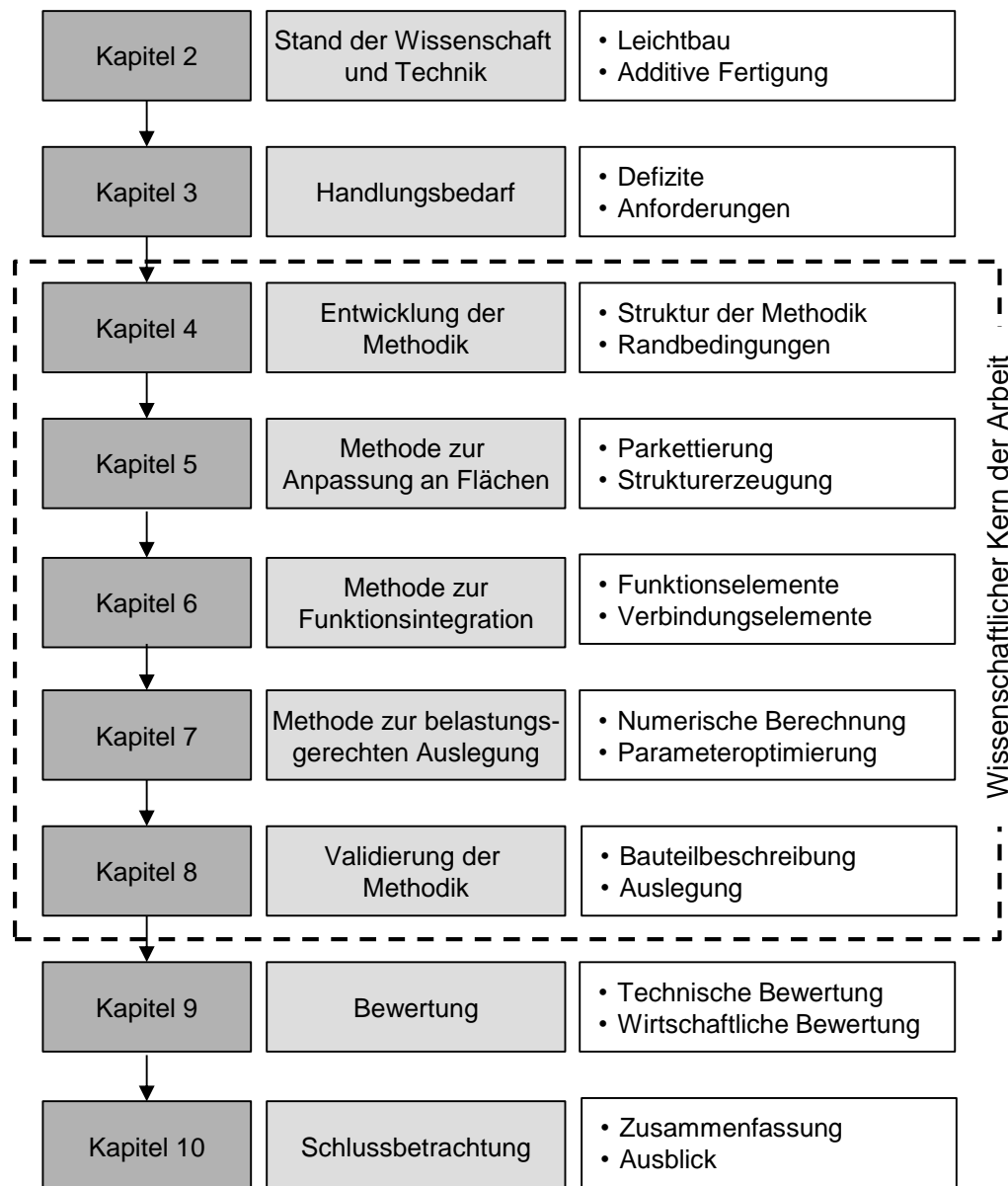


Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit

Die Entwicklung einer *Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung von Wabenkernen für Sandwichbauteile* erfolgt in *Kapitel 4*. Den Fokus des Kapitels bildet die Beschreibung der Struktur zur Anwendung des Vorgehens. Hierbei gilt es Randbedingungen zu definieren, welche in einer Spezifikationsliste dokumentiert werden.

Kapitel 5 behandelt die *Methode zur Anpassung von Waben an eine stetige, endliche Fläche*. Die Parkettierung der Fläche sowie die anschließende Extrusion entlang des Normalenvektors ermöglichen es, dass am Ende des Kapitels ein Wabenkern mit regelmäßigen Sechseckwaben zur Verfügung steht, bei dem jede Wabenwand senkrecht zur Deckschicht angeordnet ist.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die in *Kapitel 6* beschriebene *Methode zur Funktionsintegration* beinhaltet eine Vorgehensweise zur Reduzierung des Montageaufwands für Funktionselemente sowie eine Vorgehensweise zur Aufhebung der Bauraumlimitierung in der additiven Fertigung.

In *Kapitel 7* wird die *Methode zur belastungsgerechten Auslegung von Wabenkernen für Sandwichbauteile* vorgestellt. Hierbei erfolgt, auf Basis der Anforderung, eine Strukturoptimierung zur Steigerung der Massenreduktion innerhalb des Sandwichbauteils.

Die Validierung der entwickelten Vorgehensweise wird in *Kapitel 8* am Beispiel eines Satellitenbauteils aufgezeigt. Das nachfolgende *Kapitel 9* untersucht die technische und wirtschaftliche Bewertung der Methodik.

Den Abschluss dieser Dissertation stellt *Kapitel 10* dar. Ein Resümee fasst die Inhalte der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungsfragen des adressierten Themenkomplexes.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Aufbau des Kapitels

Im Rahmen dieses Kapitels wird der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik zum Themengebiet der funktions- und belastungsgerechten Auslegung additiv gefertigter Wabenkerne für Sandwichbauteile aufgezeigt. Der Aufbau des Kapitels ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

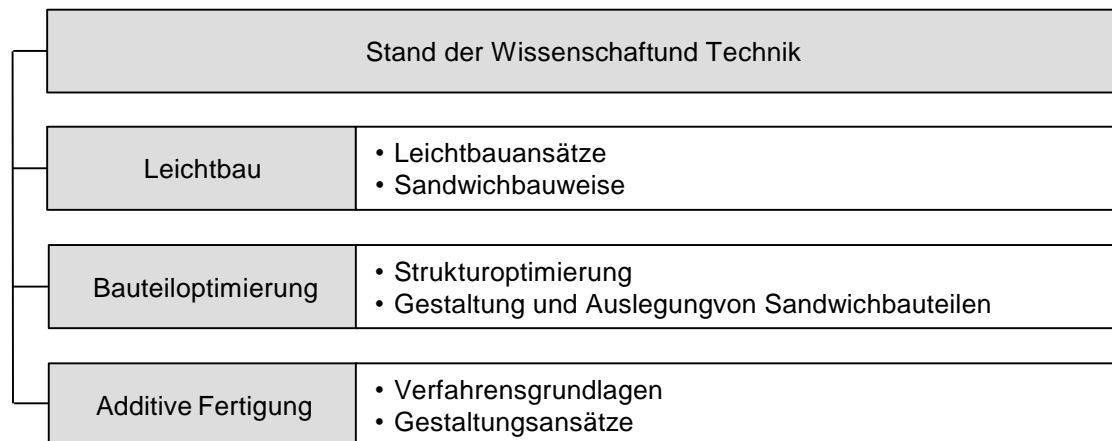


Abbildung 2-1: Aufbau des Kapitels

2.2 Leichtbau

2.2.1 Produktentwicklung im Leichtbau

Die grundlegende Idee eines produzierenden Unternehmens ist es, gewinnmaximierend funktions- und marktfähige Produkte zu entwickeln, zu produzieren und zu vertreiben. Hierbei kann es sich um ein physikalisches Erzeugnis, eine Software oder auch um eine Dienstleistung handeln. (HENNING & MOELLER 2011; PONN 2011)

Daher besteht die Notwendigkeit, dass während der Produktentwicklung alle Schritte des Produktlebenszyklus (PLZ), welcher in Abbildung 2-2 dargestellt ist, betrachtet werden (KLEIN 2009). Dies wird vor allem bei der Entwicklung von Leichtbauprodukten deutlich erkennbar. Erfahrungswerte zeigen hier, dass Leichtbaukonstruktionen meist in der Konzeption, im Werkstoffeinsatz sowie in der Herstellung und der Erprobung deutlich kostenintensiver sind als konventio-

2 Stand der Wissenschaft und Technik

nelle Konstruktionen. Eine Amortisation der Entwicklungs- und Produktionskosten von Leichtbauprodukten erfolgt in den meisten Fällen erst im dritten und vierten Teil des Produktlebenszyklus (KLEIN 2009). Weiterführende Literatur zu diesem Themenkomplex bieten EHRENSPIEL & MEERKAMM (2013); LINDEMANN (2005) und PONN (2011).

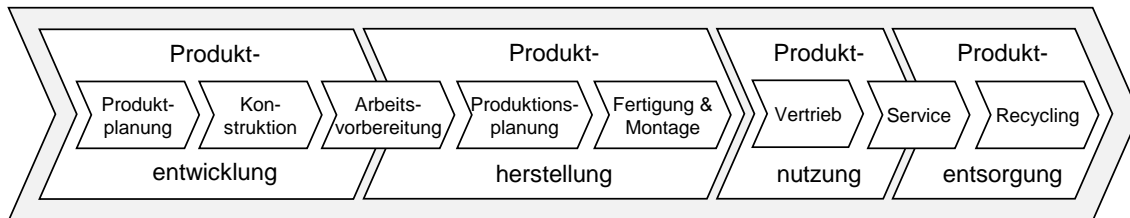


Abbildung 2-2: Produktlebenszyklus (in Anlehnung an SCHUH (2006))

Das Ziel des Leichtbaus ist primär die Masse einer Struktur zu minimieren (KLEIN 2009). Zu berücksichtigen sind hierbei Anforderungen, wie z. B. die Funktion oder die Lebensdauer eines Bauteils, welche nicht auf Kosten der Zielstellung beeinträchtigt werden dürfen (HENNING & MOELLER 2011; KLEIN 2009). Des Weiteren ist bei der Auslegung darauf zu achten, dass im gesamten Bauteil das Axiom der homogenen Bauteilspannung gilt (MATTHECK 2006A). Die bestmögliche Auslegung kann immer nur dann erfolgen, wenn der Bezug auf einen festen Anwendungs- bzw. Belastungsfall gegeben ist (KOPP ET AL. 2009). Aus den oben genannten Zielen für die Entwicklung und Konstruktion von Leichtbaukomponenten resultiert ein komplexer und interdisziplinärer Entwicklungsprozess. Hinzu kommen gesellschaftliche Anforderungen, wie z. B. Umweltverträglichkeit und Mobilität, was unter anderem für Produktentwickler im Automobilbau eine sehr hohe Herausforderung darstellt (HENNING & MOELLER 2011). In Abhängigkeit der beschriebenen mehrdimensionalen Anforderungen muss für die zielgerichtete Anwendung der gewählten Bauweisen, Werkstoffe und Fertigungstechnologien eine definierte Leichtbaustrategie ausgewählt werden (HENNING & MOELLER 2011). Hierzu stehen konventionelle und bionische Leichtbaustrategien zur Verfügung.

2.2.2 Leichtbaustrategien

Konventioneller Leichtbau

Die konventionellen Leichtbaustrategien können nach HENNING & MOELLER (2011) und KLEIN (2009) in folgende fünf Cluster zusammengefasst werden:

- *Bedingungsleichtbau*

Die Anforderungen an diese Strategie resultieren aus den Rahmenbedingungen der Gesellschaft, der Politik und/ oder der Gesetzgebung. Der Bedingungsleichtbau beinhaltet zusätzlich die Strategien des Spar-, des Zweck- und des Umweltleichtbaus. Der Sparleichtbau zielt auf eine hohe Kosteneinsparung während der Produktherstellung ab. Beim Zweckleichtbau ist beispielsweise die Massenreduktion notwendig, um die Erfüllung der Funktion eines Systems zu gewährleisten. Der Umwelt- bzw. Ökoleichtbau adressiert das sich im Betrieb befindliche Bauteil. Hierbei soll während dieser Phase unter anderem der Schadstoffausstoß reduziert werden.

- *Konzeptleichtbau*

Die Betrachtung des Gesamt- bzw. Teilsystems zur Massenreduktion zeichnet den Konzept- bzw. System- oder Funktionsleichtbau aus. Dies kann beispielsweise die Erarbeitung neuer Lastpfade oder die Integration von Strukturen mit höherem Potenzial zur Funktionsintegration sein. Bei der Funktionsintegration gilt es, möglichst viele technische Funktionen in einer minimalen Anzahl an Bauteilen umzusetzen (BREUNINGER ET AL. 2013).

- *Stoffleichtbau*

Die Stoff- bzw. Werkstoffleichtbaustrategie zielt darauf ab, basierend auf den gegebenen Anforderungen, den Werkstoff mit der geeigneten, meist niedrigsten relativen Materialdichte auszuwählen und anzuwenden.

- *Formleichtbau*

Eine Struktur mit minimaler Masse und optimaler Kraftverteilung sowie Funktionsintegration stellt das Ziel des Formleichtbaus dar. Hierzu sind vor allem genaue Anforderungen an die Belastungen, die Lagerungen und die geometrischen Abmessungen notwendig. Zusätzlich spielt die gewählte Bauweise, vgl. Abschnitt 2.2.3, eine wichtige Rolle.

- *Fertigungsleichtbau*

Der Fertigungsleichtbau ermöglicht es, Massenreduktionen durch Herstellungs-, Fertigungs- und Montageprozesse zu erreichen. Eine isolierte Betrachtung dieser Strategie kann in einer Vielzahl der Fälle nicht erfolgen, da hierbei meist eine Abhängigkeit vom Stoff- bzw. Konzeptleichtbau gegeben ist.

Zusammenfassend ist über alle Strategien festgehalten, dass die bestmögliche Ausnutzung des Leichtbaupotenzials für ein Bauteil erst dann erreicht wird, wenn alle einzelnen Ansätze berücksichtigt werden. In vielen Fällen kann das vorhan-

2 Stand der Wissenschaft und Technik

dene Potenzial auf Grund von Einschränkungen, wie beispielsweise die Rechenleistung zur Auslegung von Bauteilen oder die Limitierung der Fertigungstechnik, noch nicht vollständig abgerufen werden.

Bionischer Leichtbau

Die Defizite, welche bei der Ausnutzung des vorhandenen Gestaltungspotenzials von Leichtbauprodukten entstehen, gelten nur für die von Menschen geschaffenen Produkte. Pflanzen und Lebewesen gestalten ihre Zellen und Strukturen bereits seit Jahrmillionen überwiegend belastungs- und funktionsgerecht (KERZ 1988). Dieses in der Natur bewährte und validierte Vorgehen zum Aufbau von Produkten, ließ die wissenschaftliche Disziplin der Bionik entstehen. Wobei sich die Bionik, nach NACHTIGALL (2003, Vorwort), „...systematisch mit der technischen Umsetzung und Anwendung von Konstruktionen, Verfahren und Entwicklungsprinzipien biologischer Verfahren...“ befasst. Somit gilt als zentrales Element der Bionik die Übertragung der Ansätze in die Technik und nicht das reine Kopieren, da dies in fast allen Fällen nicht zielführend ist. Durch die Richtlinie VDI 6220-1 (2012) sind folgende Technologiebereiche der Bionik identifiziert worden:

- Funktionale bionische Oberflächen
- Bionische Maschinen und Roboter
- Bionische Materialien, Strukturen und Bauteile
- Bionische Optimierung
- Bionische Informationsverarbeitung

Auf Basis der genannten Technologiebereiche der Bionik erfolgt die Einordnung dieser Arbeit unter den Aufzählungspunkten: *bionische Materialien, Strukturen und Bauteile* sowie *bionische Optimierung*. Die nachfolgende Beschreibung zur Umsetzung von Leichtbaustrategien in der Natur fokussiert die identifizierten Technologiebereiche, denen diese Arbeit zugeordnet ist.

Materialersparnis durch Hohlräume

Um die Masse in einem Objekt zu reduzieren, ist es eine triviale Strategie, Material an den Stellen zu entfernen, an welchen die geringsten Belastungen auftreten. Aus diesem Ansatz heraus resultieren in der Natur die Fachwerk- und Skelettbauweisen. Des Weiteren besteht ebenfalls die Möglichkeit, Werkstoffe schaumartig oder zellular, wie z. B. mit Gittern oder Waben, zu strukturieren. Zusätzlich zur Massereduktion durch zelluläre Materialien bieten diese Werkstoffe auch das Potenzial zur Funktionsintegration. Die unterschiedlichen Hohlräume können

2.2 Leichtbau

z. B. zum Transport von Stoffen oder Flüssigkeiten verwendet werden. Zu den zellularen Materialien zählen unter anderem Holz, Kork und trabekuläre Knochen. (DEGISCHER & LÜFTL 2009; KERZ 1988)

Hierarchischer Aufbau

Die genaue Betrachtung von natürlichen Fasern oder Zellen zeigt, dass diese Strukturen Ausprägungen auf unterschiedlichen geometrischen Ebenen aufweisen, also einem hierarchischen Aufbau folgen (DEGISCHER & LÜFTL 2009). Dieser Aufbau kann nach ENGELBRECHT ET AL. (2009) und REINHART & TEUFELHART (2011) in folgende Ebenen unterteilt werden:

- Makroskopisch (> 10 mm)
- Mesoskopisch (0,1 mm bis 10 mm)
- Mikroskopisch (< 0,1 mm)

Der hierarchische Aufbau einer Struktur kann am Beispiel von Waben demonstriert werden. Ein natürliches Bauteil (makroskopisch) besteht aus Wabenstrukturen (mesoskopisch), dessen Material wiederum aus einem heterogenen Materialverbund aufgebaut ist (mikroskopisch). Eine exemplarische, technische Umsetzung des genannten Beispiels zeigt Abbildung 2-3.

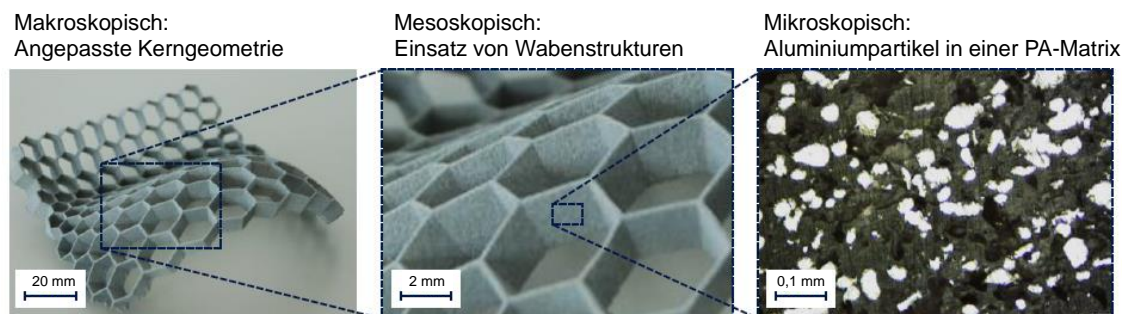


Abbildung 2-3: Technisches Beispiel für den hierarchischen Aufbau einer Struktur

Überträgt man den hierarchischen Aufbau nach dem Prinzip der Bionik auf ein Bauteil, ergeben sich neue Möglichkeiten für den Leichtbau (DEGISCHER & LÜFTL 2009). So wäre es beispielsweise möglich, die einzelnen hierarchischen Ebenen als Parameter für eine Strukturoptimierung zu verwenden. Bezogen auf die beschriebene Wabenstruktur könnten als Parameter die Wabenwände bzw. der Wabendurchmesser variiert werden.

Funktionsgerechtes Wachstum

Die Anpassung von biologischen Organismen an sich stetig verändernde Umweltbedingungen erfolgt im Allgemeinen durch zwei Strategien (KERZ 1988). Zum einen sind dies der Materialabbau, wie er beispielsweise in Bäumen stattfindet und zum anderen der Materialumbau, der unter anderem in Muskeln vorkommt (DEGISCHER & LÜFTL 2009). Die Anwendung bzw. Übertragung der beschriebenen Leichtbaustrategien auf physikalische Bauteile erfolgt unter Berücksichtigung der im nachfolgenden Kapitel beschriebenen Bauweisen im Leichtbau.

2.2.3 Bauweisen im Leichtbau

Als Bauweise wird die Gestaltung eines Bauteils, einer Baugruppe oder einer kompletten Struktur bezeichnet (HENNING & MOELLER 2011). Hierfür müssen alle Leichtbaustrategien ganzheitlich betrachtet werden. Bei der Einteilung der Bauweisen wird nach STEINHILPER (2012) generell zwischen

- Integralbauweise und
- Differentialbauweise

unterschieden. Nachfolgend werden die beiden Bauweisen in Anlehnung an GROTE & FELDHUSEN (2014) und HENNING & MOELLER (2011) vorgestellt. Welche Bauweise für welche Bauteile angewandt wird, hängt von einer Vielzahl an Faktoren ab. Beide Ansätze zielen darauf ab, das Leichtbaupotenzial bestmöglich auszunutzen. Den Unterschied zwischen der Differenzial- und der Integralbauweise verdeutlicht Abbildung 2-4. Eine Mischbauweise bzw. eine Kombination der Bauweisen ist ebenfalls möglich.

Integralbauweise

Die Integralbauweise verfolgt den Ansatz, möglichst viele Strukturelemente in einem Fertigungsvorgang herzustellen (KLEIN 2009). Zusätzlich kann durch die direkte Integration von Funktionen, wie z. B. Versteifungen, überschüssige Masse reduziert werden (GROTE & FELDHUSEN 2014). Die Anzahl der Einzelkomponenten wird daher verringert, wodurch die anschließenden Montagekosten sinken. Der Vorteil dieser Bauweise liegt somit in der minimalen Bauteilmasse und im geringen Fügeaufwand der Einzelkomponenten (KLEIN 2009). Dem entgegengesetzt stehen höhere Kosten für Werkzeuge und Fertigungsprozesse. Des Weiteren ist eine Kombination von unterschiedlichen Werkstoffen schwer zu

2.2 Leichtbau

realisieren (FLEMMING ET AL. 1996). Der Austausch eines defekten Bauteilbereichs im Schadensfall ist ebenfalls nur bedingt möglich (FLEMMING ET AL. 1996). Die Verwendung der Integralbauweise ist eng mit der Leichtbaustrategie Konzeptleichtbau verknüpft und verfolgt die identischen Ziele. (HENNING & MOELLER 2011)

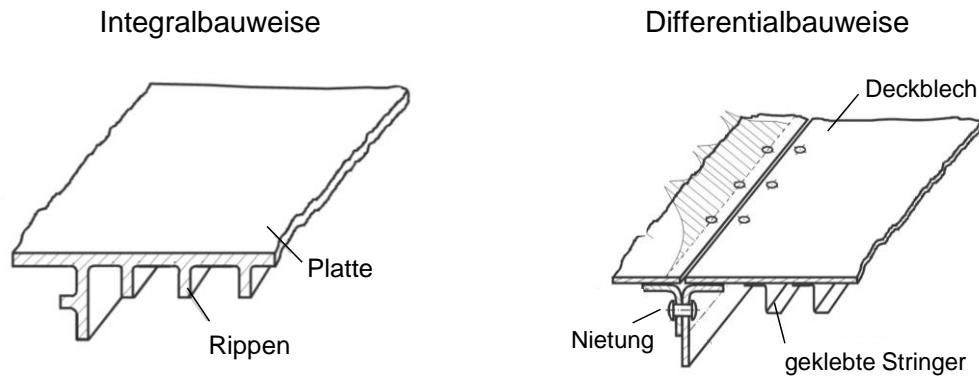


Abbildung 2-4: Bauweisen im Leichtbau (in Anlehnung an KLEIN (2009))

Differentialbauweise

Die Differentialbauweise gilt als klassische Bauweise, um eine komplexe Groß- bzw. Gesamtstruktur aufzubauen (KLEIN 2009). Die meist einfach gehaltenen Einzelkomponenten bzw. Halbzeuge oder Konstruktionselemente werden durch Fügevorgänge zu einer Gesamtstruktur verbunden. Die Fertigungskosten für die Einzelkomponenten sind meistens gering, wohingegen der anschließende Aufwand für die Baugruppenmontage hoch ist (FLEMMING ET AL. 1996). Bei der Differenzialbauweise können Kombinationen unterschiedlicher Werkstoffe eingesetzt werden, wodurch das Leichtbaupotenzial besser ausgenutzt werden kann (KLEIN 2009). Des Weiteren besteht die Möglichkeit defekte Einzelkomponenten im Schadensfall auszutauschen. Am Ende des Produktlebenszyklus wird das Bauteil in seine Einzelkomponenten zerlegt und anschließend recycelt (KLEIN 2009). Der Nachteil dieser Bauweise ist die Kontaktkorrosion, die an den Fügestellen der Einzelkomponenten auftreten kann, sowie die zusätzliche Masse, welche aus den notwendigen Fügelementen resultiert (STEINHILPER 2012). (HENNING & MOELLER 2011)

Eine Sonderform der Differenzialbauweise stellen die hochintegrativen Bauweisen, wie beispielsweise die Sandwichbauweise, dar (KLEIN 2009). Diese wird in den nachfolgenden Abschnitten ausführlich beschrieben und bildet die fokussierte Bauweise in dieser Arbeit.

2.3 Sandwichbauweise

Die Sandwichbauweise bezeichnet Komponenten, die aus zwei hochsteifen dünnen Deckschichten und einem schubsteifen Kern bestehen, welche schub- und zugfest miteinander verbunden sind (FLEMMING ET AL. 1996). Dadurch erreichen Sandwichbauteile eine sogenannte Verbundtragwirkung und gelten als Standardstrukturelemente des Leichtbaus (MÄHL 2008; TORSAKUL 2007). Die schematische Darstellung eines Sandwichbauteils zeigt Abbildung 2-5.

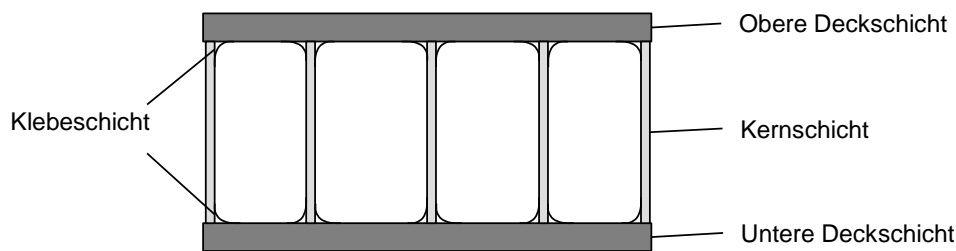


Abbildung 2-5: Schematischer Aufbau eines Sandwichbauteils

2.3.1 Mechanische Grundlagen

Vergleichbar mit dem Doppel-T-Träger-Prinzip basiert auch der *Sandwich*effekt auf einem erhöhten Flächenträgheitsmoment, welches aus dem Steiner-Anteil resultiert (WIEDEMANN 1996). Dies ermöglicht biegesteife Strukturen mit höchster Leichtbaugüte. Die generelle Lastenverteilung innerhalb eines Sandwichbauteils ist durch die Verbundtragwirkung fest definiert. Dies soll am Beispiel eines biegebeanspruchten Bauteils, wie in Abbildung 2-6 dargestellt, verdeutlicht werden. Die Deckschichten nehmen bei einer Biegebelastung primär die Zug- und Druckkräfte auf. Die Schubkräfte zwischen den Deckschichten sowie die lokalen Druckbeanspruchungen in Normalenrichtung werden vorwiegend durch den Kern aufgenommen. (HEIMBS 2008)

Auf Basis der beschriebenen Lastverteilung kann das mechanische Verhalten einer Sandwichstruktur mit den nachfolgend aufgezeigten Formeln berechnet werden. Dies wird anhand von Grundlastfällen (einer Normalkraft, einer Biege- und einer Schubbeanspruchung) demonstriert. Aufgrund der häufigen Anwendung in der Praxis und dem Fokus dieser Arbeit werden nur Bauteile mit einer identischen Deckschichthöhe und dem gleichen Werkstoff berücksichtigt. (HEIMBS 2008)

2.3 Sandwichbauweise

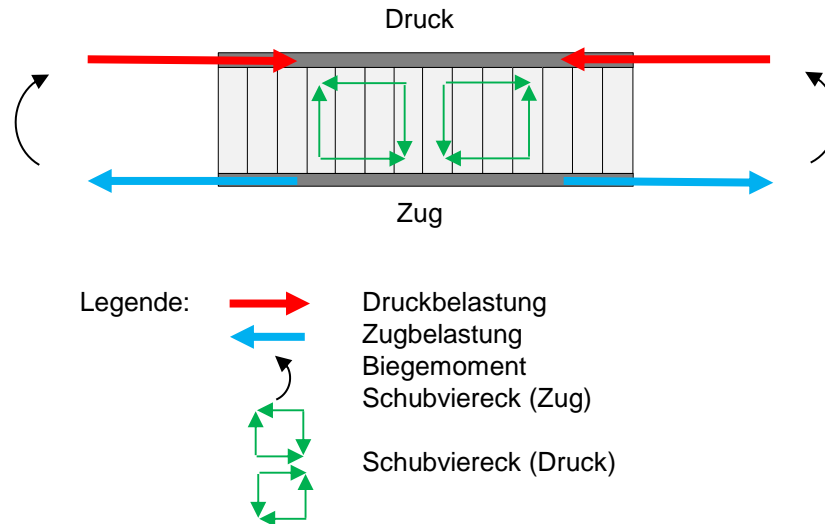


Abbildung 2-6: Lastenverteilung in einem biegebeanspruchten Sandwichbauteil (in Anlehnung an HEIMBS (2008))

Zunächst erfolgt die Betrachtung von einachsigen Zugbelastungen. Hierfür wurde in Abbildung 2-7 ein Schnitt in der x-z-Ebene eines Sandwichbauteils skizziert, welches durch eine breitenbezogene Last n_x beansprucht wird.

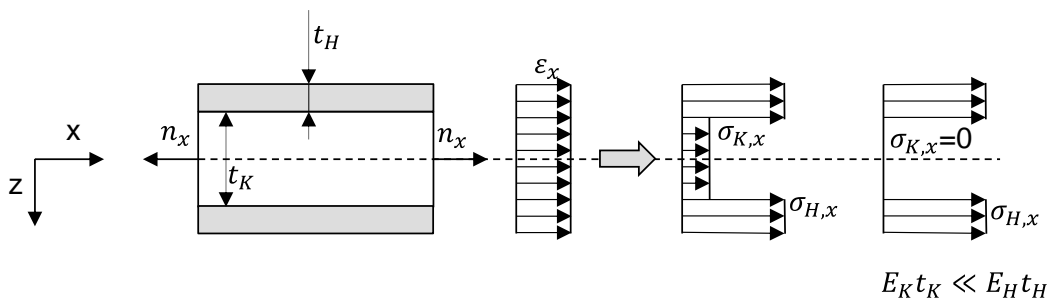


Abbildung 2-7: Spannungsverteilung einer normalkraftbeanspruchten Sandwichstruktur (in Anlehnung an HEIMBS (2008); KLEIN (2009))

Durch die unterschiedlichen Elastizitäten von Kern und Deckschichten, bilden sich Dehnungs- und Spannungsverteilungen, gemäß Abbildung 2-7, aus. Diese können durch die Formeln (2-1) bis (2-4) beschrieben werden. (HEIMBS 2008; KLEIN 2009)

$$\sigma_{H,x} = E_H \cdot \varepsilon_x \quad (2-1)$$

$$\sigma_{K,x} = E_K \cdot \varepsilon_x \quad (2-2)$$

2 Stand der Wissenschaft und Technik

$$\varepsilon_x = \frac{n_x}{D_x} \quad (2-3)$$

$$D_x = 2 \cdot E_H \cdot t_H + E_K \cdot t_K \quad D_x \approx 2 \cdot E_H \cdot t_H \quad (2-4)$$

Der zweite Grundbelastungsfall, eine Biegebelastung, welche den Hauptanwendungsfall in der Praxis darstellt, ist in Abbildung 2-8 dargestellt. Das abgebildete Sandwichbauteil wird mit einem breitenormierten Biegemoment m_y belastet, dem die Biegesteifigkeit B_y entgegenwirkt.

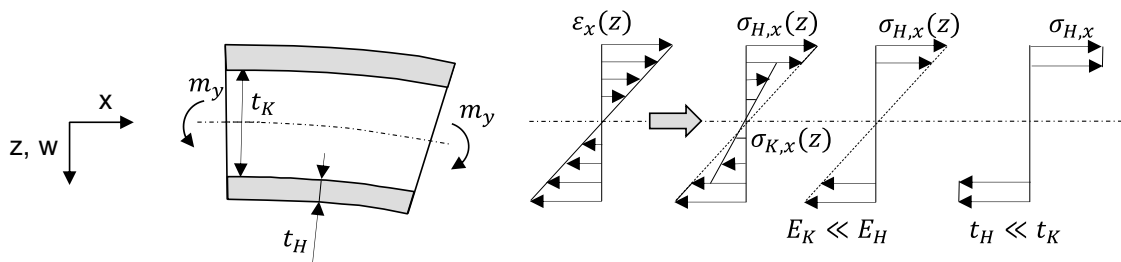


Abbildung 2-8: Spannungsverlauf einer biegebelasteten Sandwichstruktur (in Anlehnung an HEIMBS (2008); KLEIN (2009))

Die Berechnung der Spannungs- und Dehnungsverläufe kann nach HEIMBS (2008) unter Verwendung der Formeln (2-5) bis (2-8) erfolgen.

$$\sigma_{H,x}(z) = E_H \cdot z \cdot w'' \quad (2-5)$$

$$\sigma_{K,x}(z) = E_K \cdot z \cdot w'' \quad (2-6)$$

$$w'' = -\frac{m_y}{B_y} \quad (2-7)$$

$$B_y = E_H \left(\frac{(t_K + t_H)^2 \cdot t_H}{2} + \frac{t_H^3}{6} \right) + E_K \left(\frac{t_K^3}{12} \right) \quad (2-8)$$

Analog zum vorherigen Belastungsfall kann auch hier die Normalspannungskomponente im Kern auf Basis des kleineren E-Moduls ($E_K \ll E_H$), wie in Formel (2-9) beschrieben, vernachlässigt werden. Des Weiteren ist es möglich, bei sehr dünnen Deckschichten ($t_H \ll t_K$), eine konstante Spannung über der Dicke anzusetzen.

2.3 Sandwichbauweise

$$B_y \approx \frac{E_H t_H (t_K + t_H)^2}{2} \quad (2-9)$$

Der dritte Grundbelastungsfall, wie in Abbildung 2-9 dargestellt, beschreibt ein Sandwichbauteil unter Querkraftbiegung.

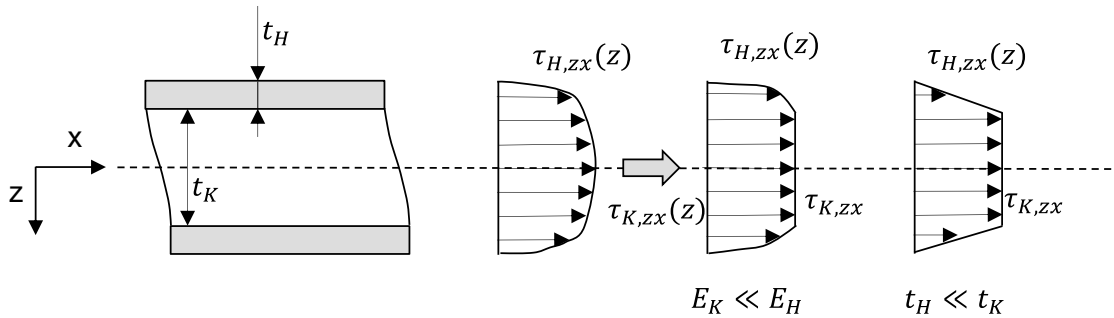


Abbildung 2-9: Verzerrungszustand und Spannungsverlauf einer schubbelasteten Sandwichstruktur (in Anlehnung an HEIMBS (2008); KLEIN (2009))

Durch die Querkraft Q und den Abstand Z zur neutralen Faser ergibt sich eine Spannungsverteilung nach HEIMBS (2008) und KLEIN (2009), welche durch Formel (2-10) und (2-11) beschrieben wird. Des Weiteren können durch die Annahme einer sehr geringen Elastizität des Kerns ($E_K \ll E_H$) sowie sehr dünnen Deckschichten ($t_H \ll t_K$), welche in Abbildung 2-9 dargestellt sind, Vereinfachungen getroffen werden.

$$\tau_{H,zx}(z) = \frac{Q}{B_y} \cdot \frac{E_H}{2} \left(\frac{t_K^2}{4} + t_K t_H + t_H^2 - Z^2 \right) \quad (2-10)$$

$$\tau_{K,zx}(z) = \frac{Q}{B_y} \left[\frac{E_H t_H (t_K + t_H)}{2} + \frac{E_K}{2} \left(\frac{t_K^2}{4} - Z^2 \right) \right] \quad (2-11)$$

Allgemein ist in Bezug auf die Versagensarten bei Sandwichbauteilen darauf hinzuweisen, dass bei dünnwandigen Leichtbaukomponenten die Konstruktion nicht aus Festigkeitsgründen, sondern aus Stabilitätsgründen, wie beispielsweise durch Knicken, Beulen oder Auskippen, versagt (KOSSIRA 1996). Bezogen auf die Wandstärke treten hierbei immer große Verformungen auf (KOSSIRA 1996). Weitere Ausführungen zur Berechnung von Sandwichbauteilen sind in WIEDEMANN (1996) zu finden.

Zur Erreichung der oben beschriebenen mechanischen Eigenschaften in einem Sandwichbauteil, müssen für den Kern bzw. die Deckschichten die entsprechenden Materialien gewählt werden.

2.3.2 Kerne für Sandwichbauteile

Kerne für Sandwichbauteile können nach KLEIN (2009) in

- homogene Kerne und
- strukturierte Kerne

unterteilt werden. Die jeweiligen Vor- und Nachteile sind in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

Homogene Kerne

Die Verwendung von homogenen bzw. stochastischen, zellularen Materialien bietet sich als die einfachste Ausführung eines Kerns für Sandwichbauteile an (KLEIN 2009). Diese werden aus gepresstem Papier, aufgeschäumten Kunststoffen (z. B. Polyurethan (PU), Polyvinylchlorid (PVC)) oder Metallschäumen hergestellt (KOPP ET AL. 2009). Homogene Kerne finden Anwendung in kostengünstigen und wenig beanspruchten Bauteilen wie z. B. Verkleidungen, Türen oder Verpackungselemente (GIBSON & ASHBY 1997; SVIRIDOV 2011). Auf Basis des Fertigungsverfahrens ergibt sich eine sehr hohe Flexibilität in Bezug auf die mögliche äußere Formgebung, wie in Abbildung 2-10 dargestellt.



Abbildung 2-10: Aufgeschäumtes Sandwichbauteil (SVIRIDOV 2011)

Strukturierte Kerne

Die zweite Möglichkeit zur Ausführung von Kernen für Sandwichbauteile ist die Verwendung von regelmäßigen strukturierten Kernen. Eine Unterscheidung

2.3 Sandwichbauweise

erfolgt maßgeblich durch den regelmäßigen inneren Strukturaufbau. Als Werkstoffe kommen vor allem neben harzgetränktem Papier und Kunststoffen auch metallische Materialien (z. B. Aluminiumlegierungen) zum Einsatz (KLEIN 2009). Die Auswahl des Werkstoffs ist, identisch zu den homogenen Kernen, immer vom Anwendungsfall abhängig. Der entscheidende Vorteil, den strukturierte Materialien im Gegensatz zu stochastischen Materialien aufweisen, ist ihre deutlich höhere Festigkeit, welche auf dem regelmäßigen Aufbau und der inneren Abstützung basiert (KLEIN 2009; KOPP ET AL. 2009). Als nachteilig sind jedoch die höheren Fertigungskosten der strukturierten Kerne zu nennen (KOPP ET AL. 2009).

Vergleich der Kernauführungen

Im Rahmen dieses Abschnitts erfolgt eine Gegenüberstellung der beiden beschriebenen Kernauführungen. Das Ziel hierbei ist es, die Kernvariante mit dem höchsten Leichtbaupotenzial zu identifizieren. Zunächst wird, wie in Abbildung 2-11 dargestellt, ein Vergleich der Kernfestigkeit in Abhängigkeit des spezifischen Kerngewichts vorgenommen.

Aus der Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass der strukturierte Kern (Sechseckwaben), im Gegensatz zum homogenen Kern (Schaumwerkstoff), eine deutlich höhere Festigkeit bei identischem spezifischem Kerngewicht aufweist. Diese erhöhten mechanischen Eigenschaften sind auf die regelmäßige Struktur des Sechseckwabenkerns zurückzuführen. Der Vergleich der Fertigungskosten in KOPP ET AL. (2009) zeigt, unter Verwendung der konventionellen Verfahren, einen deutlichen Vorteil für die homogenen Kerne auf.

Werden jedoch Schichtbauverfahren angewandt, hängen die Fertigungskosten nicht mehr von der Komplexität des Bauteils, sondern nahezu allein vom Bauteilvolumen ab (vgl. 2.4; GEBHARDT 2013). Des Weiteren bieten die homogenen Kerne im Bauteil nahezu keine Möglichkeit einer belastungsgerechten Auslegung. Zusammenfassend kann daher festgehalten werden, dass die strukturierten Kerne ein höheres Potenzial zur Massenreduktion in Sandwichbauteilen bieten.

Auf Basis der beschriebenen Gegenüberstellung der Kerne sind anschließend die unterschiedlichen Ausführungsmöglichkeiten von strukturierten Kernen zu betrachten. Hierfür steht eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Gestaltung der Grundfläche wie beispielsweise als Kreis, Hexagon, Viereck oder Dreieck zur Verfügung. Die Hauptanforderung, die an jede Grundgeometrie für Sandwichkerne

2 Stand der Wissenschaft und Technik

gestellt wird, liegt darin eine hohe Steifigkeit bei minimaler Bauteilfläche zur Verfügung zu stellen (WIEDEMANN 1996).

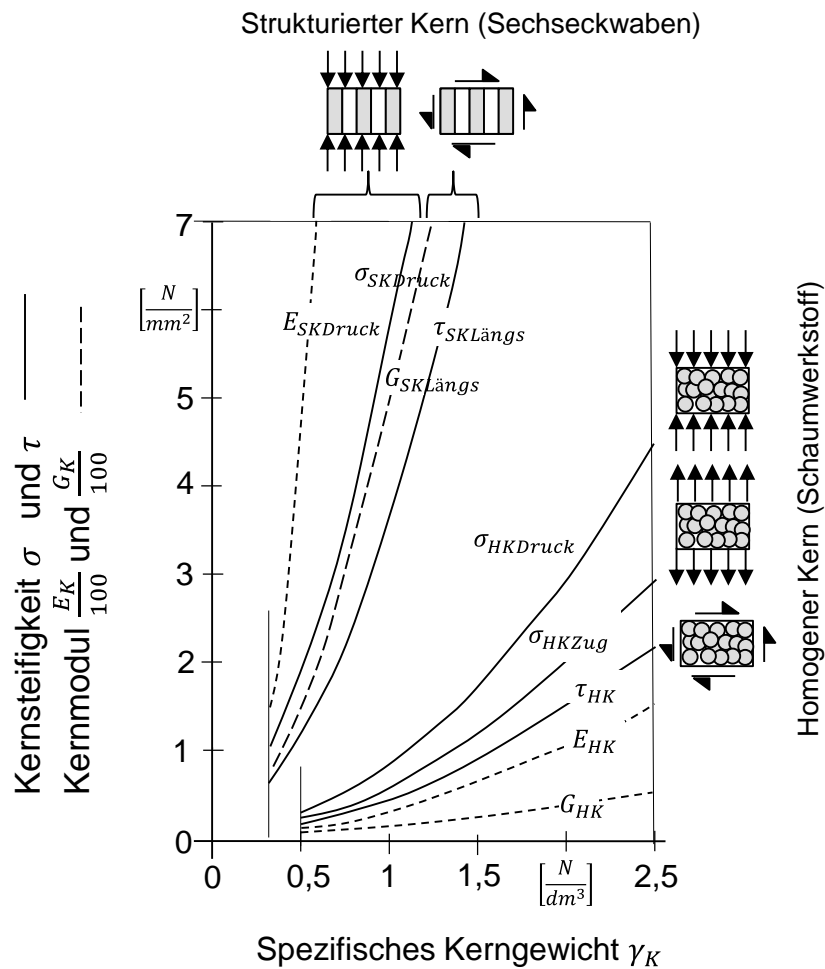


Abbildung 2-11: Vergleich homogener und strukturierter Kerne (in Anlehnung an WIEDEMANN (1996))

Die Forderung nach einer minimalen Grundfläche kann durch die sogenannte Parkettierung erfolgen. Als Parkettierung wird das vollständige, überlappungsfreie und lückenlose Beschreiben einer Ebene bzw. einer Fläche durch eine oder mehrere deckungsgleiche (Grund-) Flächen bezeichnet (HAREL & FELDMANN 2006; KALTENMORGEN 2008). In Abbildung 2-12 ist beispielhaft eine regelmäßige Parkettierung dargestellt. Diese sogenannte platonische Parkettierung ermöglicht, nur durch die Anwendung von Dreiecken, Vierecken oder Hexagonen, eine lückenlose Parkettierung einer Ebene (KALTENMORGEN 2008). Mathematisch basiert dieser Sachverhalt auf der Betrachtung des Innenwinkels eines regelmäßigen Polygons.

2.3 Sandwichbauweise

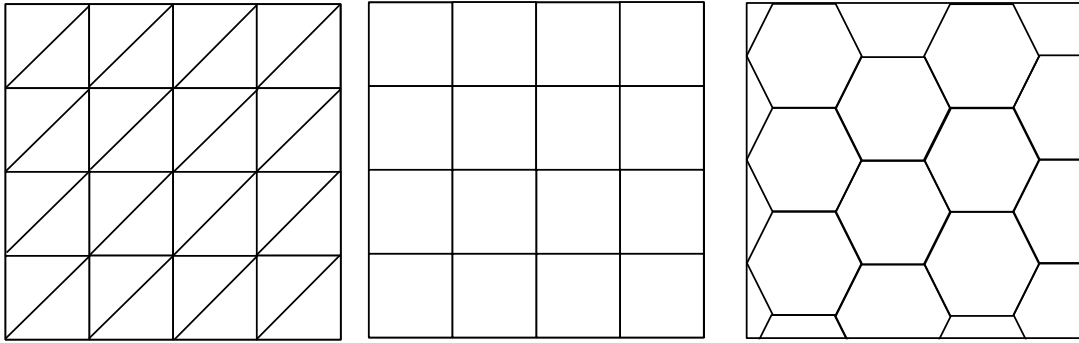


Abbildung 2-12: Beispielhafte Parkettierung einer Fläche

Der in Tabelle 2-1 dargestellte Vergleich zeigt die Unterschiede der genannten Grundformen am Beispiel eines Innkreises mit einem Radius von 10 mm auf. Zur Vergleichbarkeit wird zusätzlich eine Kreisgeometrie mitbetrachtet. Die Überlegenheit der Sechseckwaben, gegenüber den anderen Strukturen, ergibt sich aus dem größeren Flächeninhalt, der bei gleicher Größe des Inn- bzw. Umkreises entsteht. Diese Erkenntnisse, dass hexagonale Waben das bestmögliche Leichtbaupotenzial aufweisen, wird in NACHTIGALL (2005) ebenfalls bestätigt. Hierfür verantwortlich ist die Minimaltheorie, auf der hexagonale Waben basieren (NACHTIGALL 2005). Der Nachweis, dass regelmäßige Sechsecke dieser Theorie zu Grunde liegen, wurde in NACHTIGALL (2005) am Beispiel eines Seifenblasen-experiments gezeigt. Des Weiteren bieten hexagonale Waben die bestmögliche physikalische Festigkeit im Vergleich zu anderen Wabenformen (NACHTIGALL 2005).

Tabelle 2-1: Vergleich unterschiedlicher Wabengrundformen

Kategorie	Dreieck	Viereck	Sechseck	Kreis
Innenwinkel [°]	60,00	90,00	120,00	k. A.
Umfang [mm]	34,65	56,56	60,00	62,82
Flächeninhalt [mm ²]	104,84	199,94	259,81	314,16
Verhältnis Umfang zu Flächeninhalt [1/mm]	0,33	0,28	0,23	0,20

Die Auswertung demonstriert ebenfalls, dass der Kreis das geringste Verhältnis von Umfang zu Flächeninhalt besitzt und daher geometrisch das höchste Poten-

zial innerhalb dieses Vergleichs aufweist. Die Anwendung von hexagonalen und kreisförmigen Flächen bei der Parkettierung ist in Abbildung 2-13 dargestellt. Es ist jedoch festzustellen, dass durch die Anwendung einer Kreisgrundfläche keine sogenannte vollständige (Platonische) Parkettierung möglich ist. Es resultieren Lücken an den Verbindungsstellen. Bei den hexagonalen Waben hingegen sind nur die notwendigen Wabenwände und keine zusätzlichen Bauteilmassen vorhanden.

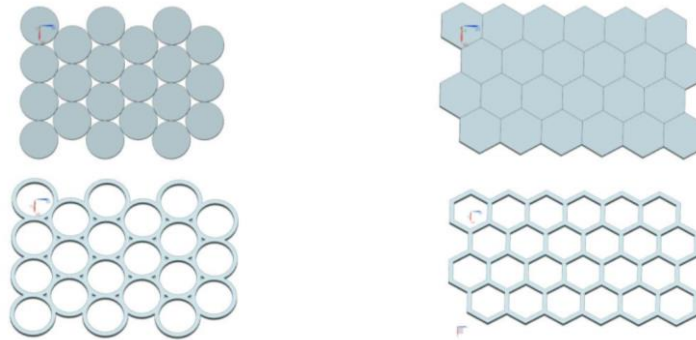


Abbildung 2-13: Vergleich unterschiedliche Wabenformen

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass strukturierte Kerne für Sandwichbauteile, im Vergleich zu homogenen Kernen, eine höhere Steifigkeit in Kombination mit einer gesteigerten Massenreduktion ermöglichen. Des Weiteren konnte bei der Analyse der strukturierten Kerne recherchiert werden, dass hexagonale Strukturen, im Vergleich zu anderen Geometrien das höchste Leichtbaupotenzial in Bezug auf die Massenreduktion in Kernen für Sandwichbauteile aufweisen (HEIMBS 2008; NACHTIGALL 2005). Zusätzlich kann festgehalten werden, dass strukturierte Kerne, im Gegensatz zu homogenen Kernen, die Möglichkeit zur lokalen Analyse und Variation des Materialfüllgrads aufweisen, wodurch eine belastungsgerechte Auslegung resultieren kann (ROSEN 2007). Auf Basis der beschriebenen Potenziale werden nachfolgend die hexagonalen Wabenkerne fokussiert betrachtet. Die Herleitung der Formeln erfolgt am Beispiel der hexagonalen Waben und kann auf beliebige regelmäßige Kernstrukturen angewandt werden.

Definition einer hexagonalen Wabe

In BITZER (1997) wird eine hexagonale Wabe durch den inneren Wabendurchmesser d_q , den äußeren Kreisdurchmesser d_s sowie durch die Wandstärke t beschrieben. Der Winkel zwischen den einzelnen Wabenwänden beträgt jeweils 120° . Eine hexagonale Grundstruktur ist in Abbildung 2-14 dargestellt.

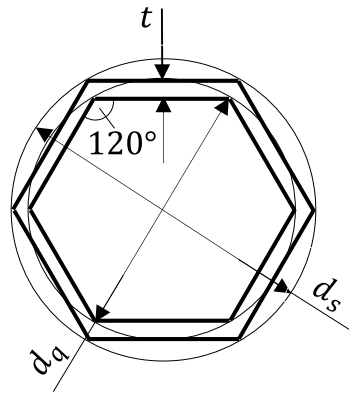


Abbildung 2-14: Schematische Darstellung einer hexagonalen Wabe

Zur technischen Kommunikation wird ein Koordinatensystem, wie in Abbildung 2-15 dargestellt, in jede Wabenstruktur integriert. Dieses kartesische Koordinatensystem definiert die Wabenrichtungen W, L und H und wird vom Wabenmittelpunkt aus beschrieben (BITZER 1997).

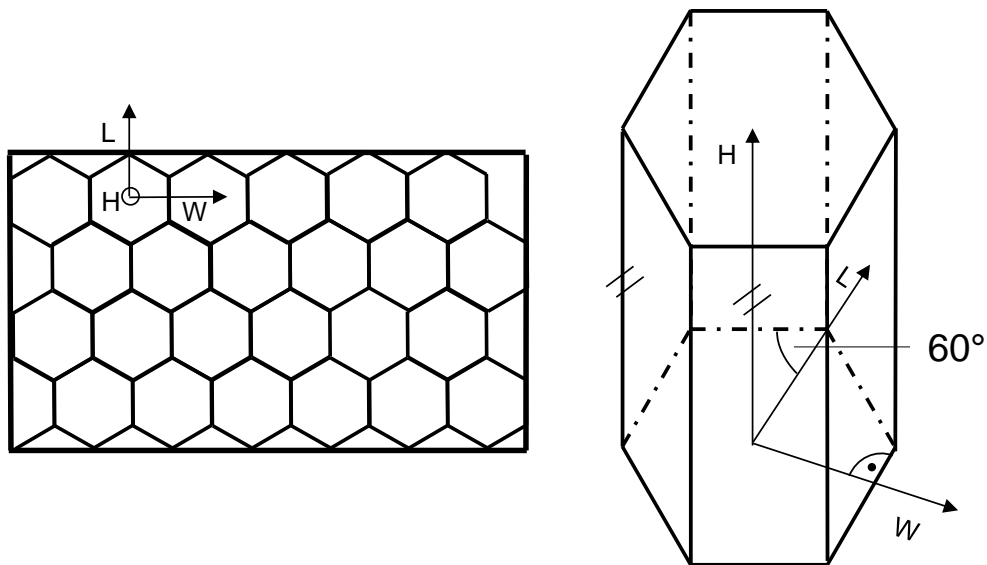


Abbildung 2-15: Terminologie einer hexagonalen Wabenstruktur

Die x- bzw. y-Achse des kartesischen Koordinatensystems bilden zum einen die W-Richtung (Width) und zum anderen die L-Richtung (Length) (BITZER 1997). Die W-Koordinatenachse zeichnet sich dadurch aus, dass die Wabenstege senkrecht auf ihr stehen. Die L-Richtung hingegen schneidet, wie in Abbildung 2-15 links dargestellt, die spitzzulaufenden Wabenecken. Diese beiden Koordinatenachsen sind für die spätere Konstruktion der Waben von hoher Wichtigkeit, da entlang der einzelnen Richtungen unterschiedliche Steifigkeiten resultieren. Die

H-Richtung (Hight), wie in Abbildung 2-15 rechts dargestellt, beschreibt die Richtung der Höhe des Wabenkerns (BITZER 1997).

Fertigung von hexagonalen Kernstrukturen

Für die konventionelle Herstellung von Sechseckwaben kommt in den meisten Fällen das Wellungsverfahren oder das Expansionsverfahren zum Einsatz (WADLEY 2006). Das Wellungsverfahren, welches Abbildung 2-16 schematisch zeigt, war das erste Verfahren zur Produktion von Sechseckwaben.

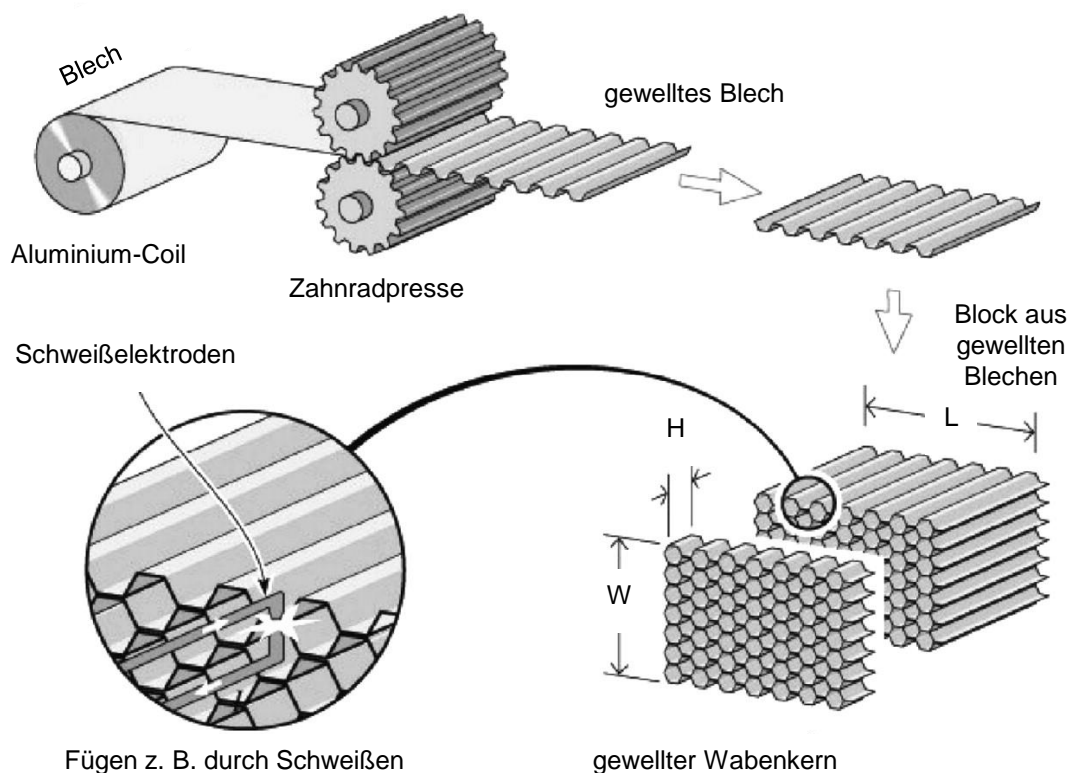


Abbildung 2-16: Wellungsverfahren zur Fertigung von Honigwaben (in Anlehnung an WADLEY (2006))

Der Fertigungsprozess beginnt mit dem Abwickeln des Ausgangsmaterials von einer Rolle. Anschließend wird das ebene Ausgangsmaterial durch zwei Walzen mit Wellung geführt, wodurch es zu einem Umformungsprozess kommt (BITZER 1997). Die gewellte Einzellage wird an den Verbindungsstellen mit den anderen halben Waben gefügt. Als Fügeverfahren kann neben Schweißen und Löten auch das Kleben angewandt werden. Im abschließenden Schneideprozess wird der Wabenblock in einzelne Komponenten mit der gewünschten Höhe H geteilt. (WADLEY 2006)

2.3 Sandwichbauweise

Beim Expansionsverfahren, wie in Abbildung 2-17 dargestellt, wird zunächst ein Coil mit dem Ausgangsmaterial abgewickelt und auf eine vorher definierte Länge zugeschnitten. Danach wird auf die zugeschnittene Einzellege Klebstoff an den Stellen aufgebracht, an denen die Lage mit der nächsten verklebt werden soll. Anschließend erfolgt das Aufstapeln der einzelnen mit Klebstoff versehenen Schichten, so dass der Klebstoff aushärten kann (BITZER 1997). Der entstandene Block wird in Streifen geschnitten und expandiert. Durch eine Unter- bzw. Überexpansion der Wabenstrukturen können, neben der hexagonalen Querschnittfläche, beispielsweise auch Wabenstrukturen mit nahezu rechteckigem Querschnitt erzeugt werden (BITZER 1997). (WADLEY 2006)

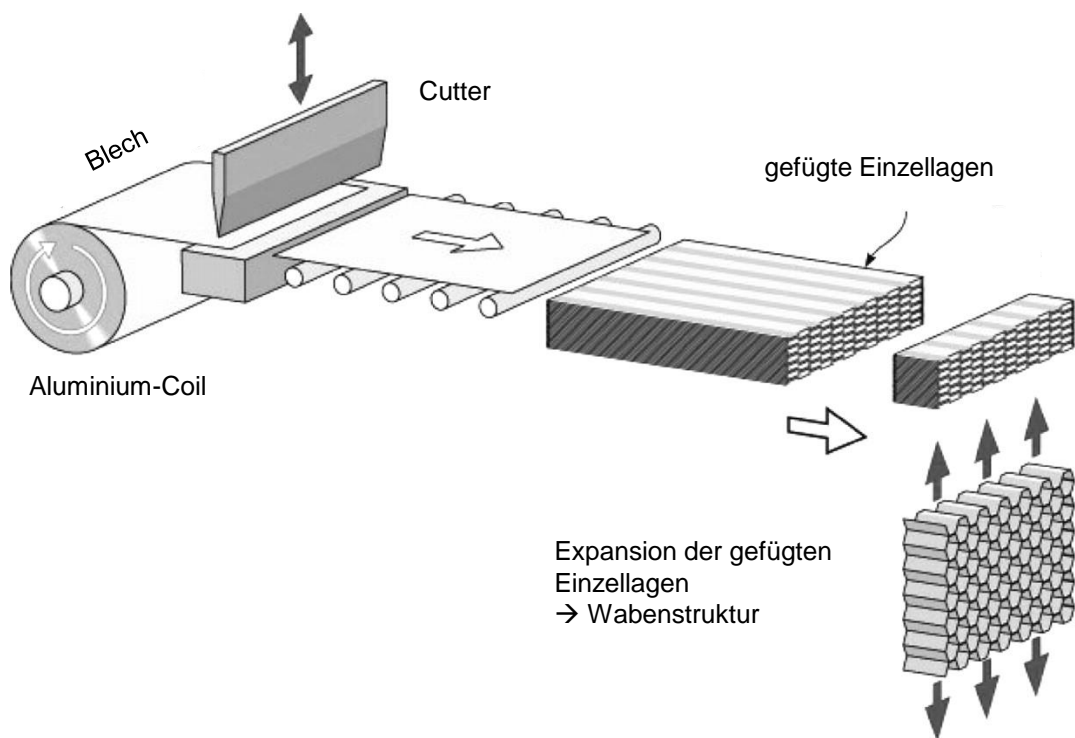


Abbildung 2-17: Expansionsverfahren zur Herstellung von Honigwaben (in Anlehnung an WADLEY (2006))

Nach der Beschreibung des Kerns erfolgen im nächsten Abschnitt die Ausführungen zu den Deckschichten, die mit dem Kern und der Klebeverbindung den Sandwichverbund darstellen.

2.3.3 Deckschichten

Die Deckschichten, Häute oder auch Facesheets genannt, bilden den flächigen Abschluss an der Ober- und Unterseite des Sandwichbauteils. Als Materialien für die Deckschichten eignen sich in den meisten Fällen hochfeste und dehnsteife

Werkstoffe, wie beispielsweise Stahl, Aluminium oder auch faserverstärkte Kunststoffe (FVK) (z. B. glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) oder carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK)) (HEIMBS 2008; KLEIN 2009). Neben den mechanischen bestehen für Deckschichten auch visuelle und haptische Anforderungen, da Sandwichbauteile sehr oft für Verkleidungen und Abdeckungen genutzt werden (STAMM & WITTE 1974). Ebenso finden neben den ebenen auch profilierte Deckschichten für Sandwichbauteile Anwendung in Produkten. Diese kommen immer dann zum Einsatz, wenn eine gerichtete Tragfähigkeit notwendig ist (HEIMBS 2008; MÄHL 2008; STAMM & WITTE 1974). Um eine hohe Biegesteifigkeit des Sandwichbauteils zu erhalten, müssen die einzelnen Komponenten schub- und zugfest miteinander verbunden werden.

2.3.4 Verbindung von Kern und Deckschichten

Die dritte Funktionsschicht, neben dem Kern und den Deckschichten, ist die Verbindungsschicht. Ohne diese Schicht würde der Sandwicheffekt, wie in Abschnitt 2.3.1 aufgezeigt, nicht zu Stande kommen. Die Ausführung der Verbindung erfolgt in den meisten Fällen stoffschlüssig mittels Kleben durch Klebefolien oder bei FVK-Deckschichten teilweise auch durch die Verwendung des Harzes beim Laminieren (STAMM & WITTE 1974). Eine Verbindung unter Verwendung anderer Fügeverfahren ist denkbar, hängt jedoch von den Werkstoffen der Deckschicht und des Kerns ab. Die Verbindungsschicht muss den Lasttransfer bzw. das Kräftegleichgewicht zwischen normalbeanspruchten Deckschichten und dem querkraftbeanspruchten Kern herstellen. Die Auslegung der Verbindungsschicht erfolgt in der Regel so, dass die Zug- und Schubfestigkeit der Verbindungsschicht deutlich größer ist als die des Kerns. Grund hierfür ist, dass die Traglast der Gesamtstruktur somit nicht von der Güte der Verbindung abhängig ist. Dadurch wird die Gefahr des Ablösens der Deckschichten vom Kern während des Betriebs verringert (STAMM & WITTE 1974).

2.4 Additive Fertigung

2.4.1 Verfahrensbeschreibung

Der ansteigende Bekanntheitsgrad der additiven Fertigungsverfahren ermöglicht eine stetige Erweiterung der Einsatzgebiete dieser Technologie (WOHLERS 2013). Vor allem für Industriezweige mit komplexen Bauteilen und kleinen Stückzah-

2.4 Additive Fertigung

len, wie z. B. der Luft- und Raumfahrt oder der Medizintechnik, bieten diese Verfahren ein hohes Potenzial einer wirtschaftlichen Fertigung (BREUNINGER ET AL. 2013; EISEN 2010; GEBHARDT 2013; GIBSON ET AL. 2010; KAUSCH 2013). Die am weitest verbreiteten Verfahren in der industriellen Anwendung sind im Metallbereich das Laserstrahlschmelzen (LBM) und das Elektronenstrahlschmelzen (EBM) sowie im Kunststoffbereich das Lasersintern, Fused Layer Modelling (FDM) als auch das 3-D-Drucken (3DP) (WOHLERS 2013). Das grundsätzliche Funktionsprinzip dieser Fertigungsverfahren ist in Abbildung 2-18 schematisch am Beispiel des Laserstrahlschmelzens aufgezeigt und wird anschließend in Anlehnung an KIEF & ROSCHI WAL (2011) und MEINERS (1999) beschrieben.

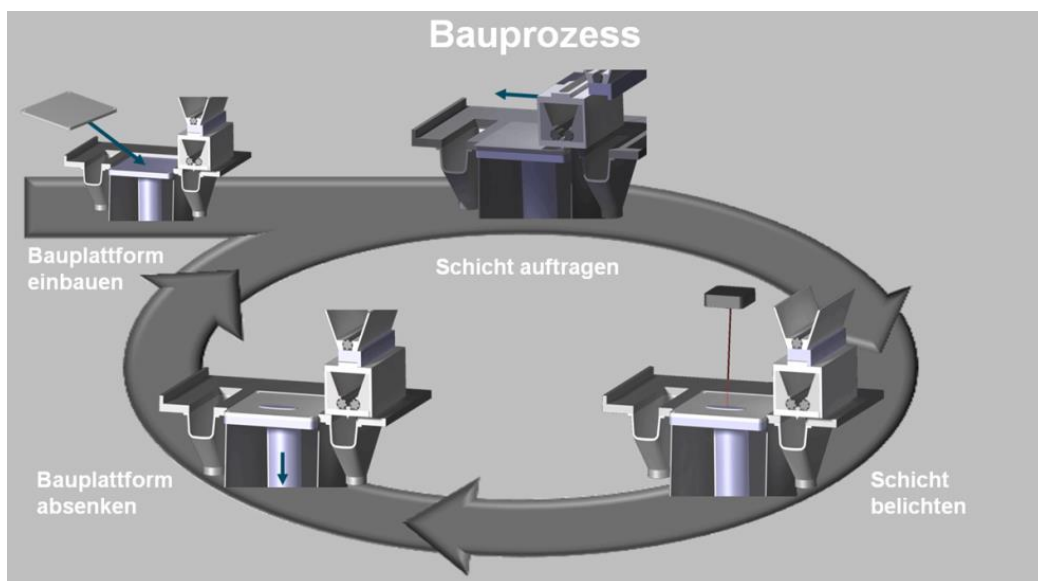


Abbildung 2-18: Schematischer Ablauf des Laserstrahlschmelzens (KIEF & ROSCHI WAL 2011)

Zu Prozessbeginn wird eine Substratplatte in die Anlage eingebaut, welche während des gesamten Prozesses als Werkstückträger dient. Anschließend erfolgt die initiale Beschichtung der Bauplatzform. Die Schichtstärke wird hierbei in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens und Werkstoffs gewählt und beträgt zwischen 20 μm und 150 μm (MEINERS 1999). Mit Hilfe einer Strahlquelle wird das Pulverbett an der Stelle vollständig aufgeschmolzen, an der das Bauteil entstehen soll. Alle anderen Bereiche bleiben in Pulverform. Im nächsten Schritt wird die Bauplatzform um eine Schichtstärke abgesenkt und durch das erneute Beschichten beginnt der Prozesskreislauf von Neuem. Diese drei Vorgänge werden solange wiederholt, bis das Bauteil komplett gefertigt wurde. Durch das selektive und schichtweise Aufschmelzen des Pulvers ergeben sich deutlich mehr geometrische Freiheiten als im Falle von konventionellen Fertigungsverfahren (KIEF &

ROSCIWAL 2011). Eine wirtschaftliche additive Fertigung ist vor allem bei kleinen Stückzahlen möglich, da für diese Verfahrensgruppe keine zusätzlichen Formen und Werkzeuge, wie beispielsweise bei den urformenden Verfahren, angefertigt werden müssen (MEINERS 1999). Die Ausnutzung dieser Gestaltungsmöglichkeiten ist jedoch auf Basis der verfügbaren Anlagentechnik in ihrer Bauteilgröße limitiert.

2.4.2 Bauteilgestaltung in der additiven Fertigung

Die additiven Fertigungsverfahren bieten ein hohes Potenzial zur Bauteilgestaltung, welches durch aktuell bestehende Defizite bei der additivgerechten Konstruktion nicht vollständig ausgenutzt werden kann (REHME 2009; WOHLERS 2013). Grund hierfür ist, dass eine Vielzahl an Konstrukteurinnen und Konstrukteuren bisher nur für konventionelle Fertigungsverfahren konstruiert haben und dadurch die Möglichkeiten der additiven Fertigung bisher nicht kennenlernen bzw. ausschöpfen konnten. Der erste Schritt, der durch die Arbeiten von ADAM & ZIMMER (2014), BREUNINGER ET AL. (2013), THOMAS (2009), GIBSON ET AL. (2010) und WEGNER & WITT (2013) erfolgt ist, besteht in der Definition von Konstruktionsrichtlinien, die unter anderem Grenzwerte für minimale Wandstärken, maximale Überhänge oder Bohrungsdurchmesser zur Verfügung stellen. Zusätzlich zu den genannten wissenschaftlichen Arbeiten wurden durch den Verband Deutscher Ingenieure (VDI) Regelwerke erarbeitet, die sich mit den Themen Terminologie, Werkstoffen und Konstruktionsregeln für die additive Fertigung befassen (z. B. VDI 3405 (2014)). Der nächste Schritt zur weiteren Industrialisierung dieser Verfahrensgruppe besteht in der Entwicklung geeigneter Konstruktionsmethoden. Hierzu wurden in KLAHN ET AL. (2014) Kriterien identifiziert, nach welchen die Bauteilgestaltung unter Verwendung der additiven Fertigungsverfahren erfolgen soll bzw. ihr Potenzial bestmöglich ausgenutzt wird:

- *Integrated Design:*
Integration verschiedener Funktionen in einem Bauteil
- *Individualization:*
Gestaltung von Bauteilen unter Berücksichtigung kundenspezifischer Anforderungen
- *Lightweight Design:*
Massenreduktion in Bauteilen durch angepasste Strukturen

2.4 Additive Fertigung

- *Efficient Design:*
Steigerung der Effizienz des Produkts in der Anwendung, beispielsweise durch neue Gestaltungsansätze

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Kriterien *Integrated Design* und *Lightweight Design* jeweils an einem Beispiel erläutert, da die beiden Gestaltungskriterien im Rahmen dieser Arbeit fokussiert betrachtet werden. Aus den meisten Anwendungsfällen resultiert jedoch die Berücksichtigung aller vorhandenen Kriterien, denn eine strikte Trennung der Gestaltungsansätze ist nahezu unmöglich.

Integrated Design

Die Möglichkeiten zur Funktionsintegration unter Verwendung der additiven Fertigung soll im Rahmen dieser Arbeit am Beispiel eines Zahnrads mit innenliegenden Kühlkanälen, wie in Abbildung 2-19 dargestellt, aufgezeigt werden. Durch die Integration von Kühlkanälen kann die Wärmeabfuhr effizienter gestaltet werden, was die Minimierung des notwendigen Schmierstoffs erlaubt. (KAMPS & REINHART 2014)

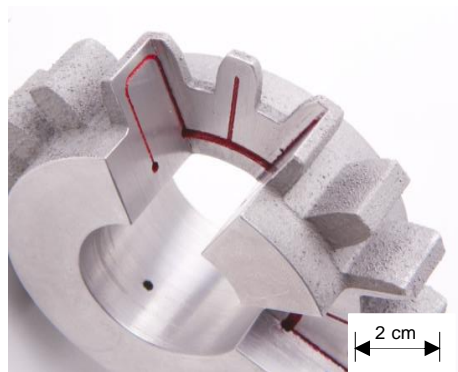


Abbildung 2-19: Additiv gefertigtes Zahnrad mit integrierten Kühlkanälen (in Anlehnung an KAMPS & REINHART (2014))

Lightweight Design

Die Potenziale zur Ausschöpfung des Leichtbaupotenzials, unter Verwendung der additiven Fertigungsverfahren, werden am Beispiel eines Halters für die Luftfahrtindustrie aufgezeigt. Hierfür wurden zunächst der konventionell gefertigte Halter (siehe Abbildung 2-20 links) analysiert und die entsprechenden Randbedingungen identifiziert. Im zweiten Schritt erfolgte eine Massenreduktion des Bauteils durch den Einsatz von Strukturoptimierungsalgorithmen. Abschließend, wie in Abbildung 2-20 rechts dargestellt, wurde eine additivgerechte Ge-

2 Stand der Wissenschaft und Technik

staltung des Bauteils, unter Berücksichtigung der vorher genannten Konstruktionsrichtlinien, durchgeführt. Durch die Anwendung der additiven Fertigungsverfahren bzw. die Ausschöpfung des Leichtbaupotenzials, welches durch diese Verfahrensgruppe gegeben ist, konnte eine Massenreduktion von 330 g zu 191 g ermöglicht werden. (EMMELMANN ET AL. 2011A)



Abbildung 2-20: Leichtbauoptimierung eines Halters (in Anlehnung an EMMELMANN ET AL. (2011A))

Die aufgeführten Beispiele zeigen die Gestaltungsfreiheiten durch die Anwendung der additiven Fertigungsverfahren. Erste Ansätze zur Gestaltung von Sandwichbauteilen, auf Basis der Schichtbauweise, sind unter anderem im nächsten Abschnitt beschrieben.

2.5 Gestaltung und Auslegung von Sandwichbauteilen

2.5.1 Konstruktionsansätze für strukturierte Kerne

Die Anpassung eines strukturierten Kerns an eine gekrümmte Fläche erfolgt meist unter Verwendung der uniformen oder der konformen Ausrichtung (ENGELBRECHT ET AL. 2009). Dabei wird die Orientierung der H-Richtung, wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, variiert (ENGELBRECHT ET AL. 2009). Bei der uniformen Gestaltung (siehe Abbildung 2-21) sind alle Strukturen, wie z. B. Gitterstäbe oder Wabenwände, parallel zu einem Vektor ausgerichtet (ENGELBRECHT ET AL. 2009). In der Praxis ist dieser Vektor meist die y-Achse bzw. die H-Achse, die normal auf der Horizontalen steht. Vorteil dieser Ausrichtung ist, dass der fertigungstechnische und konstruktive Aufwand häufig deutlich geringer ist, als bei der konformen Ausrichtung (NAMASIVAYAM & SEEPERSAD 2011). Allerdings entstehen bei der uniformen Ausrichtung verringerte Steifigkeiten im Kern, was

2.5 Gestaltung und Auslegung von Sandwichbauteilen

zu einem vorzeitigen Versagen führen kann (ENGELBRECHT ET AL. 2009; MAHESHWARAA ET AL. 2007).

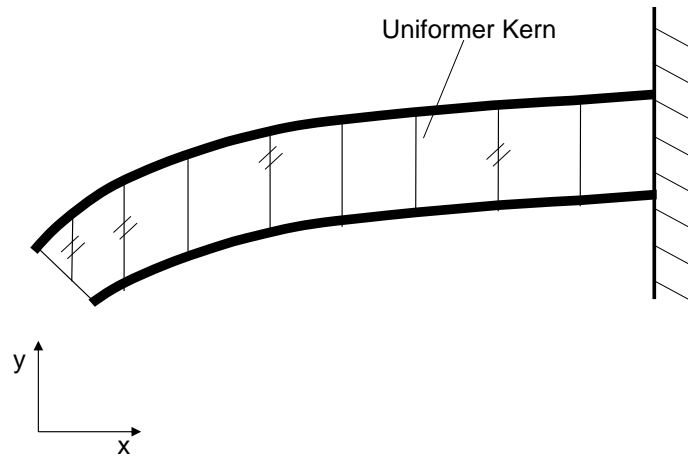


Abbildung 2-21: Uniform angepasste Wabenstrukturen (in Anlehnung an ENGELBRECHT ET AL. (2009))

Für die Gestaltung eines uniform ausgerichteten und gekrümmten Wabenblocks wird die gewünschte Bauteilgeometrie aus einem Wabenblock herausgetrennt (FLEMMING ET AL. 1996). Das Ergebnis einer uniform angepassten Wabenstruktur zeigt Abbildung 2-22.



Abbildung 2-22: Uniform ausgerichteter Wabenkern nach der Fräsbearbeitung (HARDING 2015)

Diese Ausrichtung einer Struktur erlaubt generell eine Anpassung des Wabenkerns an eine gekrümmte Fläche. Jedoch erfolgt die Krafteinleitung in den meisten Fällen nicht senkrecht, so dass eventuell ein vorzeitiges Versagen der Struktur die Folge ist. Zur gesteigerten Ausnutzung des Leichtbaupotenzials wird eine

2 Stand der Wissenschaft und Technik

konforme Anpassung des strukturierten Kerns gefordert (ENGELBRECHT ET AL. 2009; MAHESHWARAA ET AL. 2007). Hierbei werden, wie in Abbildung 2-23 schematisch aufgezeigt, alle Strukturen normal zum jeweiligen Schnittpunkt mit der Deckschicht ausgerichtet. Dadurch können senkrechte Lasten (vgl. Abschnitt 2.5.3) nahezu ohne Aufteilung der Kraftflusspfade in den Kern geleitet werden.

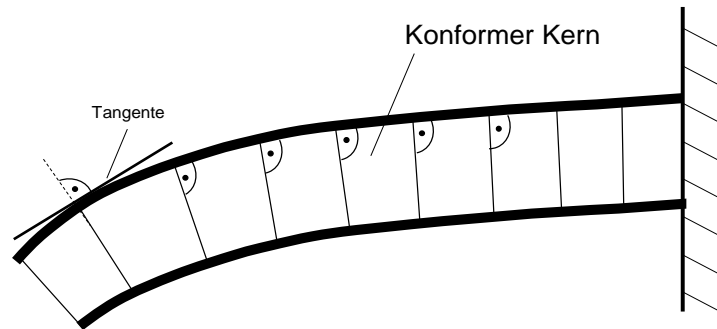


Abbildung 2-23: Konform aufgebaute Struktur (in Anlehnung an ENGELBRECHT ET AL. (2009))

Der nachfolgende Vergleich der unterschiedlichen Kernausrichtungen, der an einem Beispielbauteil aufgezeigt wird, soll das Verständnis für die Notwendigkeit der konformen Kerngestaltung erweitern. Der Vergleich wird an einem Beispielbauteil aufgezeigt. Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird ein ebener Sandwichverbund mit hexagonalem Wabekern gewählt. Die Abmessungen des Bauteils betragen 100 mm x 100 mm x 20 mm. Der Wabendurchmesser d_s wird mit 20 mm und die Wandstärke t mit 1 mm gewählt. Die Deckschicht aus Stahl besitzt eine Höhe von 0,5 mm. Als Kernwerkstoff wird eine Aluminiumlegierung verwendet. Die Ausgangsmasse der Kernstruktur beträgt 155,45 g. Die Versuchsskizze und die Kennwerte für den anschließenden Vergleich sind in Abbildung 2-24 dargestellt. Die Durchführung der Versuche erfolgte unter Anwendung der Finiten-Elemente-Methode.

2.5 Gestaltung und Auslegung von Sandwichbauteilen

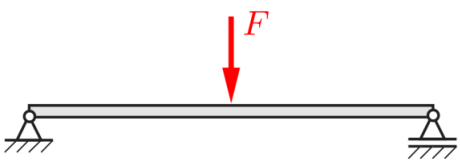
Skizze	Kennwerte
	<p>Dreipunktbiegeversuch</p> <ul style="list-style-type: none">• Kraft: 1000 N (mittig)• Links: Festlager, rechts: Loslager <p>Simulation</p> <ul style="list-style-type: none">• Schalenelemente QUAD8• Elementgröße 1 mm• Statischer Solver

Abbildung 2-24: Lastfall für den Vergleich der Ausrichtung

Als Versuchsparameter wird der Winkel um die W-Richtung mit den folgenden Schritten ausgewählt: 0° , 5° , 15° , 25° und 45° . Ein um 25° verschobener Wabenkern ist in Abbildung 2-25 dargestellt. Der Winkel 0° stellt die senkrecht zu den Deckschichten stehenden Waben dar.

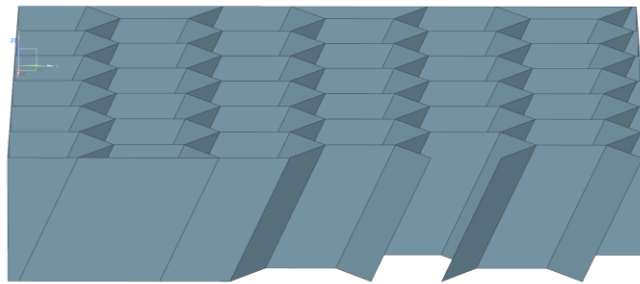


Abbildung 2-25: Verschiebung der Ausrichtung des Wabenkerns um 25°

Zur Bewertung der Ergebnisse wird ein sogenannter Effizienzfaktor eingeführt. Dieser berechnet sich durch den Kehrwert des Produkts aus Bauteilmasse und Durchbiegung. In Abbildung 2-26 ist deutlich zu erkennen, dass umso größer der Winkel definiert wird, desto mehr verliert der Kern an Steifigkeit. Dies bestätigt die Aussage von ENGELBRECHT ET AL. (2009) und MAHESHWARAA ET AL. (2007).

2 Stand der Wissenschaft und Technik

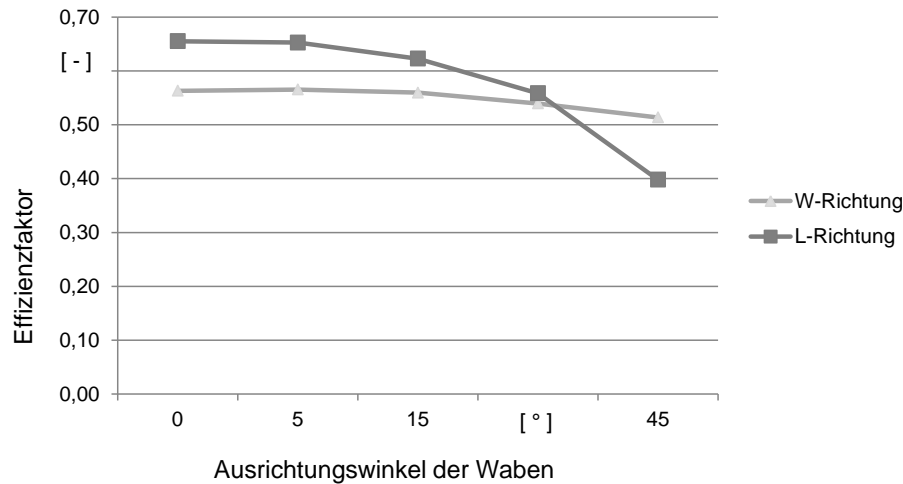


Abbildung 2-26: Steifigkeit der Waben in Abhängigkeit der Ausrichtung

Die Auswertung der Bauteilspannungen (von-Mises-Vergleichsspannung) ergibt ebenfalls, dass bei kleinem Winkel zwischen Deckschicht und Kern nur ein geringer Anstieg der Bauteilspannung zu erkennen ist (siehe Abbildung 2-27). Wird der besagte Winkel jedoch größer, ergeben sich Spannungsunterschiede von bis zu 30 %. Auf Basis der aufgezeigten Unterschiede zwischen konformer und unformer Ausrichtung wird zur besseren Ausnutzung des Leichtbaupotenzials im Rahmen dieser Arbeit die lokal senkrechte Ausrichtung (konform) nachfolgend weiter fokussiert.

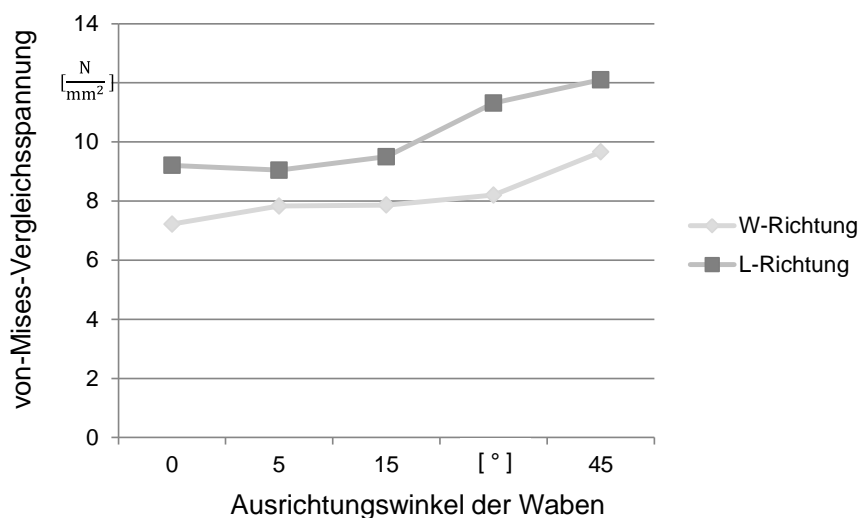


Abbildung 2-27: Von-Mises-Vergleichsspannung der Waben in Abhängigkeit der Ausrichtung

2.5 Gestaltung und Auslegung von Sandwichbauteilen

Eine Möglichkeit zur bedingten konformen Anpassung bietet die konventionell gefertigte NOMEX®-Wabe, welche aus einem in Phenolharz getränktem Papier besteht. Diese Wabenstrukturen kommen vor allem in der Luft- und Raumfahrt (z. B. an der Flugzeugspitze) zum Einsatz. Bei der Anwendung der NOMEX®-Wabe auf gekrümmte Bauteile folgt aus der geforderten Krümmung, die in Abbildung 2-28 als grüne Linie dargestellt ist, zusätzlich eine um 90° versetzte Gegenkrümmung, welche durch eine rote Linie gekennzeichnet ist.

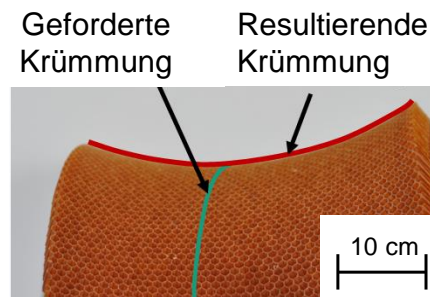


Abbildung 2-28: Gekrümmte NOMEX®-Wabenstruktur (in Anlehnung an RISS ET AL. (2014B))

Dieser Effekt basiert auf der bestehenden Abhängigkeit der einzelnen Wabenstrukturen zueinander, aus der sich eine Sattelform ergibt (WIEDEMANN 2007). Eine Anwendung von regelmäßig strukturierten Kernen an zylindrischen oder kugelförmigen Schalen, ist daher ohne Deformation des Kerns nicht möglich (WIEDEMANN 2007). In ausgewählten Anwendungsfällen werden die regelmäßigen Sechseckstrukturen durch Über- oder Unterexpandieren der Querschnittsgeometrie deformiert. Eine Vorgehensweise zur Berechnung derartiger Kernstrukturen ist in EVANS (1991) aufgezeigt. Dies ermöglicht, wie in Abbildung 2-29 dargestellt, eine Anpassung des Wabenkerns an eine gekrümmte Fläche (EVANS 1991). Nachteilig ist, dass aus der Deformation der regelmäßigen Struktur eine Reduktion der Festigkeit bzw. der Stabilität des Kerns resultiert (BITZER 1997). Des Weiteren kann dieser Ansatz nur für hochflexible Materialien angewandt werden. Eine Umsetzung aus Titan- oder Aluminiumlegierungen ist aus fertigungstechnischen Gründen nicht gegeben. Weitere Möglichkeiten zur konformen Ausrichtung von Kernen für Sandwichbauteile bestehen bei Verwendung der additiven Fertigungsverfahren. In den nachfolgenden Ansätzen werden Gitterelemente als Kernstruktur eingesetzt, was zunächst vernachlässigt werden kann, da die Vorgehensweisen zur konformen Anpassung an eine gekrümmte Fläche fokussiert betrachtet werden.

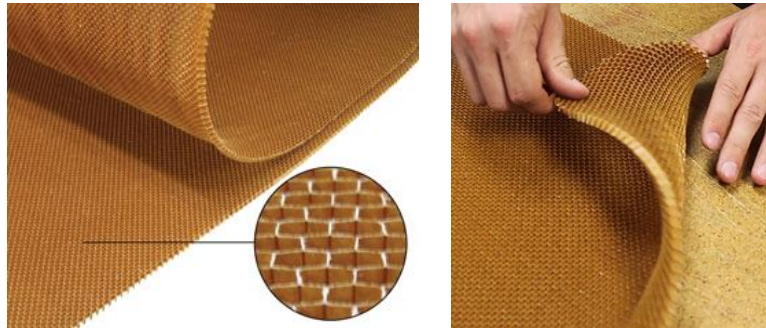


Abbildung 2-29: Überexpandierte NOMEX®-Waben (FIBRE GLAST 2015)

CLS-Methode nach ENGELBRECHT ET AL. (2009); NGUYEN ET AL. (2012); ROSEN (2007); WILLIAMS ET AL. (2011) und WANG & ROSEN (2002)

Die *Conformal Lattice StructuresTM-Methode* (CLS) zur Anpassung von strukturierten Kernen an eine gekrümmte Fläche, wurde am Georgia Institute of Technology in Atlanta durch ENGELBRECHT ET AL. (2009); NGUYEN ET AL. (2012); ROSEN (2007); WANG & ROSEN (2002) und WILLIAMS ET AL. (2011) entwickelt. Der Fokus dieser Arbeiten liegt auf der Unterstützung bzw. Versteifung von Freiformflächen durch konforme Gitterstrukturen. Die CLS-Methode ist in Abbildung 2-30 dargestellt.

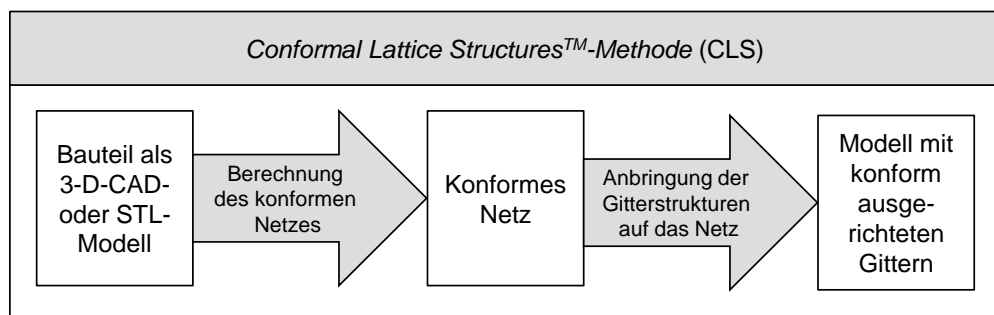


Abbildung 2-30: CLS-Methode des Georgia Institut of Technology (in Anlehnung an ENGELBRECHT ET AL. (2009))

Den ersten Teil der Vorgehensweise bildet die Netzerstellung. Zu Beginn der Methode wird ein digitales Bauteil (beispielsweise im STL-Format) eingelesen und in einzelne Bereiche, in Abhängigkeit des Krümmungsradius, unterteilt. Anschließend wird eine Offset-Fläche, welche der gegenüberliegenden Deckschicht entspricht, berechnet und erstellt. Die Aufbringung des Netzes sowie die Berechnung der jeweiligen Normalenvektoren bilden den Fokus der Methode. Die Überführung des Netzes in Einheitsgitterzellen, wie beispielsweise quaderförmige raumzentrierte Gitterstrukturen, stellt den letzten Schritt in der Vorge-

2.5 Gestaltung und Auslegung von Sandwichbauteilen

hensweise dar. Die angewandte CLS-Methode ist an einem Demonstrator in Abbildung 2-31 dargestellt.

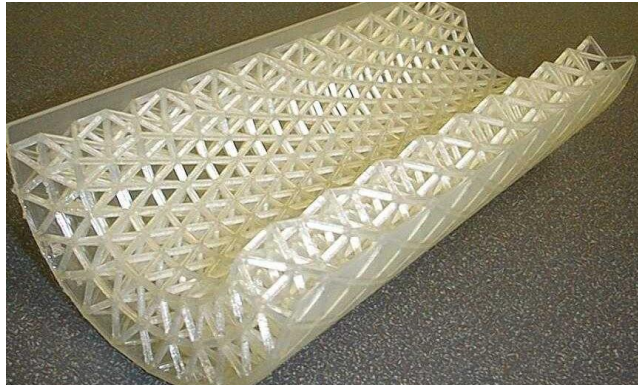


Abbildung 2-31: Bauteil mit konform ausgerichteten Gitterstrukturen (ENGELBRECHT ET AL. 2009)

Gestaltung von Strukturen nach MAHESHWARAA ET AL. (2007) und NAMASIVAYAM & SEEPERSAD (2011)

Ein weiteres Vorgehen zur konformen Gestaltung von strukturierten Kernen wurde an der University of Texas in Austin durch MAHESHWARAA ET AL. (2007) und NAMASIVAYAM & SEEPERSAD (2011) erarbeitet. Auch hier werden die Gitterstrukturen an einzelnen Punkten entlang der Freiformfläche angebracht. Die Festlegung der Stützpunkte für die Struktur kann entweder belastungsabhängig, auf Basis einer Berechnung oder frei gewählt werden. Abschließend werden entlang der ermittelten Stützstellen Einheitsgitterzellen angebracht (siehe Abbildung 2-32).

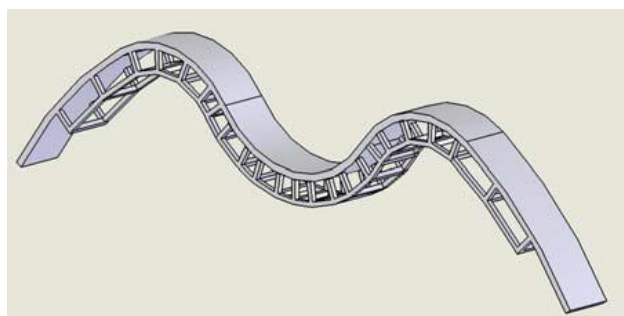


Abbildung 2-32: Demonstrator mit konformer Gitterstruktur (MAHESHWARAA ET AL. 2007)

Anpassung von Gitterstrukturen nach EMMELMANN ET AL. (2011B)

Das Ziel der Arbeit war, eine Methode zu entwickeln, mit der Einheitszellen aus Gitterstrukturen normal zur Oberfläche angepasst werden können. Als ersten Schritt der Methode wird zur Bauteiloberfläche, entsprechend der gewünschten Höhe der Einheitszellen, eine Offset-Kurve berechnet. Basierend auf diesen beiden Grenzflächen wird eine Fläche ermittelt, auf der sich die Mittelpunkte der Einheitszellen befinden sollen. Die abschließende Skalierung, Deformation, Rotation und Translation jeder Einheitszelle zielt darauf ab, dass der jeweilige Mittelpunkt der Einheitszelle auf der vorher erstellten Mittelfläche ist und die Zelle lokal senkrecht auf der Freiformfläche positioniert ist. Abbildung 2-33 zeigt die Methode angewandt an einer Hüft-Endoprothese.

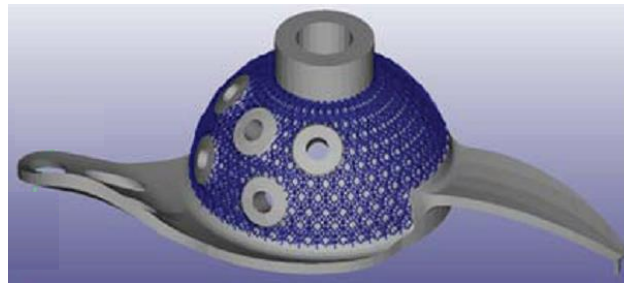


Abbildung 2-33: Anpassung von Gitterstrukturen am Beispiel einer Hüft-Endoprothese (EMMELMANN ET AL. 2011B)

Generell kann gesagt werden, dass die Verwendung von strukturierten Kernen eine Gestaltung von gekrümmten Sandwichbauteilen zulässt. Wobei vor allem bei der uniformen Ausrichtung des Wabenkerns erhöhte Spannungen und verringerte Steifigkeiten auftreten, die das Leichtbaupotenzial des entsprechenden Bauteils einschränken. Auch durch die Verwendung von flexiblen Wabenkernen kann nur eine bedingte und materialabhängige Komplexität an Bauteilen abgebildet werden. Abhilfe hierfür schaffen neue Gestaltungsmöglichkeiten für Sandwichbauteile unter Verwendung der additiven Fertigungsverfahren. Jedoch werden bei allen recherchierten Ansätzen Gitter als Kernstrukturen verwendet, obwohl, wie in 2.3.2 aufgezeigt, hexagonale Strukturen die höchste Leichtbaugüte ermöglichen. Grund für die Fokussierung auf Gitterstrukturen ist unter anderem, dass diese in der additiven Fertigung einen etablierten Ansatz bilden und eine Vielzahl an wissenschaftlichen Untersuchungen, beispielsweise durch GIBSON ET AL. (2010), REHME (2009) und REINHART & TEUFELHART (2011), zur Verfügung stehen. Des Weiteren ist die Modellierung und Berechnung von Gitterstrukturen meist weniger komplex als die von Wabenstrukturen, da es sich bei Gitterelementen um Balken und bei Wabenstrukturen um Platten handelt. Diese

2.5 Gestaltung und Auslegung von Sandwichbauteilen

unterschiedliche Komplexität ist beispielsweise auch bei der konformen Anpassung von Strukturen ersichtlich. Hierzu wurde in Abbildung 2-34 ein Balken- und ein Flächenelement in einem gekrümmten Bauteil skizziert. Bei der konformen Anpassung von Gitterstrukturen sind für die Erstellung eines Balkenelements lediglich zwei Punkte notwendig. Der Krümmungsverlauf der Struktur muss nicht berücksichtigt werden. Soll jedoch eine Wabenstruktur konform angepasst werden, so sind für jede Wabenwand mindestens vier Punkte notwendig. Des Weiteren müssen der Krümmungsverlauf bei der Extrusion zur Wabenwand sowie die unterschiedlichen Normalenvektoren bei der konformen Ausrichtung stärker berücksichtigt werden.

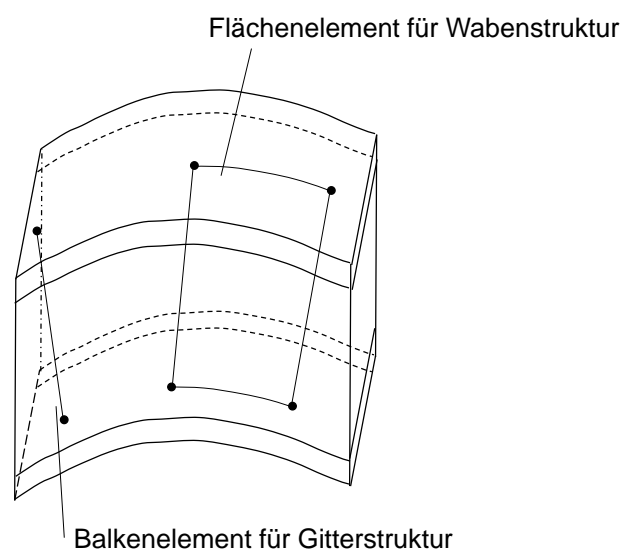


Abbildung 2-34: Vergleich: Konstruktion von Balken- und Flächenelementen

2.5.2 Strukturoptimierung von Kernen

Zur Steigerung der Masseneinsparung in Bauteilen kommen während des Produktentwicklungsprozesses vermehrt computergestützte Strukturoptimierungsansätze zur Anwendung. Allgemein bezeichnet man Optimierung als die Vorgehensweise zum Erhalt der besten Ergebnisse, unter Berücksichtigung der gegebenen Nebenbedingungen (RAO 2009). Bevor im Rahmen dieser Arbeit Optimierungsmethoden zur Gestaltung von Kernen für Sandwichbauteile betrachtet werden, erfolgt zunächst eine Beschreibung der Grundlagen mit dem Fokus auf die Strukturoptimierung.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Beschreibung des Optimierungsproblems

Ein Optimierungsproblem kann nach RAO (2009) folgendermaßen beschrieben werden:

Finde den n-dimensionalen Vektor, den Entwurfsvektor $\vec{Y} = \begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{Bmatrix}$, welcher die

Zielfunktion $f(\vec{Y})$, unter Voraussetzung der folgenden Nebenbedingungen minimiert:

$$g_o(\vec{Y}) \leq 0, \quad o = 1, 2, \dots, m$$

$$l_o(\vec{Y}) = 0, \quad o = 1, 2, \dots, p$$

Entwurfsvektor und -variable

Jedes Bauteil ist aus einer Vielzahl an Konstruktionsvariablen aufgebaut (SCHUMACHER 2013). Dies können beispielsweise Längen, Blechdicken oder Radien sein. Je nach Art und Aufbau der Konstruktion stehen fixe, also zuvor festgelegte Größen und/oder Entwurfsvariablen zu Verfügung, welche ihren Wert in Abhängigkeit eines anderen Werts verändern bzw. anpassen können. Alle Entwurfsvariablen werden im sogenannten Entwurfsvektor $\vec{Y} = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}^T$ zusammengefasst. (RAO 2009)

Zielfunktion

Mit der Zielfunktion wird das Konstruktionsziel in eine mathematische Formulierung überführt. Ebenso besteht auch die Möglichkeit mehrere untergeordnete (Teil-) Zielfunktionen miteinander zu verknüpfen, woraus eine übergeordnete Zielfunktion resultiert. (RAO 2009)

Nebenbedingungen

Neben der Zielfunktion sind weitere Funktionen zu betrachten, sogenannte Nebenbedingungen, die beispielsweise die fertigungstechnischen Einschränkungen berücksichtigen. Eine in der Praxis oft definierte Nebenbedingung ist die Bauteilsteifigkeit. Allgemein werden die Limitierungen bzw. Randbandbedingungen in Form von Gleichungen, Ungleichungen oder expliziten Restriktionen beschrieben (SCHUMACHER 2013). (RAO 2009)

2.5 Gestaltung und Auslegung von Sandwichbauteilen

Einteilung von Optimierungsproblemen

Bei der Einteilung der Optimierungsprobleme nach RAO (2009) wird unter anderem zwischen der Verwendung von Nebenbedingungen, den Entwurfsvariablen und der Art der Zielfunktion unterschieden. Bei der Einteilung nach der Art der Zielfunktion stehen die Klassen: linear, nicht-linear, geometrisch und quadratisch zur Verfügung. Befinden sich beispielsweise in der Zielfunktion und in den Nebenbedingungen nur Entwurfsvariablen in linearer Form, so erfolgt die Einteilung in die Klasse lineares Optimierungsproblem. Identisches gilt für die Klassifizierung weiterer Optimierungsprobleme. Für die Lösung der unterschiedlichen Optimierungsprobleme wurde eine Vielzahl an Methoden entwickelt, welche entsprechend zur Anwendung kommen. Neben den klassischen, analytischen Berechnungsverfahren, stehen für komplexe Optimierungsprobleme numerische Verfahren zur Verfügung, die im Gegensatz zu den analytischen Methoden nur eine angenäherte Lösung bieten. (RAO 2009)

Die Klassifizierung der einzelnen Strukturoptimierungsverfahren, in Abhängigkeit ihrer Entwurfsvariablen, zeigt Abbildung 2-35. Diese Einteilung wird im Rahmen der Arbeit fokussiert betrachtet.

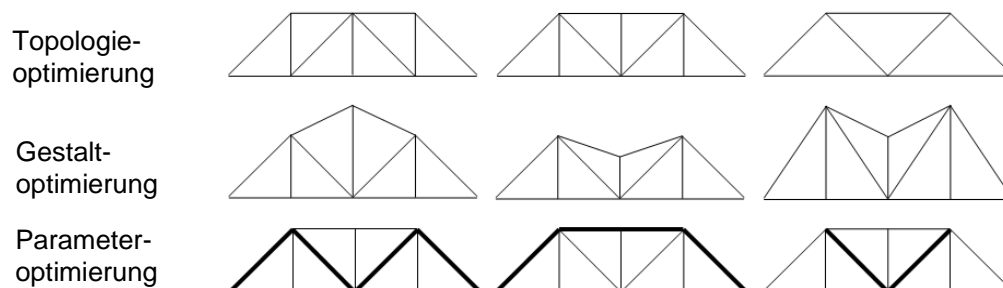


Abbildung 2-35: Klassifizierung der Strukturoptimierungsverfahren am Beispiel eines Trägers (vgl. KOBER ET AL. (2011))

Auf Basis der beschriebenen Grundlagen werden nachfolgend die einzelnen Strukturoptimierungsverfahren aufgezeigt. Ein Beispiel zur grundlegenden Vorgehensweise bei der Strukturoptimierung zeigt Abbildung 2-36.

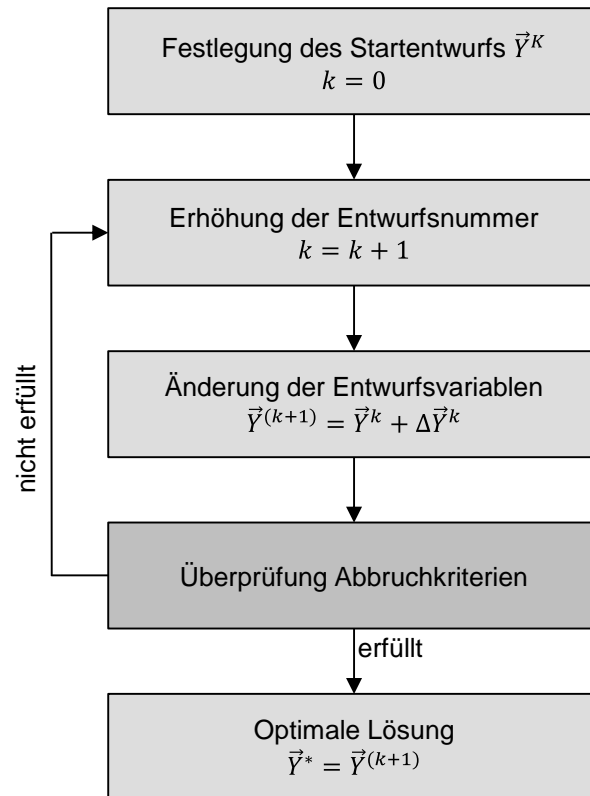


Abbildung 2-36: Allgemeine Vorgehensweise bei der Strukturoptimierung (in Anlehnung an SCHUMACHER (2013))

Der Ablauf einer Strukturoptimierung beginnt mit der Festlegung des Startentwurfs. Mit diesem Schritt werden die initialen Werte der Entwurfsvariablen definiert. Durch die Erhöhung der Entwurfsnummer startet die Iterationsschleife. Anschließend erfolgt die Änderung der Entwurfsvariablen um einen vorher festgelegten Wert. Bei der Überprüfung werden die Soll-Anforderungen mit den Ist-Werten verglichen. Sind alle Abbruchkriterien erfüllt, steht die optimale Lösung zur Verfügung. Resultiert eine Ungleichheit aus der Überprüfung der Abbruchkriterien, gelten die Kriterien als nicht erfüllt und die Iteration startet erneut mit der Erhöhung der Entwurfsnummer. (SCHUMACHER 2013)

2.5.2.1 Topologieoptimierung

Als Topologie werden die Lage und die Anordnung von Strukturelementen in einem Bauteil beschrieben. Somit beschäftigt sich die Topologieoptimierung grundsätzlich mit dem Aufbau einer Struktur (SCHUMACHER 2013). Dadurch ist es möglich, eine optimale Verteilung und Anordnung von Material in einem Designraum zu erzielen (KOBEL 2012). Anwendung findet dieses Optimierungsverfahren hauptsächlich bei massiven Bauteilen, sogenannte monolithische

2.5 Gestaltung und Auslegung von Sandwichbauteilen

Strukturen (SCHUMACHER 2013). Als Entwurfsvariablen für die Topologieoptimierung sind die Lage und die Anordnung von Strukturelementen definiert. In den meisten Methoden wird, wie beispielsweise beim Pixel-Verfahren, die Nachgiebigkeit als Zielfunktion und die Masse als Nebenbedingungen festgelegt (SCHUMACHER 2013). Im Rahmen dieser Arbeit wird stellvertretend für alle Topologie-Optimierungsverfahren die *Soft-Kill-Option* nach MATTHECK (2006A) vorgestellt, da diese die Grundidee der Topologieoptimierung anwendungsnah aufzeigt.

***Soft-Kill-Option* (SKO) nach MATTHECK (2006A)**

Die *Soft-Kill-Option*, als Topologieoptimierungsansatz, welcher auf der Vorgehensweise des Knochenumbaus basiert, zielt darauf ab niedrig belastete Bereiche eines Bauteils zu eliminieren und hoch belastete Bereiche zu verstärken. Der schematische Ablauf der in MATTHECK (2006A) entwickelten SKO ist in Abbildung 2-37 dargestellt. Als ersten Schritt gilt es einen Designraum festzulegen sowie die Betriebslasten und Zwangsbedingungen, gemäß dem Einsatzfall, zu wählen. Aus dem Ergebnis der Berechnung werden die lokalen E-Module mit den am jeweiligen Ort berechneten von-Mises-Spannungen gleichgesetzt ($E = \sigma$).

Exkurs: Bei der von-Mises-Spannung bzw. der Gestaltänderungshypothese (GEH) wird davon ausgegangen, dass eine Beanspruchung des Materials ausschließlich eine Veränderung der Gestalt und keine Volumenänderung hervorruft (DANKERT & DANKERT 2013). Durch diese Hypothese können alle im Bauteil auftretenden Spannungen mit einem Wert beschrieben und anschließend mit dem einachsigen Spannungszustand verglichen werden. Die Berechnung der von-Mises-Vergleichsspannung erfolgt durch Formel (2-12). (BERGER 1994).

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2-12)$$

Dies bedeutet, dass Bauteilbereiche, die vorher hochbelastet waren, jetzt einen hohen E-Modul besitzen und Regionen, die wenig belastet waren, einen niedrigen E-Modul aufweisen. Durch diesen Schritt wird der ehemals homogene Werkstoff inhomogen. Wiederholt man diesen Schritt mehrmals, so werden die tragenden Bereiche immer stärker und die wenig- bis nichttragenden Bereiche immer geringer belastet. Unterschreiten die wenig tragenden Bauteilbereiche einen bestimmten und vorher festgelegten Spannungswert werden diese entfernt.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Liegen in allen Bauteilbereichen konstante globale, nur minimal variierende E-Modulwerte vor, handelt es sich um ein Bauteil mit einer homogenen Spannungsverteilung. (MATTHECK 2006A)

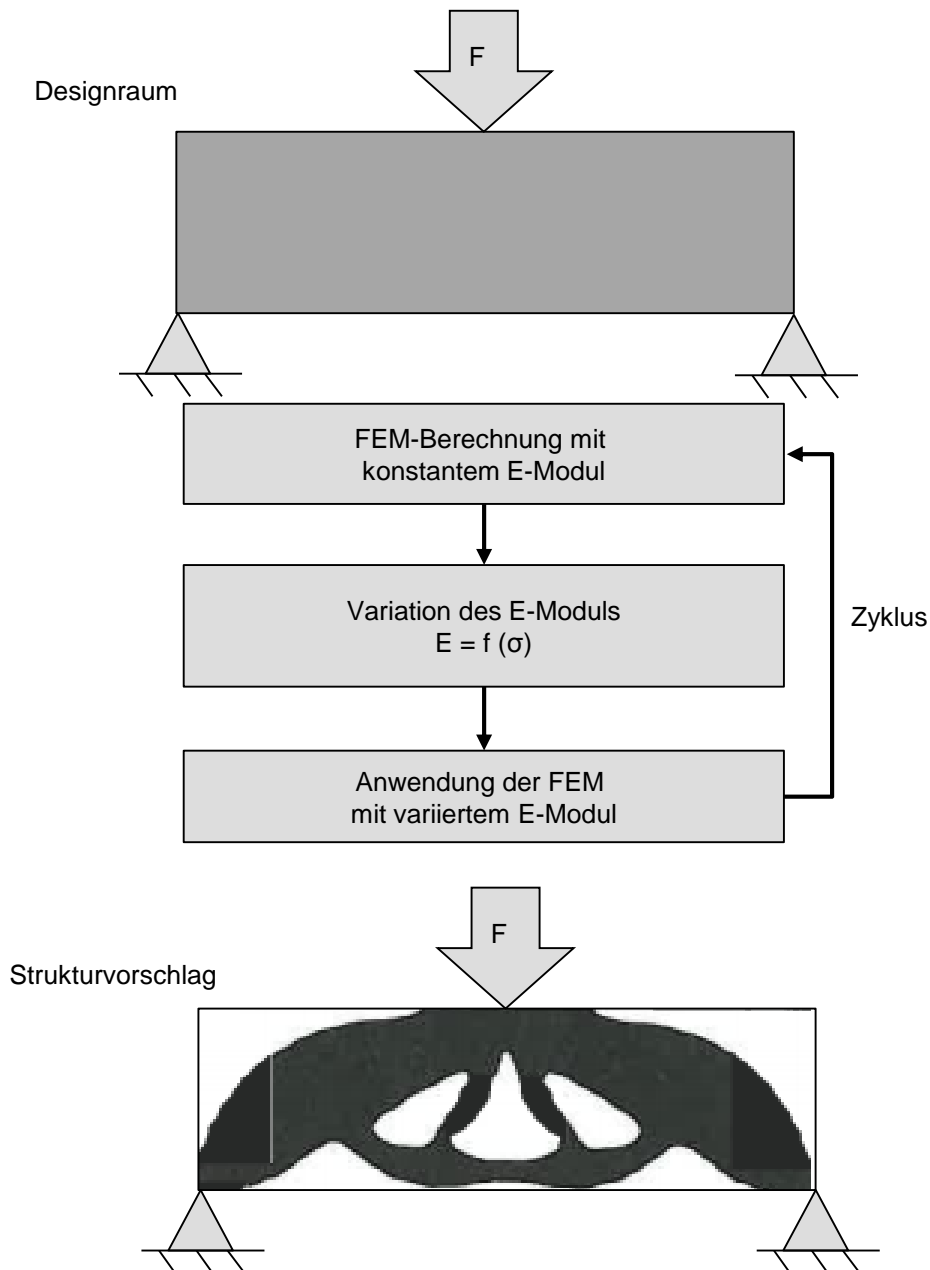


Abbildung 2-37: Schematischer Verfahrensablauf der SKO-Methode (in Anlehnung an MATTHECK (2006A))

Ein Nachteil derzeit vorhandener Topologieoptimierungsansätze ist es, dass diese annähernd nur für massive Strukturen und nicht für mesoskopische Strukturen angewandt werden können (BREUNINGER ET AL. 2013). Die Generierung eines Sandwichbauteils, unter Verwendung eines Topologieoptimierungsansatzes, ist nach BREUNINGER ET AL. (2013) mit den derzeitigen Ansätzen nur eingeschränkt

2.5 Gestaltung und Auslegung von Sandwichbauteilen

möglich. Als Grund hierfür wird die innere Systematik der Vorgehensweisen genannt (BREUNINGER ET AL. 2013). Eine Möglichkeit der Anwendung dieses Verfahrens könnte darin bestehen, dass die initiale Bauteilkontur mittels Topologieoptimierung erzeugt wird und anschließend das massive, innere Bauteilvolumen mit mesoskopischen Strukturen substituiert wird.

2.5.2.2 Gestaltoptimierung

Bei der Produktgestaltung korrelieren in den meisten Fällen die Anforderungen nach Ästhetik und höchsten mechanischen Eigenschaften (SCHUMACHER 2013). Um einen optimalen Kompromiss bezüglich der Anforderungen zu finden, wird die Gestalt- bzw. Formoptimierung eingesetzt. Ziel ist es, bei diesen Verfahren der Strukturoptimierung die äußere Kontur eines Bauteils so zu variieren, dass seine Eigenschaften in Bezug auf ein vorher definiertes Kriterium das Optimum erreichen. Die äußere Bauteilkontur kann nur verschoben werden. Neue Strukturelemente, wie beispielsweise Hohlräume und Streben, können nicht eingebracht werden (SCHUMACHER 2013). Als Zielfunktion wird hier in der praktischen Anwendung meist der Abbau von Spannungsspitzen, die beispielsweise aus Kerben resultieren, definiert. Allgemein kann jedoch festgehalten werden, dass jede beliebige Zielfunktion zur Anwendung kommen kann. Die Entwurfsvariablen beschreiben bei der Gestaltoptimierung die Form des Bauteilrandes (z. B. durch Radien bzw. Splines) und sollen diese steuern (SCHUMACHER 2013). Als Nebenbedingungen werden teilweise Grenzwerte für die Entwurfsvariablen oder die Bauteilmasse definiert (SCHUMACHER 2013). Aufgrund der Komplexität des Optimierungsproblems kann nur eine minimale Anzahl an realen Bauteilen analytisch berechnet werden. In allen anderen Fällen erfolgt die Anwendung von numerischen Lösungsmethoden, wie beispielsweise die Nutzung der FEM. Als repräsentatives Beispiel, stellvertretend für die bestehenden Gestaltoptimierungsverfahren, wird nachfolgend die *Computer Aided Optimization* -Methode nach (MATTHECK 2006A) vorgestellt. Diese Methode wird ausgewählt, da die Grundlagen auf Untersuchungen an Knochen und Bäumen basieren und die Vorgehensweise eine breite Anwendung in der Praxis findet. (KOBBER 2012)

***Computer Aided Optimization* (CAO)-Methode nach MATTHECK (2006A)**

Die Vorgehensweise zur Anwendung der CAO-Methode ist in Abbildung 2-38 dargestellt. Im ersten Schritt wird eine initiale Finite-Elemente-Berechnung, unter Berücksichtigung der Betriebslasten und Lagerungen, auf Basis des Grundentwurfs durchgeführt. Anschließend werden die für die Gestaltoptimierung

2 Stand der Wissenschaft und Technik

berechneten von-Mises-Vergleichsspannungen formal einer fiktiven Temperatur gleichgesetzt.

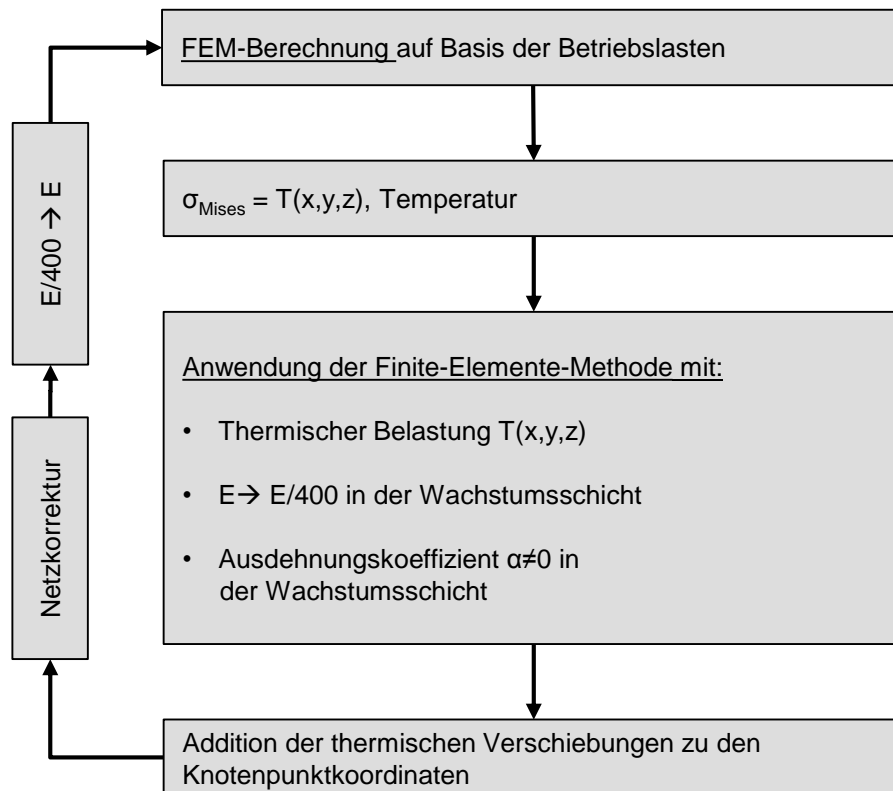


Abbildung 2-38: Schematischer Ablauf der CAO-Methode (in Anlehnung an MATTHECK (2006A))

Die Idee hinter diesem Schritt ist, dass hochbeanspruchte bzw. heiße Zonen sich ausdehnen und niedrig beanspruchte bzw. kalte Bereiche schrumpfen, woraus sich eine Materialverschiebung ergibt (KLEIN 2009). Da die Gestaltanpassung ausschließlich in den Randzonen erfolgen soll, wird zusätzlich der Elastizitätsmodul der äußeren Schicht, vergleichbar mit dem Kambium des Baumes, auf ungefähr 1/400 des ursprünglichen Wertes reduziert, was zu einer elastischen Außenschicht führt. In einer zweiten FE-Berechnung erfolgt nur eine Betrachtung der thermischen Beanspruchungen. Die vorher aufgebrachten mechanischen Belastungen werden nicht mehr berücksichtigt. Des Weiteren erfolgt die Festlegung, dass nur die Oberflächenschicht einen Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha > 0$ hat. Darunter liegende Bereiche dürfen sich nicht thermisch ausdehnen. Die Berechnung der Längenänderung Δl erfolgt dabei nach der Formel (2-13).

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot (T - T_{ref}) \quad (2-13)$$

2.5 Gestaltung und Auslegung von Sandwichbauteilen

Hierbei ist l_0 die Ausgangslänge des Elements. Der Überhöhungsfaktor und der Wärmeausdehnungskoeffizient α werden zur Berechnung des Zuwachses bzw. der Abnahme festgelegt.

Die aktuelle Temperatur des Elements wird mit T , die Referenztemperatur mit T_{ref} beschrieben. Zur Überprüfung in wie weit die Spannungsspitzen verringert werden konnten, wird der Oberflächenschicht wieder der Ausgangswert des Elastizitätsmoduls zugewiesen. Die anschließende FE-Berechnung des Bauteils mit den Betriebslasten zeigt geringere Spannungsspitzen. Zur vollständigen Eliminierung der Kerbwirkungen wird empfohlen, die Vorgehensweise bis zu fünfmal hintereinander durchzuführen. Als Ergebnis dieser Vorgehensweise steht am Ende ein Bauteil mit gesteigerter Dauerfestigkeit, im Vergleich zum Ausgangsbauteil, zur Verfügung. (MATTHECK 2006A)

Eine direkte Anwendung der Gestaltoptimierung auf Wabenkerne ist nur bedingt möglich. Grund hierfür ist, dass beispielsweise aus einer hexagonalen Kernstruktur eine Art Tubuswabe entsteht, woraus wiederum eine Reduktion des Leichtbaupotenzials resultiert. Daher ist dieser Konstruktionsansatz meist nur in Kombination mit anderen Bauteilen bzw. Baugruppen anwendbar. Dies wurde beispielsweise in BREUNINGER ET AL. (2013) bereits erfolgreich aufgezeigt. Hier konnte die Reduzierung der Kerbspannungen bei der Anbindung zwischen den Deckschichten und einem massiven Bauteilbereich erreicht werden.

2.5.2.3 Parameteroptimierung

Bei der Parameteroptimierung handelt es sich um die älteste Disziplin der Strukturoptimierung, welche grundsätzlich auf jedes parametrisierbare Bauteil angewandt werden kann. Die Zielfunktion stellt bei diesem Verfahren in den meisten Fällen die Minimierung der Bauteilmasse dar. Die Festlegung der Nebenbedingungen muss bei der Parameteroptimierung sorgfältig erfolgen, da die Verwendbarkeit der Ergebnisse davon abhängt. Exemplarische Nebenbedingungen sind Grenzwerte für die Nachgiebigkeit oder für die Entwurfsvariablen. Als potenzielle Entwurfsvariablen stehen bei diesem Verfahren vor allem Wanddicken oder Querschnittsgrößen zur Verfügung. Unter Verwendung von CAD- und CAE-Plattformen, die parametrisierte Modelle berücksichtigen, ist die Anwendung dieser Strukturoptimierungsmethode nahezu ohne zusätzlichen Aufwand möglich. (KOBEL 2012)

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Erfolgt die Anwendung der Parameteroptimierung auf regelmäßige, mesoskopische Strukturen, die durch einzelne, wenige Parameter vollständig beschrieben werden können, ergeben sich neue Möglichkeiten zu deren Gestaltung. Dies könnte beispielsweise eine belastungsgerechte Auslegung von Gittern oder Waben sein. Die Parameteroptimierung von stochastisch-verteilten Strukturen ist aufgrund der fehlenden Beschreibbarkeit nur bedingt möglich.

Auslegung von Sandwichbauteilen nach KOPP ET AL. (2009)

Eine Methodik zur Gestaltung von Sandwichbauteilen wurde von KOPP ET AL. (2009) entwickelt. Die Vorgehensweise zur Anwendung der Methodik ist in Abbildung 2-39 dargestellt ist.

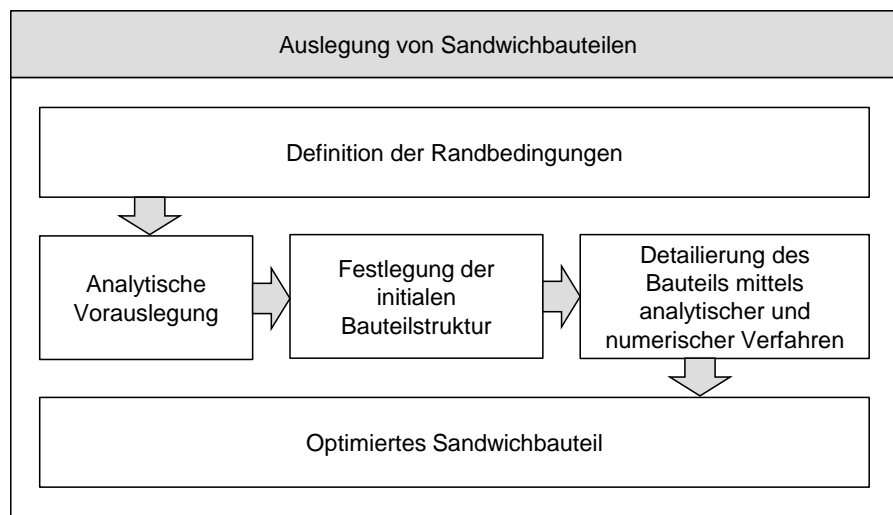


Abbildung 2-39: Methodik zur Sandwichauslegung (vgl. KOPP ET AL. (2009))

Die in KOPP ET AL. (2009) entwickelte Methodik stellt ein allgemeines und übergeordnetes Vorgehen bei der Auslegung von Sandwichbauteilen zur Verfügung, welches beispielsweise für beliebige Kerne angewandt werden kann. Die explizite Fokussierung auf strukturierte Kerne erfolgt nicht. Ebenso wird auf eine Detaillierung in Bezug auf zu verwendende Optimierungsverfahren oder Gestaltungshinweise für die Kerngeometrie nicht weiter eingegangen. Um eine möglichst tiefe Detaillierung zu erreichen, werden in den nachfolgenden Abschnitten Methoden zur Parameteroptimierung von Sandwichkernen aufgezeigt.

Parameteroptimierung von hexagonalen Waben nach FLEMMING ET AL. (1996)

Hexagonale Waben bieten ein hohes Potenzial zur Parameteroptimierung, da jedes einzelne Strukturelement (z. B. die Wabenwände oder der Durchmesser)

2.5 Gestaltung und Auslegung von Sandwichbauteilen

entsprechend den Anforderungen variiert werden kann. Eine Anpassung der Geometrie an die auftretenden Belastungen ist im Falle der konventionellen Herstellungsverfahren nur bedingt möglich. Grund hierfür ist, dass überwiegend Strukturen mit einem einheitlichen Materialfüllgrad, wie in Abbildung 2-40 dargestellt, gefertigt werden können.

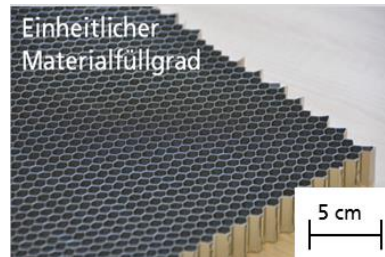


Abbildung 2-40: Konventionell gefertigte Wabenstruktur mit einheitlichem Materialfüllgrad (in Anlehnung an RISS ET AL. (2014B))

Eine Parameteroptimierung von Sechseckwaben (siehe Abbildung 2-41) ist auf Basis der beschriebenen Randbedingungen nur mit Einschränkungen möglich. Im dargestellten Bauteil, einem Höhenleitwerk des Flugzeugs Tornado, kommen konventionell gefertigte Wabenstrukturen mit unterschiedlichem Raumgewicht (in kg/m^3) zum Einsatz. Dadurch kann der Wabenkern eingeschränkt an die auftretenden Belastungen angepasst werden. Bauteilbereiche, die gesteigerte Belastungen erfahren, werden mit Wabenkernen mit hohem Raumgewicht ausgestattet. Weniger belastete Bereiche werden durch Waben mit einem geringeren Raumgewicht ersetzt. Zusätzlich ist in Abbildung 2-41 auch die Expansionsrichtung angegeben. Das heißt in dieser Richtung stehen, aus fertigungstechnischen Gründen, doppelte Wabenstege zur Verfügung, wodurch eine Anisotropie im Bauteil generiert wird. Die Anwendung dieser Methode verursacht zusätzliche Kosten bei der Baugruppenmontage. (FLEMMING ET AL. 1996)

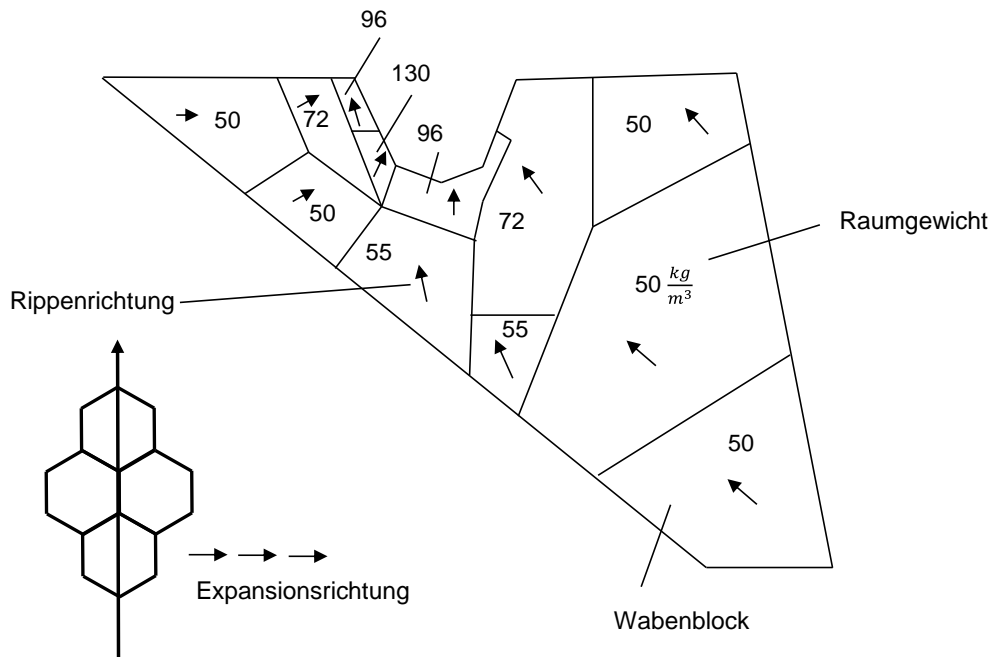


Abbildung 2-41: Wabenübergänge mit konventionell gefertigten Wabenstrukturen (in Anlehnung an FLEMMING ET AL. (1996))

Im Vergleich zu den Sandwichbauteilen mit homogenem Materialfüllgrad des Kerns, kann durch den Ansatz nach FLEMMING ET AL. (1996) die Massenreduktion gesteigert ausgeschöpft werden. Eine homogene Spannungsverteilung, welche als eine der Hauptanforderungen an Leichtbauteile definiert ist, kann unter Verwendung dieser Methode nur bedingt erfolgen. Zum einen entstehen an den Stellen, an denen zwei Wabenkerne mit unterschiedlichem Raumgewicht aufeinander treffen, Spannungsspitzen, was zu einem Defekt des Bauteils führen kann. Zum anderen resultiert aus den doppelten Wabenwänden eine unterschiedliche Steifigkeit im Bauteil. Neben den hexagonalen Waben bieten auch weitere regelmäßige, mesoskopische Strukturen (z. B. Gitter) ein hohes Potenzial für die Parameteroptimierung. Das theoretische Potenzial von parameteroptimierten, mesoskopischen Strukturen kann unter Verwendung der additiven Fertigungsverfahren, welche eine hohe Gestaltungsfreiheit ermöglichen, praktisch umgesetzt werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden unterschiedliche Ansätze zur Strukturoptimierung von Gittern, unter Verwendung der additiven Fertigungsverfahren, aufgezeigt. Die beschriebenen Ansätze bilden nicht den vollständigen Stand der Wissenschaft in Bezug auf die Parameteroptimierung von regelmäßigen, mesoskopischen Strukturen ab. Es handelt sich hierbei um die Vorgehensweisen, welche eine inhaltlich hohe Relevanz für diese Arbeit besitzen.

2.5 Gestaltung und Auslegung von Sandwichbauteilen

Size Matching and Scaling (SMS)-Methode nach NGUYEN ET AL. (2012)

Am Georgia Institut of Technology wurde durch NGUYEN ET AL. (2012), aufbauend auf der in Abschnitt 2.5.1 erläuterten CLS-Methode, die *Size Matching and Scaling*-Methode (SMS) entwickelt. Die Anwendung der SMS-Methode basiert auf sieben Schritten. Zunächst erfolgt die Definition der Randbedingungen zur Gestaltung der Struktur. Darauf aufbauend wird auf Basis der CLS-Methode die Gitterstruktur erstellt. Parallel hierzu sind, unter Anwendung der FE-Methode auf ein massives Ersatzmodell (siehe Abbildung 2-42 unten), die hochbelasteten Bereiche zu identifizieren. Anschließend werden die Knoten aus dem Netz der FE-Berechnung mit den Gitterknotenpunkten aus der CLS-Methode überlagert. Zusätzlich erfolgt eine Extrapolation der Knotenspannungen aus dem massiven Modell auf die Knoten der Gitterstruktur. In Abhängigkeit dieser Spannungen ist im nächsten Schritt die Zuordnung von unterschiedlich gestalteten Einheitsgitterzellen, entsprechend der Belastungen, durchzuführen. Den vorletzten Schritt bildet die Vereinigung von überlappenden Gitterstrukturen, so dass am Ende keine zusätzlichen Gitterstrukturen bzw. Massen im Bauteil vorhanden sind. Als letzten Schritt werden die einzelnen Stabdurchmesser auf Basis der vorher berechneten Lasten durch eine Parameteroptimierung angepasst. Die Abbildung 2-42 demonstriert die SMS-Methode an einem kragenden Biegebalken. Aus der Validierung der Methode an unterschiedlichen Bauteilen resultiert, dass unter Verwendung der SMS-Methode der Konstruktionsaufwand für Sandwichbauteile mit einem strukturiertem Kern um bis zu 70-mal verringert werden konnte. (NGUYEN ET AL. 2012)

Durch die Verwendung der SMS-Methode kann die Gestaltung von hochkomplexen Sandwichkernen mit Gitterstrukturen nahezu automatisiert erfolgen. Die vollständige Ausschöpfung des Leichtbaupotenzials ist jedoch nicht gegeben. Dies basiert darauf, dass die Spannungen aus einem massiven Volumenmodell abgeleitet und nicht die Spannungen in der Gitterstruktur selbst berechnet werden. Dadurch können die einzelnen Spannungen und Verschiebungen für die Gitterstrukturen nur angenähert werden. Ebenso erfolgt die belastungsgerechte Auslegung nur auf Basis einer initialen Finite-Elemente-Berechnung. Eine finale überprüfende Berechnung der Struktur ist nicht vorgesehen. Dadurch kann die Massenreduktion nur bedingt ausgeschöpft werden.

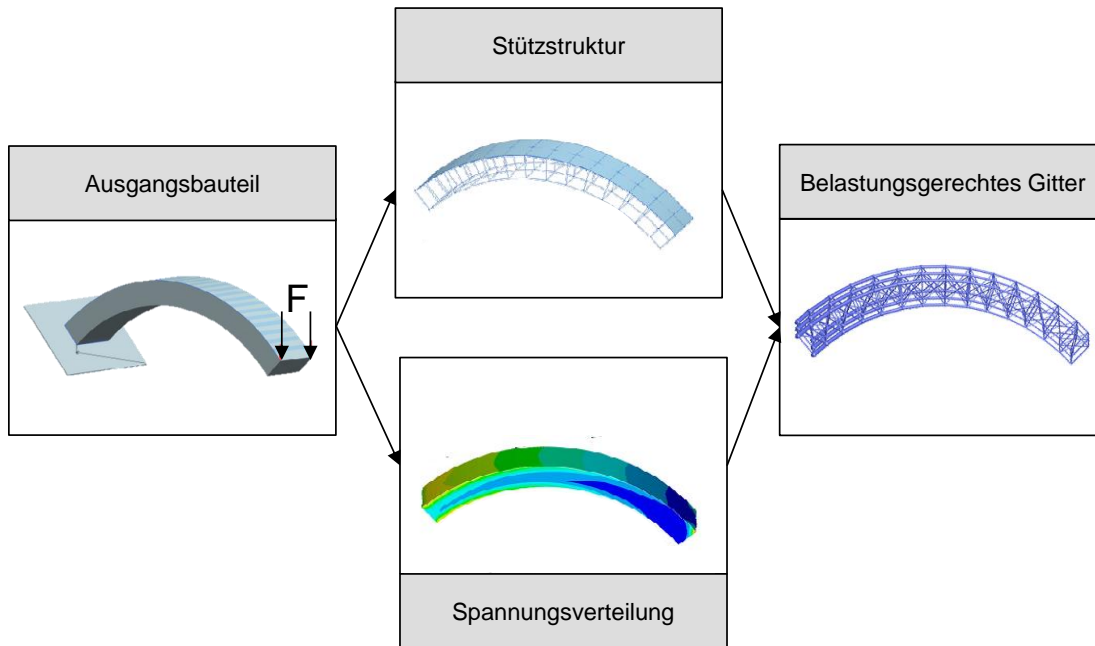


Abbildung 2-42: Anwendung der SMS-Methode (in Anlehnung an NGUYEN ET AL. (2012))

Kraftflussgerechte Gestaltung von Gitterstrukturen nach TEUFELHART (2014)

Ein weiterer Ansatz zur Parameteroptimierung von Gittern, unter Verwendung der additiven Fertigung, ist in TEUFELHART (2014) beschrieben. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der kraftflussgerechten Gestaltung von Gitterstrukturen. Hierzu wird ein Designraum vorgegeben, welcher für das spätere Leichtbauteil zur Verfügung steht. Nach der manuellen Definition eines Startpunkts, berechnet ein Algorithmus innerhalb des Designraums den Verlauf des Kraftflusses entlang der ersten, zweiten oder dritten Hauptspannungsrichtung. Die Ergebnisse aus der initialen Finite-Elemente-Berechnung stellen die Eingangsdaten für die Optimierung dar. Aufbauend auf diesen Ergebnissen erfolgt im nächsten Schritt die iterative Anpassung der Stabdurchmesser an die auftretenden Belastungen. Das Ergebnis der angewandten Vorgehensweise ist in Abbildung 2-43, am Beispiel eines Biegebalkens, dargestellt. (TEUFELHART 2014)

2.5 Gestaltung und Auslegung von Sandwichbauteilen

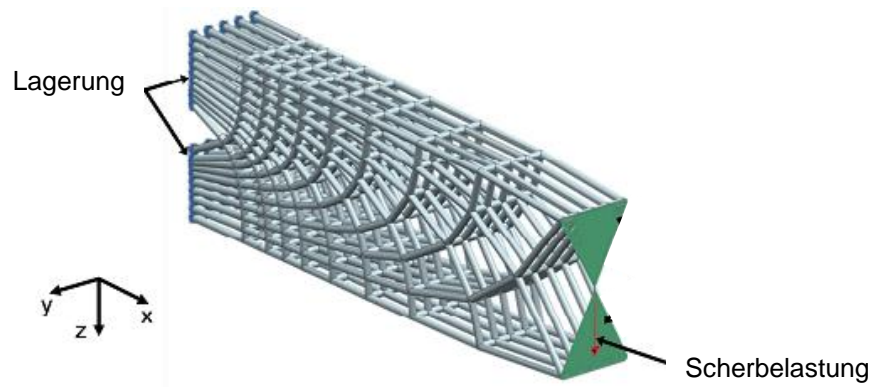


Abbildung 2-43: Kraftflussgerechte Auslegung eines Biegebalkens mit Gitterstrukturen (TEUFELHART 2014)

Der in TEUFELHART (2014) entwickelte Ansatz zur kraftflussgerechten Gestaltung von Gitterstrukturen, zielt auf dreidimensionale Strukturbauteile ab. Eine Anwendung auf Sandwichbauteile ist nur bedingt möglich, da eine Vielzahl an Randbedingungen das Leichtbaupotenzial dieser Methode deutlich reduzieren würde. Das Vorgehen bei der Parameteroptimierung ist, im Gegensatz zum Ansatz von NGUYEN ET AL. (2012), ein iteratives Vorgehen. Dies verlangsamt auf der einen Seite den Gestaltungsprozess und ermöglicht auf der anderen Seite eine gesteigerte Ausnutzung des Leichtbaupotenzials.

2.5.3 Funktions- und Verbindungselemente für Sandwichbauteile

Durch die Verwendung von Funktionselementen, beispielsweise sogenannte Inserts, wird die Kraft lokal in die Sandwichstruktur eingeleitet (BITZER 1997). Aufgrund der meist dünnen Deckschichthäute, wird eine möglichst großflächige Verteilung der Kraft in die beiden Deckschichten angestrebt (ZENKERT 1997). Am Häufigsten werden vor allem sogenannte Stoffschluss-Inserts verwendet, da diese die höchste Festigkeit gegenüber den anderen Varianten aufweisen (ECSS 2011; FUNKE 2001; HEIMBS 2008). Grund hierfür ist, dass die verwendete Einbettmasse den Insert mit dem Kern und den beiden Deckschichten verbindet (BITZER 1997). Nachteilig hierbei ist jedoch, dass durch den Stoffschluss zusätzliche Massen in die Sandwichstruktur eingebracht werden und die Montage der Inserts mehr Zeit beansprucht (BITZER 1997; FUNKE 2001). Die nach ECSS (2011) möglichen Belastungsarten von Inserts sind in Abbildung 2-44 dargestellt.

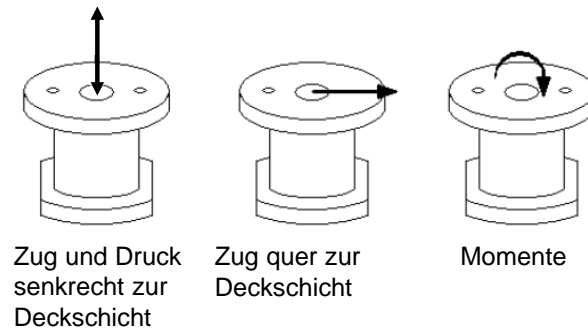


Abbildung 2-44: Belastungsarten von Inserts (in Anlehnung an ECSS (2011))

Die Aufgabe der Verbindungselemente besteht darin, die Lastübertragung zwischen zwei Sandwichbauteilen sicherzustellen (ECSS 2011; HEIMBS 2008). Dadurch können einzelne Sandwichelemente zu einem Bauteil mit beliebigen Abmessungen montiert werden (FUNKE 2001; BITZER 1997; ECSS 2011). Die Verbindungsmöglichkeiten von Sandwichbauteilen nach HEIMBS (2008) sind in Abbildung 2-45 dargestellt.

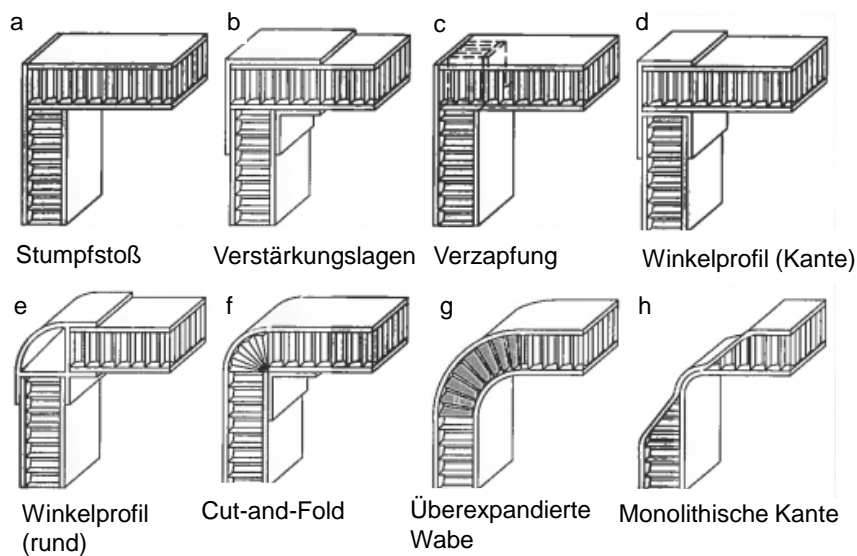


Abbildung 2-45: Konzepte zur Kantenverbindung von Sandwichstrukturen (vgl. HEIMBS (2008))

Nachteilig sind ebenfalls die zusätzlichen Massen, die eingebracht werden. Daraus ergeben sich geänderte Lastpfade, welche zu einer ungewünschten Deformation des Bauteils führen können. Außerdem entstehen durch die Einbringung der Verbindungselemente zusätzliche Kosten für die Fertigung und Montage des Bauteils.

2.6 Zusammenfassung

In Kapitel 2 wird der Stand der Wissenschaft und Technik, der in dieser Arbeit relevanten Themenbereiche, aufgeführt und erläutert. Zu Beginn erfolgt die Beschreibung der Grundlagen des Leichtbaus, unter Berücksichtigung der einzelnen Leichtbaustrategien und Bauweisen, wobei hier besonders die Sandwichbauweise adressiert wird. Die anschließenden Ausführungen zu den additiven Fertigungsverfahren befassen sich neben der Verfahrensbeschreibung auch mit den Gestaltungsmöglichkeiten für Bauteile.

Im Abschnitt über die Gestaltung und Auslegung von Sandwichbauteilen wird eingehend über eine Vielzahl an Vorgehensweisen zur Konstruktion unterschiedlicher Kerne für Sandwichbauteile diskutiert. Weiterhin werden Methoden zur Strukturoptimierung aufgezeigt, welche Sandwichbauteile zur gesteigerten Ausschöpfung des Leichtbaupotenzials befähigen können. Den Abschluss des Kapitels bildet die Beschreibung von Funktions- und Verbindungselementen für Sandwichbauteile. Dies erfolgt unter Berücksichtigung konventioneller Vorgehensweisen zur Lasteinleitung in Sandwichbauteile und zur Verbindung von einzelnen Komponenten.

Als Fazit aus Kapitel 2 ist festzuhalten, dass das Potenzial zur Massenreduktion, welches die additive Fertigung bietet, bisher nur limitiert für Sandwichbauteile mit Wabenkernen ausgeschöpft werden kann.

3 Identifikation des Handlungsbedarfs

3.1 Defizite

Die Rechercheergebnisse in Kapitel 2 zeigen, dass bereits eine Vielzahl an Vorgehensweisen zur Gestaltung und Auslegung von Kernen für Sandwichbauteile existieren. Diese werden nachfolgend in Bezug auf die Ausschöpfung des Leichtbaupotenzials und die praktische Anwendbarkeit bewertet, um anschließend den Handlungsbedarf für diese Arbeit abzuleiten. Eine Übersicht der fokussiert betrachteten Ansätze ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

Legende:

- voll erfüllt
- ◐ teilweise erfüllt
- nicht erfüllt

	BAUMEISTER ET AL. 2007	ECSS 2011	EMMELMANN ET AL. 2011	ENGELBRECHT ET AL. 2009	EVANS 1991	FLEMMING ET AL. 1996	KOPP ET AL. 2009	KRIECHBAUM 1994	MAHESHWARAA ET AL. 2007	MATTHECK 2006A UND 2006B	MOLDENHAUER 2011	NGUYEN ET AL. 2012	ROSEN 2007	SVIRIDOV 2011	TEUFELHART 2014	TORSAKUL 2007	WANG & ROSEN 2001	WILLIAMS ET AL. 2011
Auslegung von Kernen																		
Ebene Strukturen	◐	◐	○	◐	◐	◐	◐	○	○	○	○	◐	◐	◐	○	◐	◐	◐
Gekrümmte Strukturen	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	◐	◐	○	◐	◐	◐
Funktionselemente in Sandwichbauteile																		
Additive Fertigung	○	○	◐	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Konventionelle Fertigung	◐	●	○	○	○	◐	◐	○	○	○	○	○	○	○	○	◐	○	○
Strukturoptimierung von Wabenkernen																		
Topologieoptimierung	○	○	◐	○	○	○	○	●	○	●	●	◐	○	○	○	○	○	○
Parameteroptimierung	○	○	◐	◐	◐	◐	◐	○	◐	○	○	◐	◐	○	◐	○	◐	◐
Gestaltoptimierung	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○

Abbildung 3-1: Zusammenfassung der Arbeiten zum Stand der Wissenschaft und Technik

Sandwichbauteile gelten als Standardkonstruktionselemente im Leichtbau. Ein Vergleich mit den Anwendungen in der Natur jedoch zeigt, dass das Leichtbaupotenzial dieser Konstruktionselemente nicht maximal ausgeschöpft wird. Grund hierfür sind vor allem die konventionellen Fertigungsverfahren sowie die daraus resultierenden Konstruktionsmethoden. In BAUMEISTER ET AL. (2007) und in

3 Identifikation des Handlungsbedarfs

TORSAKUL (2007) wird die Herstellung von Sandwichkernen aus Aluminiumschaum beschrieben. Dies ermöglicht eine hohe Flexibilität bei der Anpassung von Sandwichbauteilen an eine beliebig gekrümmte Fläche. Eine belastungsgerechte Auslegung, wie beispielsweise unter Verwendung der Parameteroptimierung, kann jedoch nicht erfolgen, da die finale Verteilung des Schaums im Bauteil nach dem Fertigungsprozess nicht vorhersagbar ist. Eine Alternative zu homogenen Kernen bilden strukturierte Kerne.

Hier bieten vor allem hexagonale Wabenstrukturen, aufgrund ihres inneren Aufbaus, wie in HEIMBS (2008); KERZ (1988) und NACHTIGALL (2005) beschrieben, ein Leichtbaupotenzial höchster Güte. Ebenfalls, wie bei den homogenen Kernen, besteht auch hier die Möglichkeit zur nahezu beliebigen Gestaltung von Sandwichbauteilen (FLEMMING ET AL. 1996). Allerdings resultiert aus der meist uniformen Ausrichtung der Waben bei gekrümmten Sandwichbauteilen eine geringere Steifigkeit im Kern. Dadurch muss der Kern massiver ausgeführt werden, was eine zusätzliche Masseneinbringung bedeutet. Des Weiteren ist eine belastungsgerechte Auslegung bei strukturierten Kernen, unter Verwendung der aktuell bestehenden Ansätze für Wabenkerne, ebenfalls nur bedingt möglich (KOPP ET AL. 2009). Grund hierfür ist, dass für die Umsetzung einer lokalen Variation der Kernstruktur hohe Fertigungskosten sowie Spannungsspitzen an den Übergangsstellen entstehen (FLEMMING ET AL. 1996). Bei der Integration von Funktionselementen erfolgt keine Unterscheidung zwischen den einzelnen Kernauführungen. Bei beiden Varianten müssen die Funktionselemente nach der Sandwichfertigung manuell in das Bauteil eingebracht werden. Hieraus ergeben sich ebenfalls weitere Fertigungskosten.

Neue Möglichkeiten zur Ausnutzung des Leichtbaupotenzials in Kernen für Sandwichbauteile bieten die additiven Fertigungsverfahren. Hierfür beschreiben ENGELBRECHT ET AL. (2009); NGUYEN ET AL. (2012) und WANG & ROSEN (2002) Ansätze, die eine konforme und belastungsgerechte Auslegung von Sandwichkernen mit Gitterstrukturen ermöglichen. Diese Ausführung des Kerns weist jedoch, wie in Abschnitt 2.3.2 bereits aufgezeigt, nicht die höchste Leichtbaugüte auf. In den beschriebenen Ansätzen wird keine lokale Lasteinleitung, wie beispielsweise durch Inserts, berücksichtigt. Dies limitiert die Anwendungsmöglichkeit der Methoden deutlich, da Funktionselemente für die industrielle Anwendung eine hohe Wichtigkeit darstellen. Ein ähnlicher Ansatz ist in EMMELMANN ET AL. (2011B) dokumentiert, der ebenfalls eine konforme Gestaltung von Gitterstrukturen sowie die Integration von Funktionselementen berücksichtigt. Allerdings kann auch hier keine Steigerung bei der Ausschöpfung des

3.2 Anforderungen

Leichtbaupotenzials erfolgen, da eine belastungsgerechte Auslegung vollständig fehlt.

Zusammenfassend kann, auf Basis des aufgezeigten Stands der Wissenschaft und Technik, abgeleitet werden, dass ein Handlungsbedarf zur Entwicklung einer Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung von Wabenkernen für Sandwichbauteile besteht. Zur Erreichung dieser übergeordneten Zielsetzung sind folgende Teilziele anzustreben:

- Entwicklung einer mathematischen Vorgehensweise zur konformen Anpassung von Wabenstrukturen an eine gekrümmte Fläche
- Identifikation von Ansätzen zur Integration von Funktionen in Wabenkernen
- Entwicklung einer Vorgehensweise zur belastungsgerechten Auslegung von Wabenkernen für Sandwichbauteile

Bevor eine Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung von Wabenkernen für Sandwichbauteile entwickelt werden kann, müssen die Anforderungen hierzu definiert werden.

3.2 Anforderungen

3.2.1 Anforderungen an die Methodik

Das zu entwickelnde Vorgehen zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung von Wabenkernen für Sandwichbauteile hat eine Vielzahl an Anforderungen zu erfüllen. Diese resultieren aus der Zielsetzung bzw. dem vorher aufgezeigten Handlungsbedarf. Die Anforderungen an die Methodik sind nachfolgend aufgelistet:

- Integration eines zentralen Datenmanagements
Die Grundlage zur Anwendung der Methodik bildet die vollständige Verfügbarkeit aller Randbedingungen und Anforderungen des zu betrachtenden Bauteils. Diese Daten müssen zentral dokumentiert werden, so dass jeder Methodenbaustein auf diese Basis zurückgreifen kann. Folglich muss eine Dokumentationsumgebung zum Datenmanagement bereitgestellt werden.

3 Identifikation des Handlungsbedarfs

- Berücksichtigung der konformen Anpassung von Wabenkernen
Für die Steigerung der Ausnutzung des Leichtbaupotenzials in Wabenkernen für Sandwichbauteile ist eine gerichtete Kernstruktur unabdingbar. Aus diesem Grund sind alle Wabenwände konform zur Deckschichtfläche zu gestalten.
- Integration von Funktionselementen
Die additiven Fertigungsverfahren bieten, durch ihren schichtweisen Aufbau, eine hohe Geometrieflexibilität und damit auch die Möglichkeit zur direkten Integration von Funktionen. Um das Leichtbaupotenzial in Sandwichbauteilen effizienter ausnutzen zu können, ist die Integration von Funktionselementen, wie z. B. Inserts, eine umzusetzende Komponente innerhalb der Methodik.
- Anwendung von Strukturoptimierungsansätzen
Die Minimierung der Bauteilmasse, bei mindestens gleichbleibender Steifigkeit, stellt eine zentrale Anforderung in der Produktentwicklung dar. Diese gilt es ebenfalls zu berücksichtigen und durch die Anwendung von Strukturoptimierungsansätzen, wie beispielsweise der Parameteroptimierung, umzusetzen.
- Berücksichtigung der fertigungstechnischen Gestaltung
Die digitale Gestaltung des Bauteils bietet nahezu keine Limitierungen bei der Konstruktion und Auslegung des Werkstücks. Bei der physikalischen Umsetzung hingegen bestehen für jedes Fertigungsverfahren Restriktionen. Damit im Anschluss an den Fertigungsprozess keine Abweichungen zum digitalen Modell entstehen, ist die fertigungsgerechte Gestaltung zu berücksichtigen.
- Allgemeingültigkeit der Vorgehensweise
Die Anwendung der zu entwickelnden Methode soll schwerpunktmäßig in Industrieunternehmen erfolgen. Durch das nahezu unendliche Teilespektrum und die unterschiedlichen, sich im Einsatz befindenden 3-D-CAD- und CAE-Plattformen, muss die Vorgehensweise bauteil- und plattformunabhängig entwickelt werden. Es dürfen keine systemabhängigen Methoden verwendet werden. Dadurch kann die allgemeine Gültigkeit der Vorgehensweise gewährleistet werden.
- Modularer Aufbau der Methodik
Auf Basis eines modularen Aufbaus können einzelne Bausteine der Methodik auch ausgelassen werden, was zu einer Vereinfachung bzw. effizienten Nutzung führt. Somit ist die einfache Erweiterbarkeit der Methodik durch zusätzliche und anwendungsspezifische Bausteine gegeben.

3.2 Anforderungen

- Automatisierbarkeit der Vorgehensweise
Eine Anforderung ist die Methodik so zu gestalten, dass eine Automatisierung des Vorgehens, wie beispielsweise die Überführung in eine CAD-CAE-Routine, ermöglicht werden kann. Dies steigert die Wirtschaftlichkeit und reduziert die Fehler bei der Anwendung der Methodik.
- Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit
Für die Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit der Methodik muss eine Gegenüberstellung des technischen Mehrwerts bzw. dem Nutzen der Methodik erfolgen. Hierfür ist ein repräsentativer Anwendungsfall auszuwählen, an dem die Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit bzw. das Kosten-Nutzen-Verhältnis der Methodik aufgezeigt wird.

3.2.2 Anforderungen an das Bauteil

Neben den bereits aufgelisteten Anforderungen an die Methodik bestehen zusätzliche, technische Anforderungen an das zu betrachtende Bauteil. Diese leiten sich vor allem aus der praktischen Anwendung ab und sind nachfolgend beschrieben:

- Krafteinleitung in das Bauteil
Die Einleitung von Lasten soll in bzw. senkrecht zur Deckschichtrichtung, wie schematisch in Abbildung 3-2 dargestellt, erfolgen. Somit wird eine direkte Krafteinleitung, welche in KLEIN (2009) für die Gestaltung von Leichtbaukomponenten gefordert ist, umgesetzt. Kann diese Anforderung nicht erfüllt werden, entsteht meist eine zusätzliche Bauteilmasse im Kern. Neben Zug- und Drucklasten, die in der Praxis die Hauptanwendung finden, können auch Momente in das Sandwichbauteil eingebracht werden.

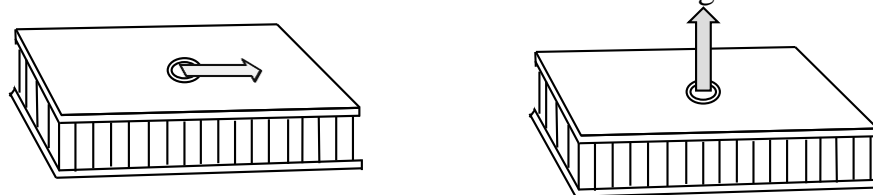


Abbildung 3-2: Direkte Krafteinleitung: in (links) bzw. senkrecht (rechts) zur Deckschichtrichtung

3 Identifikation des Handlungsbedarfs

- Mannigfaltigkeit und Stetigkeit der Fläche

Zur konformen Gestaltung von Wabenkernen muss die Bauteilgeometrie vollständig mathematisch beschrieben werden können. Andernfalls ist eine Anwendung der Methodik nicht möglich. Hierfür erfolgt zunächst die Einordnung der Fläche in den Euklidischen Raum \mathbb{R}^3 . Die Punktmenge, die das geometrische Objekt (hier die Fläche) beschreiben, werden im Folgenden als Topologie bezeichnet. Diese wiederum besteht im Allgemeinen aus einer nicht-leeren Menge $M \in \mathbb{R}^3$ oder einer offenen Teilmenge aus M (GRÜNDEMANN 2011; NEDISAN 2014). Durch diese Festlegung ist das zu betrachtende geometrische Objekt im dreidimensionalen Raum ortsfest definiert und jeder Punkt der Topologie kann über den Ortsvektor beschrieben werden. Ein weiteres Kriterium zur Anwendung der Methodik ist, dass es sich bei den zu betrachtenden Objekten um hinreichend glatte Flächen handelt (siehe Abbildung 3-3 links). Das heißt Bereiche, in denen der Normalenvektor, wie in Abbildung 3-3 rechts, nicht eindeutig definiert ist, werden nicht betrachtet (FRIED 2013). Zusätzlich muss die Fläche zusammenhängend sein, also nicht aus Einzelteilen bestehen. Kann die Fläche komplett durch den Ortsvektor beschrieben werden und besteht in jedem Punkt des geometrischen Objekts ein eindeutig beschreibbarer Normalenvektor, bildet die Fläche eine zweidimensionale, differenzierbare Mannigfaltigkeit im \mathbb{R}^3 (GRÜNDEMANN 2011; NEDISAN 2014). Dies bedeutet: für die zu betrachtende Fläche existiert eine ebene Abbildung.

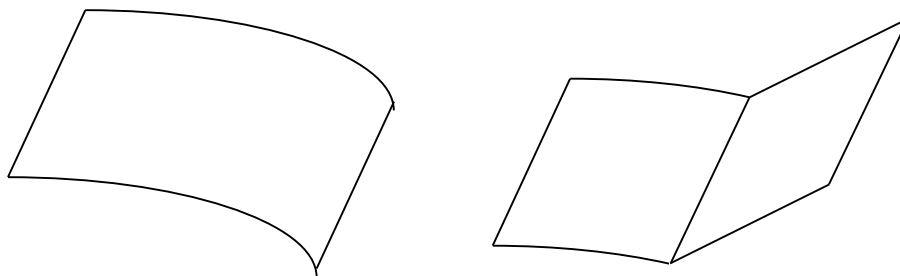


Abbildung 3-3: Links: glatte Fläche (stetig); rechts: Fläche mit nicht eindeutig definierten Bereichen des Normalenvektors (unstetig)

- Bauteilabmessungen

Eine Veränderung der initialen Bauteilabmessungen, $L_{Bauteil}$ = Länge, $B_{Bauteil}$ = Breite und $H_{Bauteil}$ = Höhe, innerhalb der Methodik ist nicht möglich. Dies basiert auf der Eingrenzung des Betrachtungsraums in Ab-

3.2 Anforderungen

schnitt 1.2.2, da ansonsten eine Vergleichbarkeit der Potenziale dieser Ansätze mit anderen Bauteilen nicht bzw. nur bedingt möglich ist. Des Weiteren ist der maximale Abstand zwischen den Deckschichten durch den Krümmungsradius des Bauteils für die konforme Anpassung begrenzt. Besitzt das ausgewählte Bauteil eine starke Krümmung in Kombination mit einem großen Abstand zwischen den Deckschichten, kann es zu Schnittpunkten der einzelnen Normalenvektoren innerhalb des Bauteils kommen. Daraus resultiert, dass sich bei der anschließenden Generierung der Wabenwände diese innerhalb des Bauteils schneiden, wodurch das Leichtbaupotenzial deutlich limitiert wird.

Aus dem abgeleiteten Handlungsbedarf resultiert die Notwendigkeit einer neuen Konstruktionsmethodik für Sandwichbauteile, welche eine gesteigerte Ausnutzung des Leichtbaupotenzials ermöglicht. Diese Vorgehensweise gilt es, auf Basis der aufgestellten Anforderungen, in den nachfolgenden Kapiteln zu entwickeln.

3 Identifikation des Handlungsbedarfs

4 Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung additiv gefertigter Wabenkerne

4.1 Aufbau des Kapitels

Ziel dieses Kapitels ist es, die Methodik als Gesamtes sowie deren Systemgrenzen zu beschreiben. Zur Erreichung der Zielstellung wurde der in Abbildung 4-1 schematisch dargestellte Aufbau des Kapitels gewählt.

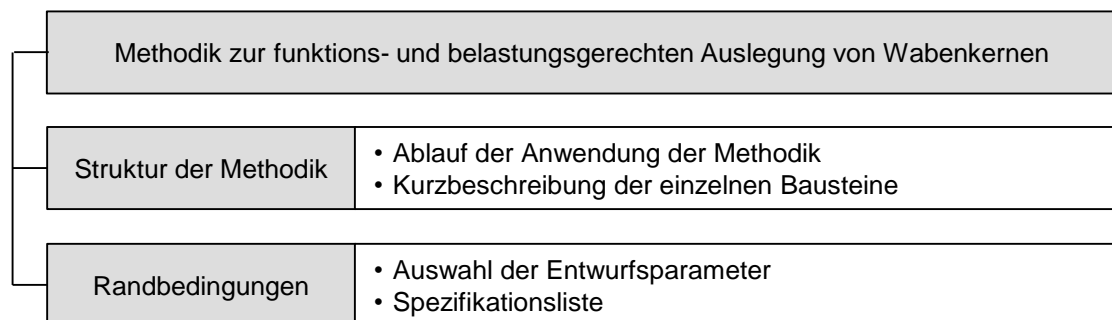


Abbildung 4-1: Aufbau von Kapitel 4

4.2 Struktur der Methodik

Die in Abbildung 4-2 dargestellte Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung von Wabenkernen stellt eine Weiterentwicklung der Ausführungen in RISS ET AL. (2014A) und RISS ET AL. (2014B) dar. Der Ablauf zur Anwendung der Methodik ist sequenziell. Es ist jedoch nicht erforderlich, dass jeder einzelne Baustein der Methodik durchlaufen werden muss. Einzelne Methoden können auch übersprungen werden.

Den ersten Baustein bildet die *Erstellung einer Spezifikationsliste*. Im Rahmen dieser Liste gilt es, alle Randbedingungen aufzunehmen und die Anwendbarkeit der Methodik durch die Überprüfung des Gültigkeitsbereichs sicherzustellen. Jede der nachgelagerten Methoden greift auf die Spezifikationsliste zurück, um die entsprechenden Entwurfs- und Optimierungsparameter abzuleiten.

Die Berechnung und Generierung von Wabenkernen für Sandwichbauteile, in Abhängigkeit der vorher definierten Parameter, erfolgt durch die *Methode zur Erstellung von Wabenstrukturen auf einer Fläche*. Das Ziel dieses Vorgehens ist,

4 Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung additiv gefertigter Wabenkerne

dass jede Wabenwand konform zu den komplex gekrümmten Deckschichten ausgerichtet ist (siehe Kapitel 5).

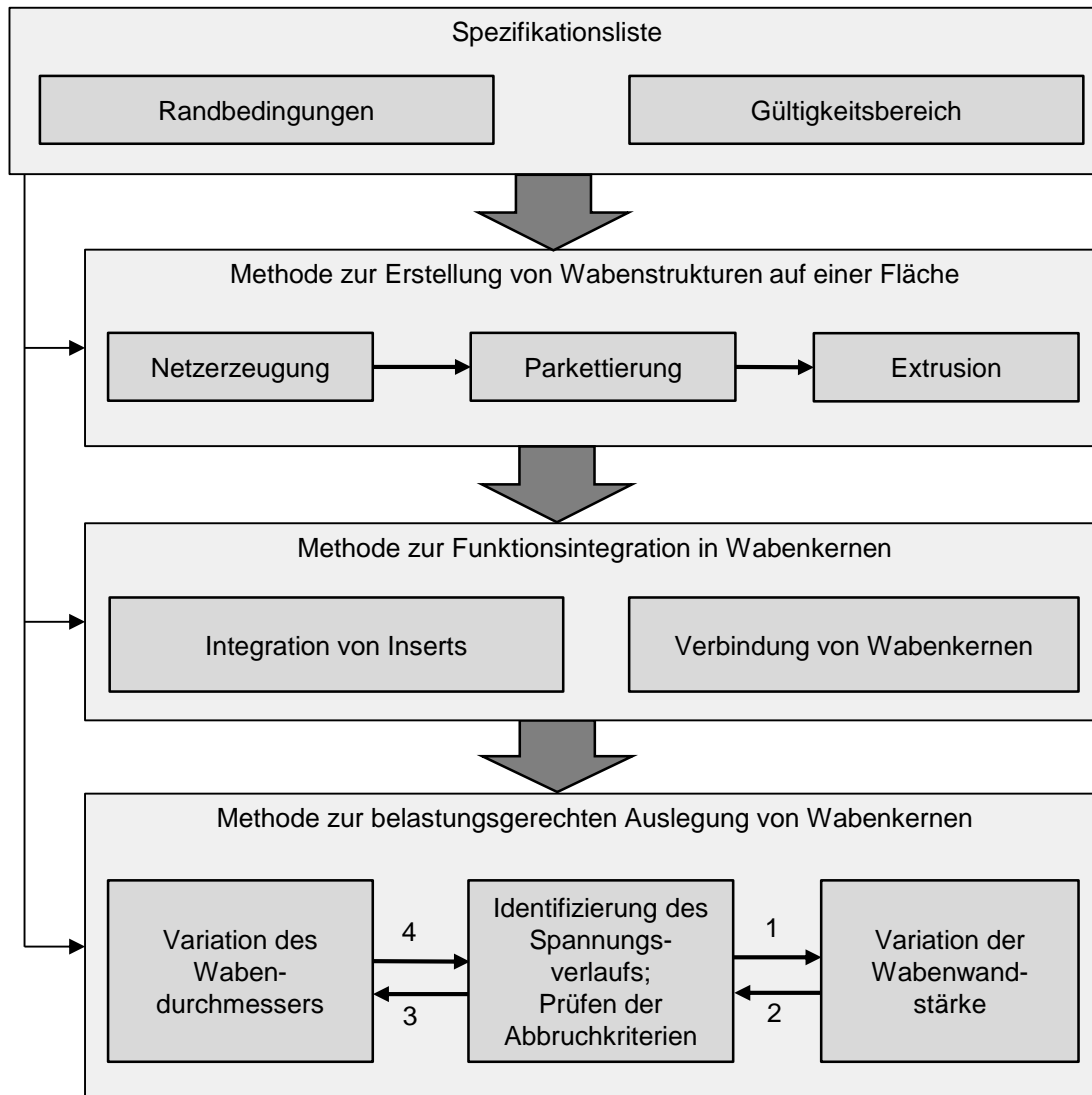


Abbildung 4-2: Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung von Wabenkernen

Darauf aufbauend ist die *Methode zur Funktionsintegration in Wabenkernen* in Kapitel 6 ausgeführt. Hierbei liegt der Fokus vor allem auf Funktionselementen, wie beispielsweise Gewindeeinsätze zur Montage von Komponenten oder Steckverbindungen zur Überwindung der Größenlimitierung additiv gefertigter Bauteile.

Die Leichtbauoptimierung des Wabenkerns erfolgt durch die *Methode zur belastungsgerechten Auslegung von Wabenkernen* (siehe Kapitel 7). Als Zielkriterium der Optimierung wird eine Zielspannung von der Konstrukteurin bzw. vom Konstrukteur bestimmt, die nach der Anwendung der Methode im gesamten Bauteil

4.3 Randbedingungen der Methodik

vorliegt. Das Ergebnis der Methodik bildet ein funktions- und belastungsgerecht ausgelegter Wabenkern zum Einsatz in Sandwichbauteilen.

4.3 Randbedingungen der Methodik

4.3.1 Zentrales Datenmanagement in einer Spezifikationsliste

Die Dokumentation der Randbedingungen bildet nach ENGELN (2006) die Basis in der Produktentwicklung. Daher gilt die absolute Notwendigkeit, für jedes Bauteil eine sogenannte Spezifikationsliste anzufertigen. Diese beinhaltet alle Randbedingungen und Anforderungen an das Bauteil (VDI 2222-1 1997) und gewährleistet, dass während der Entwicklung stets alle relevanten Informationen konsistent und verfügbar sind (LINDEMANN 2009). Außerdem gilt die Spezifikationsliste zusätzlich als Kommunikationsinstrument zwischen den einzelnen Bereichen und Personen, die im Rahmen einer Produktentwicklung beteiligt sind. Zur Sicherstellung eines globalen Datenmanagements während der BauteilAuslegung, wird dieses Standardelement der Produktentwicklung (ENGELN 2006; LINDEMANN 2009; VDI 2222-1 1997) aufgegriffen und für die funktions- und belastungsgerechte Auslegung von Wabenkernen erweitert. Die nachfolgend beschriebenen Methoden beziehen ihre Informationen alle aus der Spezifikationsliste und spiegeln die Ergebnisse wieder zurück. Die strukturellen Grundlagen der Spezifikationsliste bilden die allgemeinen und technischen Anforderungen, die in Abschnitt 3.2 beschrieben sind. Hieraus resultiert, dass unter anderem bei der Verwendung von Strukturoptimierungsansätzen eine Festlegung und Dokumentation der Zielfunktionen, der Entwurfsvariablen und der Randbedingungen erfolgen muss. Die aufgeführten Randbedingungen stellen den minimalen Bedarf für die Auslegung von Wabenkernen für Sandwichbauteile dar. Eine Erweiterung der Spezifikationsliste kann, in Abhängigkeit des Anwendungsfalls, beliebig erfolgen. Ein Ausschnitt der Spezifikationsliste, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird, ist in Abbildung 4-3 dargestellt. Die komplette Vorlage kann unterstützend zur Anwendung der Methodik herangezogen werden und befindet sich im Anhang (siehe Kapitel 12).

4 Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung additiv gefertigter Wabenkerne

Kategorie	Beschreibung	Formelzeichen	Kenngröße
Zielfunktion und Zielgröße	Zielfunktion		
	Gewählte Zielspannung	$\sigma_{\text{gewählt}}$	
	Sicherheitsfaktor	S	
Entwurfsvariablen	Wabenwandstärke	t	
	Wabendurchmesser	d	

Abbildung 4-3: Ausschnitt der Spezifikationsliste zur Anwendung der Methodik

4.3.2 Zielfunktion

Generell kann die Zielfunktion auf beliebige Zielgrößen, wie beispielsweise die Steifigkeit oder die Masse, angewandt werden. Auf Grund der Forderungen im Leichtbau nach einer homogenen Spannungsverteilung im Bauteil (vgl. MATTHECK (2006B)) erfolgt im Rahmen dieser Arbeit die Definition der Zielfunktion wie in Formel (4-1) dargestellt.

$$f(Y) = \min_{Y \in \mathbb{R}} |\sigma_{\text{Ziel}} - \sigma_{\text{Ist}}(Y)| \quad (4-1)$$

Durch das in Formel (4-1) beschriebene Optimierungsproblem wird die Entwurfsvariable Y so verändert, dass der Term aus festgelegter Zielspannung σ_{Ziel} und Ist-Spannung im Bauteil σ_{Ist} , ein Minimum bei Null bildet. Dadurch ergibt sich die identische Spannung für σ_{Ziel} und σ_{Ist} . Die Betragsfunktion wird benötigt, da aus dem Term ebenfalls ein Minimum resultieren könnte, welches nicht Null ist. Somit wäre das Optimierungsproblem gelöst, eine Übereinstimmung von Ziel- und Ist-Spannung steht jedoch nicht zur Verfügung.

Die Zielspannung σ_{Ziel} , die nach der erfolgreichen Anwendung der Methodik im Bauteil vorhanden sein soll, wird durch die Konstrukteurin oder den Konstrukteur, in Abhängigkeit des Werkstoffs, gewählt. Dabei kann es sich beispielsweise um die Streckgrenze R_e oder die maximale Zugfestigkeit R_m eines Werkstoffs handeln. Für die Festlegung der Zielspannung wird empfohlen, keinen einzelnen Spannungswert zu wählen, sondern einen Spannungsbereich als sogenannten Zielbereich anzugeben. Andernfalls kann im Rahmen der Lösung des Optimie-

4.3 Randbedingungen der Methodik

rungsproblems eine endlose Optimierungsiteration entstehen. Nach SCHUMACHER (2013) liegt in der Strukturmechanik der Zielbereich bei 3 % Abweichung von der Zielgröße. Ebenso wird empfohlen, einen Sicherheitsfaktor S zu verwenden. Für die Berechnung der Ist-Spannung σ_{Ist} wird die von-Mises-Vergleichsspannung herangezogen, wodurch ein direkter Vergleich mit den Ergebnissen aus dem einachsigen Spannungszustand gegeben ist (vgl. Abschnitt 2.5.2).

4.3.3 Entwurfsvariablen

Auswahl der Entwurfsvariablen

Bei der Betrachtung von Sandwichbauteilen mit Wabenkernen steht eine Vielzahl an potenziellen Entwurfsvariablen, wie beispielsweise in Abbildung 4-4 aufgelistet, zur Verfügung. Die nachfolgende Diskussion und Auswahl der Entwurfsvariablen erfolgt auf Basis des Betrachtungsraums dieser Arbeit (siehe Abschnitt 1.2.2). Daher wird die Gestaltung der Deckschichten sowie die Höhe des Wabenkerns als Entwurfsvariable nicht berücksichtigt.

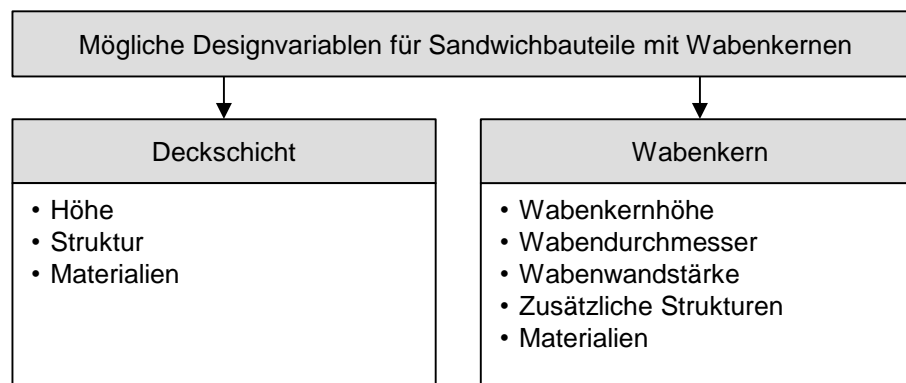


Abbildung 4-4: *Potenzielle Entwurfsvariablen für Sandwichbauteile mit Wabenkern*

Die Integration zusätzlicher Strukturen, wie in Abbildung 4-5 links am Beispiel von Schubgurten dargestellt, kann unter anderem in W- bzw. L-Richtung erfolgen. Dieser Ansatz kommt bereits in Konstruktionsmethoden zum Einsatz, wenn die Bauteilsteifigkeit erhöht werden soll. Die einfache mathematische Parametrisierbarkeit ist ebenfalls gegeben. Allerdings ist die Anforderung zur Umsetzung eines homogenen Spannungsverlaufs mit diesem Ansatz nur bedingt möglich, da eine lokale Anpassung der Schubgurte meist nicht umsetzbar ist. Des Weiteren werden durch die Gurte entlang des gesamten Bauteils, zusätzliche Massen mit

4 Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung additiv gefertigter Wabenkerne

eingebraucht, die meist nicht benötigt werden und die reine hexagonale Struktur ist nicht mehr gegeben.

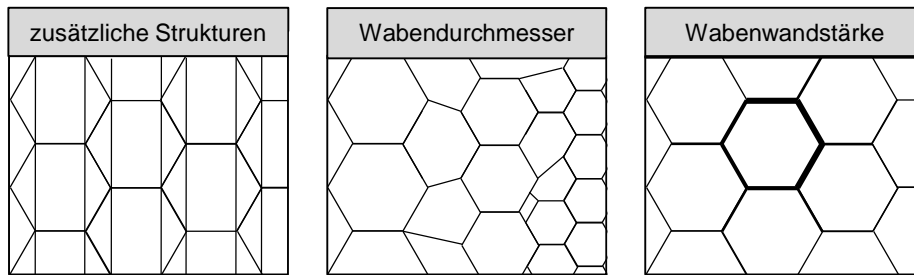


Abbildung 4-5: Schematische Darstellung möglicher Entwurfsvariablen

Eine weitere potentielle Entwurfsvariable für die Strukturoptimierung ist der Wabendurchmesser, wie in der Mitte von Abbildung 4-5 dargestellt. Durch die Möglichkeit der lokalen Variation dieses Parameters, können Spannungsspitzen im Bauteil abgebaut werden. Das heißt, dass an Bereichen mit hohen Spannungen, Waben mit kleinem Durchmesser und bei niedrigen Spannungen, Waben mit großen Durchmessern verwendet werden. Dadurch erfolgt ebenfalls eine Massenreduktion im Bauteil. Zusätzlich kann durch die Variation des Wabendurchmessers auch die Steifigkeit innerhalb des Kerns angepasst werden. Ein Nachteil dabei ist jedoch, dass ein hoher Konstruktionsaufwand bzw. eine komplexe mathematische Beschreibung des Durchmessers notwendig ist, wenn stark variierende Spannungsverläufe im Bauteil auftreten. Aufgrund der unterschiedlichen Wabengrößen, die in Abhängigkeit zur Bauteilspannung entstehen, muss die hexagonale Struktur verzerrt bzw. teilweise aufgelöst werden. Eine weitere mögliche Entwurfsvariable bildet, wie rechts in Abbildung 4-5 dargestellt, die Änderung der Wabenwandstärke. Durch die einfache Möglichkeit zur Parametrisierung, kann auch hier eine lokale Anpassung der Bauteilmasse an die Spannungsspitzen erfolgen. Die Änderung der Steifigkeit ist durch die festgelegte regelmäßige Struktur nur bedingt umsetzbar. Ein hohes theoretisches Potenzial kann dem Ansatz der gezielten Werkstoffvariation im Bauteil zugesprochen werden. Fertigungstechnisch ist dieser Ansatz aktuell nur eingeschränkt umsetzbar. Daher kann diese Entwurfsvariable im Rahmen der Arbeit nicht berücksichtigt werden.

Schlussfolgernd kann somit festgehalten werden, dass mit den unterschiedlichen Entwurfsvariablen verschiedene Zielgrößen adressiert werden können. So bietet beispielsweise die Integration von Schubgurten hauptsächlich die Möglichkeit zur Steigerung der Steifigkeit. Soll die Zielfunktion jedoch in Abhängigkeit einer Spannung aufgestellt werden, so zeigen, unter Berücksichtigung der beschriebe-

4.3 Randbedingungen der Methodik

nen Einschränkungen, die Entwurfsvariablen Wabendurchmesser und Wabenwandstärke das höchste Potenzial. Da im Rahmen dieser Arbeit als Zielfunktion die Spannung festgelegt wurde, werden in den nachfolgenden Kapiteln die Wabenwandstärke und der Wabendurchmesser als Parameter für die Strukturoptimierung verwendet. Eine Bestätigung der Auswahl dieser Entwurfsvariablen erfolgt in WOHLERS (2005). Hierbei wird für eine belastungsgerechte Auslegung von Wabenkernen die Variation des Wabendurchmessers und der Stegdicke genannt.

Durch die nachfolgende Bewertung in Tabelle 4-1, soll die Priorisierung der ausgewählten Entwurfsvariablen zur Gestaltung des Wabenkerns festgelegt werden. Als Bewertungsgrundlage werden die Anforderungen aus Abschnitt 3.2 herangezogen, wodurch sich die drei Hauptanforderungen: Parametrisierbarkeit, Umsetzung einer homogenen Spannungsverteilung im Wabenkern sowie Steigerung der Bauteilsteifigkeit, ergeben. Für die Bewertung der einzelnen, nicht gewichteten Kategorien werden ein oder null Punkte vergeben. Bei gleicher Wertigkeit werden beide Kategorien mit einem Punkt bewertet.

Tabelle 4-1: Bewertung der Entwurfsvariablen

Anforderung	Wabendurchmesser	Wabenwandstärke
Steigerung der Bauteilsteifigkeit	1	0
Lokale Variation des Füllgrads	1	1
Homogene Spannungsverteilung	1	1
Regelmäßige Strukturierung	0	1
Möglichkeit zur Automatisierung	0	1
Konstruktionsaufwand	0	1
Summe:	3	5

Auf Basis des durchgeführten Vergleichs zwischen den Entwurfsvariablen kann festgehalten werden, dass die Wabenwandstärke als primäre Entwurfsvariable festgelegt wird. Ist eine homogene Spannungsverteilung im Wabenkern allein durch die Wabenwandstärke nicht umsetzbar, wird dies durch die Anpassung des Wabendurchmessers umgesetzt. Jedoch erfolgt eine Änderung des Wabendurch-

4 Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung additiv gefertigter Wabenkerne

messers nicht, wie in Abbildung 4-5 mittig dargestellt, durch die Auflösung bzw. Verzerrung der regelmäßigen Struktur. Die Kombination aus der Integration von Strukturen und der Anpassung des Wabendurchmessers, wie in Abbildung 4-6 umgesetzt, bietet die Möglichkeit zur Steigerung der Feingliedrigkeit und der lokalen Versteifung im Bauteil. Durch diesen Ansatz wird die hierarchische Bauweise, welche bereits in der Bionik zur Anwendung kommt (vgl. Abschnitt 2.2.3), aufgegriffen. Folglich kann, durch die definiert eingebrachten zusätzlichen Strukturen, eine vereinfachte Parametrisierung und Automatisierung der Änderung des Wabendurchmessers erfolgen.

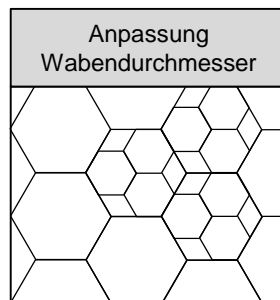


Abbildung 4-6: Lokale Anpassung des Wabendurchmessers

Berechnung der initialen Werte für die Entwurfsvariablen

Die Festlegung der initialen Wabenwandstärke $t_{initial}$ und des initialen Wabendurchmessers $d_{s,initial}$ kann durch zwei Varianten erfolgen:

- Die erste Möglichkeit ist die freie Wahl der Parameter. Es wird jedoch empfohlen, die Werte so zu wählen, dass diese innerhalb des festgelegten Definitions- bzw. Gültigkeitsbereich liegen. Ansonsten kann es zu Abweichungen zwischen den gewählten Parametern und dem gefertigten Bauteil kommen.
- Die zweite Variante zur Festlegung der Wabenparameter beruht auf der analytischen Lösung eines Optimierungsproblems. Hierbei wird bereits eine erste Näherungslösung berechnet, welche die Anzahl an Optimierungszyklen bei der belastungsgerechten Auslegung verringert. Die Anwendung dieser Methode kann ebenfalls erfolgen, wenn ein Bauteil flächig und homogen auf Druck belastet wird, da jede Wabenstruktur die identischen Lasten erfährt.

Die erste Variante wird empfohlen, wenn nur der Wabenkern ohne eine belastungsgerechte Auslegung erzeugt werden soll. Die Verwendung der zweiten Möglichkeit ist zu präferieren, wenn eine anschließende belastungsgerechte Aus-

4.3 Randbedingungen der Methodik

legung erfolgen soll. Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich die zweite Variante betrachtet, da die Leichtbauoptimierung von Bauteilen hier im Fokus steht.

Die Berechnung der initialen Werte für die Entwurfsvariablen erfolgt an einer einzelnen Wabenstruktur. Dafür wird die Wabe mit der betragsmäßig maximal auftretenden Betriebskraft belastet. Die Ergebnisse aus dem Optimierungsproblem für eine Wabe werden anschließend auf die gesamte Struktur übertragen. Dadurch kann bereits nur durch die initiale Auslegung ein tragfähiger Wabenkern zur Verfügung gestellt werden. Hierzu muss zunächst die mathematische Beschreibung der einzelnen Zusammenhänge erfolgen. Gemäß der Anforderung an die Methode, in Bezug auf die Allgemeingültigkeit, sind die nachfolgend verwendeten Formeln alle in Abhängigkeit eines regelmäßigen n -Ecks beschrieben, wobei hier gilt: $n > 2$ mit $n \in \mathbb{N}$. Die Vorgehensweise im Rahmen dieser Arbeit erfolgt am Beispiel einer hexagonalen Wabe, da diese, wie bereits beschrieben, das höchste Leichtbaupotenzial aufweist. Die Abhängigkeiten zur Berechnung der Querschnittsfläche einer hexagonalen Wabenstruktur mit $n=6$ Ecken, in Bezug auf die Entwurfsvariablen Wandstärke und Wabendurchmesser, ist in Abbildung 4-7 dargestellt.

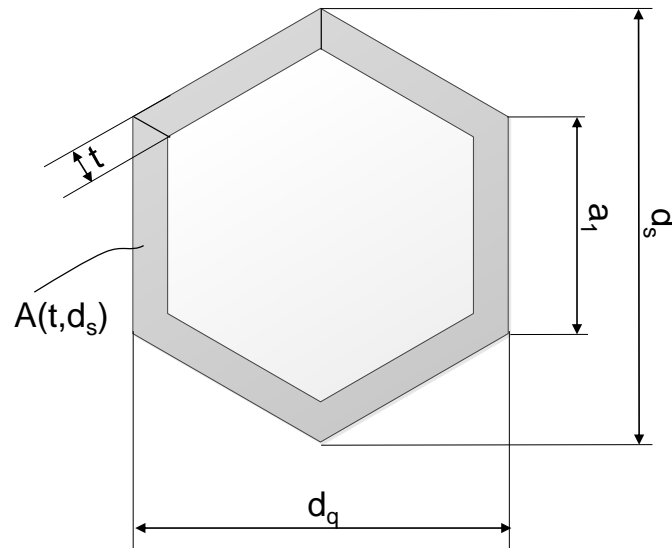


Abbildung 4-7: Zusammenhänge zur Berechnung von $A(t, d_s)$

Hierfür muss zusätzlich zur Wandstärke t eine Variable bestimmt werden, welche den Wabendurchmesser beschreibt. Je nach Positionierung der hexagonalen Wabe, steht die Strecke d_q als horizontaler Durchmesser:

4 Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung additiv gefertigter Wabenkerne

$$\begin{aligned}d_q &= 2 \cdot y \\ &= a_1 \cdot \sqrt{3} \\ &= \frac{d_s}{2} \cdot \sqrt{3}\end{aligned}\tag{4-2}$$

und die Strecke d_s als vertikaler Durchmesser:

$$d_s = 2 \cdot a_1\tag{4-3}$$

zur Verfügung. Im Rahmen dieser Arbeit wurde d_s als beschreibende Variable für den Durchmesser gewählt, da dieser den äußeren Durchmesser einer hexagonalen Wabe beschreibt und somit die maximalen Abmessungen direkt ermittelt werden können. Für die Berechnung der Fläche ist nur einer der beiden Durchmesser notwendig, da der andere daraus resultiert. Im ersten Schritt erfolgt die Betrachtung einer Wabenwand, wie in Abbildung 4-8 dargestellt.

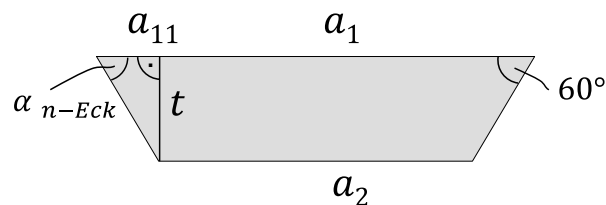


Abbildung 4-8: Trapez-Ausschnitt einer hexagonalen Wabe

Für die lange Seite des Trapezes wird die Bezeichnung a_1 und für die kurze Seite a_2 gewählt. Die allgemeine Berechnung des Winkels in einem regelmäßigen n -Eck beschreibt Formel (4-4).

$$\alpha_{n-Eck} = \frac{180^\circ - \frac{360^\circ}{(n)}}{2}\tag{4-4}$$

In dieser Arbeit ergibt sich für den Winkel zwischen zwei Wabenwänden, gemäß der Wabentheorie, ein Wert von 120° . Folglich ist der Winkel α in einem Trapez für eine hexagonale Wabe 60° .

Der Abstand a_{11} beschreibt die Strecke, die rechts und links zu a_2 hinzugefügt werden muss, dass sich a_1 ergibt. Die Strecke a_{11} wird durch die Winkelfunktion in Formel (4-5) und die Wabenwandstärke t berechnet.

4.3 Randbedingungen der Methodik

$$a_{11} = \frac{t}{\tan(\alpha)} \quad (4-5)$$

Aus der Formel (4-5) wiederum, kann a_2 in Abhängigkeit von a_1 und t dargestellt werden.

$$a_2(a_1, t) = a_1 - \frac{2t}{\tan(\alpha)} \quad (4-6)$$

Die allgemeine Formel zur Berechnung der Querschnittsfläche eines Trapezes $A(\text{Trapez})$ ist in (4-7) dargestellt. Für ein regelmäßiges Sechseck kann mit (4-8) die Querschnittsfläche bestimmt werden.

$$A(\text{Trapez}) = \frac{1}{2} \cdot (a_1 + a_2) \cdot t \quad (4-7)$$

$$A(\text{Wabe}) = \frac{6}{2} \cdot (a_1 + a_2) \cdot t \quad (4-8)$$

Durch Umformen kann aus Formel (4-3) mit (4-9) die Strecke a_1 berechnet werden.

$$a_1 = \frac{d_s}{2} \quad (4-9)$$

Aufgrund der Formel (4-8) ergibt sich für die gesamte Querschnittsfläche einer hexagonalen Wabe, in Abhängigkeit von d_s und t , Formel (4-10).

$$\begin{aligned} A(\text{Wabe}) &= 3 \cdot (a_1 + a_2) \cdot t \\ &= 3 \cdot \{a_1 + [a_1 - (2 \cdot a_{11})]\} \cdot t \\ &= 3 \cdot \left[\frac{d_s}{2} + \frac{d_s}{2} - \left(t \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \right) \right] \cdot t \\ &= 3 \cdot t \left(d_s - t \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right) \right) \\ &= 3 \cdot t \cdot d_s - \left(\frac{6}{\sqrt{3}} \right) \cdot t^2 \end{aligned} \quad (4-10)$$

Im nächsten Schritt muss eine Verknüpfung zwischen Zielspannung σ_{Ziel} , aufgebrachtener Kraft F und der Fläche $A(t, d_s)$ hergestellt werden. Dazu wird die Formel zur Berechnung der Spannung σ nach der Fläche A umgeformt.

4 Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung additiv gefertigter Wabenkerne

$$A(t, d_s) = \frac{F}{\sigma_{Ziel}} \quad (4-11)$$

Zuletzt müssen die Rand- und Nebenbedingungen für die Optimierung des Wabenkerns ebenfalls in Form einer Gleichung, einer Ungleichung oder durch einen Definitionsbereich berücksichtigt werden. Zur Findung der initialen Werte für die Entwurfsvariablen ist die Zielfunktion aus Formel (4-1) entsprechend mit den Entwurfsvariablen zu erweitern.

$$f(t, d_s) = \min_{t, d_s} |\sigma_{Ziel} - \sigma_{Ist}(t, d_s)| \quad (4-12)$$

Das Ergebnis durch Einsetzen der Formel (4-10) und (4-11) in Formel (4-12) ist:

$$f(t, d_s) = \min_{t, d_s} \left| \sigma_{Ziel} - \frac{F}{3 \cdot t \cdot d_s - \left(\frac{6}{\sqrt{3}}\right) \cdot t^2} \right| \quad (4-13)$$

Somit entsteht durch Formel (4-13) ein nichtlineares, zweidimensionales Optimierungsproblem. Die Nichtlinearität ergibt sich aus dem quadratischen Exponent t^2 , sodass hier auch von einem quadratischen Optimierungsproblem gesprochen werden kann. Die Beschreibung als zweidimensionales Optimierungsproblem basiert darauf, dass zwei Entwurfsvariablen vorliegen.

Die Lösung des Optimierungsproblems erfolgt durch zweimaliges Ableiten der Zielfunktion nach den Entwurfsvariablen. Die erste Ableitung ist gleich Null zu setzen. Mit der zweiten Ableitung ist zu überprüfen, ob es sich um ein Minimum oder ein Maximum handelt (SCHUMACHER 2013). Somit ergibt sich für Formel (4-13):

$$\frac{\partial f(t, d_s)}{\partial t d_s} = 0 \quad (4-14)$$

Als Ergebnis des Optimierungsproblems stehen abschließend die initialen Werte der Entwurfsvariablen zur Verfügung.

4.3.4 Nebenbedingungen

Im Rahmen der Methodik sind in Bezug auf die Entwurfsvariablen Wabenwandstärke t und Wabendurchmesser d_s mindestens die nachfolgend beschriebenen

4.3 Randbedingungen der Methodik

Nebenbedingungen zu berücksichtigen. Für alle Wabenwandstärken t gilt in dieser Arbeit allgemein die Formel (4-15).

$$t_{ug} < t < t_{og} \quad (4-15)$$

Die untere Grenze der Wabenwandstärke t_{ug} basiert auf den Limitierungen, welche sich aus dem angewandten Werkstoff und dem gewählten additiven Fertigungsverfahren ergeben. Daher wird zur Definition der minimalen Wandstärke auf die Konstruktionsempfehlungen in ADAM & ZIMMER (2014) und THOMAS (2009) verwiesen. Die obere Grenze der Wabenwandstärke t_{og} leitet sich aus den allgemeinen Forderungen im Leichtbau nach Feingliedrigkeit ab (KLEIN 2009). Abbildung 4-9 zeigt eine Wabenstruktur mit einem Verhältnis von Wabendurchmesser zu Wabenwandstärke, das zu einem nahezu massiven Bauteil führt.

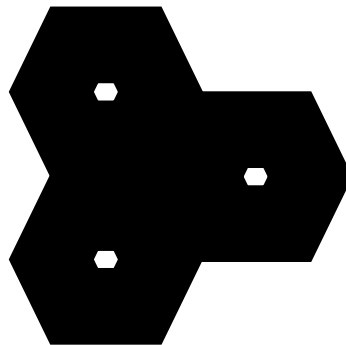


Abbildung 4-9: Massive Wabenstruktur

Die Feingliedrigkeit wird im Rahmen dieser Arbeit durch das Verhältnis von Wabenwandstärke zu Wabendurchmesser bestimmt. Aus den genannten Konstruktionsempfehlungen und Leichtbauanforderungen ergibt sich für diese Arbeit ein zulässiger Bereich der Wandstärke t von:

$$t_{ug} < t < \frac{d_s}{2} \quad (4-16)$$

Des Weiteren gilt für den Durchmesser d_s die Formel (4-17).

$$d_s > d_{s,ug} \quad (4-17)$$

Die Definition des minimalen Wabendurchmessers liegt ebenfalls den Konstruktionsrichtlinien in ADAM & ZIMMER (2014) und THOMAS (2009) zugrunde. Die-

4 Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung additiv gefertigter Wabenkerne

ser wird, identisch zur minimalen Wabenwandstärke, von den Parametern Werkstoff und Fertigungsverfahren bestimmt.

Eine weitere Nebenbedingung bei der Bauteil实现ung ist die Steifigkeit. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese durch die Bauteilverschiebung dargestellt. Wird eine Bauteilsubstitution durchgeführt, müssen aufgrund der Vergleichbarkeit, das initiale und das optimierte Bauteil jeweils mindestens die vorgegebene Zielverschiebung γ_{Ziel} , gemäß Formel (4-18), aufweisen.

$$\gamma_{Optimiert} \wedge \gamma_{Original} \leq \gamma_{Ziel} \quad (4-18)$$

4.3.5 Funktionsintegration

Im Rahmen der Methodik ist ebenfalls das Potenzial der Funktionsintegration durch die additive Fertigung zur Gestaltung von Wabenkernen für Sandwichbauteile zu nutzen. Sollen zusätzliche Funktionen, wie z. B. Inserts, in den Wabenkern integriert werden, so müssen diese Randbedingungen gleichermaßen in der Spezifikationsliste dokumentiert werden. Auf Basis der durchgeführten Aufnahme der Randbedingungen werden die in Tabelle 4-2 dargestellten Ansätze zur Funktionsintegration empfohlen.

Tabelle 4-2: Funktionsintegration in Wabenkernen

Resultat aus den Randbedingungen	Notwendige Methode
Punktuelle Lasten werden aufgebracht, Anbindungen zu anderen Bauteilen werden benötigt	Methode zur Integration von Inserts
Bauteilabmessungen sind größer als der zur Verfügung stehende Anlagenbauraum	Methode zur Integration von Verbindungselementen

4.3.6 Materialien und Fertigungsverfahren

Für die Materialauswahl von Wabenkernen in Sandwichbauteilen wird empfohlen, dass der Werkstoff für den Wabenkern einen niedrigeren E-Modul als der Werkstoff der Deckschicht aufweist. Außerdem muss eine schub- und zugfeste

4.3 Randbedingungen der Methodik

Verbindung zwischen den beiden Deckschichten und dem Wabenkern vorhanden sein. Für die belastungsgerechte Optimierung des Sandwichbauteils müssen folgende Daten der Deckschicht- und der Wabenkernmaterialien mindestens bekannt sein:

- Materialdichte
- Zugfestigkeit
- Elastizitätsmodul
- Schubmodul
- Streckgrenze
- Bruchdehnung
- Querkontraktionszahl

Die additive Fertigung wird in dieser Arbeit als Standardproduktionsverfahren festgelegt. Grund hierfür ist, dass in Kombination mit diesem Verfahren das Leichtbaupotenzial in Wabenkernen für Sandwichbauteile, gemäß der vorgestellten Methodik, besser ausgenutzt werden kann. Im Anschluss an die Auswahl des additiven Fertigungsverfahrens, wie z. B. Lasersintern oder Laserstrahlschmelzen, muss überprüft werden, ob der Wabenkern im ausgewählten Anlagenbau- raum gefertigt werden kann oder ob eine Aufteilung des Bauteils erfolgen muss. Dazu wird das Werkstück mit einer *bounding box*, also einem Rechteck umschlossen (ERICSON 2005). Für den Bauraum wird ebenfalls ein Hüllkörper erstellt. Anschließend erfolgt ein Vergleich der Abmessungen der beiden Hüllkörper:

- $bounding\ box_{Bauteil} < bounding\ box_{Bauraum}$

Das zu fertigende Bauteil kann mit der ausgewählten Anlage aufgebaut werden. Es muss keine Anpassung des Bauteils an den Bauraum der Anlage erfolgen (vgl. Abbildung 4-10 links).

- $bounding\ box_{Bauteil} \geq bounding\ box_{Bauraum}$

Das zu fertigende Bauteil kann nicht mit dem zur Verfügung stehenden Anlagensystem einteilig gefertigt werden. Das Bauteil muss in einzelnen Komponenten aufgebaut werden (vgl. Abbildung 4-10 rechts).

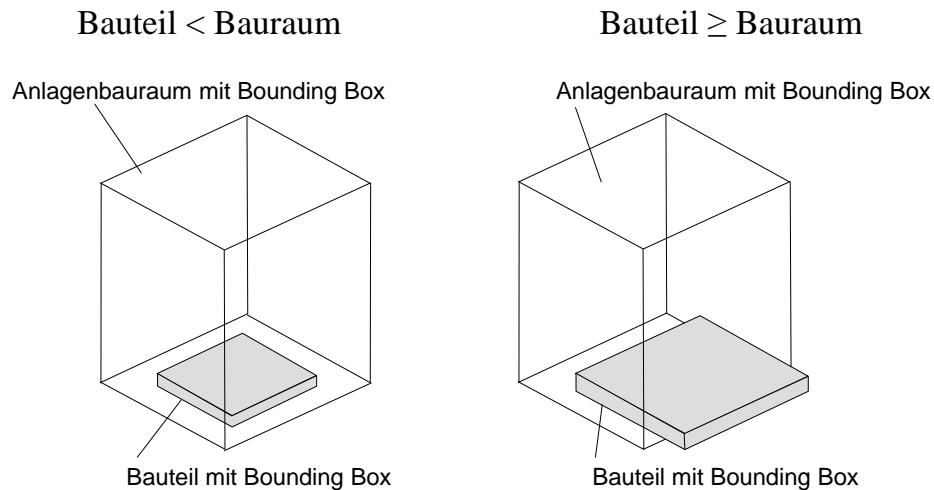


Abbildung 4-10: Vergleich: Bauteilgröße und Anlagenbauraum

4.4 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Kapitels wird eine Methodik vorgestellt, mit der Wabenkerne für Sandwichbauteile funktions- und belastungsgerecht ausgelegt werden können. Zur systematischen Dokumentation der einzelnen Randbedingungen wird eine Spezifikationsliste entwickelt, welche Konstrukteurinnen und Konstrukteure bei der Anwendung der Vorgehensweise unterstützen soll. Die Methodik beinhaltet drei Methoden: Die erste befasst sich mit der Erstellung von Wabenstrukturen auf einer komplex gekrümmten Fläche. Die Integration von Funktionen in Wabenkerne bildet die zweite Methode, bevor mit dem dritten Vorgehen die belastungsgerechte Auslegung des Wabenkerns realisiert werden kann.

5 Methode zur Anpassung von Wabenstrukturen an eine Fläche

5.1 Aufbau des Kapitels

Ziel des Kapitels ist es, eine Vorgehensweise aufzuzeigen, die Konstrukteurinnen und Konstrukteuren die Möglichkeit eröffnet, Wabenstrukturen an ebene und gekrümmte Flächen so anzupassen, dass jede Wabenwand senkrecht zu dieser ausgerichtet ist. Die Entwicklung der Methode erfolgt allgemeingültig, wird jedoch am Beispiel einer rechteckigen Grundfläche und hexagonalen Wabenstrukturen aufgezeigt. Den Aufbau des Kapitels zeigt Abbildung 5-1.

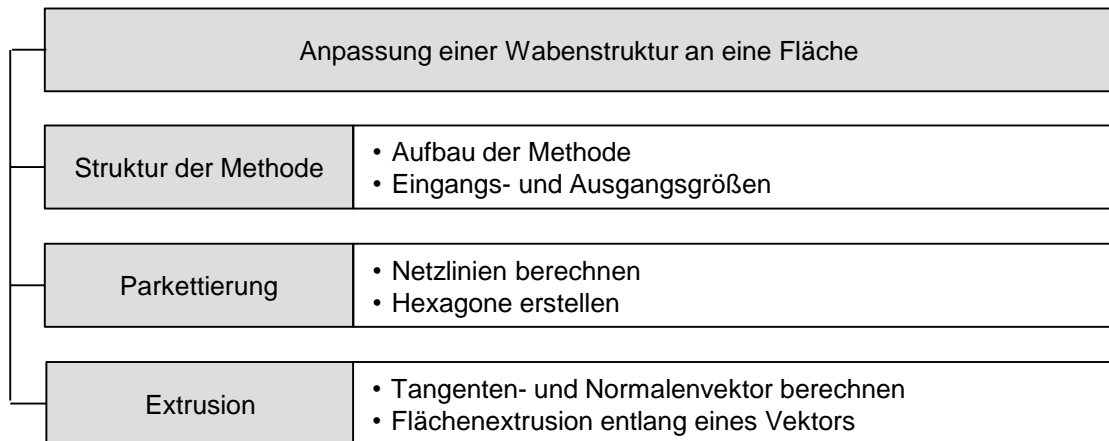


Abbildung 5-1: Aufbau von Kapitel 5

5.2 Struktur der Methode

Die Methode, wie in Abbildung 5-2 dargestellt, besteht aus vier einzelnen Bausteinen, welche bei der Anwendung sequenziell zu durchlaufen sind. Die Eingangsgrößen der Methode basieren auf der in Kapitel 4 erstellen Spezifikationsliste.

Den ersten Schritt in der Methode bildet die Generierung der Netzlinien. Hierbei wird ein Rechtecknetz auf die Fläche aufgebracht, bei dem die Schnittpunkte der einzelnen Linien die Eck- bzw. Hilfspunkte der einzelnen Wabenstrukturen bilden. Darauf aufbauend erfolgt die Parkettierung der Fläche.

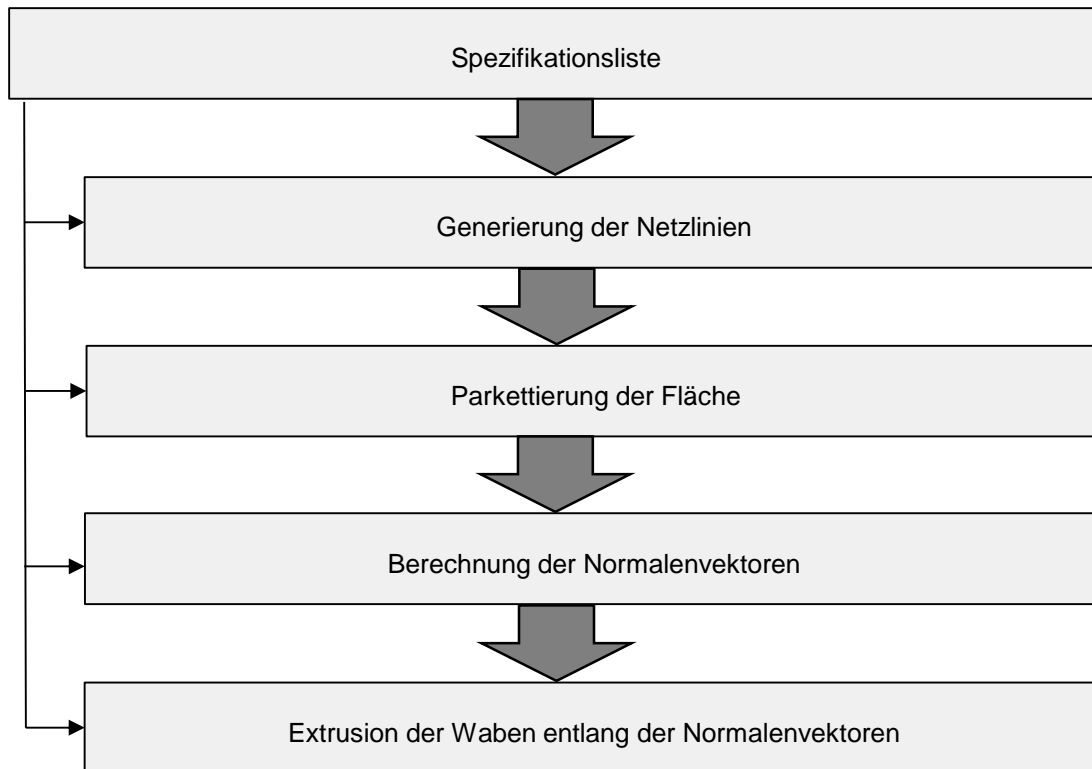


Abbildung 5-2: Methode zur Anpassung von Wabenstrukturen an eine Fläche

Die einzelnen Eckpunkte werden mittels eines Polygonzugs zu Wabenstrukturen verbunden. Zur anschließenden Extrusion müssen für jeden Eck- und Konstruktionspunkt zunächst die beiden Tangentenvektoren und anschließend der Normalenvektor berechnet werden. Die Extrusion der Polygonzüge entlang des vorher berechneten Normalenvektors bildet den Abschluss der Methode. Als Ergebnis steht eine Wabenstruktur zur Verfügung, welche auf einer ebenen oder gekrümmten Fläche entlang der lokalen Normalenvektoren extrudiert ist.

5.2.1 Generierung der Netzlينien

Basierend auf der Randbedingung aus Abschnitt 3.2, dass es sich bei der zur Anwendung kommenden Fläche um eine differenzierbare Mannigfaltigkeit handeln muss, kann die zu betrachtende Fläche durch die sogenannte Parameterdarstellung beschrieben werden. Hierbei kann, die Fläche ϕ , die eine Punktmenge des dreidimensionalen Raumes ist, als vektorwertige Funktion \vec{X} zweier Parameter u und v beschrieben werden (GFRERRER 2011). Die mathematische Beschreibung nach GRÜNDEMANN (2011) zeigt Formel (5-1).

5.2 Struktur der Methode

$$X: U \rightarrow \mathbb{R}^3 \text{ gemäß } s = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \in U \rightarrow \vec{X}(u, v) = \begin{pmatrix} X_1(u, v) \\ X_2(u, v) \\ X_3(u, v) \end{pmatrix} \quad (5-1)$$

Die Formel beschreibt allgemein, dass X von der Menge U in die Menge \mathbb{R}^3 abbildet. Dies bedeutet, wenn s die Parametermenge U durchläuft, besteht der Wertebereich dieser Abbildung aus allen Ortsvektoren $X(u, v)$ (GRÜNDEMANN 2011). Unter Verwendung der Transformation φ_{Abb} , ist eine Überführung der Punkte von der Fläche U auf die Fläche ϕ gegeben. Dadurch kann jeder Punkt der zu betrachtenden Fläche, über ein kartesisches Koordinatensystem im Euklidischen Raum, beschrieben werden. Die Anwendung der Parameterdarstellung einer Fläche zeigt Abbildung 5-3.

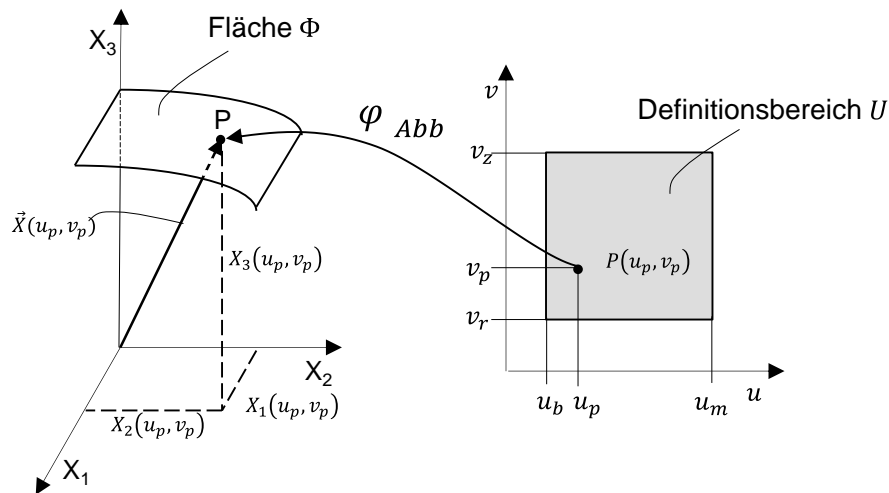


Abbildung 5-3: Parameterdarstellung einer Fläche (in Anlehnung an GFRERRER (2011))

Der Ursprung des Koordinatensystems muss sich an einem Eckpunkt der Fläche befinden, was die Erstellung der Waben bei der anschließenden Parkettierung erleichtert. Das dreidimensionale Problem wird somit durch die Parameterdarstellung auf ein ebenes Problem reduziert. Dadurch kann jeder Punkt der Fläche über ein ebenes Koordinatensystem beschrieben werden. Dies ermöglicht es, dass im nächsten Schritt die Aufbringung der Netzlinien erfolgen kann.

Die Verwendung von Netzlinien bildet bereits einen etablierten Ansatz zur Einteilung von Flächen und Volumina. Bei einem Globus beispielsweise, stehen die Netzlinien für die einzelnen Breiten- und Längengrade. Das lokale Koordinatensystem, welches entlang der Fläche aufgespannt ist, erlaubt es, durch die Variation der Laufvariablen u und v , Netzlinien aufzubringen. Bei der Erstellung der

5 Methode zur Anpassung von Wabenstrukturen an eine Fläche

Netzlinsen gilt es, die Abstände so zu wählen, dass die Schnittpunkte der u - und v -Linien Eck- bzw. Hilfspunkte für die anschließende Parkettierung darstellen. Die Basis hierzu bilden die vorher festgelegten initialen Designparameter $d_{s;initial}$ und $t_{initial}$ aus der Spezifikationsliste. Für die Berechnung der Abstände zur Erstellung der Netzlinsen wird auf die bereits hergeleitete Formel (4-2) zur Berechnung von d_q und auf die Formel (4-3) zur Berechnung von d_s zurückgegriffen. In Abbildung 5-4 ist der Zusammenhang zwischen bekannten Durchmessern und der Einteilung zur Erstellung der Abstände der Netzlinsen dargestellt. Die Einteilung der Eck- und Hilfspunkte wurde so gewählt, dass auf die vorher definierten Formeln und Zusammenhänge weiter zurückgegriffen werden kann. Des Weiteren ergibt sich daraus die Möglichkeit, dass nur vollständige Wabenwände an den Randbereichen und somit regelmäßige Strukturen entstehen.

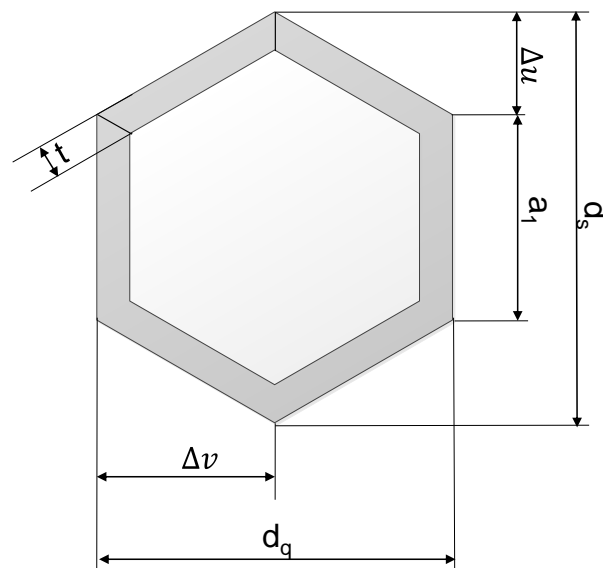


Abbildung 5-4: Unterteilung einer hexagonalen Wabenstruktur

Der Abstand der Gitternetzlinien in u -Richtung Δu ist mit Formel (5-2) und der Abstand in v -Richtung Δv ist mit Formel (5-3) zu berechnen.

$$\Delta u = \frac{a_1}{2} \quad (5-2)$$

$$\Delta v = a_1 \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (5-3)$$

Bevor auf die berechneten Schnittpunkte der Gitternetzlinien zugegriffen werden kann, müssen diese in Abhängigkeit des u, v -Koordinatensystems der Abbildung

5.2 Struktur der Methode

definiert werden. Für die Gestaltung der horizontalen Netzlinien gilt Formel (5-4) und für die vertikalen Netzlinien ist Formel (5-5) anzuwenden.

$$x_{=,i} := x(u_i, v) \text{ mit } u_i \in \zeta \quad (5-4)$$

$$x_{\parallel,j} := x(u, v_j) \text{ mit } v_j \in \omega \quad (5-5)$$

Bei der Anwendung von Formel (5-4) bzw. (5-5) sind die jeweiligen Definitionsmengen (5-6) und (5-8) bzw. (5-7) und (5-9) zu beachten.

$$\zeta = \{u_b \dots u_m\} \quad (5-6)$$

$$\omega = \{v_r \dots v_z\} \quad (5-7)$$

$$i = b \dots m \quad (5-8)$$

$$j = r \dots z \quad (5-9)$$

Aus der festlegten Definition können dadurch die Schnittpunkte P_{ij} der Netzlinien mit Formel (5-10) beschrieben werden.

$$P_{ij} = x(u_i, v_j) \quad (5-10)$$

Die Erstellung der Netzlinien in u - und v -Richtung ist schematisch in Abbildung 5-5 dargestellt. Die Menge der Netzlinien in u - und v -Richtung zeigen Formel (5-11) und Formel (5-12).

$$V = \{v_o \dots v_z\} \quad (5-11)$$

$$O = \{u_o \dots u_m\} \quad (5-12)$$

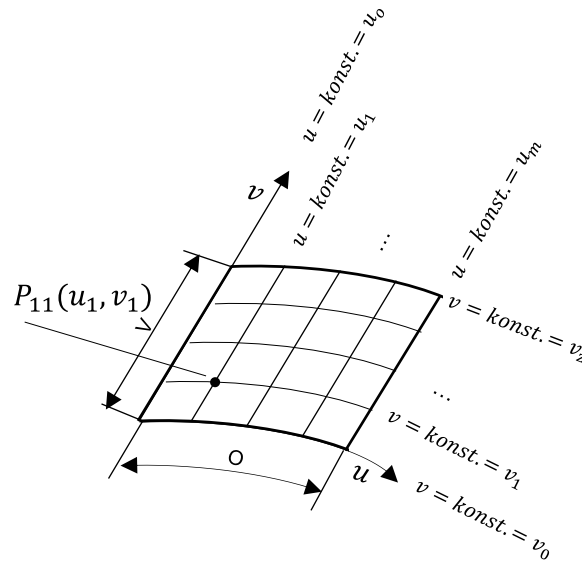


Abbildung 5-5: Netzlinien (in Anlehnung an PAPULA (2009))

Nach erfolgreicher Aufbringung der Netzlinien in u - und v -Richtung, kann im nächsten Schritt die Parkettierung der Fläche mit Wabenstrukturen erfolgen. Eine erfolgreiche Erzeugung der Netzlinien ist in Abbildung 5-6 dargestellt.

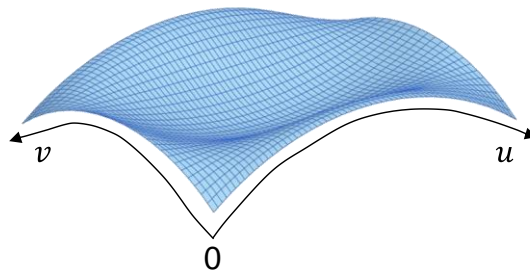


Abbildung 5-6: Erzeugung von Netzlinien auf einer doppelt-gekrümmten Freiformfläche

5.2.2 Parkettierung der Fläche mit Waben

Die Eingangsgrößen für die Parkettierung bilden die Schnittpunkte der Netzlinien aus dem vorhergehenden Abschnitt. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf hexagonalen Strukturen. Daher erfolgt die Aufteilung der Fläche unter Verwendung dieser Parkettierungsform. Die Übertragung auf weitere Flächen ist ebenfalls gegeben. Der Startpunkt zur Parkettierung einer Fläche ist der Ursprung des lokalen Koordinatensystems, da von hier aus auch die Berechnung der Netzlinien bzw. der Schnittpunkte erfolgt ist.

5.2 Struktur der Methode

Die einzelnen Schnittpunkte der Netzlinien $P_{ij} = x(u_i, v_j)$ werden, auf Basis der Parkettierungsform, zu einem geschlossenen Polygon- bzw. Streckenzug auf der Ausgangsfläche ϕ verbunden. Zur vereinfachten Darstellung der Schnittpunkte, wird nachfolgend die Formel (5-13) verwendet.

$$P_q = \{P_{ij} | i = 1 \dots m, j = 1 \dots z\} \quad (5-13)$$

mit

$$q = 1 \dots w \quad (5-14)$$

Die mathematische Beschreibung des Polygonzugs erfolgt nach TURAU (2009) auf Basis der Graphentheorie. Hierfür werden die Begriffe Ecken- und Kantenmengen eingeführt. Die Eckenmenge beinhaltet alle im Polygonzug vorhandenen Eckpunkte bzw. Knoten. Als Kanten werden die Verbindungsstrecken zwischen den einzelnen Ecken definiert, die in der Kantenmenge zusammengefasst werden. Somit beschreibt Formel (5-15) die Ecken und Formel (5-16) die Kanten einer vollständigen hexagonalen Wabe.

$$E_{allg.} = \{P_1, P_2, \dots, P_n\} \quad (5-15)$$

$$E_{n=6} = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6\}$$

$$K_n^K = \{(P_1, P_2), (P_2, P_3) \dots (P_{n-1}, P_n), (P_n, P_1)\} \quad (5-16)$$

$$K_{n=6}^K = \{(P_1, P_2), (P_2, P_3), (P_3, P_4), (P_4, P_5), (P_5, P_6), (P_6, P_1)\}$$

Handelt es sich um einen geschlossenen Polygonzug bzw. eine ganze Wabe, wie beispielsweise in Abbildung 5-7 links dargestellt, besitzen P_w und P_1 die identischen Koordinaten. Trifft dies nicht zu, handelt es sich um einen offenen Polygonzug (vgl. Abbildung 5-7 rechts). (KAHMEN 2006; NITSCHKE 2014)

5 Methode zur Anpassung von Wabenstrukturen an eine Fläche

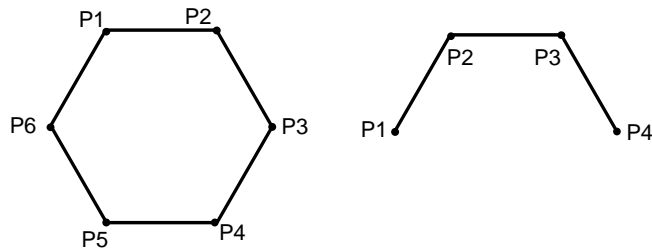


Abbildung 5-7: Geschlossener (links) und offener (rechts) Polygonzug am Beispiel eines Hexagons

Die erfolgreiche Durchführung der Parkettierung einer Fläche ist in Abbildung 5-8 dargestellt. Im Anschluss daran kann, auf Basis der Berechnung der Normalenvektoren, die Extrusion der hexagonalen Struktur erfolgen.

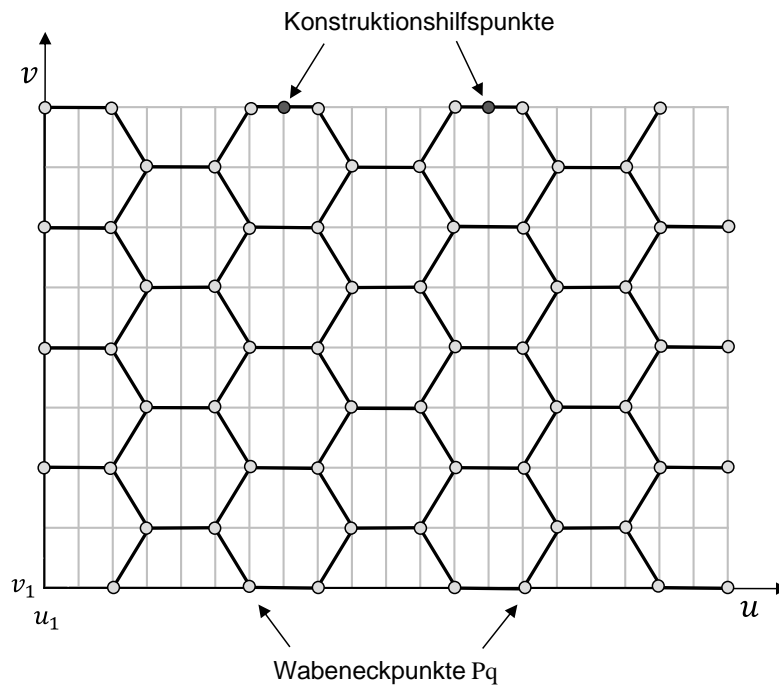


Abbildung 5-8: Beispiel einer Parkettierung mit hexagonalen Strukturen

5.2.3 Berechnung der Normalenvektoren

Zur Extrusion der Waben entlang des Normalenvektors müssen zunächst die Tangentialvektoren der Fläche im \mathbb{R}^3 für jeden einzelnen Wabeneckpunkt berechnet werden. Diese beiden Vektoren bilden wie in Abbildung 5-9 eine Ebene, auf der orthogonal der Normalenvektor steht. Die Tangentenvektoren müssen für jeden Punkt $P_q = x(u_i, v_j)$ bestimmt werden. Dazu sind die Netzklinien (Kurven)

5.2 Struktur der Methode

in u - und v -Richtung zu verwenden, welche am zu untersuchenden Punkt einen Schnittpunkt bilden.

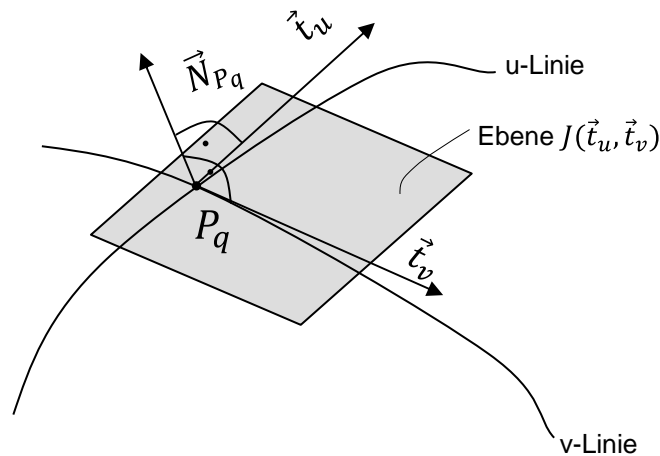


Abbildung 5-9: Normalenvektor einer Fläche (in Anlehnung an PAPULA (2009))

Aus den beiden Krümmungsradien errechnen sich in u -Richtung mit Formel (5-17) und in v -Richtung mit Formel (5-18) die beiden Tangentenvektoren.

$$\vec{t}_u = \frac{\partial \vec{X}}{\partial u} \quad (5-17)$$

$$\vec{t}_v = \frac{\partial \vec{X}}{\partial v} \quad (5-18)$$

Basierend auf den genannten Formeln kann mit Formel (5-19) der Einheitsnormalenvektor am Punkt $P_q = x(u_i, v_j)$ berechnet werden.

$$\vec{N}_{P_q} = \frac{\vec{t}_u \times \vec{t}_v}{|\vec{t}_u \times \vec{t}_v|} \quad (5-19)$$

Aus der Spezifikationsliste ist die Höhe des Wabenkerns t_K , also der Abstand von Punkt P_q zum korrespondierenden Punkt P'_q , bekannt. Die Berechnung der Koordinaten des Punktes P'_q erfolgt durch die Verschiebung des Punktes P_q , entlang des Normalenvektors mit der Formel (5-20).

$$\vec{P}'_q = \vec{P}_q + t_K \cdot \vec{N}_{P_q} \quad (5-20)$$

5 Methode zur Anpassung von Wabenstrukturen an eine Fläche

Damit kann zu jedem erzeugten Wabeneckpunkt ein korrespondierender Eckpunkt einer Wabenwand, entlang des Normalenvektors, berechnet werden. Dieser bildet die Basis für die nachfolgende Extrusion der Wabenwände.

5.2.4 Extrusion entlang der Normalenvektoren

Nachdem für jeden Wabeneckpunkt ein Punkt P_q' in der dritten Dimension errechnet wurde, erfolgt der Zusammenschluss der Punkte zu einem Körper bzw. einem Gitter, entsprechend der vorher festgelegten Parameter. Hierzu wird ebenfalls ein Polygonzug auf Basis der Graphentheorie, wie bereits in Abschnitt 5.2.2 beschrieben, für die ebene hexagonale Wabe erstellt. In Formel (5-21) werden die Eckpunkte und in Formel (5-22) die dazugehörigen Kanten einer allgemeinen und anschließend einer hexagonalen Struktur beschrieben.

$$E_{allg.} = \{P_1, P'_1, P_2, P'_2, \dots, P_n, P'_n\} \quad (5-21)$$

$$E_{n=6} = \{P_1, P'_1, P_2, P'_2, P_3, P'_3, P_4, P'_4, P_5, P'_5, P_6, P'_6, \}$$

$$K_n^K = \left\{ \begin{array}{l} (P_1, P_2), (P_2, P_3) \dots (P_{n-1}, P_n), (P_n, P_1) \\ (P'_1, P'_2), (P'_2, P'_3) \dots (P'_{n-1}, P'_n), (P'_n, P'_1) \\ (P'_1, P'_1), (P'_2, P'_2) \dots (P'_{n-1}, P'_{n-1}), (P'_n, P'_n) \end{array} \right\} \quad (5-22)$$

$$K_{n=6}^K = \left\{ \begin{array}{l} (P_1, P_2), (P_2, P_3), (P_3, P_4), (P_4, P_5), (P_5, P_6), (P_6, P_1) \\ (P'_1, P'_2), (P'_2, P'_3), (P'_3, P'_4), (P'_4, P'_5), (P'_5, P'_6), (P'_6, P'_1) \\ (P_1, P'_1), (P_2, P'_2), (P_3, P'_3), (P_4, P'_4), (P_5, P'_5), (P_6, P'_6) \end{array} \right\}$$

Abbildung 5-10 zeigt, als Ergebnis der vorher durchgeführten Schritte, die erfolgreiche Erstellung der Sechseckwabenstruktur.

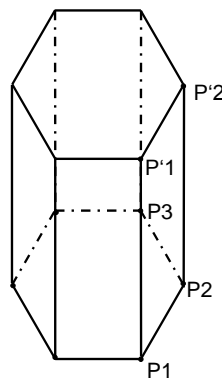


Abbildung 5-10: Polygonzug einer hexagonalen Wabe

Basierend auf diesem Schritt erfolgt die Extrusion des vorher generierten Wabengitters entlang des Normalenvektors sowie die Extrusion der Wabenwand-

5.2 Struktur der Methode

stärke t entlang der Fläche ϕ (vgl. Abschnitt 5.2.1). Dabei wird zusätzlich die initiale Wabenwandstärke $t_{initial}$ aus der Spezifikationsliste als Eingangsgröße benötigt. Die Erstellung der Extrusionsfläche erfolgt nach SORGER (2012) und ist beispielhaft in Abbildung 5-11 dargestellt. Hierbei wird durch die parallele Verschiebung einer Extrusionskurve C , entlang einer Leitkurve L_{Kurve} , eine Fläche erstellt. Die Parameterdarstellung der Extrusionsflächen ist in Formel (5-23) dargestellt.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{C,x}(u) + f_{L_{Kurve},x}(v) \\ f_{C,y}(u) + f_{L_{Kurve},y}(v) \\ f_{C,z}(u) + f_{L_{Kurve},z}(v) \end{pmatrix} \quad (5-23)$$

mit

$$s_{C,0} \leq u \leq s_{C,1}, s_{L,0} \leq v \leq s_{L,1} \quad (5-24)$$

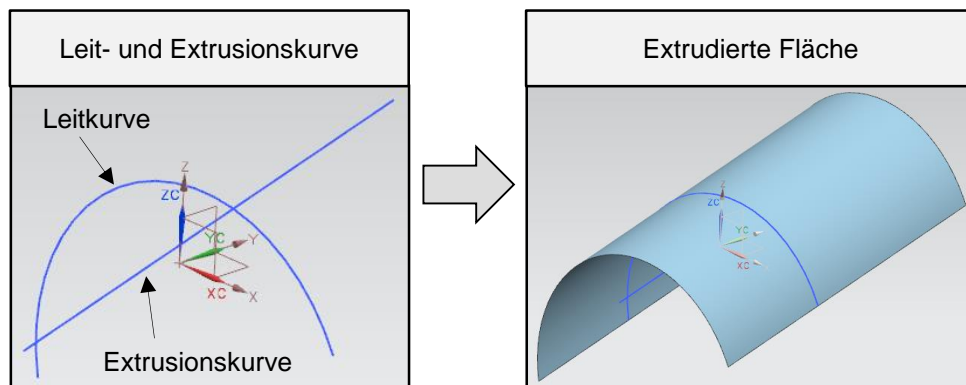


Abbildung 5-11: Extrusion einer Fläche auf Basis der Leit- und Extrusionskurve

Somit resultiert aus der dargestellten Formel die Parameterdarstellung der Extrusionskurve $f_{C,x}(u)$, $f_{C,y}(u)$ und $f_{C,z}(u)$ sowie aus $f_{L_{Kurve},x}(v)$, $f_{L_{Kurve},y}(v)$ und $f_{L_{Kurve},z}(v)$ die Parameterdarstellung der Leitkurve. Für die Extrusion entlang der Fläche zur Erstellung der Wabenwandstärke $t_{initial}$ kann diese Vorgehensweise ebenfalls angewandt werden. Ein beispielhaftes Ergebnis der Extrusion einer konformen Wabenstruktur zeigt Abbildung 5-12.

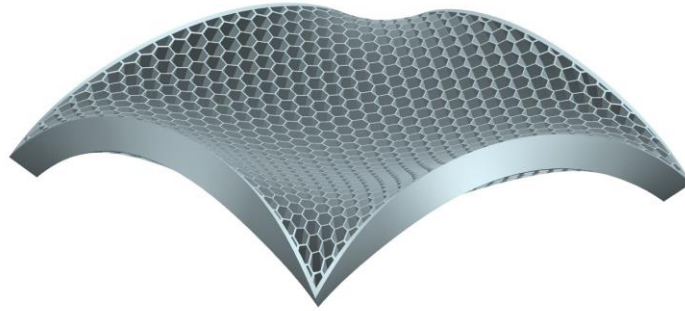


Abbildung 5-12: Anwendung der Methode an einem Demonstrator

5.3 Zusammenfassung

Dieses Kapitel beinhaltet die Entwicklung einer Methode, mit der die konforme Anpassung von Wabenstrukturen an eine komplex gekrümmte Fläche möglich ist (siehe Abbildung 5-13). Die Anpassung an eine Fläche beginnt mit der Parameterdarstellung. Aufgrund dieser Darstellungsform können im ersten Schritt Netzlinien auf die Fläche aufgebracht werden. Die Schnittpunkte der Netzlinien bilden gleichzeitig die Eck- bzw. die Hilfspunkte zur anschließenden Parkettierung der Fläche. Die einzelnen Schnittpunkte der Netzlinien werden dabei, mithilfe von Polygonzügen, zu einem Hexagon zusammengefasst. Der nächste Baustein besteht aus der Berechnung des Normalenvektor für jeden Wabeneckpunkt. Die Extrusion des hexagonalen Gitternetzes, entlang des jeweiligen Normalenvektors schließt die entwickelte Vorgehensweise ab. Das Ergebnis der Anwendung der Methode ist eine Wabenstruktur, die konform an eine doppelt-gekrümmte Fläche angepasst ist.

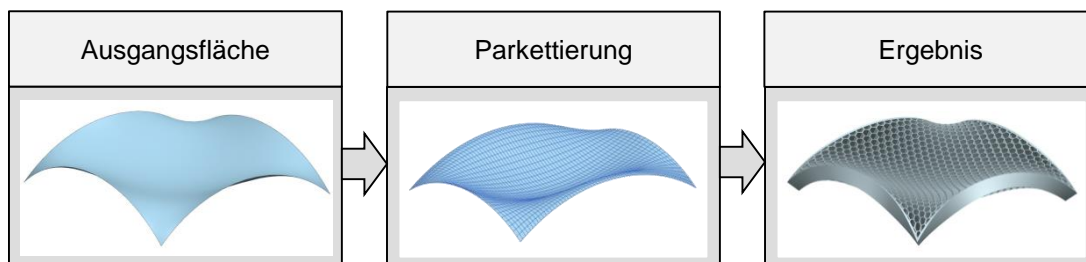


Abbildung 5-13: Zusammenfassung der Methode

6 Methode zur Funktionsintegration in Wabenkernen

6.1 Aufbau des Kapitels

Im Kapitel 6 wird die Methode zur Funktionsintegration in additiv gefertigten Wabenkernen für Sandwichbauteile aufgezeigt. Das Ziel der Methode ist es, Funktionen, welche auf Basis der Spezifikationsliste notwendig sind, unter Verwendung einer methodischen Vorgehensweise in den Wabenkern zu integrieren. Hierzu wurden zwei repräsentative Funktionen ausgewählt, da ohne diese deutliche Einschränkungen gegenüber konventionellen Konstruktionsmethoden für Wabenkerne bestehen. Dabei handelt es sich um:

- die Integration von Funktionselementen und
- die Aufteilung und Verbindung von Wabenkernen.

Der Aufbau des Kapitels ist schematisch in Abbildung 6-1 dargestellt.

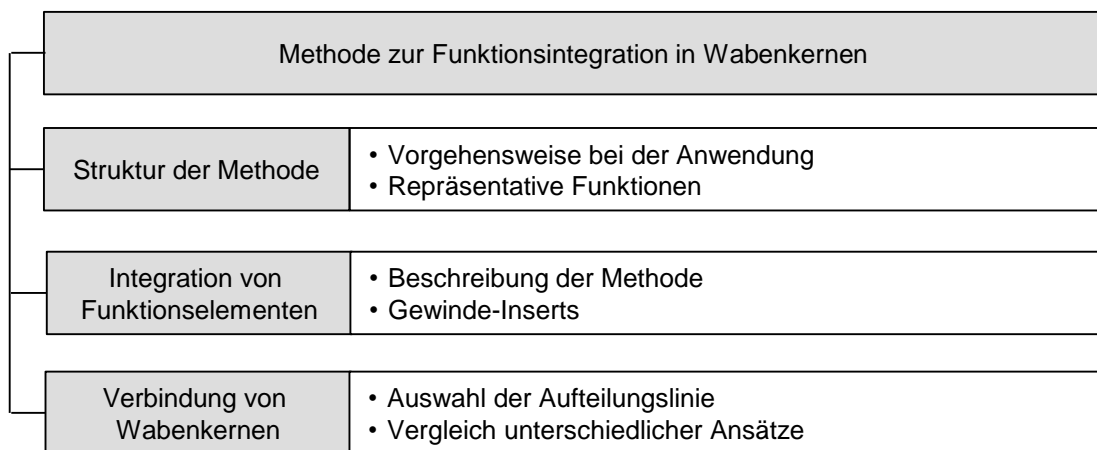


Abbildung 6-1: Aufbau des Kapitels

6.2 Struktur der Methode

Die Methode zur Funktionsintegration in Wabenkernen ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Die Grundlage für diese Methode bildet ebenfalls die Spezifikationsliste aus Kapitel 4. Hieraus werden die Funktionen abgeleitet, welche im Rahmen dieses Bausteins in den Wabenkern integriert werden sollen. Die einzelnen Vorgehen bauen nicht aufeinander auf, so dass eine getrennte Anwendung gegeben ist. Die Methode zur Funktionsintegration kann beliebig erweitert werden, da die Art und die Anzahl der Funktionen meist von den Anforderungen an das Bauteil

6 Methode zur Funktionsintegration in Wabenkernen

abhängen. Innerhalb des Vorgehens bei der jeweiligen Methode ist zu überprüfen, ob eine Abhängigkeit bzw. eine Beeinflussung der einzelnen Bausteine untereinander besteht.

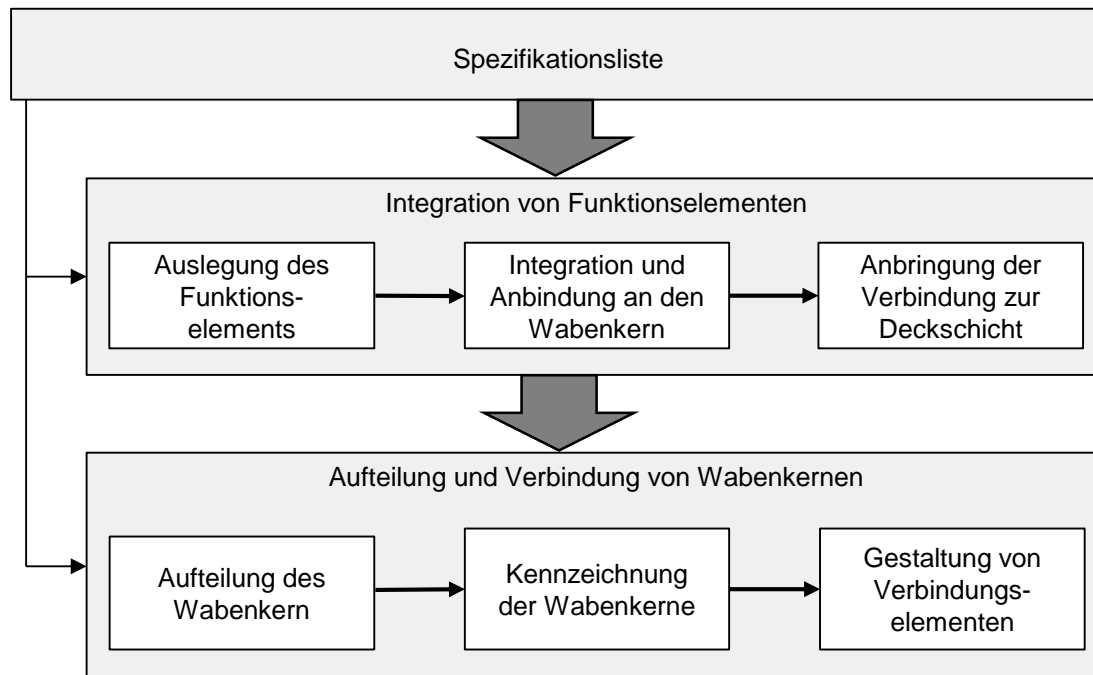


Abbildung 6-2: Methode zur Funktionsintegration in Wabenkernen

6.2.1 Integration von Funktionselementen

Die Lasteinleitung in Sandwichbauteile erfolgt entweder flächig, wie beispielsweise in einem Tragwerk oder punktuell, wie z. B. im Fall von Elektronikkomponenten oder Antennen in Satellitenpanelen (siehe Abbildung 6-3). Vor allem die punktuelle Lasteinleitung, wie in Abschnitt 2.5.3 dargestellt, bietet die Möglichkeit, zusätzliche Bauteile oder Baugruppen mit lösbaren Verbindungen anzubringen. Für diese Gestaltungsfreiheit ist jedoch ein hoher fertigungstechnischer Aufwand notwendig. Zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit besteht der Handlungsbedarf zur Entwicklung einer Vorgehensweise, welche eine direkte Integration von Funktionselementen in Wabenkernen ermöglicht.

Die Vorgehensweise zur direkten Integration von Funktionselemente in Verbindung mit einer belastungsgerechten Auslegung (siehe Kapitel 7) wurde in RISS & TEUFELHART (2012) patentiert. Im Rahmen dieses Abschnitts erfolgt die Entwicklung der Methode zur systematischen Integration von Funktionselementen am Beispiel eines Gewinde-Inserts. Diese Vorgehensweise kann auf weitere Funktionselemente übertragen werden.

6.2 Struktur der Methode

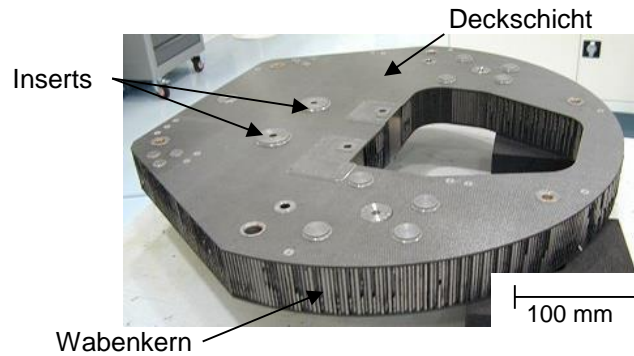


Abbildung 6-3: Sandwichbauteil mit Wabenkern und Inserts zur punktuellen Krafteinleitung (ALCATEL ALENIA SPACE 2006)

Die ersten Bausteine zur direkten Integration von Inserts bilden die Berechnung und die Auslegung. Ausgehend von den Anforderungen an das Gesamtbauteil, die in der Spezifikationsliste festgehalten sind, gilt es zunächst die Belastungen, die auf jeden einzelnen Insert wirken, entsprechend zu identifizieren. Für die anschließende Berechnung der einzelnen Inserts wird an dieser Stelle auf die Standardliteratur von BITZER (1997); ECSS (2011) und ZENKERT (1997) verwiesen. Hiermit kann unter anderem die Festigkeit des Gewindes sowie die Anbindestelle der Deckschichten berechnet werden. Nachfolgend werden zwei Vorgehensweisen zur Integration von Inserts, wie in Abbildung 6-4 dargestellt, in Abhängigkeit der Randbedingungen beschrieben.

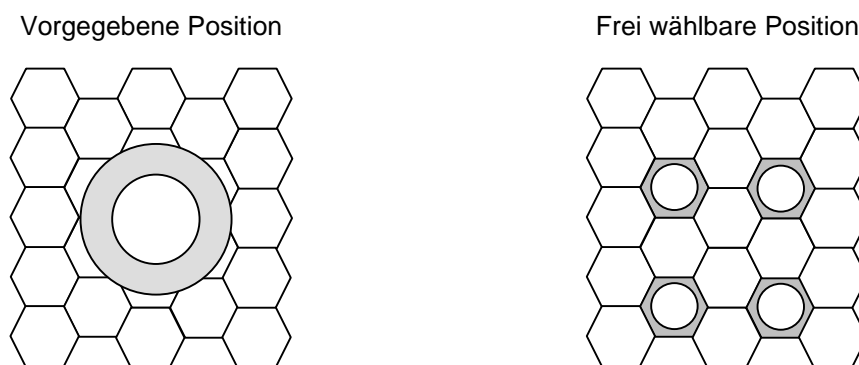


Abbildung 6-4: Unterschiedliche Möglichkeiten zur Integration von Funktionselementen

Das erste Vorgehen wird empfohlen, wenn die Positionen der Anschraubelemente vorgegeben sind, wie beispielsweise zur Anbringung eines Kaufteils. Die zweite Variante ist zu präferieren, wenn in Bezug auf die Gestaltung nahezu keine Limitierungen gelten. Dadurch kann in Abhängigkeit des initialen Waben-

6 Methode zur Funktionsintegration in Wabenkernen

durchmessers und der –wandstärke die Auslegung so gestaltet werden, dass die einzelnen Funktionselemente jeweils in eine Wabe integriert werden können. Beim ersten Vorgehen, wie in Abbildung 6-5 dargestellt, wird der Insert, in Abhängigkeit des Gewindes und der Insert-Wanddicke, direkt in den Wabenkern eingebracht und an der vorgegeben Position mit dem Wabenkern vereinigt. Daraus ergeben sich Waben, die keine hexagonale Form aufweisen. Dies kann zu ungewünschten Spannungszuständen (z. B. Biegespannungen im Kern) führen, was bei einer anschließenden belastungsgerechten Auslegung eine zusätzliche Materialanhäufung bedeutet.

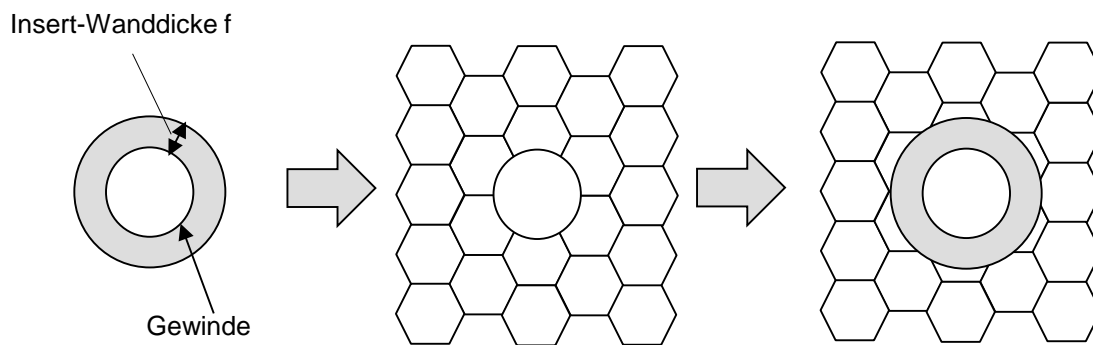


Abbildung 6-5: Direkte Integration eines Funktionselements

Eine gesteigerte Ausnutzung des Leichtbaupotenzials ist dann gegeben, wenn die Position und der Gewindedurchmesser durch die Konstrukteurin bzw. den Konstrukteur festgelegt werden kann und keine Übernahme von bestehenden Randbedingungen existiert. In diesem Fall ist der Insert so zu gestalten, dass er in eine der bestehenden Waben, wie in Abbildung 6-6 aufgezeigt, integriert werden kann. Dies bietet den Vorteil, dass der Kraftfluss direkt im Wabenwinkel (60°) in die Struktur eingeleitet werden kann.

Den letzten Schritt der Methode bildet die Definition einer Anbindungsstelle zur Deckschicht. Um die Kraft in die Deckschicht einzuleiten, wird eine Anbindungsstelle an der Ober- und Unterseite des Inserts angebracht. Die Höhe der Anbindungsstelle ist identisch zur Höhe t_H der jeweiligen Deckschicht zu wählen. Die geometrische Form der Deckschichtanbindungsstelle ist nach Möglichkeit nicht rund zu gestalten. Grund hierfür ist, dass im Belastungsfall (z. B. durch ein Drehmoment) durch den geringeren Formschluss, im Gegensatz zu rechteckigen Anbindungsstellen, ein schnelleres Versagen des Inserts erfolgen kann.

6.2 Struktur der Methode

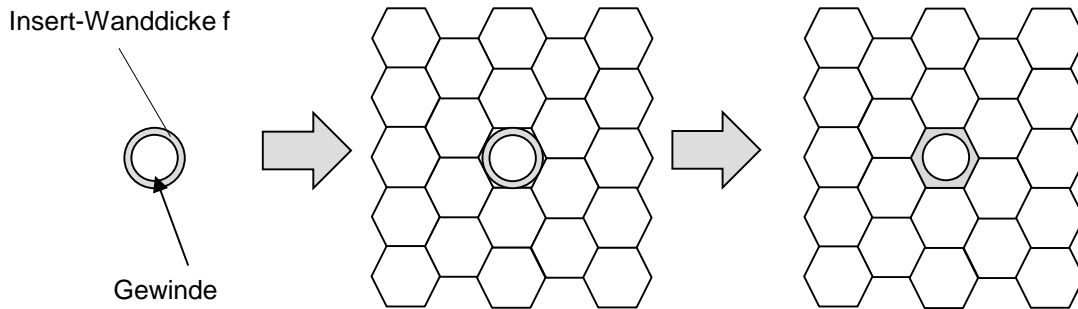


Abbildung 6-6: *Integration eines Inserts ohne Randbedingungen*

Bei der Verwendung von Deckschichten aus faserverstärkten Kunststoffen besteht die Möglichkeit, den massiven Bereich an der Oberfläche des Inserts mit Gitter- bzw. porösen Strukturen auszustatten. Dadurch kann die Anbindung der Deckschicht an den Insert beim Kleben gesteigert werden. Bei der Verwendung von CFK-Deckschichten können hierbei die Fasern direkt mit dem Insert verbunden werden. Zu dieser Themenstellung wird in SPIERINGS (2014) ein Ansatz vorgestellt, welcher die Anbindung von Faserverbundmaterialien an Metallbauteile kraftflussgerecht ermöglicht. Die Anwendung der beschriebenen Methode zur Integration von Funktionselementen am Beispiel eines Demonstrators ist in Abbildung 6-7 dargestellt.

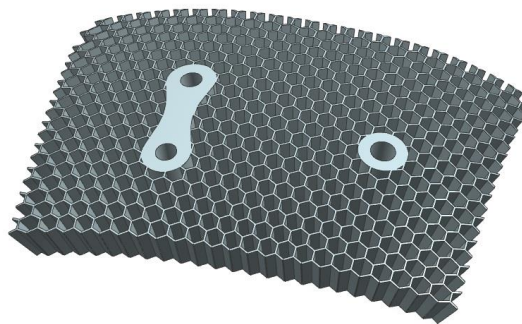


Abbildung 6-7: *Direkte Integration von Funktionselementen am Beispiel eines doppelt-gekrümmten Wabenkerns*

6.2.2 Aufteilung und Verbindung von Wabenkernen

Der Einsatz von Sandwichbauteilen mit Wabenkernen erfolgt hauptsächlich in großflächigen, biegebelasteten Bauteilen. Die additive Fertigung hingegen ist in ihrer Bauraumgröße limitiert, so dass großvolumige Bauteile meist nicht gefertigt werden können. Zur Ausnutzung des Leichtbaupotenzials der additiven Fertigung für großflächige Sandwichbauteile mit Wabenkern muss eine bauteilseitige

6 Methode zur Funktionsintegration in Wabenkernen

Funktionsintegration erfolgen. Die Zielsetzung dieses Abschnitts besteht darin, eine Vorgehensweise aufzuzeigen, bei der Wabenkerne mit beliebigen Abmessungen unter Verwendung der additiven Fertigung hergestellt werden können. Das sequentielle Vorgehen der Anwendung kann dem Patent von RISS & MAYER (2013) entnommen werden.

Die Notwendigkeit der Aufteilung und Verbindung von Wabenkernen ist bereits in der Spezifikationsliste in Kapitel 4 zu prüfen. In dieser Liste sind ebenfalls alle Erfordernisse und Parameter dokumentiert, auf die im Rahmen der Methode zurückgegriffen wird. Die Form der Verbindungsart der Einzelemente kann beliebig gewählt werden. Hierbei können form-, stoff- und kraftschlüssige Fügeverfahren oder auch Kombinationen angewandt werden. Zusätzlich sind die entsprechenden Regeln zur Gestaltung der Fügeverbindung sowie die Konstruktionsrichtlinien der additiven Fertigung zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Herleitung der Vorgehensweise auf der Basis einer Kombination aus form- und kraftschlüssiger Verbindung. Grund hierfür ist zum einen die Lösbarkeit der Verbindung, zum anderen der Vorteil, dass nahezu keine zusätzlichen Massen integriert werden müssen. Diese Anforderungen erfüllen Schnappverbindungen und Verschränkungen bestmöglich (DELPY 1989). Hier besteht der Vorteil, dass für die Montage der Einzelemente keine zusätzlichen Werkzeuge benötigt werden. Ebenso müssen die Einzelemente nur bis zum Fügen des Kerns mit den Deckschichten in Position gehalten werden. Anschließend erfolgt die Fixierung der Einzelemente über die Verbindung zwischen Kern und Deckschichten. Ein weiterer Vorteil dieser Verbindungsart ist, dass Schnappverbindungen in der Produktentwicklung zu den Standardelementen zählen, für deren Gestaltung und Auslegung eine Vielzahl an Literaturquellen vorliegt.

Zu Beginn der Vorgehensweise erfolgt die Aufteilung des großflächigen Wabenkerns in fertigungsgerechte Einzelemente. Die maximale Einzelementgröße ist abhängig vom gewählten Anlagensystem und ist der Spezifikationsliste zu entnehmen. Für die Aufteilung der Wabenstruktur wird, aus strukturmechanischen Aspekten, eine Aufteilung der Einzelemente entlang der beiden Wabenrichtungen (*L*- und *W*-Richtung) empfohlen. Dies stellt einerseits die Durchgängigkeit der hexagonalen Struktur sicher, was ansonsten zu Sollbruchstellen führen kann, andererseits wird die mögliche Translation in der *L*- bzw. *W*-Richtung bereits eingeschränkt. Entsprechend ergeben sich, wie in Abbildung 6-8 dargestellt, zwei unterschiedliche, beispielhafte Trennlinien.

6.2 Struktur der Methode

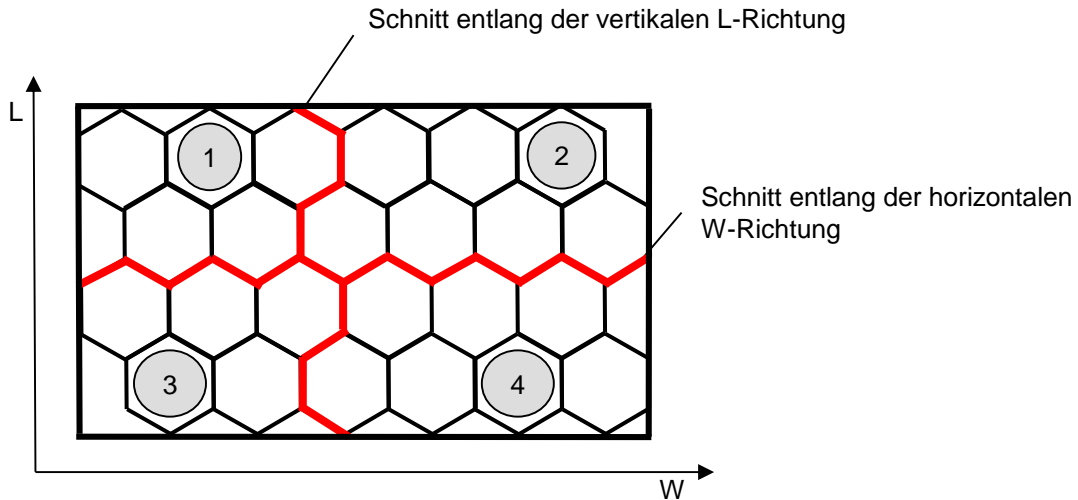


Abbildung 6-8: Trennung der Wabenstruktur in W- und L-Richtung

Im Rahmen der Arbeit konnte festgestellt werden, dass die Waben entlang der W-Richtung, bei mehrmaligem Trennen und Fügen, eine deutlich höhere Abnutzungserscheinung aufweisen, als die Waben in L-Richtung.

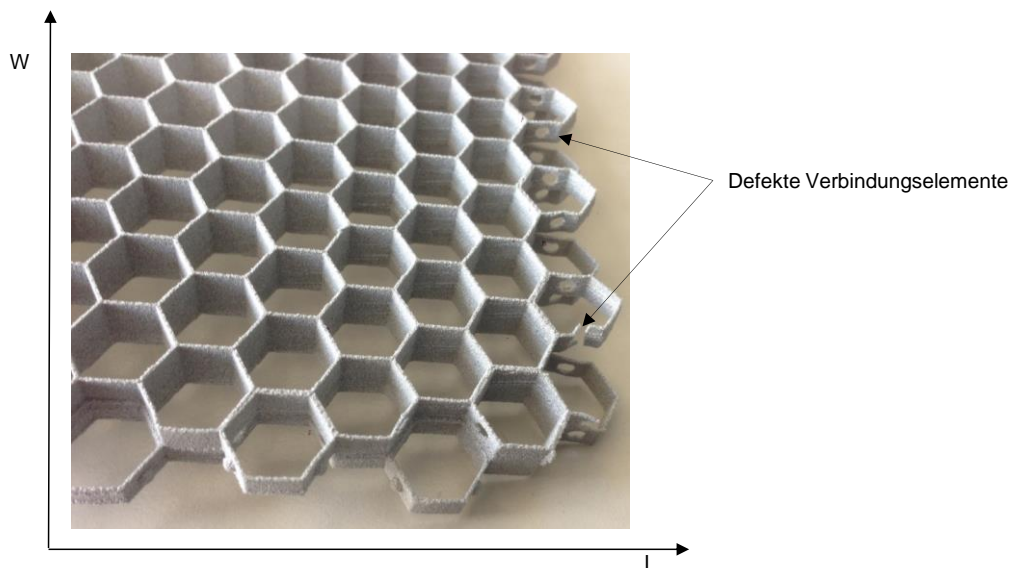


Abbildung 6-9: Wabenkern mit Aufteilung in W- und L-Richtung nach mehrmaligem Fügen

Dies resultiert daher, dass die spitz zulaufende Wabenstruktur instabiler ist, als die Kante in L-Richtung. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde, wie in Abbildung 6-10 dargestellt, die Unterteilung entlang der W-Richtung durch die Aufteilung entlang der diagonalen L-Richtung substituiert.

6 Methode zur Funktionsintegration in Wabenkernen

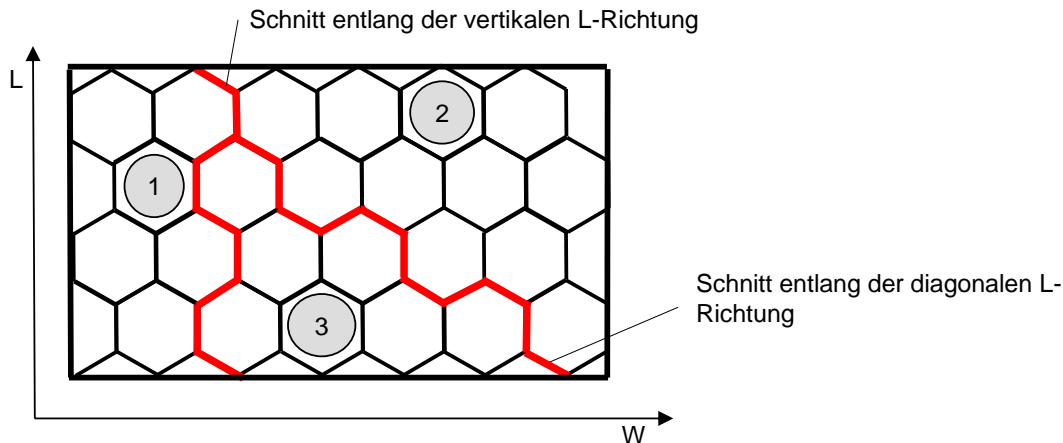


Abbildung 6-10: Aufteilung des Kerns entlang der vertikalen und diagonalen L-Richtung

Zur Fehlerreduzierung bei der Montage der einzelnen Komponenten wird jeder Trennlinie eine fortlaufende Nummer zugewiesen. Außerdem ist darauf zu achten, dass die Trennlinie auf der Mittellinie bzw. -fläche der Wabenwände verläuft. Ansonsten können im nächsten Schritt keine bzw. nur bedingt Steckverbindungen angebracht werden. Bei der Durchführung der Aufteilung entlang der Trennlinie wird alternierend an der Ober- bzw. Unterseite der Wabe jeweils eine Wabe mit halber Wabenhöhe entfernt. Daraus resultiert eine in z-Richtung verschränkende Steckverbindung, wie in Abbildung 6-11 dargestellt. Das Ergebnis bildet somit eine schubfeste Verbindung in z-Richtung.

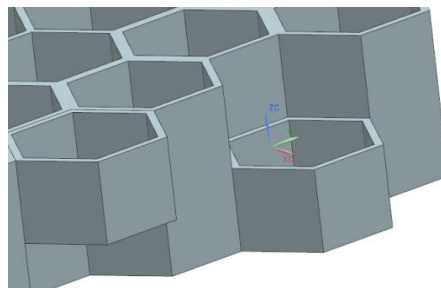


Abbildung 6-11: Schubfeste Verschränkung für Wabenkerne in L-Richtung

Die vollständige Sperrung der Translation in z-Richtung und die Reduktion der Translation in der xy -Ebene ist bereits durch das Einfügen der Trennlinien entlang der Waben sowie dem alternierenden Ausschneiden einzelner Wabenhälften erfolgt. Das Unterbinden einer Translation in x -Richtung erfolgt durch die Integration von formschlüssigen Steckverbindungen, sogenannter Schnappverbindungen. Die Grundgeometrie eines Verbindungselements am Beispiel eines Schnapphakens zeigt Abbildung 6-12. Die Auslegung der Schnapphaken steht

6.3 Zusammenfassung

nicht im Fokus dieser Arbeit. Hierzu wird auf die Literatur von DELPY (1989) und ELSNER ET AL. (2007) verwiesen. Bei der Gestaltung der Schnapphaken sind ebenfalls die Konstruktionsrichtlinien der additiven Fertigung zu berücksichtigen.

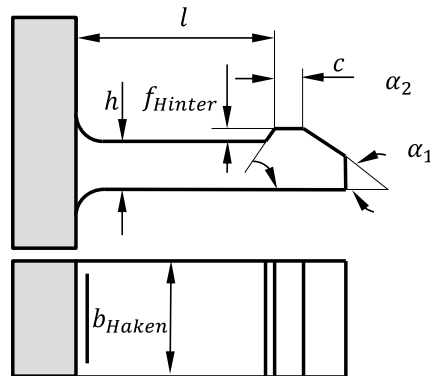


Abbildung 6-12: Geometrie zur Auslegung eines Schnapphakens (in Anlehnung an ELSNER ET AL. (2007))

Das Ergebnis der Aufteilung und die Verbindung von Wabenkernen zeigt Abbildung 6-13. Die Vorgehensweise bietet die Möglichkeit, einzelne Wabenelemente zu einem Wabenkern, durch Form- und Kraftschluss, zu fügen. Für die Demontage der Einzelemente sind keine zusätzlichen Hilfsmittel notwendig.

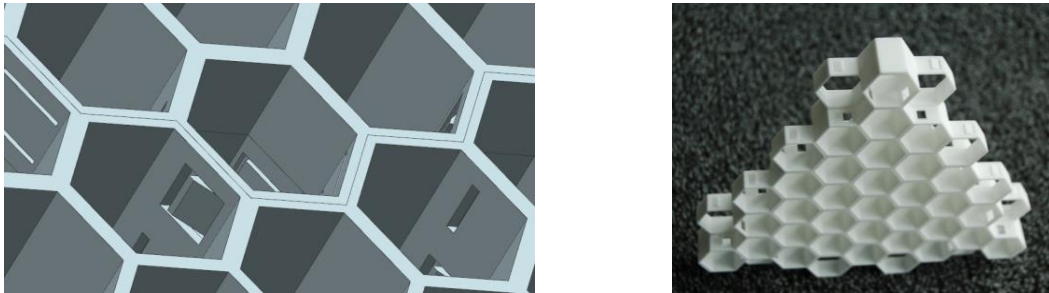


Abbildung 6-13: 3-D-CAD-Modell zwei gefügter Wabenelemente (links); additiv gefertigtes Wabenelement mit Schnappverbindung (rechts)

6.3 Zusammenfassung

Dieses Kapitel widmet sich einer Methode zur Integration von Funktionen in Wabenkernen für Sandwichbauteile. Zunächst wird die Struktur der Methode vorgestellt. Anschließend werden zwei repräsentative Beispiele für die Funktionsintegration in Wabenkernen beschrieben. Hierbei handelt es sich um die direkte Integration von Funktionselementen und die Aufteilung und Verbindung

6 Methode zur Funktionsintegration in Wabenkernen

von Wabenkernen. Bezüglich der Integration von Inserts werden zwei mögliche Vorgehensweisen aufgezeigt, die in Abhängigkeit der Randbedingungen anzuwenden sind. Mit dem zweiten Ansatz kann die Limitierung der Bauteilgröße in der additiven Fertigung aufgehoben werden. Durch die Integration von Schnappverbindungen können Wabenkerne mit beliebigen Abmessungen realisiert werden.

7 Methode zur belastungsgerechten Auslegung

7.1 Aufbau des Kapitels

Die belastungsgerechte Auslegung von Wabenkernen für Sandwichbauteile bildet einen zentralen Punkt innerhalb dieser Arbeit. Ausgehend von der Spezifikationsliste aus Kapitel 4 wird eine Methode zur Lösung des Optimierungsproblems bezüglich der Zielfunktion angestrebt. Dafür wird ein Vorgehen entwickelt, welches durch die Variation der Wabenwandstärke sowie des Wabendurchmessers das Ziel verfolgt, in wenigen Iterationsschritten optimale Ergebnisse zu erreichen. Das Resultat nach der erfolgreichen Anwendung der Methode bildet ein Wabenkern, der in Abhängigkeit der geltenden Randbedingungen belastungsgerecht ausgelegt ist. Das Vorgehen innerhalb des Kapitels zeigt Abbildung 7-1.

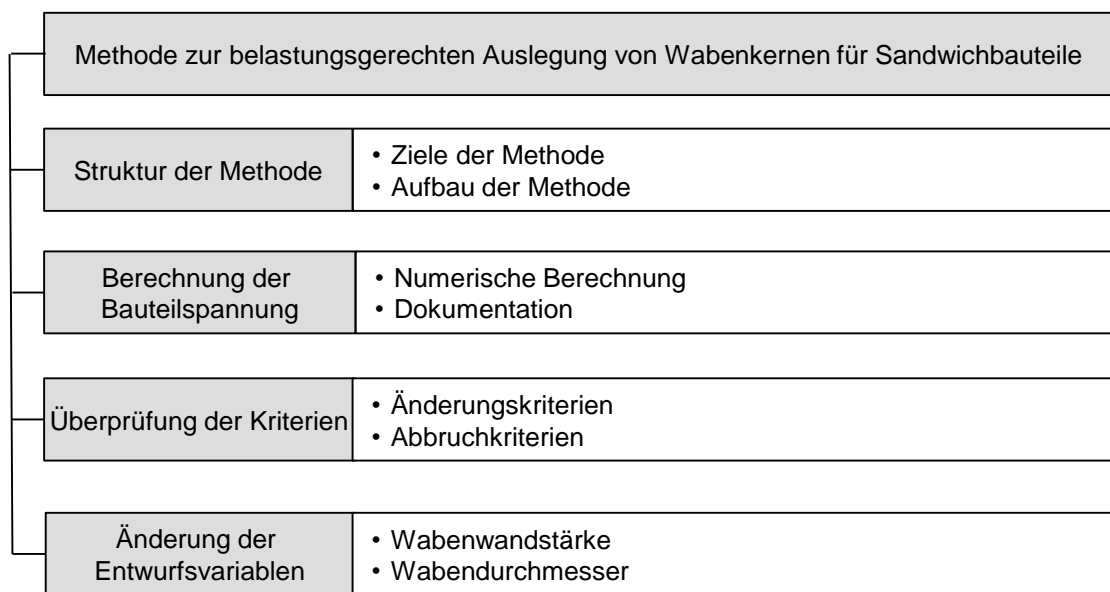


Abbildung 7-1: Aufbau von Kapitel 7

7.2 Struktur der Methode

Das Ziel der Methode besteht darin, das Leichtbaupotenzial von Wabenkernen, unter Berücksichtigung der geltenden Nebenbedingungen, gesteigert auszunutzen. Aufgrund der strukturmechanischen Verkettungen und Abhängigkeiten der einzelnen Waben, die bei einer belastungsgerechten Auslegung berücksichtigt werden müssen, ist die Verwendung eines analytischen Ansatzes zur Lösung des

7 Methode zur belastungsgerechten Auslegung

Optimierungsproblems nicht möglich. Es wird daher ein numerischer Berechnungsansatz, die Finite-Elemente-Methode, angewandt. Zunächst gilt es die einzelnen Eckdaten aus der Spezifikationsliste in Kapitel 4 in mathematische Formulierungen zu überführen. Diese sind in Tabelle 7-1 dargestellt.

Tabelle 7-1: Kenngrößen für die belastungsgerechte Auslegung

Zielfunktion	$f(t, d_s) = \min_{t, d_s} \sigma_{Ziel} - \sigma_{Ist}(t, d_s) $
Lösungsbereich	$\sigma_{Ziel} \pm 3\%$
Entwurfsvariablen	t_θ mit $\theta \in \mathbb{N}$ $d_{s\Omega}$ mit $\Omega \in \mathbb{N}$
Nebenbedingungen	$t_{ug} < t_\theta < \frac{d_{s\Omega}}{2}$ $d_{s\Omega} > d_{s,ug}$ $v \leq q$ mit $v, q \in \mathbb{N}$ $\gamma_{Optimiert} \wedge \gamma_{Original} \leq \gamma_{Ziel}$
Änderungskriterien	$ \sigma_{Ziel} - \sigma_{Ist}(t_\theta, d_{s\Omega}) \neq 0 \rightarrow t_{\theta_{neu}} = \frac{\sigma_{Ist}}{\sigma_{Ziel}} \cdot t_{\theta_{alt}}$ $\gamma_{Ist} > \gamma_{Ziel} \rightarrow t_{\theta_{neu}} = \frac{\gamma_{Ist}}{\gamma_{Ziel}} \cdot t_{\theta_{alt}}$ $t_{\theta_{neu}} > \frac{d_{s\Omega}}{2} \vee \gamma_{Ziel} < \gamma_{Ist}$ $\rightarrow d_{s\Omega_{neu}} = \frac{d_{s\Omega_{alt}}}{2^c}$ mit $c=1, 2, 3$
Abbruchkriterien	<ul style="list-style-type: none"> Jede Wabenwand: $t_\theta = \frac{d_{s\Omega}}{2} \vee t_\theta \leq d_{s,ug}$ oder Jeder Wabendurchmesser: $d_{s\Omega} \leq d_{s,ug} \vee d_{s\Omega} = \frac{d_{s\Omega_{alt}}}{8}$ oder $v = q$
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> Entwurfsnummer startet bei $v = 0$

7.2 Struktur der Methode

Ausgehend von Tabelle 7-1 wurde die in Abbildung 7-2 dargestellte Methode zur belastungsgerechten Auslegung von Wabenkernen für Sandwichbauteile entwickelt.

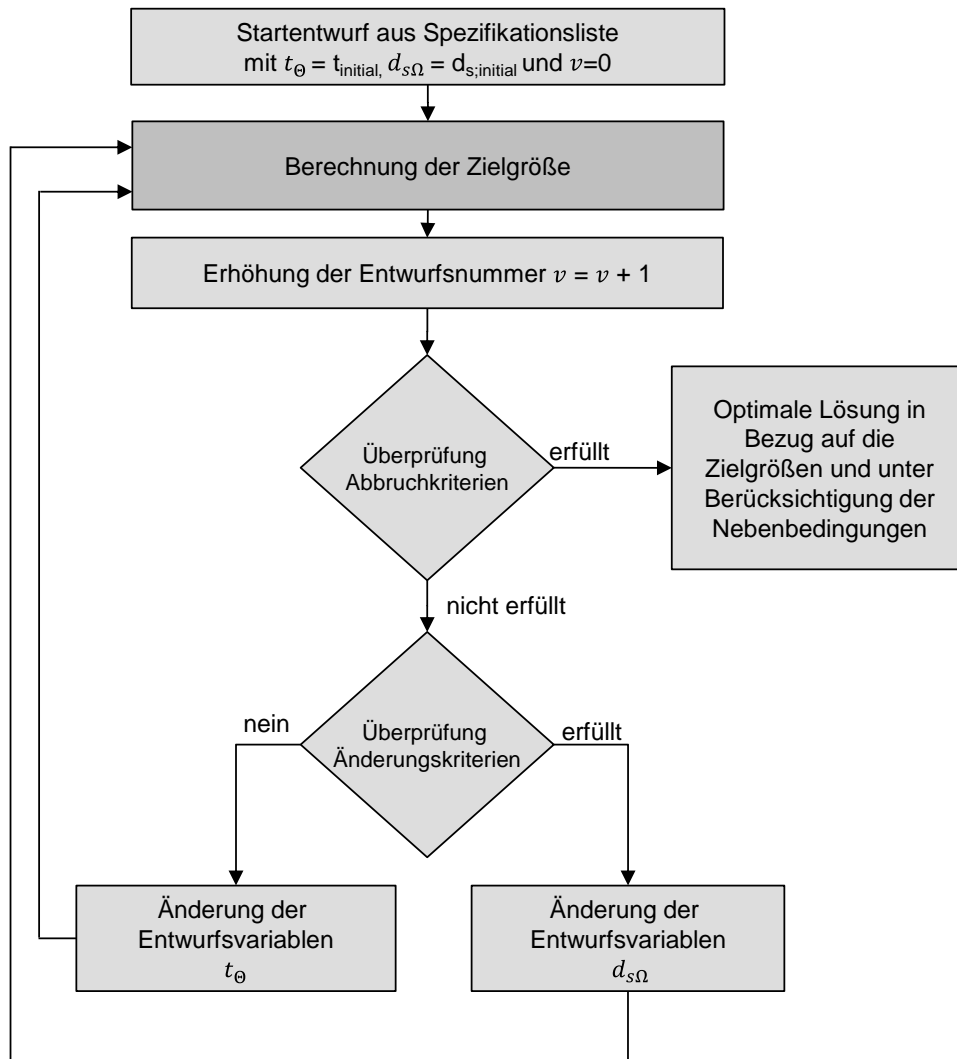


Abbildung 7-2: Methode zur belastungsgerechten Anpassung von Wabenkernen für Sandwichbauteile

Die Struktur der Methode basiert auf dem iterativen Durchlaufen der einzelnen Schritte zur Lösung des Optimierungsproblems und wird nachfolgend erläutert. Aufgrund der Vielzahl an verfügbaren digitalen Werkzeugen zur numerischen Bauteilberechnung besteht an dieser Stelle die Notwendigkeit, die Anforderungen an das jeweilige zur Anwendung kommende FEM-System darzulegen. Für die Vernetzung des Wabenkerns bzw. der Deckschichten wird im Rahmen der Methode der Einsatz von Schalenelementen empfohlen, da sich dieser Elementtyp vor allem für dünnwandige regelmäßige Strukturen etabliert hat. Ist die Integration von Funktionselementen (z. B. Inserts) vorgesehen, werden für die

7 Methode zur belastungsgerechten Auslegung

Vernetzung des Bauteils meist zusätzlich auch Volumenelemente (bspw. Tetraeder-Elemente) benötigt, welche das Softwaretool zur Verfügung stellen sollte. Des Weiteren besteht zur realitätsgetreuen Modellierung des gesamten Sandwichverbunds die Anforderung nach einer Klebe-Zwangsbedingung. Für die numerische Berechnung der Gleichungen wird im Rahmen der Arbeit der *NASTRAN-Solver* empfohlen. Dieser Solver ist in den meisten industriell eingesetzten FEM-Systemen implementiert, womit die Übertragbarkeit auf unterschiedliche CAE-Plattformen gewährleistet wird. Zur anwendungsnahen Bewertung der Berechnungsergebnisse (z. B. die von-Mises-Vergleichsspannung oder die Verschiebung) sollte die Möglichkeit bestehen, diese graphisch darzustellen. Für eine Einführung in die Finite-Elemente-Methode sowie einer ausführlichen Beschreibung der Modellierung von dünnwandigen Strukturen wird auf die Literatur von HEIMBS (2008); KLEIN (2010); STEINKE (2010) und WERKLE (2008) verwiesen.

7.2.1 Startentwurf und Berechnung der Bauteilspannungen

Die initialen Entwurfsvariablen, welche als Startwerte für die belastungsgerechte Auslegung gelten, werden aus der Spezifikationsliste (siehe Kapitel 4) abgeleitet. Auf der Basis des Startentwurfs erfolgt die initiale Berechnung der Zielgröße. In diesem Fall ist dies die von-Mises-Vergleichsspannung, welche in der Spezifikationsliste bereits festgelegt wurde. Zunächst muss das Bauteil gemäß der Lasten und Lagerungen modelliert und anschließend numerisch berechnet werden. Erst danach stehen die Ergebnisse der von-Mises-Vergleichsspannung, wie beispielsweise in Abbildung 7-3 dargestellt, zur Verfügung.

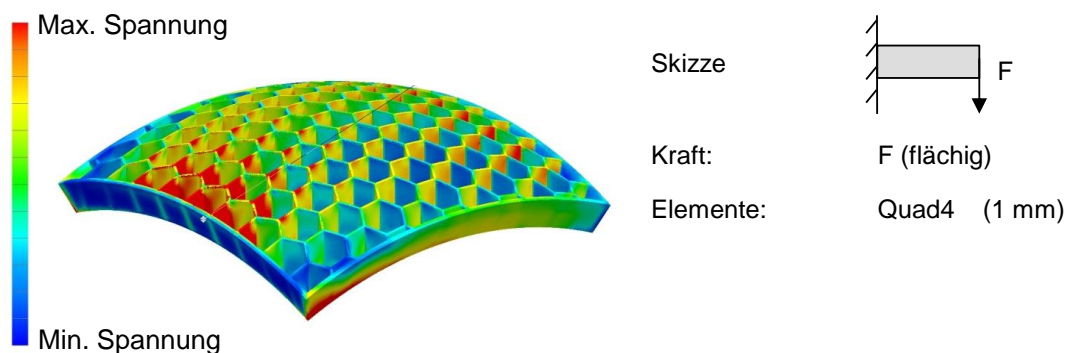


Abbildung 7-3: *Initiale Berechnung der von-Mises-Spannungen unter Verwendung der FEM*

7.2 Struktur der Methode

Im Rahmen dieser Arbeit finden bei der Finiten-Elemente-Methode hauptsächlich zweidimensionale Rechteckelemente Anwendung. Diese bieten den Vorteil, dass Mittelflächen mit virtuellen Wandstärken eingesetzt werden können, woraus für die anschließende Wandstärkenanpassung eine Parametrisierung und später eine automatisierte Berechnung erfolgen kann. Im Anschluss an die Berechnung liegt für jede Wabe bzw. für jede Wabenwand ein Ergebnis in Abhängigkeit der Zielgröße vor. Zur Übersicht der einzelnen Schritte und Zuordnung der Ergebnisse wird eine tabellarische Dokumentation, wie in Tabelle 7-2 dargestellt, empfohlen. In dieser Tabelle werden jeder Wabe bzw. Wabenwand folgende Attribute zugewiesen: Entwurfsnummer, aktueller Wabendurchmesser bzw. aktuelle Wabenwandstärke, Koordinaten der Mittelfläche, einzelne Spannungen und Verschiebungen.

Tabelle 7-2: Dokumentation der Optimierungszyklen

Kenngrößen	Werte aus den Optimierungsschleifen							
	Entwurfsnummer [-]	$v = 0$						$v = 0$
Wabenummer [-]	Ω						$\Omega + 1$...
Wabendurchmesser [mm]	$d_{s\Omega}$						$d_{s\Omega+1}$...
Wabenwandnummer [-]	Θ	$\Theta + 1$	$\Theta + 2$	$\Theta + 3$	$\Theta + 4$	$\Theta + 5$	$\Theta + 6$...
Koordinaten der Wabenwanddeckpunkte (Mittelfläche)								
Aktuelle Wandstärke [mm]	t_{Θ}	$t_{\Theta+1}$	$t_{\Theta+2}$	$t_{\Theta+3}$	$t_{\Theta+4}$	$t_{\Theta+5}$	$t_{\Theta+6}$...
$\sigma_{Ist} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$								
$\sigma_{Ziel} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$								
γ_{Ist} [mm]								

7.2.2 Überprüfung der Änderungs- und Abbruchkriterien

Bei der Überprüfung des Bauteils wird generell zwischen Änderungs- und Abbruchkriterien unterschieden. Änderungskriterien stellen die Weichen für die nächsten Schritte der Methode, das heißt, die Iterationsschleife wird nicht verlassen. Abbruchkriterien bedeuten eine Verletzung der Nebenbedingungen und veranlassen einen Abbruch der Vorgehensweise. Die Überprüfung der Änderungs- und Abbruchkriterien basiert auf den Ergebnissen der Bauteilberechnung und erfolgt nach jeder Änderung der Entwurfsvariablen. Die Änderungskriterien sowie die daraus resultierenden Vorgänge sind in Tabelle 7-3 beschrieben. Die Zielspannung ist immer in Abhängigkeit der geltenden Nebenbedingungen zu bewerten.

Tabelle 7-3: Mögliche Szenarien der Änderungskriterien

Szenario	Resultat
Zielspannung in jeder Wabe nicht erreicht, Wabendurchmesser nicht kritisch	Start bzw. Weiterführung des Optimierungsalgorithmus
Zielspannung in jeder Wabe erreicht, Wabendurchmesser kritisch	Substitution der „massiven“ Wabe durch Waben mit kleinerem Durchmesser und der initialen Wandstärke Erneute Berechnung des Bauteils und ggf. wiederholter Durchlauf der Optimierungsschleife
Zielspannung in einer Wabe nicht vorhanden, berechnete Wabenwandstärke außerhalb des zulässigen Bereichs	Wabenwand wird per Definition auf die entsprechende Grenze des Definitionsbereichs festgelegt

7.2 Struktur der Methode

Die möglichen Szenarien auf Basis der Abbruchkriterien zeigt Tabelle 7-4.

Tabelle 7-4: Mögliche Szenarien für Abbruchbedingungen

Szenario	Resultat
Zielspannung in jeder Wabe vorhanden, Wabendurchmesser nicht kritisch	Optimierungsvorgang erfolgreich
Zielspannung in jeder Wabe nicht erreicht, min. bzw. max. Wandstärke und Wabendurchmesser in jeder Wabe erreicht	Algorithmus verlässt die Optimierungsschleife
Anzahl der vorgegebenen Iterationszyklen erreicht	Abbruch des Algorithmus trotz nicht erreichter Zielspannung bzw. und eventueller Nichteinhaltung der Randbedingungen

7.2.3 Änderung der Wabenwandstärke

Den ersten Schritt innerhalb der Optimierungsschleife bildet die Anpassung der einzelnen Wabenwände. Ziel dieser Variation ist es, lokale Spannungsspitzen bzw. Änderungen im Spannungsverlauf zu egalisieren. Die obere und untere Grenze der Wabenwandstärke, auf die innerhalb des Kapitels zurückgegriffen wird, ist in der Spezifikationsliste dokumentiert.

Für die Anpassung der Wabenwandstärke gilt es zunächst die neue Wandstärke entsprechend der initialen bzw. vorherigen Berechnung zu ermitteln. Dabei werden die Zielspannung σ_{Ziel} und die aktuell berechnete Spannung σ_{Ist} ins Verhältnis gesetzt. Diesen Zusammenhang zur Berechnung der neuen Wabenwandstärke $t_{\Theta_{neu}}$ stellt Formel (7-1) dar.

$$|\sigma_{Ziel} - \sigma_{Ist}(t_{\Theta}, d_{s\Omega})| \neq 0 \rightarrow t_{\Theta_{neu}} = \frac{\sigma_{Ist}}{\sigma_{Ziel}} \cdot t_{\Theta_{alt}} \quad (7-1)$$

Die nachfolgende Abbildung 7-4 zeigt den schematischen Ablauf bei der belastungsgerechten Anpassung der einzelnen Wabenwände.

7 Methode zur belastungsgerechten Auslegung

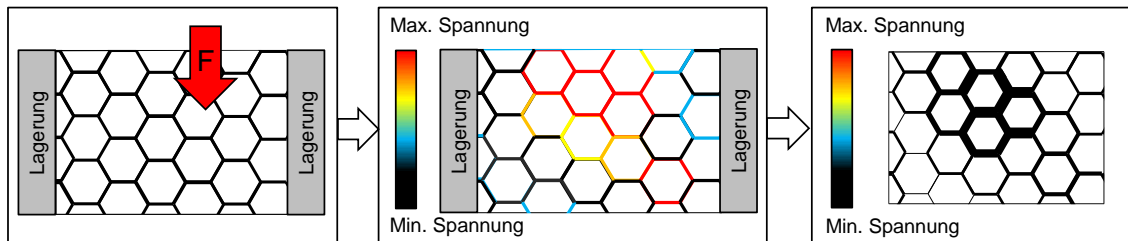


Abbildung 7-4: Schematischer Ablauf zur Anpassung der Wabenwandstärke

7.2.4 Änderung des Wabendurchmessers

Die Änderung der zweiten Entwurfsvariablen hat das zusätzliche Ziel, innerhalb des optimierten Bauteils, die geforderte Feingliederung von Strukturen (KLEIN 2009) wenn nötig zu erhöhen. Das heißt, Wabenkernbereiche mit einer Wandstärke $t_{\theta_{neu}} > \frac{d_s}{2}$, wie in Abbildung 7-5 dargestellt, gilt es durch feingliedrige Strukturen bestmöglich zu substituieren. Dadurch erfolgt in den meisten Fällen nur eine geringe Reduktion der Bauteilmasse. Jedoch kann durch die Feingliedrigkeit die homogene Spannungsverteilung lokal besser umgesetzt werden, da zusätzliche Wabenwände zur Verfügung stehen.

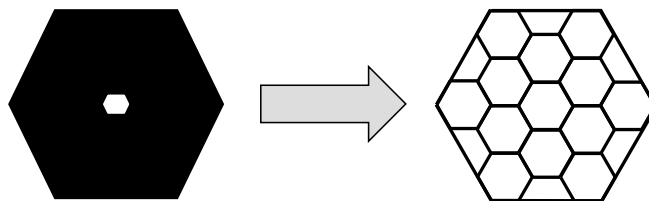


Abbildung 7-5: Massive Wabe wird zu feingliedriger Wabe

Ebenso kann durch die Variation des Wabendurchmessers auch eine lokale Versteifung umgesetzt werden, ohne dass die Wandstärke verändert werden muss. Bei der Substitution bleibt der Wabendurchmesser bzw. die Mittelfläche der massiven Wabe erhalten. Die Wandstärke wird auf die initiale Wabenwandstärke $t_{initial}$ zurückgesetzt, da sich erwartungsgemäß bei einer Änderung der Struktur auch das Potenzial zur Wandstärkenreduktion verändert. Somit ist es möglich auf die neuen Wabendurchmesser eine erneute Wandstärkenoptimierung anzuwenden. Mit dem nächsten Schritt erfolgt die Unterteilung der ursprünglichen Wabe in einzelne Waben mit kleinem Wabendurchmesser. Dazu wird eine Teilung gemäß Formel (7-2) empfohlen. Daraus können sich an den Randbereichen nur ganze, halbe oder drittel Waben ergeben. Dies hat in Bezug auf die Strukturmechanik den Vorteil, dass keine offenen Kanten vorhanden sind, welche die Steifigkeit der hexagonalen Waben limitieren können.

7.2 Struktur der Methode

$$d_{s\Omega_{neu}} = \frac{d_{s\Omega_{alt}}}{2^c} \text{ mit } c=1,2,3 \quad (7-2)$$

In Abbildung 7-6 sind die nach Formel (7-2) beschriebenen Wabendurchmesser dargestellt.

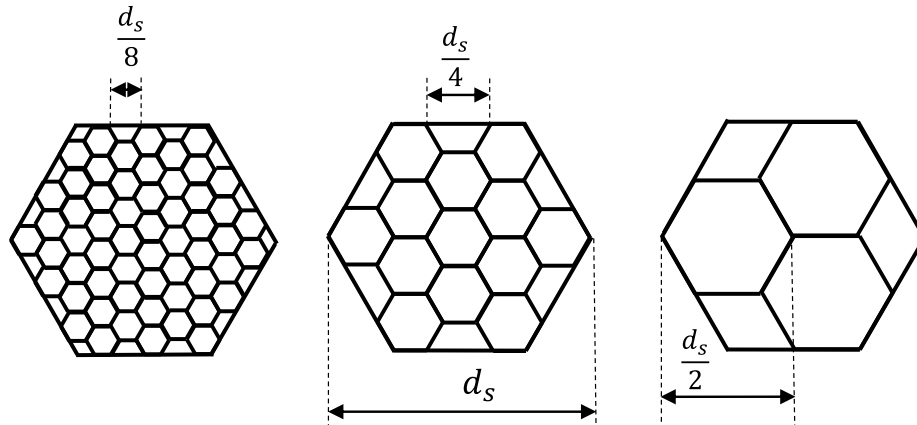


Abbildung 7-6: Vergleich: Gestaltung der Wabendurchmesser

Bei der Anpassung des Wabendurchmessers erfolgt zunächst die Aufteilung des Wabendurchmessers unter Verwendung von $c = 1$. Dadurch besteht die Möglichkeit zusätzliche Versteifungen zu integrieren bzw. Bauteilmasse, in Bezug auf die hexagonale Struktur, regelmäßig zu verteilen (KLEIN 2009). Werden weitere Strukturen zur Steigerung der Steifigkeit oder zur homogenen Materialanordnung benötigt, wird c jeweils um den Wert eins erhöht. Durch die regelmäßige Gestaltung des Wabendurchmessers ergibt sich die Möglichkeit, nebeneinanderliegenden Waben, wie in Abbildung 7-7 dargestellt, miteinander zu verbinden. Das Ergebnis dieser Vorgehensweise sind geschlossene Waben, die für einen gleichmäßigen Strukturaufbau sorgen.

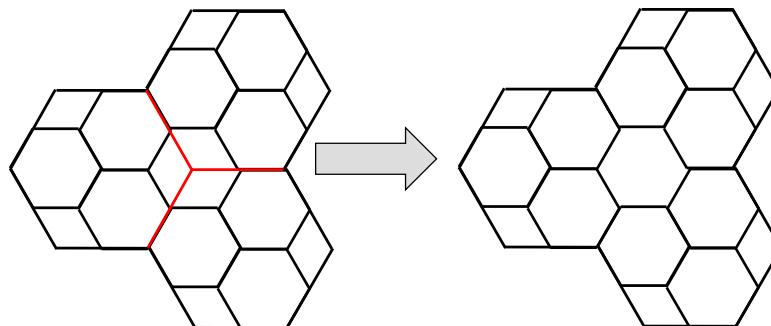


Abbildung 7-7: Verbindung von Waben nach der Durchmesseranpassung

7 Methode zur belastungsgerechten Auslegung

Die Vorgehensweise zur Anpassung des Wabendurchmessers ist in Abbildung 7-8 schematisch dargestellt.

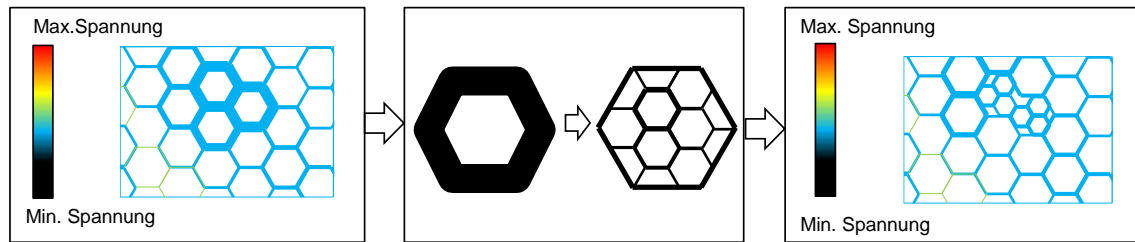


Abbildung 7-8: Schematische Vorgehensweise bei der Anpassung des Wabendurchmessers

Das Resultat einer erfolgreichen Anwendung der beschriebenen Methode stellt einen belastungsgerecht ausgelegten Wabenkern für Sandwichbauteile dar (siehe Abbildung 7-9).

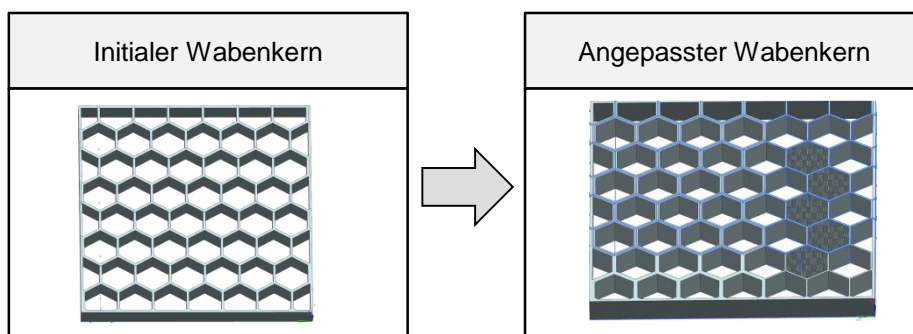


Abbildung 7-9: Belastungsgerechte Auslegung eines Wabenkerns

Der Wabenkern in Abbildung 7-9 ist an der linken Seite fest eingespannt und wird mit einer konstanten Flächenlast beansprucht. Hier konnte, bei nahezu konstanter Masse, die Vergleichsspannung um ca. 30 % und die Verschiebungen um ca. 15 % reduziert werden.

Ist nach einer erfolgreichen Optimierung bezüglich der Zielgröße bereits zu erkennen, dass der Wabenkern die Tendenz eines massiven Bauteils annimmt, sollte die Zielspannung oder die Werkstoffauswahl neu eruiert werden.

7.3 Zusammenfassung

In Kapitel 7 wird eine Methode entwickelt, welche eine belastungsgerechte Auslegung von Wabenkernen ermöglicht. Hierzu werden zunächst die Entwurfsvariablen Wabendurchmesser und wandstärke zur Zielerreichung ausgewählt. Aus-

7.3 Zusammenfassung

gehend vom Startentwurf erfolgt die initiale Berechnung, unter Verwendung numerischer Rechenverfahren, wie beispielsweise die Finite-Elemente-Methode. Im nächsten Schritt folgt die Bewertung der Ergebnisse. Hierbei wird zwischen Änderungs- und Abbruchkriterien unterschieden. Bei den Änderungskriterien erfolgt eine Variation der Entwurfsvariablen sowie die Durchführung einer weiteren Iterationsschleife. Die Abbruchkriterien führen zum Verlassen der Optimierungsschleife, wenn die geforderten Nebenbedingungen nicht erfüllt sind.

8 Validierung der Methodik

8.1 Aufbau des Kapitels

Ziel dieses Kapitels ist die entwickelte Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung von Wabenkernen für Sandwichbauteile am Beispiel eines Satellitenstrukturbauteils, einem sogenannten Block Insert, zu validieren. Dieses Bauteil wurde ausgewählt, da in der Raumfahrt ein hoher Bedarf an Leichtbaukomponenten besteht. Durch die Anwendung der Methodik auf die genannte Struktur soll die Möglichkeit zur gesteigerten Massenreduktion aufgezeigt werden. Den ersten Abschnitt in diesem Kapitel, wie in Abbildung 8-1 dargestellt, bildet die Vorstellung des Block Inserts. Hierbei werden die Aufgabe und die Funktion des Bauteils beschrieben, bevor abschließend die Anwendung der Methodik erfolgt. Für den Vergleich mit dem konventionellen Bauteil wird die FE-Methode gewählt. Grund hierfür ist, dass bei einem Test unter Realbedingungen nur begrenzte Daten (z. B. keine Bauteilspannungen auslesbar) zur Verfügung stehen.

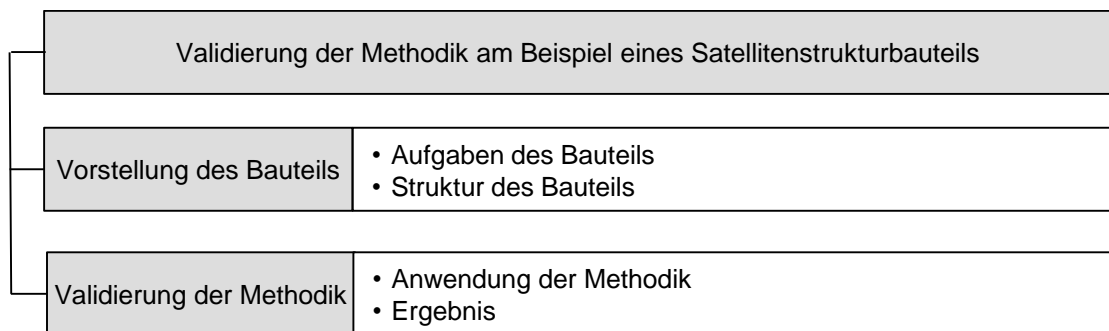


Abbildung 8-1: Aufbau von Kapitel 8

8.2 Block Insert des Sentinel 1 Spacecraft Satelliten

Die Validierung der Methodik erfolgt an einem Block Insert, welches im Satelliten *Sentinel 1B Spacecraft* der *European Space Agency* (ESA) zum Einsatz kommen soll. Dieser Satellit gehört zur *Sentinel*-Flotte, welche wiederum dem ESA-Erdbeobachtungsprogramm *Copernicus* zugeordnet ist. Hierbei erfolgt die Erdbeobachtung bzw. die Abtastung der Erdoberfläche durch ein *Synthetic Aperture Radar* (SAR). Die Struktur des Satelliten, dessen Aufbau schematisch in Abbildung 8-2 dargestellt ist, gliedert sich in zwei Bereiche: Der Kern, wel-

8 Validierung der Methodik

cher aus einer CFK-Struktur besteht und die Außenwand, welche zum einen aus großflächigen Aluminium-Sandwichplatten und zum anderen aus Aluminium-Block-Inserts besteht.

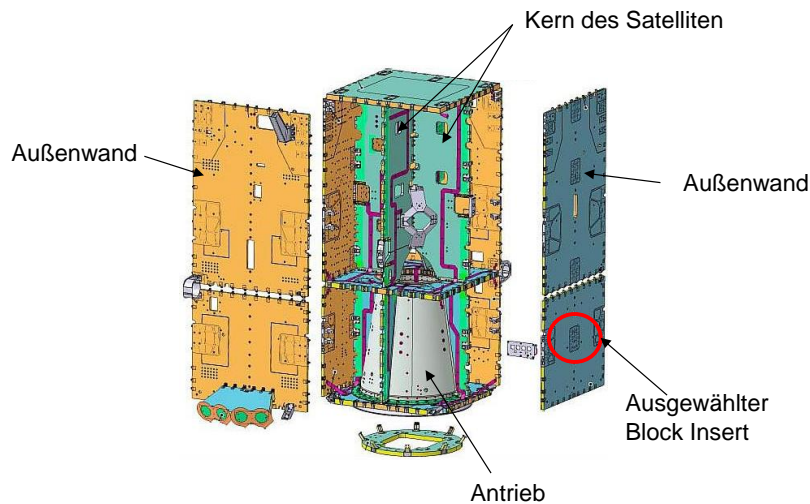


Abbildung 8-2: Struktureller Aufbau der Sentinel 1 Plattform (in Anlehnung an KRAMER (2002))

Die Einbettung von Block Inserts in die Außenwand erfolgt immer dann, wenn externe Komponenten, wie beispielsweise Antennenhalterungen, befestigt werden müssen. Diese Strukturbauteile können, im Gegensatz zu den Aluminium-Sandwichbauteilen, deutlich höhere Lasten aufnehmen. Eine schematische Abbildung eines Block Inserts und einer entsprechende Antennenhalterung sind in Abbildung 8-3 dargestellt.

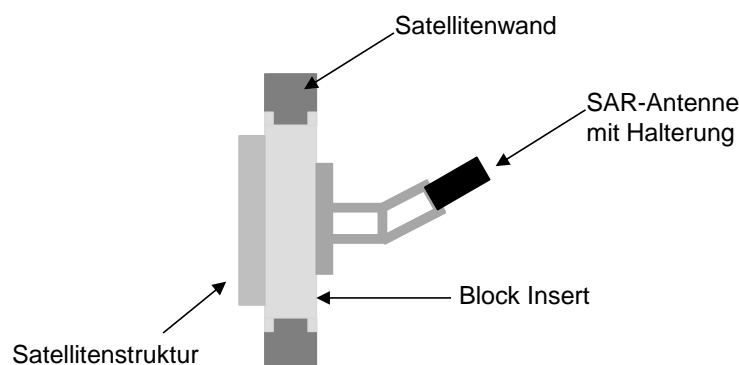


Abbildung 8-3: Schematische Darstellung eines eingebauten Block Inserts

Die Antennenhalterung wurde bereits durch Anwendung der Topologieoptimierung massenreduziert ausgelegt (RUAG SPACE 2014). Beim Block Insert hingegen handelt es sich um eine konventionelle Fräskonstruktion, die ein hohes Po-

8.2 Block Insert des Sentinel 1 Spacecraft Satelliten

tenzial zur Massenreduktion aufweist (siehe Abbildung 8-4). Daher soll die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik auf dieses Bauteil angewendet werden, um das bestehende Leichtbaupotenzial besser auszuschöpfen. Die Masse des spanend gefertigten Block Inserts beträgt 4,22 kg. Die anschließende Gegenüberstellung der Spannungen und Verschiebungen erfolgt auf Basis einer numerischen Berechnung. Hierzu wird das Block Insert, wie im Betriebsfall, mit vier Verschraubungen an der Kernstruktur des Satelliten befestigt. Die Anbindung der Antennenhalterung erfolgt ebenfalls durch vier Schraubverbindungen am Block Insert. Die Lagerung sowie die Aufbringung der Belastungen, ist in Abbildung 8-4 dargestellt. Als Kräfte werden jeweils eine Kraft in x-, y- und z-Richtung aufgebracht, sowie Torsionsmomente um die y- und z-Achse (siehe Tabelle 8-4). Dieser Fall stellt die maximal auftretenden Belastungen (*worst-case*) dar. Als Materialmodell werden die Daten aus Tabelle 8-4 herangezogen. (Die Tabelle ist ein Teil der entwickelten Methodik und beinhaltet die Rahmenbedingungen. Daher wird in Abschnitt 8.3 eine ausführliche Beschreibung gegeben sowie die Anwendung der Methodik erläutert.)

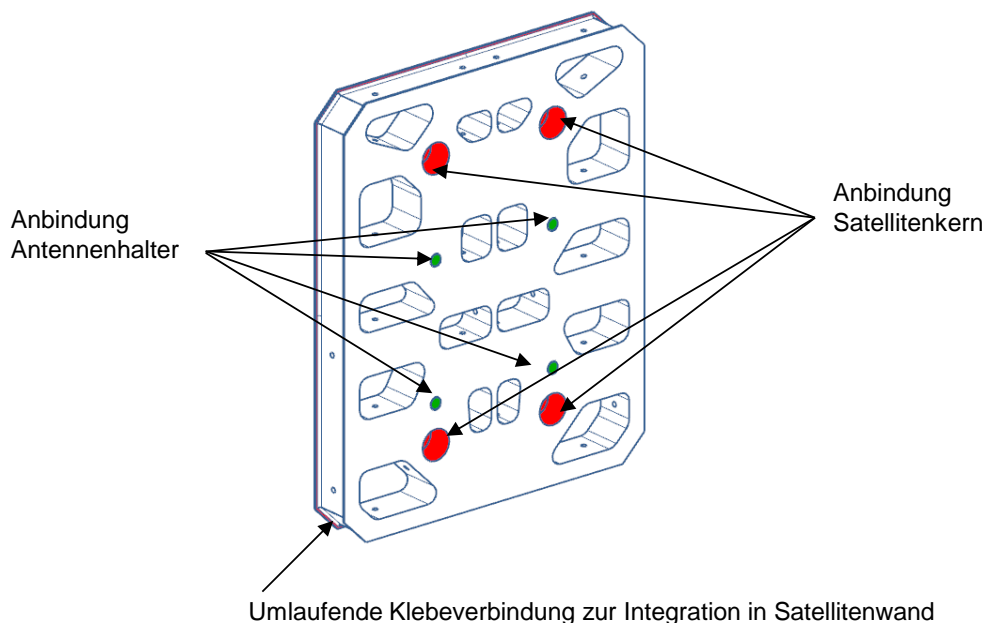


Abbildung 8-4: Lagerung des Block Inserts (grün: Anbindung Antennenhalter; rot: Anbindung Satellitenstruktur)

Die Ergebnisse der numerischen Struktursimulation des konventionellen Bauteils sind in Abbildung 8-5 dargestellt. Aus Geheimhaltungsgründen werden die Ergebnisse für die anschließende Bewertung prozentual angegeben. Somit wird die Zielspannung σ_{Ziel} , bei der sich alle Bauteilbereiche im elastischen Spannungszustand befinden, mit 100 % definiert. Für die Verschiebungen wird ebenfalls

8 Validierung der Methodik

eine Mindestanforderung von 100 % festgelegt. Die Berechnung erfolgt unter Verwendung eines Solvers für statische Lastfälle. Die maximale von-Mises-Vergleichsspannung und die maximalen Verschiebungen treten an den Funktionselementen auf (siehe Abbildung 8-5).

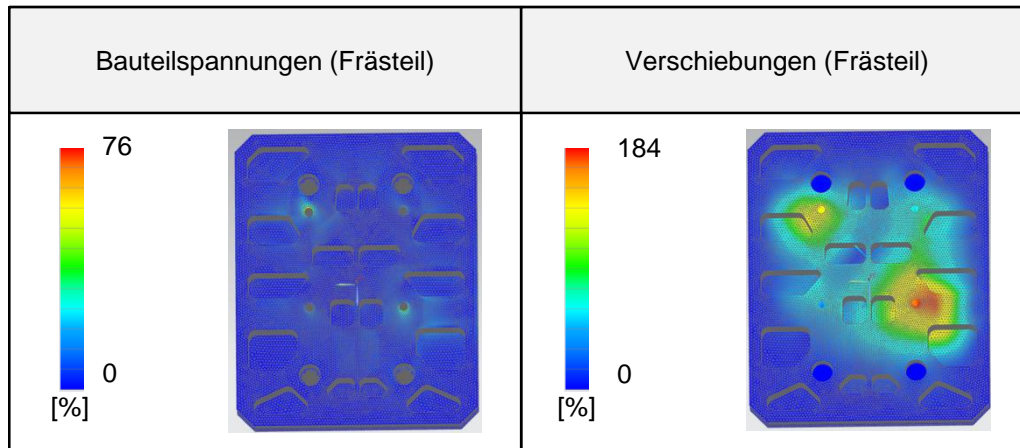


Abbildung 8-5: Ergebnisse der numerischen Simulation des Frästeils

Die von-Mises-Vergleichsspannung des konventionellen Bauteils beträgt im Vergleich zur Zielspannung 76 %. Die maximale Verschiebung liegt bei 184 % und ist deutlich über der Mindestanforderung von 100 %. Somit kann festgehalten werden, dass das Leichtbaupotenzial nicht bestmöglich ausgenutzt wird. Zur Steigerung der Massenreduktion wird im nachfolgenden Abschnitt die Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung von Wabenkernen für Sandwichbauteile auf das Frästeil angewandt.

8.3 Anwendung der Methodik

Den ersten Schritt der Methodik bildet die Erstellung einer Spezifikationsliste, in der die Eingangsgrößen des Bauteils, wie in Tabelle 8-1 dargestellt, festgelegt werden. Die Vorgaben für die Spezifikationsliste ergeben sich aus den Anforderungen an das Block Insert. Zunächst wurden die Zielfunktion und die Zielgrößen für die funktions- und belastungsgerechte Auslegung des Bauteils definiert.

8.3 Anwendung der Methodik

Tabelle 8-1: Zielfunktion und Zielgrößen für das Block Insert

Kategorie	Beschreibung	Formelzeichen	Kenngröße
Zielfunktion und Zielgröße	Zielfunktion	$f(t, d_s) = \min_{t, d_s} \sigma_{Ziel} - \sigma_{Ist}(t, d_s) $	
	Zielspannung	σ_{Ziel}	100 %
	Zielbereich (vgl. 4.3.2)		± 3 %
	Nebenbedingung	$\gamma_{optimiert} \wedge \gamma_{original} \leq \gamma_{Ziel}$ (mindestens 100 %)	

Den nächsten Schritt bildet die Bestimmung der initialen Werte. Dabei wurde das Vorgehen aus Abschnitt 4.3.3 angewandt. Die Basis für die Auslegung der Wabenstruktur bilden die auftretenden Betriebslasten. Die Ergebnisse der Berechnung der initialen Entwurfsvariablen sind in Tabelle 8-2 aufgelistet.

Tabelle 8-2: Entwurfsvariablen für das Block Insert

Kategorie	Beschreibung	Formelzeichen	Kenngröße
	Minimale Wabenwandstärke	t_{ug}	0,2 mm
	Maximale Wabenwandstärke	t_{og}	$\frac{d_s}{2}$
	Initiale Wabenwandstärke	$t_{initial}$	0,2 mm
	Minimaler Wabendurchmesser	$d_{s,ug}$	3 mm
	Maximaler Wabendurchmesser	$d_{s,og}$	20 mm
	Initialer Wabendurchmesser	$d_{s,initial}$	10,8 mm

8 Validierung der Methodik

Die Randbedingungen in Bezug auf das Block Insert, wie beispielsweise die Abmessungen des Designraums oder Stetigkeit der Fläche, werden in Tabelle 8-3 dokumentiert.

Tabelle 8-3: Bauteilrandbedingungen für das Block Insert

Kategorie	Beschreibung	Formelzeichen	Kenngröße
Bauteil- geometrie	Fläche stetig?		ja
	Fläche differenzierbar?		ja
	Abmessungen Wabenkern (Designraum)	l	245 mm
		b	210 mm
		h_K	23 mm
	Abmessungen Deckschicht	h_{DS}	jeweils 1 mm
	Schnittpunkte der Normalenvektoren innerhalb des Designraums vorhanden?		Nein, da ebenes Bauteil
Koordinatensystem	-	Kartesisches Koordinatensystem mit x,y,z	

Nach der Definition der geometrischen Randbedingungen des Bauteils sind die fertigungstechnischen und materialspezifischen Kenngrößen, wie in Tabelle 8-4 aufgezeigt, zu definieren. Für das Block Insert wurde eine Monomaterialbauweise vorgegeben. Dies bedeutet, dass die Deckschichten und der Wabenkern aus demselben Material gefertigt werden. Die Herstellung des Bauteils erfolgt unter Verwendung des additiven Fertigungsverfahrens Laserstrahlschmelzen. Dieses Verfahren ist das am weitest verbreitete und angewandte Verfahren für den schichtweisen Aufbau von Metallbauteilen.

8.3 Anwendung der Methodik

Tabelle 8-4: Materialien und Fertigungsverfahren für das Block Insert

Kategorie	Beschreibung	Formelzeichen	KenngroÙe
Materialkennwerte	Kern und Deckschicht (Monomaterial)	-	AlSi10Mg (EOS GMBH 2014)
	Materialdichte	ρ	2,67 g/cm ³
	Zugfestigkeit	R_m	345 ± 20 MPa
	Elastizitätsmodul	E	60 ± 10 MPa
	Streckgrenze	R_e	230 ± 10 MPa
	Bruchdehnung	A	11 ± 2 %
	Querkontraktionszahl	ν	0,3 (KRENKEL 2009)
Fertigungsverfahren	Additive Fertigung	Laserstrahlschmelzen	
	Anlagenbauraum	250 mm x 250 mm x 350 mm	

Die Belastungen und Lagerungen für die anschließende Auslegung werden in der Tabelle 8-5 dokumentiert. Die einzelnen Daten mussten aus Geheimhaltungsgründen verfremdet werden.

8 Validierung der Methodik

Tabelle 8-5: Definition der Lasten und Lagerungen für das Block Insert

Kategorie	Beschreibung	Formelzeichen	Kenngröße
Belastungen und Lagerung	<u>Kräfte (Punktlasten)</u>		
	in x-Richtung (verfremdet)	F_1	10.000 N
	in y-Richtung (verfremdet)	F_2	10.000 N
	in z-Richtung (verfremdet)	F_3	10.000 N
	<u>Momente</u>		
	um die z-Achse (verfremdet)	M_z	1.000 Nm
	um die y-Achse (verfremdet)	M_y	1.000 Nm
	Belastungsart		Statische Belastung
Sicherheitsfaktor	S	1,3	
Position der Lagerung	Siehe Abbildung 8-4		

Den letzten Teil der Spezifikationsliste bildet die Dokumentation der Funktionsintegration. In Tabelle 8-6 sind die einzelnen Funktionselemente sowie die entsprechenden Anforderungen beschrieben. Bei der Auslegung des Block Inserts ist als zusätzliche Funktion die Integration von Gewindeeinsätzen gefordert. Deren Positionen sowie die Wandstärke der einzelnen Inserts werden aus den Anforderungen an das Bauteil übernommen. Die Integration von Steckverbindungen ist für dieses Bauteil nicht notwendig, da der zur Verfügung stehende Bauraum die Bauteilabmessungen nicht unterschreitet. Ebenso werden für den Druckausgleich Entlüftungsbohrungen für jede Wabe benötigt, da auf der Erde ein anderer Luftdruck herrscht, wie im Weltall. Ansonsten würden die einzelnen Waben bzw. die Deckschichten bereits mit einer Druckbelastung beansprucht.

8.3 Anwendung der Methodik

Tabelle 8-6: Funktionsintegration für das Block Insert

Kategorie	Beschreibung	Formelzeichen	Kenngröße
Funktionsintegration (Inserts)	Anzahl der Inserts	-	4 Stück
	Insert-Position	-	durch Originalbauteil festgelegt
	Insert-Wanddicke	f	8 mm
Funktionsintegration (Druckausgleich)	Durchmesser		3 mm
	Position		Jede Wabe

Nachdem alle Randbedingungen erfolgreich beschrieben und festgelegt wurden, erfolgt im nächsten Abschnitt die Erstellung der initialen Wabenstruktur.

Die Gestaltung der Wabenstruktur basiert auf der in Kapitel 5 beschriebenen Vorgehensweise. Der Wabenkern, wie in Abbildung 8-6 dargestellt, wurde mit der initialen Wabenwandstärke $t_{initial} = 0,2 \text{ mm}$ und dem initialen Wabendurchmesser $d_{s,initial} = 10,8 \text{ mm}$ festgelegt. Im Anschluss an die Generierung der Wabenstruktur werden die Inserts sowie die Druckausgleichsbohrungen in den Wabenkern integriert (in Anlehnung an Kapitel 6). Für die Anbindungsstellen muss, aufgrund der Fertigung des Bauteils als Monomaterial, keine gesonderte Ausführung zur Deckschicht vorgesehen werden.

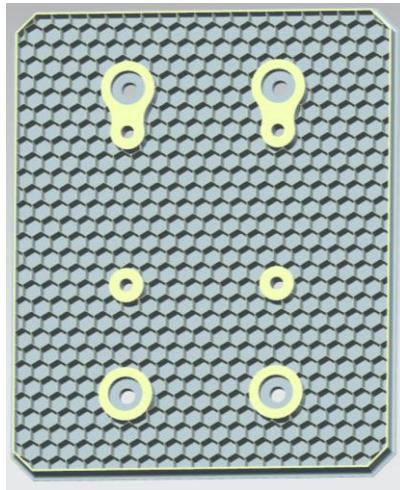


Abbildung 8-6: Block Insert nach initialer Wabenerstellung

Für die belastungsgerechte Auslegung wurde die Methode gemäß Kapitel 7 angewandt. Im Anschluss an die Aufbringung der Wabenstruktur erfolgt entsprechend der Vorgehensweise die initiale Berechnung. Die Ergebnisse der Finiten-Elemente-Methode sind in Abbildung 8-7 dargestellt.

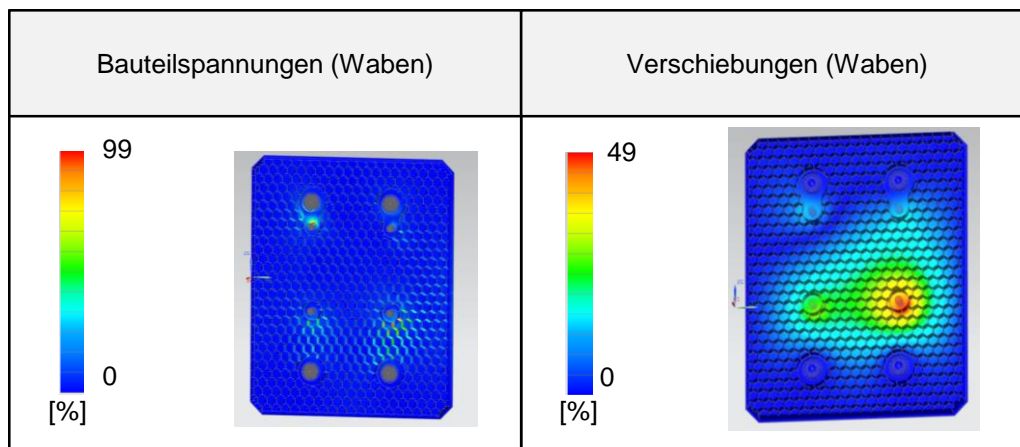


Abbildung 8-7: Ergebnisse der initialen Berechnung

Nach einer initialen numerischen Berechnung des Sandwichbauteils konnte festgestellt werden, dass durch die gewählte Wandstärke von $t_{initial} = 0,2 \text{ mm}$ das Leichtbaupotenzial nur lokal bestmöglich ausgeschöpft wird. Grund hierfür ist, dass nicht jede Wabenwand die Zielspannung erfährt. Gemäß dem Ablauf innerhalb der Methode würde jetzt eine Anpassung der Wabenwände bzw. des Wabendurchmessers erfolgen. Da es sich beim initial berechneten Durchmesser bereits um die Fertigungsgrenze handelt, kann hier keine weitere Verringerung der Wabenwandstärken erfolgen. Die Variation des Wabendurchmessers erfolgt gemäß der Vorgehensweise nur dann, wenn die maximale Wabenwandstärke

8.4 Zusammenfassung

erreicht ist. Da diese bisher nicht erreicht ist, erfolgt keine Anpassung des Wabendurchmessers zur Erreichung der Zielspannung. Bei der Betrachtung der zu erfüllenden Nebenbedingungen ist jedoch festzustellen, dass die Verschiebung des Wabenbauteils nicht der Mindestzielverschiebung von 100 % entspricht. Hier liegt ein Unterschied von 51 % vor. Somit muss eine Anpassung der Wabenwandstärke bzw. des -durchmessers erfolgen, um die geforderte Verschiebung zu erreichen. Hierzu wird, wie in der Methode beschrieben, zunächst eine iterative Variation der Wabenwandstärke durchgeführt. Erreicht die Wabenwandstärke den maximal zulässigen Wert, erfolgt die Versteifung des Bauteils durch die Variation des Wabendurchmessers. Das Ergebnis der angewandten Methode stellt Abbildung 8-8 dar. Das Erreichen der Mindestzielverschiebung konnte ohne die Variation des Wabendurchmessers erfolgen. Durch die Anpassung der Wabenwände zum Erreichen der Nebenbedingungen ist die Zielspannung abgefallen, jedoch liegt diese immer noch im Zielspannungsbereich (vgl. $\sigma_{\text{Ziel}} \pm 3\%$).

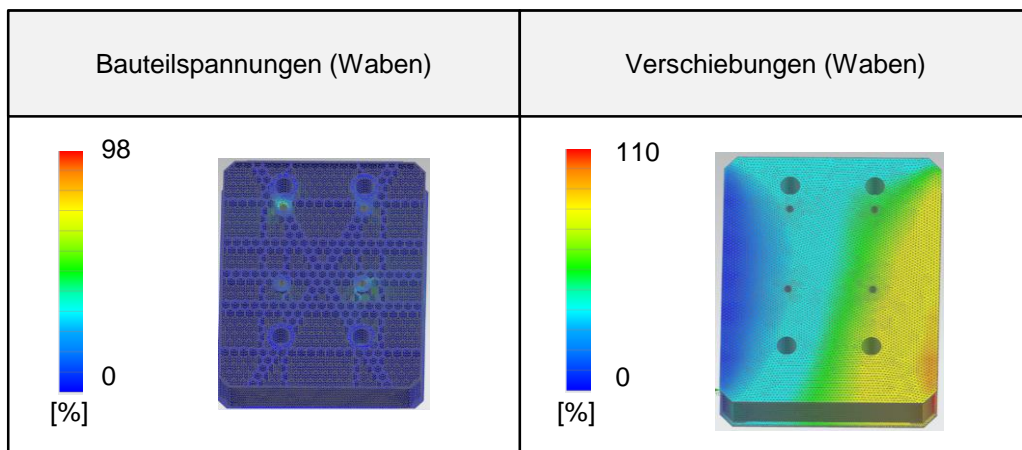


Abbildung 8-8: Anwendung der Methodik auf das Ausgangsbauteil

Die Masse des optimierten Bauteils beträgt nach der Anwendung der Methodik 2,85 kg, bei Einhaltung der geforderten Verschiebung und Ausnutzung der Zielspannung. Dies bedeutet eine Massenreduktion um mehr als 30 % zum Ausgangsbauteil.

8.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird die Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung auf ein Satellitenstrukturbauteil angewandt. Gemäß der Vorgehensweise (vgl. Kapitel 4) wird zunächst eine Spezifikationsliste erstellt, welche alle

8 Validierung der Methodik

Anforderungen und Randbedingungen an das Bauteil dokumentiert. Auf Basis der initialen Entwurfsvariablen werden die Wabenstruktur sowie die Funktionselemente konstruiert. Außerdem wird durch die Berücksichtigung von Druckausgleichsbohrungen eine weitere geforderte Funktion in den Wabenkern integriert. Den Abschluss der Methodik bildet die belastungsgerechte Auslegung. Hierbei kann das Potenzial der Methode aufgrund der bestehenden fertigungstechnischen Randbedingungen, welche aus der additiven Fertigung resultieren, nicht vollständig ausgeschöpft werden. Dennoch wird eine Massenreduktion von über 30 % erreicht. Das additiv gefertigte und leichtbauoptimierte Block Inserts ist in Abbildung 8-9 dargestellt.

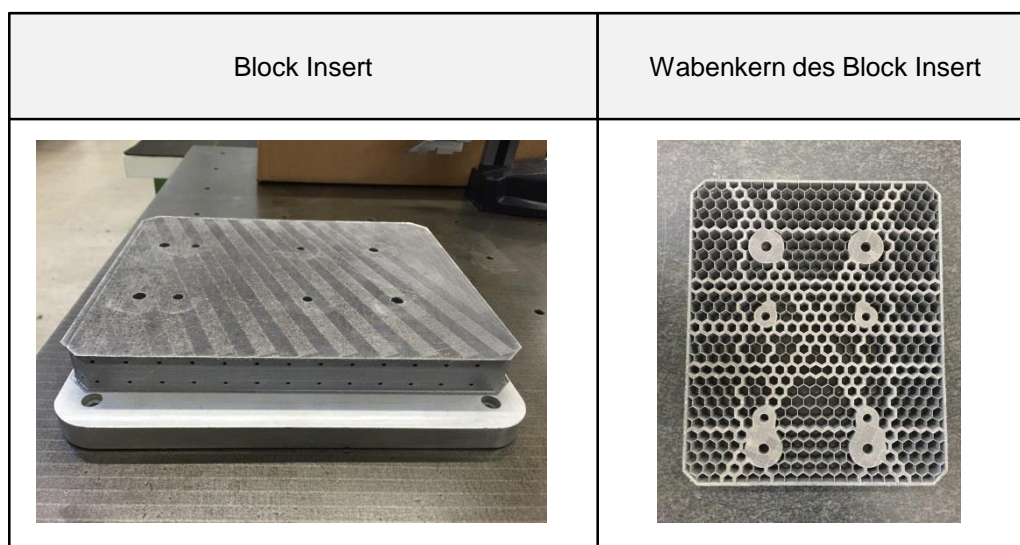


Abbildung 8-9: Additiv gefertigtes Block Insert mit Wabenkern

9 Bewertung der entwickelten Methodik

9.1 Aufbau des Kapitels

In den vorangegangenen Kapiteln wurde eine Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung von Wabenkernen für Sandwichbauteile entwickelt und die theoretischen Untersuchungen an einem Anwendungsbeispiel validiert. Die Zielsetzung dieses Kapitels ist die Bewertung der aufgezeigten Methodik. Für die technisch-wirtschaftliche Bewertung wird das im vorherigen Kapitel betrachtete Block Insert herangezogen. Die Bewertung der Methodik, in Bezug auf die abgeleiteten Anforderungen, erfolgt wie in Abbildung 9-1 dargestellt.

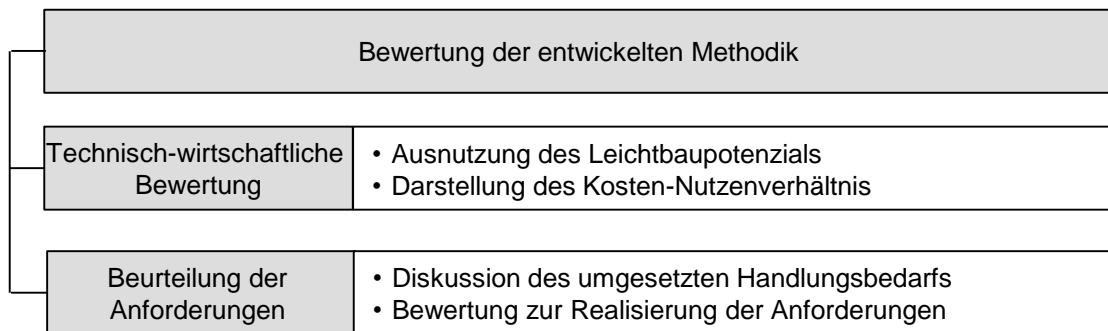


Abbildung 9-1: Aufbau des Kapitels

9.2 Technisch-wirtschaftliche Bewertung

Die Ergebnisse aus Kapitel 8 zeigen, dass die Referenzwerte unter Anwendung der Methodik erreicht werden und zusätzlich eine Massenreduktion von über 30 % möglich ist. Dadurch, dass die technische Vergleichbarkeit zwischen dem konventionell und dem additiv gefertigten Block Insert gegeben ist, kann anschließend eine vergleichende wirtschaftliche Betrachtung durchgeführt werden. Hierzu erfolgt die Bewertung entlang des Produktlebenszyklus.

Konstruktion

Die Bewertung von Aufwand und Konstruktion erfolgt zu Gunsten des konventionellen Block Inserts. Hier zeigt sich, dass aufgrund der geringeren Komplexität des Frästeils, weniger als die Hälfte der Arbeitszeit einer Konstrukteurin bzw. eines Konstrukteurs notwendig ist. Somit ergibt sich für die Konstruktion des konventionellen Block Inserts ein Aufwand von vier Ingenieurstunden

9 Bewertung der entwickelten Methodik

(400 Euro) und für die Anwendung der Methodik zur Gestaltung des Bauteils eine Arbeitszeit von neun Stunden (900 Euro). Durch eine Automatisierung der Methodik, könnten die Konstruktionskosten um bis zu 80 % reduziert werden. Die veranschlagten Beträge sind an den Kostensatz eines Großunternehmens aus der Raumfahrtbranche angelehnt.

Fertigung

Nach der erfolgreichen Konstruktion und Auslegung des Bauteils ist die Herstellung zu betrachten. Die Fertigung des konventionellen Block Inserts erfolgt mittels Fräsen. Das optimierte Bauteil hingegen wird unter Verwendung des Laserstrahlschmelzens gefertigt. Beim Werkstoff handelt es sich, wie in der Spezifikationsliste dargestellt, um eine Aluminium-Leichtbaulegierung. Für die spanende Fertigung werden Halbzeuge und für das Laserstrahlschmelzen wird der Werkstoff in Pulverform beschafft. Die Maschinen- und Personalkosten betragen für das Fräsbauteil 1.200 Euro. Die Kosten für die additive Fertigung belaufen sich auf 1.400 Euro. Die Durchlaufzeit beträgt für die spanende Fertigung ein Arbeitstag und für die additive Fertigung 1,5 Arbeitstage. Beim Laserstrahlschmelzen ist eine Differenzierung im Qualitätsniveau, verglichen mit den spanenden Prozessen, zu berücksichtigen. Dies zeigt sich beispielsweise daher, dass die Nachbearbeitung von Funktionsflächen notwendig ist. So müssen beispielsweise beim additiv gefertigten Block Insert die Gewinde und Funktionsflächen spanend nachgearbeitet werden; erst dann ist auch die Vergleichbarkeit gegeben.

Als Fazit kann daher festgehalten werden, dass die Konstruktion und Fertigung des konventionellen Block Inserts 1,5 Tage dauert und 1.800 Euro kostet. Bei der additiven Fertigung sind für einen kompletten Durchlauf der Prozesskette 4 Tage einzuplanen und Bauteilkosten von 2.520 Euro zu berücksichtigen. Eine Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Herstellkosten zeigt Tabelle 9-1.

9.2 Technisch-wirtschaftliche Bewertung

Tabelle 9-1: Gegenüberstellung der Herstellungskosten

Kostenart	Kosten [€]	
	Originalteil	Optimiertes Bauteil
Konstruktion	400	900
Materialkosten	200	220
Fertigungskosten	1.200	1.400
Herstellkosten	1.800	2.520

Nutzung

Für eine ganzheitliche wirtschaftliche Bewertung sind nicht nur die Herstellungskosten, sondern auch die Folgekosten zu betrachten. Für das Satellitenbauteil bedeutet dies, dass hier die Kosten zu berücksichtigen sind, welche dafür notwendig sind, um ein Kilogramm Nutzlast ins Weltall zu transportieren. Als Basis für die Amortisationsrechnung wird ein Kostensatz für den Transport von einem Kilogramm mit 12.000 Euro definiert (ESA 2015). Somit ergeben sich für den Transport des konventionellen Block Inserts die Kosten gemäß Formel (9-1).

$$K_{Transport,Ref} = 4,22 \text{ kg} \cdot 12.000 \frac{\text{Euro}}{\text{kg}} = 50.640 \quad (9-1)$$

Die Transportkosten des optimierten Bauteils berechnen sich nach Formel (9-2).

$$K_{Transport,Opt} = 2,85 \text{ kg} \cdot 12.000 \frac{\text{Euro}}{\text{kg}} = 34.200 \quad (9-2)$$

Für die abschließende Bewertung gilt es die Herstellungs- und die Transportkosten, wie in Tabelle 9-2 aufgezeigt, gegenüberzustellen.

Zusammenfassend kann daher festgestellt werden, dass durch die Anwendung der Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung von Wabenkerne für dieses Bauteil die Möglichkeit zur Kostenersparnis von 15.720 Euro besteht. Zur allgemeingültigen Betrachtung der technisch-wirtschaftlichen Bewertung werden die Herstellkosten zunächst auf ein Kilogramm normiert. Dies ergibt für die konventionelle Fertigung Kosten von 426,54 €/kg und für die addi-

9 Bewertung der entwickelten Methodik

tive Fertigung 884,21 €/kg. Daraus kann abgeleitet werden, dass sich die Mehrkosten zur Anwendung der Methode für dieses Bauteil erst dann amortisieren, wenn für jedes eingesparte Kilogramm mindestens eine Kostenreduktion von mehr als 457,67 € im anschließenden Betrieb gegeben ist.

Tabelle 9-2: Gegenüberstellung der Kosten

Kosten	Referenzbauteil [€]	Optimiertes Bauteil [€]
Herstellkosten	1.800	2.520
Transportkosten ins All	50.640	34.200
Summe:	52.440	36.720

9.3 Beurteilung der Anforderungen

In Kapitel 3 wurden die allgemeinen Anforderungen für die Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung von Wabenkernen für Sandwichbauteile ausgearbeitet. Diese werden innerhalb dieses Abschnitts bezüglich des Erfüllungsgrads diskutiert und bewertet. In Abbildung 9-2 ist die Erfüllung der Anforderungen an die Methodik zusammenfassend bewertet und graphisch dargestellt.

Die übergeordnete Anforderung an die Methodik bestand darin, ein *zentrales Datenmanagement* zur Verfügung zu stellen, in welchem alle Daten und Schnittstellen während des gesamten Auslegungsprozesses dokumentiert sind. Hierzu wurde auf das bereits etablierte Vorgehen, gemäß der Richtlinie VDI 2222-1 (1997), zurückgegriffen. Das Ergebnis bildet eine Spezifikationsliste, die speziell für die Gestaltung von Wabenkernen erstellt wurde. Darin werden die Anforderungen an das Bauteil sowie die Schnittstellen definiert.

Die bestehenden Gestaltungsmethoden für Wabenkerne (uniforme Waben) konnten durch die entwickelte Methode zur *konformen Anordnung des Wabenkerns* erweitert werden. Jedoch bestehen für die erarbeitete Vorgehensweise Einschränkungen in Bezug auf das zu betrachtende Bauteil. Die Methode kann nicht für beliebige Bauteile angewandt werden, da es beispielsweise für un stetige Flächen keine Möglichkeit gibt, eine durchgängige Wabenstruktur aufzubringen.

Die Anforderung zur *Integration von Funktionselementen* konnte erfüllt und ebenfalls in eine Vorgehensweise überführt werden. Aufgrund der Vielzahl an

9.3 Beurteilung der Anforderungen

möglichen Funktionen, die in einen Wabenkern integriert werden können, wurden im Rahmen dieses Vorgehens zwei exemplarische Funktionen aufgezeigt. Diese Vorgehensweise ist jedoch auf beliebige Funktionen erweiterbar.

Für die Sicherstellung eines möglichen Transfers in die Anwendung galt die Anforderung zur *Berücksichtigung der fertigungstechnischen Randbedingungen*. Diese Grenzen konnten durch umfangreiche Literaturrecherchen, für unterschiedliche additive Fertigungsverfahren, identifiziert und in die Vorgehensweise implementiert werden. Außerdem bestand, für eine möglichst breite Anwendung der Methodik, die Anforderung nach *Allgemeingültigkeit*. Daher wurde die Vorgehensweise CAD-plattformunabhängig entwickelt. Dies erlaubt einen Transfer auf beliebige Softwaretools. Durch die Verwendung einer übergeordneten Spezifikationsliste, auf die alle einzelnen Bausteine der Vorgehensweise zugreifen können, kann die Methodik beliebig erweitert werden. Dadurch ist ebenfalls *der modulare Aufbau*, gemäß den Anforderungen, gegeben.

Allgemeine Anforderungen an die Methodik	
Integration eines zentralen Datenmanagements	●
Berücksichtigung der konformen Anpassung von Wabenkernen	◐
Integration von Funktionselementen	◐
Berücksichtigung von Strukturoptimierungsansätzen	◐
Modularer Aufbau der Methodik	●
Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit	◑
Automatisierbarkeit der Vorgehensweise	●
Allgemeingültigkeit der Methodik	●
Berücksichtigung der fertigungsgerechten Gestaltung	●

Legende: ● voll erfüllt ◐ schwerpunktmäßig erfüllt ◑ teilweise erfüllt ○ nicht erfüllt

Abbildung 9-2: Bewertung der Erfüllung der an die Methodik gestellten Anforderungen

Im vorherigen Abschnitt erfolgte eine technisch-wirtschaftliche Bewertung der entwickelten Methodik am Beispiel eines Block Inserts. Hierbei konnten die Aufwände bei der Anwendung der Vorgehensweise an einem industriell relevanten Bauteil abgeschätzt und bewertet werden. Bei einer Gegenüberstellung der

9 Bewertung der entwickelten Methodik

konventionellen Vorgehensweise und der entwickelten Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung, konnte die *Wirtschaftlichkeit* abgeschätzt werden.

10 Schlussbetrachtung

10.1 Zusammenfassung

Die immer knapper werdenden Ressourcen sowie die steigenden Rohstoffpreise stellen die Produktentwicklung täglich vor die Herausforderung innovative und massereduzierte Bauteile zu gestalten. Zur Erreichung dieser Zielsetzung werden unter anderem bionische Leichtbaustrategien, wie beispielsweise die Verwendung von Sandwichbauteilen mit Wabenkernen, angewandt. Das Leichtbaupotenzial, das diese Ansätze aufweisen, kann unter Anwendung der konventionellen Fertigungsverfahren nur bedingt ausgenutzt werden. Neue Gestaltungsmöglichkeiten für Bauteile bieten die additiven Fertigungsverfahren. Hierdurch kann eine zusätzliche Massenreduktion in Leichtbauelementen, wie beispielsweise in Sandwichbauteilen, erfolgen. Zur Ausschöpfung dieses Potenzials ist neben der Substitution des Fertigungsverfahrens auch eine Erweiterung von bestehenden Konstruktionsmethoden zur Auslegung von Sandwichbauteilen notwendig. Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht darin, eine Konstruktionsmethodik zu entwickeln, welche das Leichtbaupotenzial in Sandwichbauteilen gesteigert ausnutzt. Zur Zielerreichung wird eine modulare Vorgehensweise gewählt, welche in den einzelnen Abschnitten ausführlich beschrieben ist.

Den ersten Baustein der Arbeit bildet die Zusammenfassung der Rechercheergebnisse des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik in Kapitel 2. Hierbei stehen vor allem Methoden zur Gestaltung und Auslegung von strukturierten Kernen für Sandwichbauteile im Fokus. Die Umsetzung der Konstruktionen erfolgt überwiegend mittels konventioneller Fertigungsverfahren (FLEMMING ET AL. 1996; KOPP ET AL. 2009). Weiter kann aufgezeigt werden, dass vor allem unter Verwendung der Schichtbauverfahren bereits eine Vielzahl an Gestaltungsmethoden für Kerne aus Gitterstrukturen zur Verfügung stehen (ENGELBRECHT ET AL. 2009; ROSEN 2007). Gleichzeitig existieren aber keine Ansätze zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung von Wabenstrukturen.

Die Ableitung des Handlungsbedarfs erfolgt in Kapitel 3. Aufgrund der dargestellten Defizite, in Bezug auf den Stand der Wissenschaft und Technik, kann das hohe Potenzial der Wabenkerne für Sandwichbauteile aufgezeigt werden. Dieses Potenzial kann erst durch die Verwendung der additiven Fertigungsverfahren nahezu vollständig ausgeschöpft werden. Jedoch steht keine Konstruktionsme-

thodik zur Verfügung, die Konstrukteurinnen und Konstrukteuren bei der Auslegung von additiv gefertigten Wabenkernen unterstützt.

Zur Abdeckung des geforderten Handlungsbedarfs wird in Kapitel 4 eine *Methodik zur funktions- und belastungsgerechten Gestaltung von additiv gefertigten Wabenkernen für Sandwichbauteile* entwickelt. Dieses Vorgehen beinhaltet einen Analyseteil und drei nachgelagerte Methoden. Der Ablauf bei der Anwendung der Methodik ist sequenziell. Der Analyseteil dient zur Erfassung der Randbedingungen und Überprüfung der Systemgrenzen. Alle Randbedingungen, die im Rahmen der Methodik Anwendung finden, werden nach erfolgreicher Überprüfung in einer Spezifikationsliste dokumentiert.

In Kapitel 5 wird die *Methode zur Anpassung von Wabenstrukturen an eine Fläche* beschrieben. Diese Vorgehensweise bildet den ersten Baustein in der Methodik. Zur Anwendung kommt dieses Vorgehen meist dann, wenn eine gekrümmte Wabenstruktur konstruiert werden soll. Den initialen Schritt stellt die Generierung eines Netzes auf der Fläche dar, auf dem die Eck- bzw. Konstruktionspunkte der final entstehenden Wabenstruktur definiert werden. Im nächsten Schritt gilt es die einzelnen Schnittpunkte zu hexagonalen Strukturen zu verbinden. Anschließend wird der Normalenvektor an jedem Wabeneckpunkt berechnet und die Extrusion des Gitternetzes zu hexagonalen Waben durchgeführt.

Die *Methode zur Funktionsintegration in Wabenkernen* wird in Kapitel 6 ausführlich beschrieben. Hierbei werden Vorgehensweisen zur Integration von Funktionselementen und zur Anbringung von Verbindungselementen entwickelt. Die Anwendung des jeweiligen Vorgehens basiert auf den Anforderungen, welche in der Spezifikationsliste dokumentiert sind.

Die Strukturoptimierung des Wabenkerns erfolgt in Kapitel 7. Die *Methode zur belastungsgerechten Auslegung von Wabenkernen für Sandwichbauteile* zielt darauf ab, die Masse innerhalb des Bauteils so zu verteilen, dass eine homogene Spannungsverteilung und somit eine minimal notwendige Bauteilmasse resultiert. Dazu werden der Wabendurchmesser und die -wandstärke als Entwurfsvariablen definiert und in Abhängigkeit der Zielgröße variiert.

Die Validierung der entwickelten Methodik ist in Kapitel 8 dargestellt. Als Anwendungsbauteil wird ein Satellitenstrukturbauteil ausgewählt. Dieses Block Insert erlaubt es, Anbauteile wie beispielsweise Antennen an einen Satelliten zu montieren, ohne dass die filigrane Außenwand beschädigt wird. In diesem Kapitel wird das spanend gefertigte Originalbauteil als Designraum verwendet. Durch

die Anwendung der entwickelten Methodik kann, unter Berücksichtigung der Zielgröße und der Nebenbedingungen, eine Massenreduktion von 30 % erreicht werden.

Kapitel 9 adressiert die technische und wirtschaftliche Bewertung der entwickelten und angewandten Vorgehensweise. Im Rahmen der Bewertung erfolgt zunächst die Betrachtung der technischen Merkmale, wie beispielsweise der Vergleich der Bauteilspannungen und der Verschiebungen. Die wirtschaftliche Bewertung hingegen fokussiert die Amortisation der Herstellkosten entlang des Produktlebenszyklus. Das Block Insert zeigt hier im Gegensatz zum konventionell gefertigten Bauteil deutliche Kostenvorteile auf. Die Beurteilung zur Realisierung des Handlungsbedarfs bzw. der Anforderungen an die Methodik ist zum größten Teil positiv erfolgt.

10.2 Ausblick

Durch die Entwicklung einer Methodik zur belastungs- und funktionsgerechten Gestaltung additiv gefertigter Wabenkerne für Sandwichbauteile konnte eine systematische Vorgehensweise zur gesteigerten Ausnutzung des Leichtbaupotenzials in Wabenkernen, im Vergleich zu den bestehenden Ansätzen, aufgezeigt werden. Zur Erhöhung der Massenreduktion, in Bezug auf das gesamte Sandwichbauteil, muss die Methodik zur Auslegung des Wabenkerns um die Gestaltung der Deckschichten erweitert werden. Auch hier bestehen Möglichkeiten zur belastungsgerechten Auslegung, wie beispielsweise durch die Berücksichtigung der Faserorientierung bei Deckschichten aus technischen Textilien. Eine mögliche Entwurfsvariable könnte hierbei die Deckschichthöhe darstellen. Des Weiteren ist die Berücksichtigung der Wabenkernhöhe als weitere Optimierungsgröße ebenfalls zu untersuchen. Durch die Vergrößerung des Abstands der Deckschichten zueinander resultiert die Erhöhung des Steiner Anteils, was zu einer Steigerung der Steifigkeit im Bauteil führt.

Neben der reinen Betrachtung der geometrischen Parameter sind in den nachfolgenden Arbeiten ebenfalls die Kenntnisse über die fertigungstechnischen Randbedingungen, speziell für Wabenstrukturen, zu erweitern. Das heißt, über sogenannte *Baubarkeitsstudien* gilt es, die positionsabhängigen Limitierungen im Bauraum bestmöglich zu charakterisieren und diese in ein Materialmodell zu überführen. In diesem Materialmodell sollten anschließend für jede Position im Bauraum die fertigungstechnischen Randbedingungen sowie die mechanischen

10 Schlussbetrachtung

Kennwerte abrufbar sein. Dadurch kann das Bauteil bestmöglich an den Fertigungsprozess angepasst werden und das Leichtbaupotenzial besser ausgeschöpft werden.

Ebenso sei hier die Verwendung der Multimaterialbauweise erwähnt, welche eingeschränkt bereits in der additiven Fertigung angewandt werden kann. Bei diesem Ansatz wird in Bauteilbereichen, die hochbelastet sind, ein Werkstoff mit höherer Festigkeit eingesetzt und an wenig belasteten Bereichen ein Werkstoff mit geringerer Festigkeit und niedrigerer relativer Materialdichte verwendet. Dieser alternative Ansatz bzw. die Kombination aus der Anpassung der geometrischen und werkstofflichen Parameter zeigt in der Theorie ein hohes Leichtbaupotenzial, bezogen auf das gesamte Sandwichbauteil.

11 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion - Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser 2011. ISBN: 978-3446425958.

ADAM & ZIMMER 2014

Adam, G.; Zimmer, D.: Design for Additive Manufacturing - Element transitions and aggregated structures. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 7 (2014) 1, S. 20–28.

ALCATEL ALENIA SPACE 2006

Alcatel Alenia Space: Carbon-carbon sandwich panel assembly. http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2006/07/Carbon-carbon_sandwich_panel_assembly - 28.09.2015.

BAUMEISTER ET AL. 2007

Baumeister, J.; Rausch, G.; Stöbener, K.; Lehmus, D.; Busse, M.: Verbundwerkstoffe mit Aluminiumschaum - Anwendungen im Schienenfahrzeugbau. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 38 (2007) 11, S. 939–942.

BERGER 1994

Berger, J.: Technische Mechanik für Ingenieure. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag 1994. ISBN: 978-3322898982.

BITZER 1997

Bitzer, T.: Honeycomb Technology. London, New York: Chapman & Hall 1997. ISBN: 978-0412540509.

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, Heidelberg: Springer 2013. ISBN: 978-3642243240.

DANKERT & DANKERT 2013

Dankert, H.; Dankert, J.: Technische Mechanik. 7. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013. ISBN: 978-3834822352.

DEGISCHER & LÜFTL 2009

Degischer, H.-P.; Lüftl, S.: Leichtbau - Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten. Weinheim: Wiley-VCH 2009. ISBN: 978-3527323722.

DELPY 1989

Delpy, U.: Schnappverbindungen aus Kunststoff: Anwendung und Auslegung, Einflüsse der Gestalt, des Werkstoffs und der Fertigung. Renningen: Expert 1989. ISBN: 978-3816904885.

ECSS 2011

ESA Requirements and Standards Division: Space engineering - Insert design handbook. Noordwijjk, Niederlande: [ohne Verlagsnennung] 2011.

11 Literaturverzeichnis

EHRENSPIEL & MEERKAMM 2013

Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5. Aufl. München: Carl Hanser 2013. ISBN: 978-3446435483.

EISEN 2010

Eisen, M. A.: Optimierte Parameterfindung und prozessorientiertes Qualitätsmanagement für das Selective-Laser-Melting-Verfahren. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2010) Aachen: Shaker 2010. ISBN: 978-3832288273. (Berichte aus der Fertigungstechnik).

ELSNER ET AL. 2007

Elsner, P.; Eyerer, P.; Hirth, T.: Handbuch Polymer Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer 2007. ISBN: 978-3540724025.

EMMELMANN ET AL. 2011A

Emmelmann, C.; Sander, P.; Kranz, J.; Wycisk, E.: Laser Additive Manufacturing and Bionics: Redefining Lightweight Design. Physics Procedia 12 (2011) Part A, S. 364–368.

EMMELMANN ET AL. 2011B

Emmelmann, C.; Scheinemann, P.; Munsch, M.; Seyda, V.: Laser Additive Manufacturing of Modified Implant Surfaces with Osseointegrative Characteristics. Physics Procedia 12 (2011) Part A, S. 375–384.

ENGELBRECHT ET AL. 2009

Engelbrecht, S.; Folgar, L.; Rosen, D. W.; Schulberger, G.; Williams, J.: Cellular Structures for Optimal Performance. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg): Proceedings of the 20th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX), 03.-05 August 2009: The University of Texas at Austin 2009; S. 831-842.

ENGELN 2006

Engeln, W.: Methoden der Produktentwicklung: Skripten der Automatisierungstechnik. München: Oldenbourg Industrieverl. 2006. ISBN: 978-3835631120.

EOS 2014

EOS: Werkstoffdatenbank.
<<http://www.eos.info/werkstoffe-m>> - 26.09.2015.

ERICSON 2005

Ericson, C.: Real-time collision detection. Amsterdam, Boston: Elsevier 2005. ISBN: 978-1558607323.

ESA 2015

Artikel: Erfolgsstory Raumtransport: Wie Phoenix aus der Asche.
<http://www.esa.int/ger/ESA_in_your_country/Germany/Erfolgsstory_Raumtransport_Wie_Phoenix_aus_der_Asche> - 22.10.2015.

EVANS 1991

Evans, K. E.: The design of doubly curved sandwich panels with honeycomb cores. Composite Structures 17 (1991) 2, S. 95–111.

11 Literaturverzeichnis

FIBRE GLAST 2015

Fibre Glast Developments Corporation: Nomex® Honeycomb
<http://www.fibreglast.com/product/Nomex_Honeycomb_1562/Vacuum_Bagging_Sandwich_Core> - 09.12.2015.

FLEMMING ET AL. 1996

Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen - Halbzeuge und Bauweisen. Berlin, Heidelberg: Springer 1996. ISBN: 978-3540606161.

FRIED 2013

Fried, M.: Mathematik für Ingenieure 1 für Dummies - Für den Kick in der Mathematik. Weinheim: Wiley-VCH 2013. ISBN: 978-3527706938.

FUNKE 2001

Funke, H.: Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges. Diss. Universität Paderborn (2001).

GEBHARDT 2013

Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren - Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. 4. Aufl. München: Carl Hanser 2013. ISBN: 978-3446436527.

GFRERRER 2011

Gfrerrer, A.: Kurven und Flächen - eine Einführung. (Vorlesungsskript TU Gratz, Institut für Geometrie)
<https://people.math.ethz.ch/~acannas/2014_FS_MathematikII/gfrerrer_kurve_n_und_flaechen.pdf> - 29.09.2015.

GIBSON ET AL. 2010

Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B.: Additive manufacturing technologies. New York: Springer 2010. ISBN: 978-1441911193.

GIBSON & ASHBY 1997

Gibson, L. J.; Ashby, M. F.: Cellular solids. 2. Aufl. Cambridge, New York: Cambridge University Press 1997. ISBN: 978-0-521495608.

GROTE & FELDHUSEN 2014

Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. 24. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2014. ISBN: 978-3642388910.

GRÜNDEMANN 2011

Gründemann, H.: Grundlagen der Differentialgeometrie. (Vorlesungsskript HS Mittweida)
<<http://www.staff.hs-mittweida.de/~hgruende/Files/diffgeo.pdf>> - 29.09.2015.

HARDING 2015

Harding, A.: CIM - Composites in Manufacturing.
<<http://www.composites-manufacturing.com/features/31/201310/515/>> - 09.12.2015.

11 Literaturverzeichnis

HAREL & FELDMANN 2006

Harel, D.; Feldman, Y. A.: Algorithmik – Die Kunst des Rechnens. Berlin, Heidelberg: Springer 2006. ISBN: 978-3540374374.

HEIMBS 2008

Heimbs, S.: Sandwichstrukturen mit Wabenkern: Experimentelle und numerische Analyse des Schädigungsverhaltens unter statischer und kurzzeitdynamischer Belastung. Diss. Technische Universität Kaiserslautern (2008).

HENNING & MOELLER. 2011

Henning, F.; Moeller, E.: Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung. München: Carl Hanser 2011. ISBN: 978-3446428911.

KAHMEN 2006

Kahmen, H.: Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde. 20. Aufl. Berlin: Walter de Gruyter 2006. ISBN: 978-3110184648.

KALTENMORGEN 2008

Kaltenmorgen, B.: Der mathematische Patchworker. Gelnhausen: Wagner 2008. ISBN: 9783-866833821.

KAMPS & REINHART 2014

Kamps, T.; Reinhart, G.: Increasing transmission efficiency by implementation of a conformal cooling system using additive manufacturing. DDMC - Direct Digital Manufacturing Conference 2014. Berlin, 12.-13. März 2014.

KAUSCH 2013

Kausch, M.: Entwicklung hochbelasteter Leichtbaustrukturen aus lasergenerierten metallischen Komponenten mit Faserverbundverstärkung. Diss. Technische Universität Chemnitz (2012): Auerbach: Wissenschaftliche Scripten 2013. ISBN: 978-3942267779.

KERZ 1988

Kerz, P.: Natürliche und technische Konstruktionen in Sandwichbauweise. Konstruktion 40 (1988) [keine Nummernangabe], S. 41–47.

KIEF & ROSCHI WAL 2011

Kief, H. B.; Roschiwal, H. A.: CNC-Handbuch 2011/12. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3446425941.

KLAHN ET AL. 2014

Klahn, C.; Leutenecker, B.; Meboldt, M.: Design for Additive Manufacturing – Supporting the Substitution of Components in Series Products. Procedia CIRP 21 (2014) [keine Nummernangabe], S. 138–143.

KLEIN 2009

Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion - Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2009. ISBN: 978-3834899651.

KLEIN 2010

Klein, B.: FEM - Grundlagen und Anwendung der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010. ISBN: 978-3834808448.

11 Literaturverzeichnis

KOBER 2012

Kober, M.: Ein Beitrag zur strukturmechanischen Optimierung realer Bauteile in metallischer und Faserverbundbauweise unter Verwendung von wirkebenenbasierten Bruchkriterien. Diss. Brandenburgische Technische Universität Cottbus (2011). Berlin: Mensch & Buch (2012) ISBN: 978-3863870850.

KOPP ET AL. 2009

Kopp, G.; Kuppinger, J.; Friedrich, H. E.; Henning, F.: Innovative Sandwichstrukturen für den funktionsintegrierten Leichtbau. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 111 (2009) 4, S. 298–305.

KOSSIRA 1996

Kossira, H.: Grundlagen des Leichtbaus - Einführung in die Theorie dünnwandiger stabförmiger Tragwerke. Berlin, Heidelberg: Springer 1996. ISBN: 978-3540607861.

KRAMER 2002

Kramer, H.: Copernicus: Sentinel-1.
<<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-1>> - 26.05.2015.

KRENKEL 2009

Krenkel, W.: Verbundwerkstoffe – 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde. Weinheim: Wiley-VCH 2009. ISBN: 978-3527627127.

KRIECHBAUM 1994

Kriechbaum, R.: Ein Verfahren zur Optimierung der Faserverläufe in Verbundwerkstoffen durch Minimierung der Schubspannungen nach Vorbildern der Natur. Diss. Technische Hochschule Karlsruhe (1994).

LINDEMANN 2005

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Berlin, Heidelberg: Springer 2005. ISBN: 978-3540140412.

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3642014239.

MAHESHWARAA ET AL. 2007

Maheshwaraa, U.; Bourell, D.; Seepersad, C. C.: Design and freeform fabrication of deployable structures with lattice skins. Rapid Prototyping Journal 13 (2007) 4, S. 213–225.

MÄHL 2008

Mähl, F.: Untersuchungen zur tragkonstruktiven Eignung transluzenter Sandwichstrukturen mit polymerer Kernschicht. Diss. Technische Universität Kaiserslautern (2008).

MATTHECK 2006A

Mattheck, C.: Design in der Natur. 4. Aufl. Freiburg im Breisgau: Rombach Druck- und Verlagshaus 2006. ISBN: 978-3-793094708.

11 Literaturverzeichnis

MATTHECK 2006B

Mattheck, C.: Verborgene Gestaltgesetze der Natur. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie 2006. ISBN: 978-3923704538.

MEINERS 1999

Meiners, W.: Direktes selektives Laser-Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (1999). Aachen: Shaker 1999. ISBN: 978-3826565717. (Berichte aus der Lasertechnik).

MOLDENHAUER 2011

Moldenhauer, H.: Berechnung variabler Faserverläufe zur Optimierung von Compositestrukturen. *Lightweight Design* 4 (2011) 1, S. 51-26.

NACHTIGALL 2003

Nachtigall, W.: Bau-Bionik - Natur, Analogien, Technik. Berlin, Heidelberg: Springer 2003. ISBN: 978-3540443360.

NACHTIGALL 2005

Nachtigall, W.: Biologisches Design – Systematischer Katalog für bionisches Gestalten. Berlin, Heidelberg: Springer 2005. ISBN: 978-3540227892.

NACHTIGALL & BLÜCHEL 2000

Nachtigall, W.; Blüchel, K.: Das grosse Buch der Bionik. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt 2000. ISBN: 978-3421058010.

NAMASIVAYAM & SEEPERSAD 2011

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

NEDISAN 2014

Nedisan, C.: Differentialgeometrie: Differentialtopologie und Riemannsche Geometrie. [ohne Verlagsnennung] 2014.

NGUYEN ET AL. 2012

Nguyen, J.; Park, S.; Rosen, D. W.; Folgar, L.; Williams, J.: Conformal Lattice Structure Design and Fabrication. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg): Proceedings of the 23th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX), 06.-08 August 2012: The University of Texas at Austin 2012; S. 138–161.

NITSCHKE 2014

Nitschke, M.: Geometrie – Anwendungsbezogene Beispiele und Grundlagen. 2. Aufl. München: Carl Hanser 2014. ISBN: 978-3446441736.

PAPULA 2009

Papula, L.: Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 10. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2009. ISBN: 978-3834807571.

PONN 2011

Ponn, J.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3642205798.

11 Literaturverzeichnis

RAO 2009

Rao, S. S.: Engineering Optimization: Theory and Practice. 4. Aufl. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons 2009. ISBN: 978-0470183526.

REHME 2009

Rehme, O.: Cellular design for laser freeform fabrication. Diss. Technische Universität Hamburg-Harburg. Göttingen (2009): Cuvillier 2009. ISBN: 978-3869552736. (Schriftenreihe Lasertechnik Band 4).

REINHART & TEUFELHART 2011

Reinhart, G.; Teufelhart, S.: Load-Adapted Design of Generative Manufactured Lattice Structures. Physics Procedia 12 (2011) Part A, S. 385–392.

RISS & TEUFELHART 2012

Schutzrecht DE 102012016309A1 Patent (20.02.2014). Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.. Pr.: 10 2012 016 309.616.08.2012

Riss, F.; Teufelhart, S.: Verfahren zur Herstellung einer Sandwichplatte sowie Sandwichplatte.

RISS & MAYER 2013

Schutzrecht DE 102013209979A1 Patentanmeldung (04.12.2014). Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.. Pr.: 10 2013 209 979.728.05.2013

Riss, F.; Mayer, M.: Verfahren zum Ausbilden eines Leichtbauteils mit einem Tragekern und Tragekern.

RIB ET AL. 2013

Riß, F.; Teufelhart, S.; Reinhart, G.: Auslegung von Gitter- und Wabenstrukturen für die additive Fertigung. Lightweight Design 6 (2013) 1, S. 24–28.

RISS ET AL. 2014A

Riss, F.; Grafen, N.; Reich, J.; Schilp, J.: Belastungsgerechte Auslegung von Sandwichbauteilen für die additive Fertigung. In: Tagungsband RapidTech 2014 (Hrsg.): Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-Technologie. Erfurt, 14.-15. Mai 2014. Erfurt: DESOTRON 2014. ISBN: 978-3932875366.

RISS ET AL. 2014B

Riss, F.; Schilp, J.; Reinhart, G.: Load-dependent Optimization of Honeycombs for Sandwich Components – New Possibilities by Using Additive Layer Manufacturing. Physics Procedia 56 (2014) [keine Nummernangabe], S. 327–335.

ROSEN 2007

Rosen, D. W.: Computer-Aided Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures. Computer-Aided Design and Applications 4 (2007) 5, S. 585–594.

11 Literaturverzeichnis

RUAG SPACE 2014

RUAG Space AG: Aus dem 3D-Drucker in den Weltraum.

<<http://www.ruag.com/de/space/medien/medienmitteilungen/news/ruag-pioneers-3d-printing-for-space/882637e6165ffcdefc9c575309dd4d23/>> - 26.05.2015.

SCHUH 2006

Schuh, G.: Produktionsplanung und -steuerung. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2006. ISBN: 978-3540403067.

SCHUMACHER 2013

Schumacher, A.: Optimierung mechanischer Strukturen. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2013. ISBN: 978-3642346996.

SORGER 2012

Sorger, C. G.: Generierung von Netzen für Finite Elemente hoher Ordnung in zwei und drei Raumdimensionen. Diss. Technische Universität München. München (2012).

SPIERINGS 2014

Spierings, A. B.: Anwendung additiver Fertigung im klassischen Leichtbau mit Composite-Strukturen. 9. Swiss Rapid Forum am 16.09.2014. St. Gallen, Schweiz, 16. September 2014.

STAMM & WITTE 1974

Stamm, K.; Witte, H.: Sandwichkonstruktionen: Berechnung, Fertigung, Ausführung. Wien: Springer 1974. ISBN: 978-3211811214.

STEINHILPER 2012

Steinhilper, R.: Handbuch Konstruktion. München: Carl Hanser 2012. ISBN: 9783-446434035.

STEINKE 2010

Steinke, P.: Finite-Elemente-Methode: Rechnergestützte Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3642112041.

SVIRIDOV 2011

Sviridov, A.: Leichtbau mit Aluminiumschaumsandwich. Diss. Brandenburgische Technische Universität Cottbus (2011).

TEUFELHART 2014

Teufelhart, S.: Investigation of the Capability of Flux of Force Oriented Lattice Structures for Lightweight Design. Advanced Materials Research [keine Jahrgangangabe] (2014) 907, S. 75–87.

THOMAS 2009

Thomas, D.: The Development of Design Rules for Selective Laser Melting. Zugel. Diss. University of Wales (2009).

TORSAKUL 2007

Torsakul, S.: Modellierung und Simulation eines Verbunds von Sandwichplatten zur Entwicklung einer mechanischen Verbindungstechnik. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2007).

11 Literaturverzeichnis

TURAU 2009

Turau, V.: Algorithmische Graphentheorie. 3. Aufl. München: Oldenbourg 2009. ISBN: 978-3486590579.

VDI 2222-1 1997

VDI 2222, Blatt 1: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Berlin: Beuth 1997.

VDI 3405 2014

VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. Berlin: Beuth 2014.

VDI 6220-1 2012

VDI 6220, Blatt 1: Bionik - Konzeption und Strategie - Abgrenzung zwischen bionischen und konventionellen Verfahren/Produkten. Berlin: Beuth 2012.

WADLEY 2006

Wadley, H. N. G.: Multifunctional periodic cellular metals. *Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 364 (2006) 1838, S. 31–68.

WANG & ROSEN 2002

Wang, H.; Rosen, D. W.: Computer-Aided Design Methods for Additive Fabrication of Truss Structures. *International Conference on Manufacturing Automation (ICMA 2002)*, Hong Kong, China, 10.-12. Dezember 2002, S. 181-198.

WEGNER & WITT 2013

Wegner, A.; Witt, G.: Prozessbeherrschung als Grundlage für eine erfolgreiche Funktionsintegration in additiv gefertigten Kunststoffbauteilen. In: Zäh, M. (Hrsg.): *17. Augsburger Seminar für additive Fertigung*. München: Utz 2013. ISBN: 978-3831642656.

WERKLE 2008

Werkle, H.: *Finite Elemente in der Baustatik*. 3. Aufl. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn 2008. ISBN: 978-3528288822.

WIEDEMANN 1996

Wiedemann, J.: *Leichtbau: Elemente und Konstruktion*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 1996. ISBN: 978-3540607465.

WIEDEMANN 2007

Wiedemann, J.: *Leichtbau*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2007. ISBN: 9783-540336570.

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) 1, S. 231–239.

WOHLERS 2013

Wohlers, T. T.: *Wohlers Report 2013: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report*. Fort Collins, USA: Wohlers Associates 2013. ISBN: 978-0975442999.

11 Literaturverzeichnis

WOHLERS 2005

Wohlers, W.: Mehrstufige Optimierung komplexer strukturmechanischer Probleme. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2004). Göttingen: Cuvillier 2005. ISBN: 978-3865374790.

ZÄH & HAGEMANN 2006

Zäh, M.; Hagemann, F.: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. München: Carl Hanser 2006. ISBN: 978-3446228542.

ZENKERT 1997

Zenkert, D.: The handbook of sandwich construction. Cradley Heath (USA): Engineering Materials Advisory Services 1997. ISBN: 978-0947817961.

12 Anhang

Spezifikationsliste zur funktions- und belastungsgerechten Auslegung additiv gefertigter Wabenkerne für Sandwichbauteile.

Tabelle 12-1: Zielfunktion und Zielgröße

Kategorie	Beschreibung	Formelzeichen	Kenngröße
Zielfunktion und Zielgröße	Zielfunktion		
	Zielgröße	σ_{Ziel}	
	Zielbereich	$\pm 3 \%$	

Tabelle 12-2: Entwurfsvariablen

Kategorie	Beschreibung	Formelzeichen	Kenngröße
	Minimale Wabenwandstärke	t_{ug}	
	Maximale Wabenwandstärke	t_{og}	
	Initiale Wabenwandstärke	$t_{initial}$	
	Minimaler Wabendurchmesser	$d_{s;ug}$	
	Maximaler Wabendurchmesser	$d_{s;og}$	
	Initialer Durchmesser	$d_{s;initial}$	

Tabelle 12-3: Bauteilrandbedingungen

Kategorie	Beschreibung	Formelzeichen	Kenngröße
Bauteil- geometrie	Fläche stetig?		
	Fläche differenzierbar?		
	Abmessungen Wabenkern (Designraum)	l b h_K	
	Abmessungen Deckschicht	h_{DS}	
	Schnittpunkte der Normalen- vektoren innerhalb des Design- raums vorhanden?		
	Koordinatensystem	-	

Tabelle 12-4: Funktionsintegration

Kategorie	Beschreibung	Formelzeichen	Kenngröße
Funktions- integration (z B. Inserts)	Anzahl der Inserts	-	
	Insert-Position wählbar	-	
	Insert-Wanddicke	f	

12 Anhang

Tabelle 12-5: Materialien und Fertigungsverfahren

Kategorie	Beschreibung	Formelzeichen	KenngroÙe
Materialkennwerte	Kern und/ oder Deckschicht	-	
	Materialdichte	ρ	
	Zugfestigkeit	R_m	
	Elastizitätsmodul	E	
	Streckgrenze	R_e	
	Bruchdehnung	A	
	Querkontraktionszahl	ν	
Fertigungsverfahren	Additive Fertigung		
	Anlagenbauraum		

Tabelle 12-6: Definition der Lasten und Lagerungen

Kategorie	Beschreibung	Formelzeichen	KenngroÙe
Belastungen und Lagerung	Kräfte und Momente		
	Belastungsart		
	Sicherheitsfaktor	S	
	Referenzverschiebung	γ	
	Position und Art der Lagerung		

13 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) und am Fraunhofer IWU in den Jahren 2011 bis 2015, unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten. Dabei wurden verschiedene Fragestellungen zur Gestaltung und Auslegung von Wabenkernen für Sandwichbauteile untersucht. Deren Ergebnisse flossen teilweise in das vorliegende Dokument ein. Der Autor dankt allen Studierenden für Ihr Engagement und Ihre Unterstützung bei dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Studierende(r)	Studienarbeit
Grafen, N.	Innovative geometrie- und belastungsgerechte Konstruktion von Wabenstrukturen für den Leichtbau mithilfe additiver Fertigung, Bachelorarbeit, 2013, eingeflossen in Abschnitt 5.2.
Heuchler, J.	Untersuchung von Entwicklungsmethoden für die belastungsgerechte Auslegung von additiv gefertigten Wabenkernen für die Anwendung in Sandwichbauteilen, Masterarbeit, 2015, eingeflossen in die Abschnitte 2.3.2 und 4.3.3.
Krabusch, J.	Auslegung einer additiv gefertigten Leichtbaustruktur unter Verwendung der Finiten Elemente, Semesterarbeit, 2015, eingeflossen in Abschnitt 8.3.
Lassonczyk, O.	Automatisierung des Modellierungsprozesses mesoskopischer Leichtbaustrukturen, Bachelorarbeit, 2012, eingeflossen in Abschnitt 5.2.
Mayer, M.	Funktionsintegration und klebegerechte Gestaltung von additiv gefertigten Sandwichbauteilen mit Honigwabenkernen, Diplomarbeit, 2014, eingeflossen in Abschnitt 6.2.2.
Reich, J.	Erstellung eines Werkzeugs zur automatisierten Modellierung belastungsgerecht ausgelegter Wabenstrukturen auf Freiformflächen im CAX-System NX 8, Bachelorarbeit, 2014, eingeflossen in die Abschnitte 5.2 und 7.2.
Schlather, F.	Design und Auslegung von Verbindungselementen für additiv gefertigte Wabenstrukturen, Semesterarbeit, 2014, eingeflossen in Abschnitt 6.2.2.
Vogler, D.	Untersuchungen zur direkten Integration von Funktionselementen in Sandwichbauteilen mittels additiver Fertigung, Diplomarbeit, 2013, eingeflossen in Abschnitt 6.2.1.