



Ralph Stelzer (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN 2016

Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung
und Konstruktionstechnik

Ralph Stelzer (Hrsg.) **ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN** 2016
Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik

Ralph Stelzer (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN 2016

Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung
und Konstruktionstechnik

Dresden · 30. Juni – 1. Juli 2016

Programmkomitee Virtuelle Produktentwicklung und Konstruktionstechnik

Prof. Dr. Ralph Stelzer, TU Dresden

Prof. Dr. Michael Abramovici, Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr. Reiner Anderl, TU Darmstadt

Prof. Dr. Martin Eigner, Universität Kaiserslautern

Prof. Dr. Detlef Gerhard, TU Wien

Prof. Dr. Jivka Ovtcharova, KIT Karlsruhe

Prof. Dr. Rainer Stark, TU Berlin

Prof. Dr. Sandor Vajna, Universität Magdeburg

Prof. Dr. Sandro Wartzack, Universität Erlangen

Entwickeln – Entwerfen – Erleben 2016.
Beiträge zur Virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
Herausgeber: Ralph Stelzer

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

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-062-0

© 2016 w.e.b. Universitätsverlag & Buchhandel
Eckhard Richter & Co. OHG
Bergstr. 70 | D-01069 Dresden
Tel.: 0351/47 96 97 20 | Fax: 0351/47 96 08 19
<http://www.tudpress.de>

TUDpress ist ein Imprint von w.e.b.

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.
Layout und Satz: Technische Universität Dresden.
Umschlaggestaltung: TU Dresden, Illustration © 2016 TU Dresden
Printed in Germany.

Erscheint zugleich auf QUCOSA der SLUB Dresden
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-203878>



© 2016 SAP SE oder ein SAP-Konzernunternehmen. Alle Rechte vorbehalten.



KOMPLEXITÄT DREHT SICH IMMER NUR IM KREIS.



EINFACH TRIFFT ENTSCHEIDUNGEN.

Komplexität bremst Ihr Business aus. Denn je gewaltiger die Informationsflut, desto schwieriger die Entscheidungsfindung. SAP arbeitet daran, Dinge zu vereinfachen. Damit aus Daten Wissen und aus Wissen fundierte Entscheidungen werden, die Ihr Unternehmen weiterbringen. Finden Sie heraus, wie gemeinsam einfach möglich wird auf sap.de/runsimple

SAP[®] Run Simple

Optimierung von Druckbehältern unterschiedlicher Geometrien und Werkstoffe

Thomas Guthmann · Frank Engelmann

Einleitung

Moderne Simulations- und Berechnungsmethoden, wie beispielsweise die Finite-Elemente-Methode (FEM), erlauben dem Konstrukteur bereits in einer relativ frühen Phase des Entwicklungsprozesses die wesentlichen Eigenschaften des Produktes virtuell am Computer zu analysieren. Die Ergebnisse dieser Berechnungen können anschließend zur zielgerichteten Verbesserung ausgewählter Produkteigenschaften genutzt werden. Der Aufwand für die Optimierung ist dabei in erster Linie von der Komplexität des Produktes abhängig.

Produkte, bei welchen die mathematischen Zusammenhänge zwischen den Ein- und Ausgangsparametern bekannt ist, lassen sich oftmals recht einfach analytisch optimieren.

Bei komplexen Produkten oder einer großen Anzahl an Einflussparametern lassen sich diese Zusammenhänge in vielen Fällen nicht herleiten, so dass die Optimierung bisher meist nach dem Trial and Error-Verfahren erfolgte. Diese heuristische Vorgehensweise führt durch eine hohe Anzahl an notwendigen Iterationsschleifen zu einem extremen Anstieg der Zeit und der Kosten, wobei die Wiederholungsrate des Entwicklungsschrittes in hohem Maße von der Erfahrung und dem vorhandenen Wissen des Konstrukteurs abhängig ist.

Der Einsatz von wissenschaftlichen Optimierungsverfahren, wie beispielsweise der Topologieoptimierung, ermöglicht eine zielgerichtete und weitestgehend automatisierbare Optimierung von komplexen Produkten.

Die hohe Komplexität des Produktes ist dabei oftmals nicht auf den ersten Blick ersichtlich. Beispielsweise gestaltet sich die Gewichtsoptimierung von Druckbehältern mit nicht rotationsymmetrischen Querschnitten aufgrund der komplexen Spannungsverläufe schwierig.

Grundsätzlich wird bei Leichtbaukonstruktionen versucht, die zur Verfügung stehende Werkstofffestigkeit in den gegebenen Sicherheitsgrenzen voll auszuschöpfen. Hierfür ist es notwendig, die Materialverteilung an dem Kraftverlauf anzupassen. Bei einem mehrachsigen Spannungszustand, wie er bei den Druckbehältern mit komplexen Geometrien vorliegt, bestehen zwischen der Materialverteilung und den Spannungsverläufen über die Geometrie komplexe Zusammenhänge, so dass für die optimale Materialverteilung keine allgemeingültige triviale Lösung existiert.

Ziele

Im Rahmen dieser Arbeit sollen computerbasierte Methoden zur Gewichtsoptimierung von Druckbehältern mit rechteckigen Querschnitten vorgestellt werden. Neben den klassischen isotropen Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium sollen hierbei auch Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (FKV) wie kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK) betrachtet werden.

Lösungsmethoden

Die mechanische Belastung einer Seitenwand von einfach gestalteten, rechteckigen Behältnissen mit einem erhöhten Innendruck, entspricht in guter Näherung der Belastung einer einfachen Platte mit fester Randeinspannung. Mit dieser Vereinfachung reduziert sich die Optimierung des Gesamtgehäuses auf die Optimierung einer einzelnen Platte.

Vorbetrachtung

Der erste Schritt zur Gestaltung von gewichtsoptimierten Druckbehältern ist die Festlegung der maximalen beziehungsweise minimalen Gehäuseabmessungen und des Konstruktionswerkstoffes. Folgende Gehäusemaße sind für die Auslegung zu bestimmen:

- Gehäuseaußen/-innenmaße
- minimal zulässige Wandstärke
- maximal zulässige Wandstärke

Anhand der aufgeführten Parameter lässt sich der Designraum der einzelnen Gehäusewände berechnen. Der Designraum entspricht demjenigen Volumen, in dem der Konstruktionswerkstoff im Sinn einer Leichtbaukonstruktion beliebig angeordnet werden kann.

Ausgehend von dem minimalen Designraum (Höhe \times Breite der einzelnen Seitenwand in Verbindung mit der minimal zulässigen Wandstärke) ist anschließend die mechanische Belastung der Seitenwand, beziehungsweise

der Platte zu bestimmen. Auf Basis dieser Ergebnisse ist der mechanische Auslastungsgrad der Struktur zu berechnen.

Nur wenn die zulässige Festigkeit in diesem Fall überschritten wird (Auslastungsgrad größer 100%) ist eine Optimierung hinsichtlich der Materialverteilung sinnvoll. Weiterhin ist die Berechnung mit dem maximal zulässigen Designraum (Höhe x Breite der einzelnen Seitenwand in Verbindung mit der maximal zulässigen Wandstärke) zu wiederholen. In diesem Fall muss der Auslastungsgrad kleiner 100% sein, damit eine nennenswerte Materialeinsparung möglich ist.

Für homogene Konstruktionswerkstoffe kann die Vorbetrachtung mit Hilfe von analytischen Gleichungen auf Basis der Kirchhoffschen Plattengleichung durchgeführt werden, siehe (Szilard 2004).

Bei Verbundwerkstoffen mit anisotropen Materialeigenschaften gestaltet sich die Berechnung des Auslastungsgrades im Vorfeld schwieriger, da der genaue Aufbau des Laminates meist unbekannt ist. Weiterhin existieren analytische Lösungen nur für wenige Spezialfälle unter fest definierten Randbedingungen, so dass die Berechnung von FKV-Strukturen meist mittels FEM-Software erfolgt.

Bedingt durch den schichtweisen Aufbau von FKV-Laminaten, unterscheidet sich die FE-Modellierung im Detail von der Modellierung isotroper Werkstoffe.

Die Orthotropie der mechanischen Eigenschaften erfordert die separate Betrachtung, beziehungsweise Modellierung der einzelnen Laminatlagen. Zur Verringerung der Rechenzeit wird meist für die einzelne Laminatlage ein Shell-Element verwendet, welches in Dickenrichtung nur eine Elementreihe mit den entsprechenden Materialeigenschaften aufweist. Der Aufbau des kompletten Laminates ergibt sich aus der Überlagerung der einzelnen Lagen.

Der schichtweise Aufbau des Laminates, in Verbindung mit den unterschiedlichen Eigenschaften der Kunststoffmatrix, beziehungsweise der Verstärkungsfaser, führt zu einem komplexen Schädigungsverhalten des Verbundwerkstoffes, welches sich wesentlich von denen metallischer Konstruktionswerkstoffe unterscheidet. Für die Bewertung der Laminathaltbarkeit sind aus diesem Grund differenziertere Versagenskriterien notwendig, welche die Besonderheiten faserverstärkter Kunststoffe berücksichtigen, siehe (Tsai et al. 1971); (Puck 1996).

Materialoptimierung

Zeigen die Ergebnisse der Vorbetrachtung, dass eine Optimierung der Geometrie sinnvoll erscheint, ist mit geeigneten Hilfsmitteln eine belastungsgerechte Materialverteilung zu bestimmen. Die Auswahl der Hilfsmittel hängt dabei von den mechanischen Eigenschaften des Konstruktionswerkstoffes ab.

Optimierung konventioneller Gehäusekonstruktionen

Effektive Methoden zur Berechnung der optimalen Materialverteilung bei orthotropen Konstruktionswerkstoffen stellen die Free-Size Optimierung und die Topologieoptimierung dar (Sen 2013). Beide Verfahren basieren auf der Methode der FEA gekoppelt mit wissenschaftlichen Optimierungsalgorithmen.

Bei der Free-Size Optimierung wird die Platte in eine n -Anzahl zweidimensionaler Shell-Elemente unterteilt. Die Höhe der einzelnen Shell-Elemente entspricht dabei der Plattendicke an diesem Punkt und ist in den Grenzen zwischen der minimalen und der maximalen Plattendicke veränderlich. Mit Hilfe spezieller Optimierungsalgorithmen wird die Dicke der einzelnen Shell-Elemente variiert, bis das minimale Bauteilgewicht unter den gegebenen Randbedingungen erreicht ist.

Als Randbedingung eignet sich besonders die Begrenzung der maximalen Durchbiegung oder die Vorgabe der Volumenreduktion im Verhältnis zum Volumen des maximalen Designraums. Die Festlegung der maximal zulässigen Elementenspannung als Randbedingung ist möglich, jedoch sind die Ergebnisse kritisch zu hinterfragen, da die Elementenspannung an einzelnen Punkten zu Singularitäten neigen kann (Sen 2013).

Das Ergebnis der Free-Size Optimierung ist die Plattendicke an diskreten Punkten der Platte.

Da bei diesem Verfahren die druckbelastete Platte in Dickenrichtung nur mit einem Element aufgelöst wird, ist die Gesamtanzahl der Finiten Elemente relativ gering, woraus sich kurze Berechnungszeiten ergeben. Die begrenzte Auflösung in Dickenrichtung ermöglicht allerdings nur die Berechnung von symmetrischen Materialverteilungen um die neutrale Faser der Platte.

Im Unterschied zum Free-Size-Optimierungsverfahren wird bei der Topologieoptimierung der gesamte dreidimensionale Designraum in einzelne Finite-Elemente unterteilt. Die Steifigkeit K_i der einzelnen Elementzellen ist bei der Berechnung nicht mehr allein vom Material und der Zellengeometrie

abhängig, sondern wird nach Gleichung 1 mit einer normierten Elementdichte ρ_i verknüpft (Harzheim 2008).

$$K_i = \rho_i \cdot K_0 \quad (1)$$

Durch die Variation der Elementdichte von Werten zwischen nahe 0 und 1 lässt sich damit auch gleichzeitig die Steifigkeit und somit auch der Anteil der Lastaufnahme des einzelnen Elementes variieren. In einem iterativen Verfahren wird mit Hilfe von speziellen Algorithmen die Elementdichte für jedes einzelne Element so lange angepasst bis sich das minimale Gewicht unter Einhaltung der Nebenbedingungen ergibt. Sinnvolle Nebenbedingungen ergeben sich, analog zur Free-Size Optimierung, aus den zulässigen Verformungen, geometrischen Restriktionen oder den zulässigen Festigkeiten.

Da in der Realität nur diskrete Materialverteilungen möglich sind (Material vorhanden oder kein Material vorhanden), sind im Optimierungsalgorithmus zusätzliche Korrekturfunktionen implementiert, die eine diskretere Materialverteilung erzwingen.

Das Ergebnis dieser Topologieoptimierung stellt die optimale Materialverteilung in Form der Elementdichte dar. In der Praxis hat sich gezeigt, dass in Bereichen mit einer Elementdichte $\rho_i \geq 0,4$ Material benötigt wird und in Bereichen mit kleinerer Elementdichte nicht.

Kommerziell verfügbare Programme zur Topologieoptimierung bieten neben der eigentlichen Topologieoptimierung meist Funktionen zur gezielten Beeinflussung der Materialverteilung im Designraum. Beispielsweise kann die Austragungsrichtung definiert werden, damit keine Hinterschneidungen entstehen und sich das Bauteil in einer einfachen Gussform herstellen lässt (Sen 2013).

Gegenüber der Free-Size-Optimierung bietet die Topologieoptimierung den Vorteil, dass auch sehr komplexe dreidimensionale Bauteilstrukturen mit Hohlräumen oder Hinterschneidungen optimiert werden können. Allerdings steigt hierbei aufgrund der höheren Elementanzahl die Rechendauer an.

Optimierung faserverstärkter Gehäusekonstruktionen

Im Vergleich zu den konventionellen Konstruktionswerkstoffen gestaltet sich die Gewichtsoptimierung von druckbelasteten Behältern aus Verbundwerkstoffen aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften und der Vielzahl der Einflussparameter deutlich schwieriger. Bei konventionellen Konstruktionswerkstoffen sind prinzipiell für jeden einzelnen Punkt des Designraumes nur zwei Lösungen möglich: Material ist vorhanden oder nicht.

Aufgrund der Anisotropie der faserverstärkten Kunststoffe ist nicht nur die Materialverteilung, sondern auch die Orientierung der einzelnen Fasern im Verbund ein wesentlicher Gestaltungsparameter.

Die Materialeigenschaften des Laminates werden im Wesentlichen von folgenden Parametern beeinflusst:

- mechanische Eigenschaften der Verstärkungsfaser
- mechanische Eigenschaften des Matrixmaterials
- Volumenanteil der Verstärkungsfaser im Verbund
- Lagendicke und Lagenanzahl
- Ausrichtung der Verstärkungsfaser (Unidirektional; Gewebeart...)

Dementsprechend komplex gestaltet sich die Optimierung eines Faserverbund-Laminates.

In der Praxis werden zur Herstellung von faserverstärkten Bauteilen oftmals vorimprägnierte Fasern, sogenannte Prepregs, verwendet. Die Verstärkungsfasern sind bei diesen textilen Halbzeugen bereits als fertige unidirektionale Schicht oder als Fasergewebe bzw. Fasergelege in die nicht ausgehärtete Kunststoffmatrix eingebettet. Zur Herstellung des kompletten Laminates werden die einzelnen Prepregs entsprechend den aus der Belastung resultierenden Anforderungen schichtweise übereinander gelegt und anschließend unter Wärme und Druck miteinander verbunden.

Bei der Verwendung von vorgefertigten Prepregs ist neben den Ausgangsmaterialien für den Aufbau des Laminates die Anzahl, die Dicke und die Orientierung der einzelnen Schichten zu bestimmen. Im Regelfall werden die einzelnen Schichten in definierten Winkeln (oftmals 0° ; $\pm 45^\circ$ und 90°) zueinander angeordnet, so dass die Steifigkeit in den Hauptbelastungsrichtungen maximal wird, siehe (Flemming 2003).

Die Optimierung des Laminataufbaus erfolgt aufgrund der Komplexität der Aufgabenstellung in drei Schritten. Im ersten Schritt wird mit Hilfe der bereits vorgestellten Free-Size-Optimierung die optimale Dicke der einzelnen Lagen für die möglichen Faserorientierungen berechnet (Bromberger 2013). Die möglichen Orientierungen der Fasern werden hierbei als Randbedingung vorgegeben.

Da die Dicke der einzelnen Laminatlagen über den Querschnitt des Bauteils am Ende des ersten Optimierungsschrittes variiert, sind die Ergebnisse fertigungstechnisch nur sehr schwer umsetzbar. Zur Erzielung eines fertigungsgerechten Aufbaus wird im zweiten Schritt mit Hilfe der sogenannten Bundle-Size-Optimierung die Dicke der einzelnen Schichten an die vorab definierten Prepregstärken angepasst. Im dritten und letzten Schritt wird die

optimale Stapelreihenfolge der einzelnen Gewebelagen bestimmt, wobei weitere fertigungstechnische Restriktionen appliziert werden können.

Ergebnisse

Auf Basis der vorgestellten Optimierungsmethoden wurde eine Gehäusewand als druckbelastete Platte hinsichtlich des Bauteilgewichts optimiert und mit dem Ausgangsgewicht einer homogenen Platte verglichen.

Folgende geometrische Randbedingungen bildeten dafür die Grundlage:

Geometrische Bedingungen:

- Kantenmaß der Platte: 400mm x 400mm (Länge x Breite)
- minimale Plattendicke: 5 mm
- maximale Plattendicke: 30 mm

Werkstoffspezifische Randbedingungen:

Aluminium:

- E-Modul: 71.000 N/mm²
- Querkontraktionszahl: 0,33
- Dichte: 2.65 g/mm³
- max. zulässige Festigkeit: 150 N/mm²

Kohlefaserverstärkter Kunststoff (CFK):

- E-Modul in x-Richtung: 121.000 N/mm²
- E-Modul in y-Richtung: 8.600 N/mm²
- Querkontraktionszahl in x-y Richtung: 0,27
- Gleitmodul in x-y-Ebene: 4.700 N/mm²
- Gleitmodul in x-z-Ebene: 4.700 N/mm²
- Gleitmodul in y-z-Ebene: 3.100 N/mm²
- Dichte: 1.49 g/mm³
- Zugfestigkeit in Faserrichtung: 2231 N/mm²
- Druckfestigkeit in Faserrichtung: 2231 N/mm²
- Zugfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung: 29 N/mm²
- Druckfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung: 100 N/mm²
- Schubfestigkeit: 60 N/mm²

sonstige Randbedingungen:

- umlaufende feste Randeinspannung
- gleichverteilte Drucklast von 0,5 MPa
- Begrenzung der maximalen Durchbiegung auf 1,5 mm
- Dicke der einzelnen Prepreg-Lage: 0,25 mm

Vorbetrachtung

Die Ergebnisse der Vorbetrachtung für die Aluminiumvariante zeigen, dass die maximale Vergleichsspannung nach Mises für die minimale Plattendicke von 5 mm rund 884 N/mm_2 beträgt und bei der maximalen Plattendicke von 30 mm rund $26,6 \text{ N/mm}_2$. Damit liegen die Vergleichsspannungen bei der minimalen Plattendicke deutlich oberhalb und bei der maximalen Plattendicke deutlich unterhalb der zulässigen Vergleichsspannung von 150 N/mm_2 , woraus sich das Potenzial für eine Gewichtsreduktion ableiten lässt.

Zum Vergleich wurde ermittelt, dass eine Aluminiumplatte mit konstanter Dicke eine Dicke von 12,1 mm aufweisen muss, damit die zulässige Festigkeit maximal ausgenutzt wird. Dabei beträgt das Gewicht dieser Vergleichsplatte 5,11 kg.

Optimierung der Aluminiumplatte

Für die Optimierung der Aluminiumplatte wurde die vorgestellte Methode (siehe Kapitel 3.2.1) der Topologieoptimierung genutzt. Neben dem minimalen Bauteilgewicht als Optimierungsziel, wurde als zusätzliche Restriktion die Vergleichsspannung im optimierten Bauteil auf 150 N/mm_2 begrenzt. Weiterhin wurde durch die Festlegung einer definierten Materialwachstumsrichtung sichergestellt, dass die optimierte Geometrie keine Hohlräume oder Hinterschneidungen aufweist, damit eine Fertigung als Gussteil möglich ist. Die Ergebnisse der Topologieoptimierung sind in Abbildung 1 dargestellt.

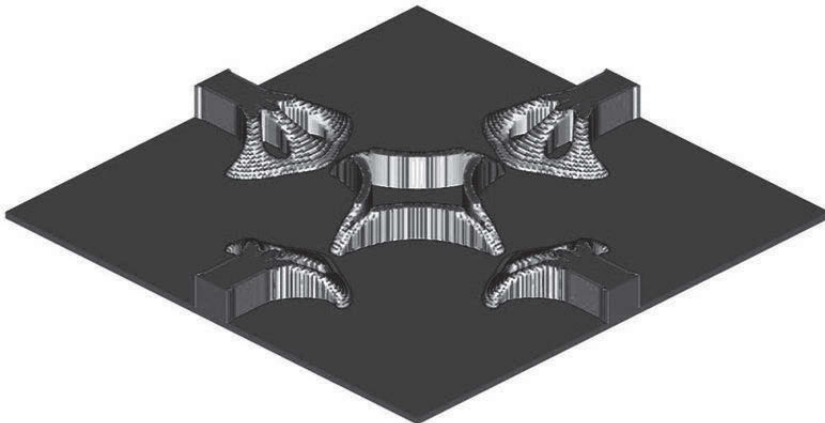


Abbildung 1: Materialverteilung bei der Referenzplatte nach Topologieoptimierung.

Die topologieoptimierte Aluminiumplatte weist eine Masse von rund 3,25 kg bei einer maximalen Durchbiegung von 1,23 mm und einer maximalen Vergleichsspannung von 146,5 N/mm_z auf, womit sie gegenüber der homogenen Platte um rund 36,4 % leichter ist.

Optimierung der CFK-Platte

Die Optimierung der Platte aus kohlefaserverstärktem Kunststoff erfolgte anhand des vorgestellten dreistufigen Optimierungsprozesses (siehe Kapitel 3.2.2).

Im ersten Schritt wurde ein Laminataufbau mit den genannten mechanischen Eigenschaften vorgegeben. Hierfür wurde ein symmetrischer Aufbau mit folgenden Schichtwinkeln definiert: 0°; 90°; -45°; +45°, mit der Randbedingung, dass die -45° Schicht und die +45° Schicht die gleiche Stärke aufweisen.

Die Ergebnisse dieses ersten Schrittes ist ein Laminataufbau, bestehend aus insgesamt 8 Schichten. Die maximale Durchbiegung der Struktur beträgt 1,5 mm, bei einem Gesamtgewicht von 1,94 kg.

Mit Hilfe der Bundle-Size-Optimierung erfolgte anschließend die Anpassung der Ergebnisse der Free-Size-Optimierung an die verfügbaren Prepreg-Dicken. Dies bedeutet, dass nur Gesamtdicke der einzelnen Laminatlage möglich sind, die ein Vielfaches der Prepreg-Dicke (0,25 mm) betragen.

Diese fertigungstechnische Optimierung steigerte die Anzahl der notwendigen Einzellagen auf insgesamt 116 und das Gesamtgewicht auf 2,43 kg.

Im finalen Optimierungsschritt wurde die Stapelreihfolge der einzelnen Schichten dahingehend angepasst, dass maximal vier aufeinander folgende Lagen mit gleicher Faserorientierung zulässig sind. Weiterhin muss auf eine Lage mit einer Faserorientierung von +45° eine Lage mit einer Faserorientierung von -45° folgen.

Als Ergebnis dieses Prozesses steht eine Plattengeometrie mit einem Gesamtgewicht von 2,43 kg, wie sie in Abbildung 2 dargestellt ist.

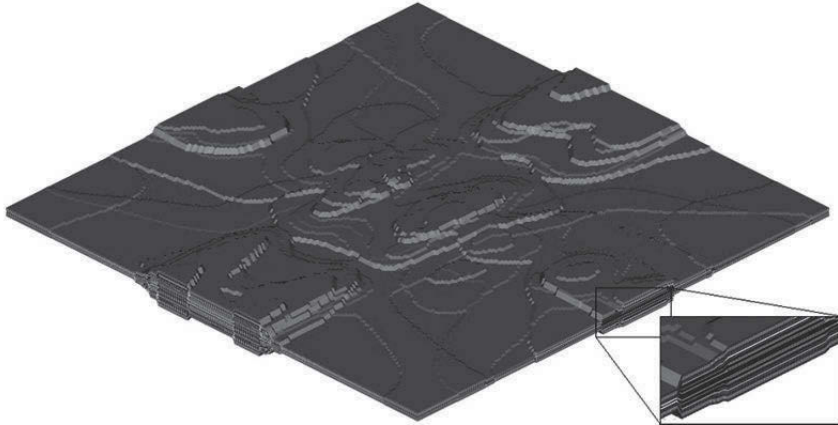


Abbildung 2: optimierte CFK-Platte mit Detailansicht der einzelnen Lagen

Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz von modernen Optimierungsmethoden das Gesamtgewicht der Gehäusestruktur deutlich gesenkt werden kann, unabhängig ob der Werkstoff isotrope oder anisotrope Materialeigenschaften aufweist. Für anisotrope Materialien gestaltet sich die Optimierung hierbei aufgrund der höheren Anzahl an Freiheitsgraden allerdings komplexer.

Der Vergleich der resultierenden Materialverteilungen für die beiden Varianten zeigt, dass prinzipiell die beiden Geometrien in ähnlichen Bereichen Verstärkungen, beziehungsweise Verrippungen aufweisen. Im Detail unterscheiden sich die Ergebnisse, schon allein durch den lagenweisen Aufbau der CFK-Variante, voneinander.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Ausgangslage und der Optimierungsergebnisse

Variante	Ausgangsvariante (Aluminium 12,1 mm Plattenstärke)	Aluminium Topologieoptimiert	CFK mit optimierten Lagenaufbau
Gewicht	5,11 kg	3,25 kg	2,43 kg
Bauvolumen	1,93 dm ³	1,22 dm ³	1,63 dm ³
Auslastungsfaktor	99 %	97 %	96 %
max. Durchbiegung	1,38 mm	1,22 mm	1,5 mm
Gewichtseinsparung	0 %	36,4 %	52,4 %

Obwohl das Volumen der CFK-Variante höher ist, als das Volumen der optimierten Aluminium-Variante, besitzt diese aufgrund der niedrigeren Materialdichte ein geringeres Gesamtgewicht.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Methoden zur Entwicklung von druckbelasteten Strukturen mit nicht rotationssymmetrischen Querschnitten vorgestellt und angewendet. Im Fokus standen hierbei besonders die unterschiedlichen Anforderungen bei der Entwicklung von Strukturen mit orthotropen und isotropen Materialeigenschaften eingegangen. Mit Hilfe einer Topologieoptimierung wurde die belastungsgerechte Materialverteilung für eine Aluminiumplatte berechnet. Auf diese Weise ließ sich eine maximale Gewichtseinsparung von rund 36 %, gegenüber einer homogenen Aluminiumplatte mit konstanter Dicke erreichen.

In einem dreistufigen Auslegungsprozess, basierend auf der vorgestellten Free-Size Optimierung mit einer anschließenden zweistufigen Optimierung des Lagenaufbaus, konnte eine CFK-Platte entwickelt werden, welche eine Gesamtgewichtseinsparung von rund 52 % aufweist.

Die vorgestellten Ergebnisse sind zwar im Sinne des Leichtbaus unter den gegebenen Randbedingungen als annähernd optimal einzuschätzen, allerdings ist die fertigungstechnische Umsetzung dieser Varianten sehr aufwendig.

Im Fall der Aluminiumvariante besteht die optimale Geometrie zum großen Teil aus einer Freiformfläche, welche schwierig zu fertigen ist. Die Vermeidung von Gusslunkern erfordert zusätzlich eine komplizierte Gestaltung des Anguss-, beziehungsweise Speisersystems. Aus den genannten Gründen ist zu überprüfen, inwieweit die gewichtsoptimierte Geometrie im Sinne einer wirtschaftlichen Fertigung zu vereinfachen ist. Allerdings ist davon auszugehen, dass durch die Anpassung der Geometrie das Bauteilgewicht ansteigt.

Die fertigungstechnische Umsetzung der CFK-Variante ist prinzipiell möglich, jedoch aufgrund der 116 Gewebelagen sehr aufwendig. Zusätzlich ist der Zuschnitt der einzelnen Lages teilweise aufgrund der komplexen Schnittmuster schwierig. Da die maximale Lagenanzahl bei einer vorgegebenen Prepregstärke von der Gesamtplattendicke abhängig ist, kann durch eine Reduzierung der maximalen Plattendicke auch die maximale Lagenanzahl verringert werden. Eine fertigungstechnische Optimierung ergibt sich ebenfalls durch die Vereinfachung der einzelnen Lagenzuschnitte, wobei die geschickte Gestaltung der einzelnen Schnittmuster zu einer deutlichen Reduzierung des Verschnittes des textilen Halbzeuges und damit zu einer

Kostensenkung führt. Die genannten Vereinfachungen führen allerdings auch an dieser Stelle zu einem Anstieg des Bauteilgewichts.

Da die computergestützte Optimierung noch am Beginn ihrer Entwicklung steht und der Bedarf an optimierten Bauteilen ständig steigt, ist in Zukunft auf dem Gebiet der computergestützten Optimierung mit einem Wachstum zu rechnen. Gerade im Bereich der Optimierungsalgorithmen besteht nach wie vor ein großer Entwicklungsbedarf. So ist derzeit kein einziger Algorithmus bekannt, der mit vertretbarem Aufwand und absoluter Sicherheit das globale Minimum einer Zielgröße findet, wenn gleichzeitig mehrere lokale Minima existieren.

Literaturverzeichnis

- Bromberger, M. 2013: Laminataufbau – Strukturoptimierung in 3 Schritten In: Composites World 2, S. 24 – 27
- Flemming M. 2003: Faserverbundbauweisen, mechanische Eigenschaften, konstruktive, thermische, elektrische, ökologische, wirtschaftliche Aspekte, Berlin und Heidelberg, Springer Verlag
- Harzheim, L. 2008: Strukturoptimierung, Grundlagen und Anwendungen, Frankfurt am Main, Verlag Harry Deutsch
- Puck, A. 1996: Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten: Modelle für die Praxis. München, Wien, Hanser Verlag
- Sen D. 2013: Optistruct Optimization Concept and Fine-Tuning Design. Trainingsunterlagen Firma Altair
- Szillard, R. 2004: Theories and Applications of Plate Analysis: Classical Numerical and Engineering Methods. Hoboken (New Jersey), John Wiley & Sons Verlag
- Tsai, S., Wu, E. 1971: A General Theory of Strength for Anisotropic Materials. in Journal of Composite Materials, 5 (1), 58–80

Kontakt

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Guthmann
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
Carl-Zeiss-Promenade 2
07745 Jena

www.wi-konstruktion.eah-jena.de/
Prof. Dr.-Ing. habil Frank Engelmann
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
Carl-Zeiss-Promenade 2
07745 Jena
www.wi-konstruktion.eah-jena.de/