

## Reihe 1

Konstruktions-  
technik/  
Maschinen-  
elemente

Nr. 439

Dipl.-Ing. Daniel Klein,  
Freystadt

# Ein simulationsbasierter Ansatz für die beanspruchungsgerechte Auslegung endlosfaser- verstärkter Faser- verbundstrukturen

Lehrstuhl für

**Konstruktionstechnik**

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartack

<https://doi.org/10.51202/bfb-3166439017-1>

Generiert durch IP '3.146.65.72', am 05.06.2024, 06:53:48

Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.





**Ein simulationsbasierter Ansatz für die  
beanspruchungsgerechte Auslegung  
endlofaserverstärkter Faserverbundstrukturen**

Der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg  
zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von  
Daniel Klein  
aus Neumarkt i. d. Opf.

Als Dissertation genehmigt  
von der Technischen Fakultät der  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Juli 2017

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Prof. Dr. Paolo Ermanni

# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 1

Konstruktionstechnik/  
Maschinenelemente

Dipl.-Ing. Daniel Klein,  
Freystadt

Nr. 439

Ein simulationsbasierter  
Ansatz für die  
beanspruchungsgerechte  
Auslegung endlosfaser-  
verstärkter Faser-  
verbundstrukturen

Lehrstuhl für

**Konstruktionstechnik**

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack



Klein, Daniel

**Ein simulationsbasierter Ansatz für die beanspruchungsgerechte Auslegung endlosfaserverstärkter Faserverbundstrukturen**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 439. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

206 Seiten, 109 Bilder, 2 Tabellen.

ISBN 978-3-18-343901-0, ISSN 0178-949X,

€ 71,00/VDI-Mitgliederpreis € 63,90.

**Für die Dokumentation:** Konstruktionstechnik – Simulation – Leichtbau – Faserverbundwerkstoffe – Algorithmenentwicklung – Konstruktionsmethodik

Die vorliegende Arbeit richtet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der Faserverbund- und Konstruktionstechnik. Sie greift die Problematik auf, dass die Auslegung von endlosfaserverstärkten Faserverbundbauteilen Konstrukteure vor eine große Herausforderung stellt. Beispielsweise sind die Materialeigenschaften stark von der Faserrichtung abhängig und es gilt zahlreiche unterschiedliche Auslegungsparameter zu bestimmen. Deshalb wird ein neuer vierstufiger Auslegungsprozess vorgestellt, der den Konstrukteur strukturiert von einem CAD-Modell zu einem ersten Laminataufbau führt. Dazu werden unterschiedliche Algorithmen entwickelt, implementiert und im Rahmen eines zusammenhängenden Vorgehensmodells angewendet. Am Ende der Arbeit wird anhand einiger Beispielbauteile gezeigt, dass sich mit den so entwickelten Laminataufbauten sehr gute mechanische Bauteileigenschaften ergeben.

**Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

**Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

D 29

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-949X

ISBN 978-3-18-343901-0

<https://doi.org/10.51202/9783186439017-1>

Generiert durch IP '3.146.65.72', am 05.06.2024, 06:53:48.

Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Akademischer Rat am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der FAU Erlangen-Nürnberg. In dieser Zeit wurde ich von zahlreichen unterschiedlichen Personen unterstützt, denen ich zu tiefstem Dank verpflichtet bin.

Besonders danken möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack, der immer ein offenes Ohr für meine Belange hatte und mich sehr gefördert hat. Durch sein Vertrauen in mich und meine Arbeit hat er mir ein Arbeitsumfeld ermöglicht, das ich die letzten fünf Jahre sehr genossen habe und immer in guter Erinnerung behalten werde.

Herrn Prof. Dr. P. Ermanni von der ETH Zürich danke ich an dieser Stelle recht herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens. Des Weiteren danke ich dem fachfremden Prüfer Prof. Dr. M. Stingl und dem Vorsitzenden der Prüfungskommission Herrn Prof. Dr. A. Hasse für die Unterstützung.

Mein Dank richtet sich zudem an alle aktuellen und ehemaligen Kollegen, die mich in unterschiedlichste Weise unterstützt haben. Besonders hervorheben möchte ich dabei meinen ehemaligen Kollegen und langjährigen Mentor Herrn Dr.-Ing. G. Gruber, meine Kollegen der Fachgruppe Leichtbau T. Stangl und C. Witzgall sowie die Herren H. Völkl und T. Sprügel, die sich kritisch mit den Ergebnissen meiner Arbeit auseinandergesetzt haben.

Darüber hinaus danke ich allen meinen Studenten, die mir mit ihrem Engagement eine wichtige Stütze waren. Hervorzuheben sind hier vor allem S. Schwarz, S. Götz, A. Nowak, W. Malezki, T. Luger, S. Caballero, K. Scheler, C. Kieser, P. Mielkau, S. Sperber sowie insbesondere noch einmal H. Völkl.

Ein wesentlicher Faktor, der zum Gelingen einer solchen Arbeit beiträgt, ist die Unterstützung durch Freunde und Familie. Ohne meine Eltern Elisabeth und Karl Klein, die mir jederzeit ihre bedingungslose Unterstützung geben und mir seitdem ich denken kann, alle Möglichkeiten einräumten, wäre diese Arbeit nie möglich gewesen. Als Ausdruck meines Danks, widme ich ihnen diese Arbeit.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Freundin Christina bedanken. Wann immer es notwendig war, gab sie mir die nötigen Freiräume, baute mich auf wenn die Motivation mich verlies und unterstützte mich in jeglicher Art und Weise.

*- Gewidmet meinen Eltern  
Elisabeth und Karl Klein -*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung und Motivation .....	1
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit .....	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>4</b>
2.1	Faserverstärkte Kunststoffe und ihr Leichtbaupotential .....	4
2.1.1	Faserverbundwerkstoffe und ihre Einteilung.....	4
2.1.2	Das Leichtbaupotential endlosfaserverstärkter Kunststoffe und die Notwendigkeit einer beanspruchungsgerechten Auslegung.....	5
2.2	Wahl der Koordinatensysteme und Indizierung .....	7
2.3	Das mechanische Verhalten des Mehrschichtverbundes.....	8
2.3.1	Grundlegende Gleichungen der Mehrschichtentheorie.....	8
2.3.2	Einfluss des Schichtaufbaus auf das Verformungsverhalten des Mehrschichtverbundes.....	13
2.4	Festigkeitsbewertung bei Faserverbundkunststoffen.....	15
2.4.1	Die Versagensarten der unidirektionalen Einzelschicht.....	16
2.4.2	Entwicklung von Festigkeitskriterien für endlosfaserverstärkte Kunststoffe .....	20
2.4.3	Das Bruchkriterium nach PUCK.....	22
2.5	Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile .....	25
2.5.1	Fertigungsverfahren für endlosfaserverstärkte Kunststoffbauteile .....	26
2.5.2	Kriterien für die Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens.....	28
2.6	Bestehende Ansätze und Hilfsmittel für die Auslegung endlosfaserverstärkter Faserverbundstrukturen .....	30
2.6.1	Hilfsmittel zur überschlägigen Dimensionierung und Vorauswahl.....	30
2.6.2	Klassische Methoden zur Auslegung und Dimensionierung .....	33
2.6.3	FE-Modelle als wichtige Basis der rechnerunterstützten Auslegung.....	37
2.6.4	Ansätze auf Basis von Optimierungsalgorithmen.....	38
2.6.5	Das kommerzielle Software-Werkzeug von ALTAIR .....	40
2.7	Grundlagen zur methodischen Entwicklung von Faserverbundstrukturen .....	42
2.7.1	Methodische Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung .....	42

2.7.2	Das Vorgehensmodell der VDI 2014 für die Entwicklung von Faserverbundbauteilen.....	43
2.8	Methoden zur Berechnung kraftflussgerechter Faserorientierungen.....	45
2.8.1	Die Lastpfadmethode nach KELLY .....	46
2.8.2	Der CAIO-Algorithmus .....	48
2.8.3	Gegenüberstellung der Lastpfad- und CAIO-Methode.....	50
<b>3</b>	<b>Anforderungen an einen Auslegungsprozess für Faserverbundstrukturen .....</b>	<b>52</b>
3.1	Einordnung des Begriffs „Auslegung“ in das Vorgehensmodell der VDI 2014.....	52
3.2	Die besonderen Herausforderungen bei der Auslegung von FVK-Strukturen.....	54
3.3	Ableitung der Anforderungen an einen Auslegungsprozess für endlosfaserverstärkte Faserverbundstrukturen .....	56
3.4	Diskussion bisheriger Auslegungsmethoden .....	58
<b>4</b>	<b>Konzept eines neuen simulationsbasierten Auslegungsansatzes .....</b>	<b>61</b>
4.1	Der neue Ansatz im Überblick.....	61
4.2	Berechnung der zu berücksichtigenden Hauptspannungstrajektorien auf Basis einer modifizierten CAIO-Optimierung.....	62
4.2.1	Die erforderlichen Modifikationen am CAIO-Algorithmus.....	63
4.2.2	Der Modifizierte CAIO-Algorithmus.....	70
4.2.3	Integration des CAIO-Algorithmus in den Ablauf einer CAIO-Optimierung .....	72
4.2.4	Der allgemeine Ablauf der Modifizierten CAIO-Optimierung .....	75
4.2.5	Beispielhaftes Ergebnis der Modifizierten CAIO-Optimierung .....	77
4.3	Berechnung der erforderlichen Faserorientierungen durch Reduktion der projizierten Hauptspannungstrajektorien .....	78
4.3.1	Löschen projizierter Hauptspannungstrajektorien mit niedrigen Absolutbeträgen.....	78
4.3.2	Vereinigung projizierter Hauptspannungstrajektorien mit ähnlicher Ausrichtung.....	80
4.3.3	Beispielhaftes Ergebnis nach der Reduktion der Hauptspannungstrajektorien.....	87
4.4	Auffinden von Bereichen ähnlicher Faserorientierung.....	88
4.4.1	Auswahl bestehender Clusteralgorithmen .....	89
4.4.2	Vorarbeiten für die Anwendung der bestehenden Clusteralgorithmen auf das Problem der Clusteranalyse von Faserorientierungen.....	93

4.4.3 Anwendung der Clusteralgorithmen für unterschiedliche Demonstratoren und Diskussion der Ergebnisse ..... 96

4.4.4 Entwicklung eines geometriebasierten Clusteralgorithmus..... 99

4.4.5 Beispielhafte Ergebnisse und spezielle Eigenschaften des geometriebasierten Clusteralgorithmus ..... 106

4.4.6 Plausibilisierung der Ergebnisse des geometriebasierten Clusteralgorithmus mithilfe eines modifizierten K-MEANS-Algorithmus..... 109

4.4.7 Reduktion der Clusteranzahl..... 112

4.5 Definition fertigungsgerechter Mattenzuschnitte..... 116

4.5.1 Entwicklung eines Faserüberdeckungs- und Beanspruchungswerts für die manuelle Nachbearbeitung der Clustergeometrie ..... 116

4.5.2 Beispiele für den Faserüberdeckungs- und Beanspruchungswert sowie die manuelle Nachbearbeitung der Clustergeometrie ..... 122

4.6 Ermittlung der Schichtreihenfolge und -dicken auf Basis eines Evolutionären Algorithmus ..... 126

4.6.1 Der grundlegende Aufbau der verwendeten Evolutionären Algorithmen..... 126

4.6.2 Besondere Hinweise zur Parametrisierung und der Berücksichtigung von Fertigungsrichtlinien ..... 128

4.6.3 Beispielhaftes Ergebnis nach der Anwendung des Evolutionären Algorithmus ..... 131

**5 Integration des Ansatzes in den praktischen Auslegungsprozess..... 133**

5.1 Entwicklung der Software *mfkCODE* ..... 133

5.1.1 Aufbau und Oberfläche der Software ..... 133

5.1.2 Grafisches Interaktionsmenü für das Laminatdesign innerhalb *mfkCODE*..... 135

5.1.3 Integration von *mfkCODE* in die praktische Softwareumgebung des Produktentwicklers..... 136

5.2 Ein Vorgehensplan für die Auslegung endlosfaserverstärkter FVK-Strukturen auf Basis des neuen Auslegungsansatzes..... 137

**6 Praktische Anwendung des Auslegungsansatzes..... 142**

6.1 Auslegung eines  $\Omega$ -Spant..... 142

6.1.1 Aufgabenstellung für den  $\Omega$ -Spant ..... 142

6.1.2 Definition eines beanspruchungsgerechten Laminataufbaus für den  $\Omega$ -Spant über den neuen Auslegungsansatz ..... 143

6.1.3	Ergebnisdarstellung und Diskussion.....	150
6.1.4	Plausibilisierung der Auslegungsergebnisse des $\Omega$ -Spants auf Basis einer Spannungsanalyse .....	153
6.2	Auslegung einer Frontflügelanbindung in CFK-Sandwich-Bauweise .....	155
6.2.1	Aufgabenstellung für die Frontflügelanbindung .....	155
6.2.2	Definition eines beanspruchungsgerechten Laminataufbaus für die Frontflügelanbindung über den neuen Auslegungsansatz .....	156
6.2.3	Ergebnisdarstellung und Diskussion.....	160
6.2.4	Fertigung und Inbetriebnahme der Frontflügelanbindung.....	162
6.3	Abschließende Diskussion des Auslegungsansatzes .....	162
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>165</b>
<b>8</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>169</b>
8.1	Aufbau und Lastfälle der Demonstratoren aus Kapitel 4.....	169
8.1.1	Demonstrator 1 – Lochplatte .....	169
8.1.2	Demonstrator 2 – Bolzenlasche.....	169
8.1.3	Demonstrator 3 – $\Omega$ -Spant .....	170
8.1.4	Demonstrator 4 – Längsträger .....	170
8.2	Beispielhafte Ergebnisse der Clusteralgorithmen aus Kapitel 4.4.3 .....	171
8.2.1	Ergebnisse der Clusteralgorithmen für die Lochplatte (Demonstrator 1).....	171
8.2.2	Ergebnisse der Clusteralgorithmen für den Längsträger (Demonstrator 4).....	172
8.3	Zusätzliche Angaben zu den Laminataufbauten aus Kapitel 6.1.3 .....	173
8.3.1	Die Steifigkeitseigenschaften der einzelnen Laminataufbauten.....	173
8.3.2	Der Laminataufbau „mfkCODE c“ und die Ergebnisse nach Auslegung mit ALTAIR OptiStruct.....	174
<b>9</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>175</b>

# Nomenklatur

## Indizes

x, y, z	Bezug zum globalen Koordinatensystem
1, 2, 3	Bezug zum Schicht-/Faserkoordinatensystem
⊥,	Bezug zum physikalischen Schicht-/Faserkoordinatensystem
I, II, III	Indizierung der Hauptspannungstrajektorien
k	Indizierung über die Anzahl der Schichten
+,-	Zug-/Druckrichtung
A	Auf die „Action Plane“ bzw. Wirkebene bezogen
n,t	Bezug zum Kraftflusskoordinatensystem nach KELLY

## Abkürzungen

Al	Aluminium
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
HM	High Modulus
HT	High Tension
CLT	Klassische Laminattheorie
Fb	Faserbruch
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVK	Faserverbundkunststoffe
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HM	High Modulus
HST	Hauptspannungstrajektorien
HT	High Tension
MSV	Mehrschichtverbund
OoA	Out of Autoclave
RTM	Resin Transfer Moulding
St	Stahl
SMC	Sheet Molding Compound
BMC	Bulk Molding Compound
GMT	Glass Mat Thermoplastic Mold
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion
SCRIMP	Seeman Composites Resin Infusion Molding Process
Ti	Titan
VBO	Vacuum Bag Only

WWFE	World Wide Failure Exercise
Zfb	Zwischenfaserbruch
Fbl	Flugzeugbaulaminat
Kvb	Kreuzverbund

### Variablen

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\vec{B}$	Kraftflussvektor	N/mm <sup>2</sup>
$\vec{c}$	Faserorientierungsvektor eines Clusters	°
$\vec{HST}$	Hauptspannungstrajektorie	-
$\vec{e}$	Einheitsvektor	-
$\vec{f}$	Faserorientierungsvektor	-
$\vec{p}$	Positionsvektor	-
[A]	Scheiben- und MembranstEIFIGKEITSMATRIX	-
[B]	Koppelsteifigkeitsmatrix	-
[D]	Platten- oder Biegesteifigkeitsmatrix	-
[HST] <sub>C</sub>	Beanspruchungsmatrix eines Clusters	-
[HST] <sub>C,e,MAT</sub>	Normierte Beanspruchungsmatrix eines Clusters im Materialachsensystem	-
[HST] <sub>e</sub>	Normierte Beanspruchungsmatrix eines Clusters	-
[Mat]	Materialmatrix	-
[Mat] <sub>norm</sub>	Normierte Materialmatrix	-
[P]	Projektionsmatrix	-
[Q]	Steifigkeitsmatrix	-
[S]	Nachgiebigkeitsmatrix	-
[T]	Transformationsmatrix	-
{M}	Momentenvektor	-
{N}	Normalkraftvektor	-
{ε}	Dehnungsvektor	-
{κ}	Krümmungs-/Drillungsvektor	-
{σ}	Spannungsvektor	-
$b_{el}$	Beanspruchungswert eines Elements	-
$b_p$	Nutzereingabewert für die Grenzspannung	-
$E$	Elastizitätsmodul	N/mm <sup>2</sup>
$eps$	Größe des Suchradius für Datenpunkte	-
$F$	Kraft	N

$f_{E,Zfp}$	Spannungszustandswert nach PUCK	-
$f_{el}$	Faserüberdeckungswert eines Elements	-
$f_{el,erw}$	Erweiterter Faserüberdeckungswert eines Elements	-
$f_{el,sp}$	Skalierter Überdeckungswert	-
$f_{Fb}$	Faserbruchkriterium nach PUCK	-
$f_i$	Frobeniusnorm der Projektionsmatrix	-
$G$	Schubmodul	N/mm <sup>2</sup>
$I_K$	Isotropiekriterium	-
$k$	Anzahl an Clusterzentren	-
$l$	Länge	mm
$l_a$	Anzahl an Lastfällen	-
$l_g$	Anzahl an Lagen	-
$M$	Moment	Nmm
$MinPts$	Mindestanzahl an Datenpunkte im Suchradius eines Kernpunkts	-
$m_{ef}$	Vergrößerungsfaktor	-
$M_{\tau,n}$	Konvergenzkriterium des Mod. CAIO-Algorithmus	N/mm <sup>2</sup>
$N$	Normalkraft	N
$n_e$	Anzahl an Elementen	-
$n_{el,min}$	Mindestanzahl an Elementen für ein Cluster	-
$n_f$	Anzahl an Faserorientierungen	-
$P$	Punkt in Dickenrichtung	-
$p$	Inklinationsparameter	-
$p_n$	Einstellparameter für den Faserüberdeckungswert	-
$Q$	Einzelsteifigkeit	N/mm <sup>2</sup>
$R$	Fertigkeitswert	N/mm <sup>2</sup>
$s(i,k)$	Similaritätsmaß	-
$S_{rel}$	Relative Steifigkeit	-
$T$	Torsionsmoment	Nmm
$t$	Dicke	mm
$V_t$	Toleranz beim Isotropiekriterium	-
$w_{ori}$	Gewichtung der Fasorientierungsdifferenz zweier Datenpunkte	-
$w_{pos}$	Gewichtung der Positionsdifferenz zweier Datenpkt.	-
$\alpha$	Faserwinkel mit Bezug zur globalen x-Achse	°
$\alpha_{CL}$	Winkeltoleranz für geometriebasierten Clusteralgorith.	°

$\alpha_T$	Toleranzwinkel beim Vereinen von HST	°
$\beta$	Winkel zwischen zwei HST	°
$\beta_{Kf}$	Auslenkung eines Kraftflussvektors nach KELLY	°
$\gamma$	Scherung	-
$\delta$	Abweichungswinkel von idealer Faserausrichtung	°
$\Delta M$	Feuchtigkeitsaufnahme	-
$\Delta p$	Positionsdifferenz zwischen zwei Datenpunkten	mm
$\Delta p_{norm}$	Normierte Positionsdifferenz zwischen zwei Punkten	-
$\Delta T$	Temperaturdifferenz	°C
$\Delta \alpha$	Differenz zwischen Clusterorientierung und Faserorient.	°
$\Delta \alpha_{norm}$	Normierte Winkeldifferenz zwischen zwei Faservekt.	-
$\varepsilon$	Dehnungen	-
$\eta$	Winkel zwischen den Hauptachsen der Spannungs- und Orientierungsellipse	°
$\theta_{fp}$	Neigungswinkel der Bruchkurve für Matrixversagen im Bruchmodus C nach PUCK	°
$\theta_I, \theta_{II}$	Betrag der ersten und zweiten Hauptorientierung	-
$\kappa$	Krümmung/Drillung	-
$\sigma$	Normalspannungen	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{bp}$	Grenzspannung für das Löschen betragsmäßig kleiner Hauptspannungstrajektorien	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_m$	Spannungsmittelwert	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{max}$	Maximalspannung	N/mm <sup>2</sup>
$\tau$	Schubspannungen	N/mm <sup>2</sup>
$\nu$	Querkontraktionszahl	-
$\varphi$	Hauptspannungswinkel im Spannungskreis nach MOHR	°
$\phi$	Erzwungene Rotation	°

### Koordinatensysteme

$x, y, z$	Laminatkoordinatensystem
$x_e, y_e, z_e$	Elementkoordinatensystem
1, 2, 3	Schichtkoordinatensystem/Faserkoordinatensystem
$\perp, \parallel$	Physikalisches Schichtkoordinatensystem
$n, q$	Lokales Koordinatensystem des Kraftflussvektors nach KELLY
$E_1, E_2$	Materialachsensystem

## Zusammenfassung

Endlosfaserverstärkte Faserverbundwerkstoffe sind aufgrund ihres Leichtbaupotentials in den Fokus von Produktentwicklern aus unterschiedlichen Industriezweigen gerückt. Hohe Steifigkeits- und Festigkeitswerte bei vergleichsweise geringer Dichte versprechen besonders leichte und damit letztendlich energieeffiziente Produkte. Doch diese herausragenden mechanischen und physikalischen Eigenschaften können nur dann auf das spätere Bauteil übertragen werden, wenn dieses beanspruchungsgerecht ausgelegt wird.

Für die Auslegung endlosfaserverstärkter Faserverbundstrukturen stehen dem Produktentwickler derzeit unterschiedliche Methoden und Hilfsmittel zur Verfügung, die grob in klassische Auslegungshilfen und rechnerunterstützte Methoden unterschieden werden können. Diese Hilfsmittel und Methoden sind eine wichtige Hilfestellung für den Produktentwickler während der Auslegung, sie haben jedoch einige Nachteile, die trotz korrekter Anwendung dazu führen können, dass das Leichtbaupotential nicht ausreichend ausgeschöpft wird.

Ausgehend vom Stand der Technik bei der Auslegung von endlosfaserverstärkten Faserverbundstrukturen wird daher ein neuer simulationsbasierter Auslegungsansatz vorgestellt, der sich in vier Stufen gliedert. In der ersten Stufe (I) werden auf Basis einer modifizierten CAIO-Optimierung die Hauptspannungstrajektorien berechnet, die aufgrund der einzelnen Lastfälle in der Struktur auftreten. Diese Hauptspannungstrajektorien werden im Anschluss über zwei neu entwickelte Algorithmen so weit reduziert, sodass nur noch strukturelevante Trajektorien im generierten Datensatz verbleiben (II). Am Ende dieser zweiten Stufe ist bekannt, welche Faserorientierungen an welcher Stelle des Bauteils berücksichtigt werden müssen, um eine beanspruchungsgerechte Auslegung ermöglichen zu können. Zwar wäre es damit theoretisch möglich erste Laminatentwürfe manuell abzuleiten, in der praktischen Anwendung stellt sich dies jedoch als zweitaufwändige und schwierige Aufgabe heraus. Deshalb wird ein neuer Clusteralgorithmus vorgestellt, der es erlaubt auf Basis der berechneten Faserorientierungen die ungefähren Lagengeometrien und -faserorientierungen zu berechnen (III). Die erhaltenen Cluster können anschließend in einem manuellen Prozess an das anvisierte Fertigungsverfahren angepasst werden, wobei ein neuer Faserüberdeckungswert bei dieser Aufgabe unterstützt. Im letzten Schritt des Ansatzes (IV) werden abschließend die Dicken der einzelnen Lagen und deren Laminierreihenfolge über einen evolutionären Algorithmus ermittelt, womit das Laminat vollständig definiert ist.

Am Ende der Arbeit wird der neue Auslegungsansatz für die Auslegung zweier unterschiedlicher Bauteile angewendet und gezeigt, dass damit Produktentwickler in einem strukturierten Auslegungsprozess zu einem Laminataufbau mit sehr guten mechanischen Eigenschaften geführt werden.

## Abstract

Endless fiber reinforced composite structures have become an interesting material for product developers in very different industries, due to their enormous lightweight potential. High stiffness and strength value at low density promise light and, consequently, energy efficient products. However, these extraordinary mechanical and physical properties can only be transferred to the final part if a load adapted design is chosen.

For the design of endless fiber reinforced composite structures various different design methods and aids are available, which can be roughly be distinguished in classical design aids and computational methods. These design aids and methods are vital for product developers during the design stage, but there are disadvantages that can lead to an insufficient exploitation of the lightweight potential, even if the methods are used correctly.

Based on the actual state of the art in the design of endless fiber reinforced composite structures, a new computational design approach with four different stages will be introduced within this work. In the first stage (I), the relevant mean stress trajectories from the different load cases are computed using a modified CAIO-optimization. In the following, these mean stress trajectories are reduced with algorithms so that only mean stress with structural relevance remain in the dataset (II). At the end of the second stage, it is known which fiber orientations are needed in the different areas to allow a load adapted laminate design. Even though at this stage it is already possible to define a first principal solution for a load adapted laminate manually, it turns out to be a challenging and time-consuming task. For this reason, a new cluster algorithm to compute the areas and fiber orientations of possible layers is introduced. Afterward, only the resulting clusters are adapted manually regarding the intended manufacturing process. To support this adaption process, a new fiber superposition value is developed. In the final stage of the design approach, the thicknesses as well as the stacking order of the previously defined layers are computed with an evolutionary algorithm. After this final step, the laminate and its design parameters are fully defined.

In the end of this work, the new approach is used for the design of two different parts and it is shown that product developers are assisted in a structured design process from the first geometry to the final laminate with good mechanical properties even for complex geometries and load cases.