

## Reihe 1

Konstruktions-  
technik/  
Maschinen-  
elemente

Nr. 443

Dipl.-Ing. Markus Kellermeyer,  
Rosenheim

## Robust Design Optimierung endlosfaserverstärkter Verbundbauteile

Lehrstuhl für

**Konstruktionstechnik**

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





# **Robust Design Optimierung endlosfaserverstärkter Verbundbauteile**

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

vorgelegt von  
**Markus Kellermeyer**  
aus Raubling

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

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Juni 2018

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack  
Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause

# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 1

Konstruktionstechnik/  
Maschinenelemente

Dipl.-Ing. Markus Kellermeyer,  
Rosenheim

Nr. 443

Robust Design Optimierung  
endlosfaserverstärkter  
Verbundbauteile

Lehrstuhl für

**Konstruktionstechnik**

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



Kellermeyer, Markus

## **Robust Design Optimierung endlosfaserverstärkter Verbundbauteile**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 443 . Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

160 Seiten, 79 Bilder, 4 Tabellen.

ISBN 978-3-18344301-7, ISSN 0178-949X,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

**Für die Dokumentation:** Robust Design Optimization – Faserverbundwerkstoffe – Feldstatistik – Sensitivitätsstudie – Robustheitsbewertung – klassische Laminattheorie – Pretest Analyse – Abgleich – Kalibrierung

Die vorliegende Arbeit richtet sich an Ingenieure der virtuellen Produktentwicklung. Sie zeigt ein Vorgehen basierend auf der Finiten-Elemente-Methode welches den Produktentwickler unterstützt, in der frühen Phase der Entwicklung einen bestehenden Lagenaufbau eines endlosfaserverstärkten Verbundbauteils im Sinne einer geringen Gesamtmasse bei gleichzeitiger Gewährleistung einer definierten Sicherheit zu verbessern. Die Arbeit beschreibt dabei die dazu notwendigen Kalibrierungen unter Verwendung von skalaren Größen sowie streuenden Feldern sowie das iterative Vorgehen der Robust Design Optimierung. Diese ist auf eine zeitsparende Vorgehensweise sowie auf die Gewährleistung einer ausreichenden Genauigkeit ausgelegt, um den Einsatz für industrielle Bauteile zu ermöglichen. Abschließend werden Praxisbeispiele vorgestellt, getestet und bewertet.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.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 [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

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 978-3-18-344301-7

## Vorwort

Das Anfertigen einer Dissertation erfordert Einsatz, Begeisterung aber vor allem eine rundum gute Unterstützung. Da diese Arbeit im Rahmen einer externen Promotion am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk) der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg während meiner Festanstellung bei der CADFEM GmbH entstand, bin ich gleich mehreren Personen zu Dank verpflichtet.

Besonders möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack für seine hervorragende Unterstützung sowie sein Vertrauen bedanken. Der notwendige Spielraum zur Entfaltung kombiniert mit seinem Auge für das Wesentliche waren stets entscheidende Gründe für den Erfolg dieser Arbeit. Auch danke ich recht herzlich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause für seine unkomplizierte Bereitschaft das Korreferat zu übernehmen.

Eine durchgehend starke Unterstützung erfuhr ich durch meinen Arbeitgeber. Danke an Erke Wang – seine begeisterte und motivierende Art ist einzigartig und hat für mich absoluten Vorbildcharakter. Herrn Dr.-Ing. Jürgen Vogt, Herrn Dr.-Ing. Matthias Hörmann und Herrn Dr.-Ing. Marold Moosrainer bin ich zu tiefstem Dank für ihr Engagement bei der Finanzierung, der fachlichen Beratung, dem notwendigen Freiraum zum Anfertigen dieser Arbeit sowie ihrer zwischenmenschlichen Empathie verpflichtet.

Mein Dank richtet sich auch an all meine Wegbegleiter, welche auf vielfältigste Art zum Gelingen beigetragen haben. Besonders erwähnen möchte ich die Familie Müller, Dr.-Ing. Sebastian Wolff, Dr.-Ing. Thomas Most, Dr.-Ing. Dirk Götze, Dr.-Ing. Daniel Klein, Dipl.-Ing. Christian Witzgall, Dipl.-Ing. Thomas Rathert, Dr.-Ing. Benjamin Schleich, Dr.-Ing. Georg Gruber, Dipl.-Ing. (FH) Jörg Corpus und v.a. Herrn Dr.-Ing. Martin Perterer für seine Unterstützung zur finalen Anwendung in der Praxis.

Zuletzt möchte ich meiner Familie danken - meinen Eltern Annelies und Werner für ihre unermüdliche Unterstützung sowie ihren hundertprozentigen Rückhalt, meinem Bruder Andreas für seine ansteckende Begeisterung für Technik. Aber vor allem auch meiner lieben Frau Magdalena. Dir danke ich ganz besonders für deine Geduld, dein Verständnis und deine Kraft, die du noch zusätzlich während deines Referendariats und der Schwangerschaft unserer Tochter Josephine für mich aufgebracht hast!

Raubling, im Juni 2018

Markus Kellermeier

- Meiner Familie -



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Das Potential von Faserverbundwerkstoffen und Versuche es auszuschöpfen ..	1
1.2	Herausforderung .....	2
1.3	Aufgabenstellung und Gliederung der Arbeit.....	3
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung und Technik.....</b>	<b>5</b>
2.1	Allgemeines zu faserverstärkten Verbundwerkstoffen .....	5
2.2	Herstellverfahren endlosfaserverstärkter Verbundbauteile.....	5
2.3	Einführung in die Finite-Elemente-Methode .....	6
2.4	Finite-Elemente Formulierungen für faserverstärkte Verbundwerkstoffe.....	7
2.4.1	Analytische Ebenen zur Abbildung von Faserverbundstrukturen .....	8
2.4.2	Geschichtete Volumenelemente .....	9
2.4.3	Kontinuumschalen.....	10
2.4.4	Schalenelemente .....	11
2.5	Die klassische Laminattheorie .....	11
2.6	Berechnung von interlaminaren Spannungen .....	16
2.7	Bruchkriterien / Versagenshypothesen .....	17
2.7.1	Allgemeines zur Bewertung der Festigkeit einer Faserverbundstruktur .....	17
2.7.2	Nichtinteraktive Versagenskriterien .....	19
2.7.3	Interaktive Versagenskriterien mit Interpolation.....	20
2.7.4	Interaktive und versagensmodenbezogene Kriterien .....	23
2.7.5	Zusammenfassung .....	28
2.8	Globale Sensitivitätsstudien für numerische Modelle.....	29
2.8.1	Samplingverfahren .....	29
2.8.2	Regressionsmodelle.....	31
2.8.3	Studie der Einflüsse .....	31
2.8.4	Optimale Metamodelle und Bewertung der Prognosefähigkeit .....	35
2.9	Optimierungsverfahren .....	36
2.9.1	Überblick .....	36
2.9.2	Mehrzieloptimierung .....	37
2.9.3	Optimierungsverfahren .....	38

2.10 Virtuelle Toleranzanalyse.....	42
2.10.1 Aufgabe der Toleranzanalyse.....	42
2.10.2 Statistische Charakterisierung streuender skalarer Variablen .....	43
2.10.3 Durchführung varianzbasierter Robustheitsbewertungen.....	45
2.11 Numerische Abbildung von Degradationsfeldern .....	47
2.11.1 Materialbeschreibung mit variablen Feldern .....	47
2.11.2 Übertragung von Degradationsbereiche auf FE-Netze .....	47
2.12 Zufallsfelder.....	48
2.12.1 Die Auto-Kovarianz-Matrix.....	49
2.12.2 Spektraldekomposition.....	50
2.12.3 Korrelationslänge .....	52
2.12.4 Überprüfung der Genauigkeit.....	53
<b>3 Anforderungen an die RDO von endlosfaserverstärkten Verbundbauteilen.....</b>	<b>54</b>
3.1 Zeitfaktor .....	54
3.2 Genauigkeit.....	55
3.3 Diskussion bisheriger Vorgehensweisen und Schlussfolgerungen .....	55
<b>4 Konzept zur Kalibrierung und Robust Design Optimierung .....</b>	<b>58</b>
4.1 Konzept im Überblick .....	58
4.1.1 Schematischer Ablauf .....	58
4.1.2 Begleitendes Beispiel.....	60
4.1.3 Einordnung des Konzepts bzgl. der Phasen der Produktentwicklung .....	62
4.2 Hinweise zum Aufbau eines geeigneten Simulationsmodells .....	63
4.3 Optimierungs-, Kalibrierungs- und Streuparameter.....	65
4.4 Kalibrierung.....	66
4.4.1 Pretest Analyse.....	66
4.4.2 Versuchsdurchführungen .....	69
4.4.3 Abgleich von Versuch und Simulation.....	71
4.5 Sensitivitätsstudie von endlosfaserverstärkten Verbundbauteilen .....	75
4.6 Vorüberlegungen zur Optimierung .....	84
4.7 Bewertung der Prognosefähigkeit der Versagenskriterien.....	87
4.8 Anpassen der Optimierungsverfahren an die Charakteristik von Faserverbundaufgaben .....	88
4.9 Robust Design Optimierung.....	91

<b>5</b>	<b>Softwaretechnische Umsetzung .....</b>	<b>96</b>
5.1	Notwendige Schritte zur Umsetzung des Konzepts.....	96
5.2	Hinweise zur Infrastruktur für eine effiziente, simultane Berechnung.....	98
<b>6</b>	<b>Umsetzung und Validierung an Beispielen .....</b>	<b>100</b>
6.1	Fallbeispiel: Drapiertes Schalenmodell.....	100
6.1.1	Kalibrierung der Drapiersimulation .....	101
6.1.2	Abgleich von Versuch und Simulation bzgl. mechanischer Kennwerte ....	105
6.1.3	Robustheitsbewertung und Handlungsempfehlungen .....	108
6.1.4	Schlussfolgerungen .....	109
6.2	Fallbeispiel: Frontstruktur Rallye 450.....	110
6.2.1	Überblick über die durchgeführten Schritte.....	112
6.2.2	Simulation der Versuchslastfälle.....	112
6.2.3	Verwendung von Feldstatistik zur Beschreibung von Streuungen.....	114
6.2.4	Pretest Analyse .....	115
6.2.5	Versuchsdurchführungen .....	116
6.2.6	Kalibrierung der Simulationen an die Versuchsergebnisse .....	118
6.2.7	Robust Design Optimierung.....	120
6.2.8	Gegenüberstellung der Ergebnisse und Rechenzeiten .....	127
<b>7</b>	<b>Bewertung des Analysekonzepts .....</b>	<b>129</b>
7.1	Diskussion der Genauigkeit .....	129
7.2	Möglichkeit der schrittweisen Erweiterung der Aufgabe.....	131
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>133</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>135</b>

# Nomenklatur

## Abkürzungen

AFK	Aramidfaserverstärkter Kunststoff
APDL	ANSYS Parametric Design Language
ARSM	Adaptive Antwortflächenverfahren / Adaptive Response Surface Method
CAD	Computer Aided Design
CDF	Kumulative Verteilungsfunktion / Cumulative Density Function
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CLT	Klassische Laminattheorie
CMS	Component Mode Synthesis
CoD	Coefficient of Determination
CoI	Coefficient of Importance
CoP	Coefficient of Prognosis
CoV	Variationskoeffizient / Coefficient of Variation
DOE	Design of Experiments
DP	Designpunkt
EA	Evolutionärer Algorithmus
F-CoP	Field Coefficient of Prognosis
FEM	Finite-Elemente-Methode
FG	Freiheitsgrad
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
IRF	Inverser Reservefaktor
LaRC	NASA Langley Research Center
LHS	Latin Hypercube Sampling
MoP	Metamodel of optimal Prognosis
MOR	Model Order Reduction
MoS	Sicherheitsspanne / Margin of Safety
MP	Messpunkt
MSV	Mehrschichtverbund
MW	Mittelwert
OG	Obere Grenze

PDF	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion / Probability Density Function
PSO	Partikelschwarmoptimierung
RB-GT	Roadbook-Grundträger
RDO	Robust Design Optimierung
RF	Reserve Faktor
RVE	Repräsentatives Volumenelement
SA	Standardabweichung
UD	Unidirektional
UG	Untere Grenze
ZF	Zufallsfeld
ZFB	Zwischenfaserbruch
ZFM	Zufallsfeldmodell

Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
$A$	Scheibensteifigkeitsmatrix	-
$ABD$	Laminatsteifigkeitsmatrix	-
$B$	Koppelsteifigkeitsmatrix	-
$b$	Breite des MSV-Elements	mm
$C_{HH}$	Koeffizient der Auto-Kovarianz-Matrix	-
$D$	Plattensteifigkeitsmatrix	-
$E$	E-Modul	MPa
$f$	Zielfunktion	-
$F_{12}$	Kopplungskoeffizient des Tsai-Wu Kriteriums	-
$F_X$	kumulative Verteilungsfunktion	-
$g$	Gleichheitsnebenbedingung	-
$H$	Zufallsfeld	-
$h$	Ungleichheitsnebenbedingung	-
$L_c$	Korrelationslänge	mm
$m$	Anzahl der Nebenbedingungen	-
$n$	Anzahl der Eingangsparameter	-
$N$	Anzahl der Designpunkte	-
$P$	Wahrscheinlichkeit	-

$p$	Anstiegsparameter	-
$q$	Quantilwert	-
$R$	Festigkeitsgrenzwert	MPa
$s$	Schiefe / Ortsvariable	- / mm
$s_{i,1}$ und $s_{i,2}$	Anfangsrichtungen beim Drapieren	-
$t_k$	Schichtdicke	mm
$u$	Verschiebung	mm
$u_i$	Pseudozufallszahlen	-
$V_X$	Variationskoeffizient	-
$W_i$	Wichtungsfaktor	-
$X$	Streuende Größe	-
$\bar{X}$	Mittelwert	-
$x$	Deterministische Größe	-
$\hat{n}$	Kraftfluss	N/mm
$\hat{m}$	Momentenfluss	Nmm/mm
$\alpha$	Winkelabweichung	°
$\varepsilon$	Dehnung	-
$\varepsilon_{rel}$	Relativer Fehler	-
$\phi$	Basisfunktion	-
$\varphi$	Lagenwinkel	°
$\gamma$	Gleitung	-
$\kappa$	Wölbung / Krümmung	-
$\mu_x$	Mittelwert	-
$\nu$	Querkontraktionszahl	-
$\rho_{ij}$	Korrelationskoeffizient	-
$\sigma$	Spannung	MPa
$\sigma_x$	Standardabweichung	-
$\xi$	Verhältnis / Einfluss	-
$\Gamma$	Normierungsfaktor	-

**Indizes**

1,2,3	Richtungen bezogen auf das lokale Koordinatensystem der Schicht
$\parallel, \perp$	in Faserrichtung, quer zur Faserrichtung
x,y,z	Richtungen bezogen auf das globale Koordinatensystem des Laminats
$\Delta$	Größen bezogen auf das Laminat
(+),(-)	Zug, Druck
f,m	Faser, Matrix
g,h	Gleichgewichts- und Ungleichgewichtsbedingung

## Zusammenfassung

Bei lastgerechter Auslegung können mit endlosfaserverstärkten Verbundwerkstoffen Bauteile mit hoher Leichtbaugüte entwickelt werden. Die Vorteile, welche sich durch die hohe Festigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht ergeben, rechtfertigen trotz der im Vergleich zu traditionellen Werkstoffen oft höheren Herstellkosten in immer mehr Industriezweigen ihren Einsatz. Jedoch gehen mit den Möglichkeiten, die mechanischen Eigenschaften lokal gezielt beeinflussen zu können, auch kompliziertere Wirkzusammenhänge einher, welche Konstruktionen deutlich herausfordernder machen. Auch können die durch die oft manuellen Herstellverfahren bedingten Streuungen einen großen Einfluss auf die Eigenschaften des Endprodukts haben.

Aus diesem Grund ist das Ziel dieser Arbeit, auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) ein Vorgehen zu erarbeiten, welches den Produktentwickler in der frühen Entwicklungsphase unterstützt, einen bestehenden Lagenaufbau im Sinne einer geringen Gesamtmasse bei gleichzeitiger Gewährleistung einer definierten Sicherheit zu verbessern. Dazu wird im ersten Schritt das Vorgehen für Kalibrierungen von Simulationsmodellen endlosfaserverstärkter Bauteile erarbeitet, bei welchem sowohl streuende skalare Größen als auch streuende Felder über den Abgleich mit Versuchen an die realen Gegebenheiten angepasst werden. Um unnötige Iterationen bei der Abstimmung zwischen Versuch und Simulation zu sparen, wird erläutert, wie für solch einen Abgleich mittels Pretest Analyse die aussagekräftigsten Messpunkte im Vorfeld ermittelt werden können. Aus den Ergebnissen mehrerer Kalibrierungen wird die Streucharakteristik abgeleitet und für den weiteren Verlauf zur Verfügung gestellt. Im zweiten Schritt wird die Robust Design Optimierung (RDO) durchgeführt, bei welcher der Lagenaufbau unter Vorgabe von Zielen so optimiert wird, dass gleichzeitig unter den im ersten Schritt ermittelten Eingangsstreuungen die Sicherheit des Designs gewährleistet werden kann. Dieser iterative Prozess ist so gestaltet, dass eine hohe Genauigkeit bei möglichst geringem Zeitaufwand erreicht wird, um den Einsatz für industrielle Bauteile zu ermöglichen.

Abschließend wird das Vorgehen an Praxisbeispielen getestet und bewertet. Für die Beurteilung des Vorgehens bei der Kalibrierung wird die Simulation eines von Hand gefertigtes drapiertes Schalenmodell angepasst und anschließend durch eine Robustheitsbewertung Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Sicherheit erarbeitet. Als zweites Beispiel werden Simulationen von aus CFK gefertigten Roadbook-Grundträgern der Firma KTM Technologies mit mehreren gefertigten Prüflingen kalibriert und anschließend den iterativen Schritten der Robust Design Optimierung unter Berücksichtigung eines neuen Lastfalls unterzogen. Die Ergebnisse dienen abschließend ebenfalls zur Festlegung konkreter Handlungsempfehlungen.



## Abstract

Components made of continuous fiber-reinforced plastics can reach a great lightweight potential if the material is aligned with the direction of the force. The advantages that come along with the high stiffness at low mass justify the use in a wide range of industry although the manufacturing cost might be higher than for other conventional materials. But with the possibilities to locally influence the mechanical properties there are complicated mechanisms that must be handled and that can be quite challenging for constructions. And also the manufacturing processes which are often done by hand can have significant scatter that might influence the product performance in a negative way.

For this reason the objective of this work is to develop an approach based on the finite element method that supports the product developer in the early embodiment design stage to improve an existing layer stack in terms of low weight while keeping the probability of failure low. For this purpose the calibration procedure for simulations of continuous fiber-reinforced plastics is shown first. Here, scalar entities as well as spatially varying fields are adapted to match the behavior of the product under real-world conditions. In order to save unnecessary iterations while calibrating simulations to experimental results, pretest analyses are described which can be used to determine the most informative measurement points in advance. From the results of several calibrations the scatter characteristics will be derived and made available for the next step. In the second step the robust design optimization is carried out where the layer stack is changed in such a way that predefined objectives are met as good as possible and the safety can be guaranteed for the scatter conditions gained from the first step. This is an iterative process which is done with the aspect of keeping the total calculation time low while guaranteeing a high accuracy as these are the prerequisites to allow the use in praxis.

Finally, the approach is tested and evaluated with practical examples. To judge about the calibration procedure the simulation of a draped shell structure that is made by hand will be adapted and recommendations to improve safety will be made based on the results of a robustness evaluation. The second example is a CFK roadbook base carrier from the company KTM Technologies. Simulations are set up and calibrated with experimental results of several parts. Finally a robust design optimization for a new load case is done where the results are changes in the layer stack as well as insights in how to decrease the probability of failure.

