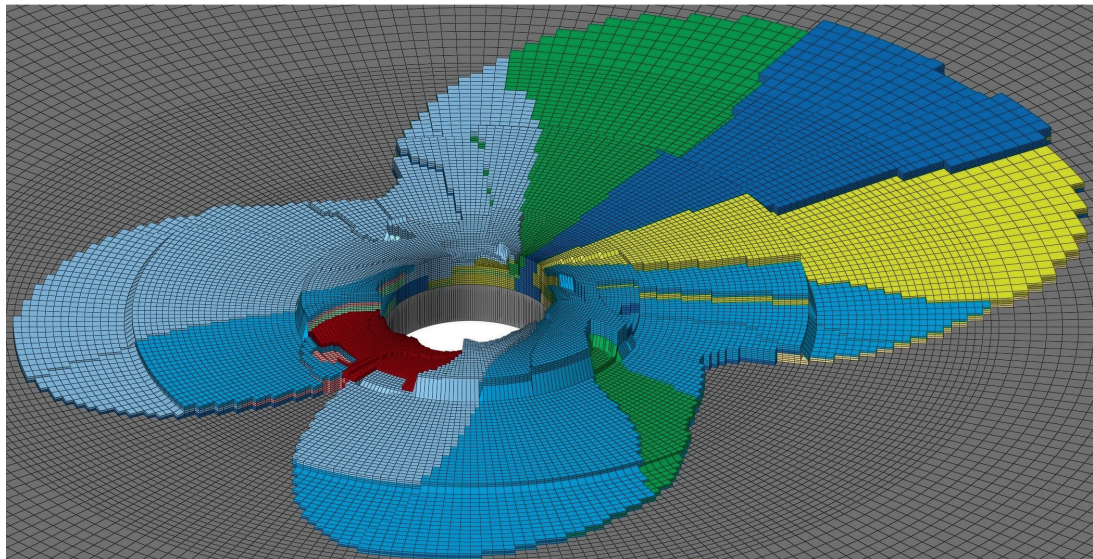


Optimierungsverfahren zur Erhöhung der Versagenslasten von Bolzenverbindungen in faserverstärkten Strukturen

Bergische Universität Wuppertal
Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen

Michail Schlosser





Optimierungsverfahren zur Erhöhung der Versagenslasten von Bolzenverbindungen in faserverstärkten Strukturen

**Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades**

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

der
Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von
Michail Schlosser
aus Schortandy (Kasachstan)

Wuppertal 2023

Tag der mündlichen Prüfung: 19.09.2023

Berichte aus dem Maschinenbau

Michail Schlosser

**Optimierungsverfahren zur Erhöhung der
Versagenslasten von Bolzenverbindungen
in faserverstärkten Strukturen**

Shaker Verlag
Düren 2024

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.

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2024

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9411-4

ISSN 0945-0874

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Michail Schlosser

Optimierungsverfahren zur Erhöhung der Versagenslasten von Bolzenverbindungen in faserverstärkten Strukturen

Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik, Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen, Februar 2023

Kurzfassung:

Faserverbundkunststoffe (FVK) besitzen enormes Leichtbaupotenzial und ein weites Einsatzspektrum. Sie Verkomplizieren jedoch aufgrund ihrer Anisotropie und Inhomogenität nicht nur die Festigkeitsbeurteilung der faserverstärkten Strukturen, sondern auch deren Auslegung. Die vielen Freiheitsgrade bei der Gestaltung eines Faserverbundlaminats (Materialauswahl, Anzahl, Dicke, Orientierung und Reihenfolge der Lagen) erschweren zudem die optimale Werkstoffausnutzung. Ein strukturiertes und zielorientiertes Auslegen kann mit Hilfe der numerischen Strukturoptimierung erfolgen. Dieser Prozess ist Bestandteil der vorliegenden Dissertation. Dabei wird die Optimierung von Bolzenverbindungen, die für lösbare Verbindungen von Faserverbundstrukturen zum Einsatz kommen, behandelt. Hierfür wird ein Verfahren entwickelt, welches für die Optimierung von FVK eine vorhandene kommerzielle Software (HyperWorks von Altair) nutzen soll. Daneben beinhaltet die Vorgehensweise die Topologieoptimierung eines modifizierten Anfangsmodells, die Überführung des erzeugten Ergebnisses in ein Laminatmodell und die darauf aufbauende Dimensionierung. Wahlweise kann hierzu eine vor- und nachgeschaltete Kontaktmodellierung und -analyse angewendet werden, um eine Approximation der Kontaktklast zur detaillierten Abbildung der Kraffteinleitung in einem Lastmodell bereitzustellen und eine genaue Nachrechnung des Optimierungsergebnisses zu ermöglichen. Die Möglichkeiten der entwickelten Methode werden an zwei Beispielen gezeigt. Mit einer Kragsscheibenoptimierung wird die Plausibilität und die Güte der Ergebnisse anhand von Vergleichsmodellen sowie einem Referenzprozess belegt. Im Anwendungsbeispiel wird die Bolzenverbindung ausgiebig behandelt. Neben der Betrachtung der Kontaktsituation und der Approximation der Kontaktklast wird ein Ausgangszustand ausgelegt und modelliert. Als Optimierungsziel wird diese Bolzenverbindung mit möglichst wenig Zusatzvolumen soweit verstärkt, dass bei höchster Steifigkeit die doppelte Versagenslast übertragen werden kann. Die optimale Verstärkung wird hierbei mit der entwickelten Methode erreicht und stellt gegenüber Vergleichsmodellen eine Verbesserung dar. Zudem wird mit dem verallgemeinerten Startentwurf innerhalb der Methode die Findung eines zulässigen Optimalentwurfs im Vergleich zu einem Referenzprozess vereinfacht.

Stichworte: Faserverbundkunststoff (FVK), Versagenskriterien, Kraffteinleitung, Kontakt, Bolzenverbindung, Strukturoptimierung, Optimierungsstrategie

Michail Schlosser

Optimization method for increasing the failure loads of bolt joints in fiber-reinforced structures.

PhD thesis, University of Wuppertal, School of Mechanical Engineering and Safety Engineering, Chair for Optimization of Mechanical Structures, February 2023

Abstract:

Fiber-reinforced composites have enormous lightweight potential and a wide range of possible applications. However, their anisotropy and inhomogeneity complicate the strength analysis and sizing of fiber-reinforced structures. The many degrees of freedom in the designing process (Material selection, number, thickness, orientation and sequence of layers) also make it difficult to achieve optimum material utilization. A structured and objective-oriented sizing can be achieved with the help of numerical structural optimization. This process is part of the present thesis. The optimization of bolt joints, which are used for releasable connections of fiber composite structures, is treated. For this purpose, a method is developed, which uses an existing commercial software (HyperWorks from Altair) for the composite optimization. Additionally, the process includes the topology optimization of a modified initial model, the transfer of the generated result into a laminate model and the dimensioning based on it. Optionally, contact modeling and analysis can be applied before and after this process to provide an approximation of the contact load for detailed mapping of the load application in a load model and to enable an accurate verification calculation of the optimization result. The capabilities of the developed method are demonstrated by two examples. With a cantilever disk optimization, the plausibility and the quality of the results are proven using comparison models and a reference process. In the application example, the bolt joint is treated in detail. In addition to considering the contact situation and the approximation of the contact load, an initial design is dimensioned and modeled. As an optimization objective, this bolt joint is reinforced with the smallest possible added volume so far that the double failure load can be carried at maximum stiffness. The optimum reinforcement is achieved with the developed method and represents an improvement with respect to comparison models. Also, the generalized initial design within the method simplifies the finding of a feasible optimal design compared to a reference process.

Keyword: fiber reinforced plastic (FRP), failure criteria, load application, contact, bolt joint, modeling, structural optimization, optimization strategy

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand neben meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter und Lehrbeauftragter an der Hochschule Albstadt-Sigmaringen sowie später nebenberuflich. Für die Möglichkeit der Promotion und die umfängliche Unterstützung bei der täglichen Arbeit möchte ich dem gesamten Studiengang Maschinenbau der Hochschule Albstadt-Sigmaringen danken. Die Promotion selbst erfolgte in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen an der Bergischen Universität Wuppertal.

Neben dem bereits ausgesprochenen Dank, haben zum Gelingen dieser Arbeit zahlreiche Menschen beigetragen, denen ich an dieser Stelle meinen Dank ausdrücken möchte.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Axel Schumacher, der mich über den gesamten Zeitraum fachlich unterstützt und stetig motiviert hat. Die vielen Anregungen und kritischen Fragen haben den Weg der Arbeit aufgezeigt ohne meine eigenen Ideen einzuschränken. Vielen Dank dafür.

Auch danke ich Prof. Dr.-Ing. Wilfried Becker von der Technischen Universität Darmstadt herzlich für die Übernahme des Zweitgutachtens und die wertvollen Anmerkungen.

Den Doktoranden vom Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen der Bergischen Universität Wuppertal danke ich für die Tipps und Diskussionen rund um das Thema.

Zu besonders großem Dank bin ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Bellendir verpflichtet, der nicht nur eine unverzichtbare Stütze für mich an der Hochschule Albstadt-Sigmaringen war, sondern auch maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat. Seine fachliche und menschliche Unterstützung war für mich über die Promotionszeit hinaus von unschätzbarem Wert. Die harmonische Zusammenarbeit und die unermüdliche Hilfsbereitschaft haben den Arbeitsalltag erleichtert und so mehr Freiraum für die Dissertation geschaffen. Ebenso möchte ich mich herzlich für die vielen Ideen und Anmerkungen sowie für die aufmunternden Worte in schwierigen Situationen bedanken.

Nicht zuletzt möchte ich besonders meiner Ehefrau danken, die in jeder Phase der Promotion hinter mir stand und mich stets motiviert hat. Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Kindern für ihre Geduld und ihr Verständnis bedanken, wenn der Papa an so manchen Tagen und Abenden mit der Arbeit beschäftigt war.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	III
----------------------------------------	-----

Kapitel 1

Einleitung	1
-------------------	----------

1.1 Einführung in das Thema	1
1.2 Stand der Forschung zur Optimierung von Bolzenverbindungen in faserverstärkten Strukturen	2
1.3 Motivation und Ziel der Arbeit	6
1.4 Aufbau der Arbeit	8

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen	11
--------------------------------	-----------

2.1 Der faserverstärkte Kunststoff	11
2.1.1 <i>Werkstoffkundliche Betrachtung und Herstellung</i>	11
2.1.2 <i>Elastizitätsgesetz und klassische Laminattheorie</i>	14
2.1.3 <i>Festigkeitsbeurteilung von FVK</i>	19
2.1.4 <i>Krafteinleitungselemente für FVK</i>	30
2.1.5 <i>FEM und Modellierung von FVK</i>	34
2.2 Das Kontaktproblem einer Bolzenverbindung	38
2.2.1 <i>Mathematische Beschreibung des Kontaktdrucks einer Bolzenverbindung in FVK</i>	41
2.2.2 <i>Beanspruchung und Deformation einer Bolzenverbindung in FVK</i>	43
2.3 Strukturoptimierung	45
2.3.1 <i>Topologieoptimierung</i>	49
2.3.2 <i>Parameteroptimierung von FVK</i>	52
2.3.3 <i>Optimierungsalgorithmus</i>	54

Kapitel 3

Modellierung einer Bolzenverbindung	57
--------------------------------------------	-----------

3.1 Auslegung der Bolzenverbindung	57
3.2 Aufbau des FE-Modells der Bolzenverbindung	59
3.2.1 <i>FE-Modell des Laminats</i>	60
3.2.2 <i>FE-Modell des Bolzens</i>	64
3.2.3 <i>FE-Modell der Bolzenverbindung</i>	69
3.3 Approximation des Kontaktproblems der Bolzenverbindung	75

Kapitel 4	
Optimierungsverfahren für FVK – speziell für Bolzenverbindungen	79
4.1 Neue Optimierungsstrategie – LTgSL-Verfahren	79
4.2 LTgSL-Verfahren am Beispiel einer Kragsscheibe	86
4.3 Diskussion des LTgSL-Verfahrens	95
4.3.1 Zusammenfassung und Diskussion der Einzelschritte	95
4.3.2 Vergleichsmodelle zur Bewertung der Ergebnisse	97
4.3.3 Dreiphasige Laminatoptimierung der Kragsscheibe mit OptiStruct	100
Kapitel 5	
Optimierung von Bolzenverbindungen	107
5.1 Optimierungsproblem und Startentwurf	107
5.2 Topologieoptimierung mit Lastmodell	110
5.3 Dicken- und Winkeloptimierung am Laminatmodell	113
5.4 Kontaktanalyse des endgültigen Entwurfs	119
5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion	122
5.5.1 Diskussion der Zwischenergebnisse und des Endzustands	123
5.5.2 Vergleichsmodelle zur Bewertung des endgültigen Entwurfs	130
5.5.3 Dreiphasige Laminatoptimierung der Bolzenverbindung mit OptiStruct	136
Kapitel 6	
Zusammenfassung und Ausblick	143
Literaturverzeichnis	147
Anhang	165
A Versagenskriterien	165
B Bruchkräfte verschiedener Versagensarten bei Bolzenverbindungen in FVK	173
C OptiStruct-Modelle von Kragsscheibe und Bolzenverbindung	176

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Die nachfolgende Zusammenstellung beinhaltet nur die wichtigsten Abkürzungen. Weitere Bedeutungen und Bezeichnungen sind jeweils im Text erläutert.

Abkürzungen

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
BESO	bidirektionale evolutionäre Strukturoptimierung
BFC	Bonding Failure Criterion
BIGOPT	Large Scale Optimization Algorithm
CAIO	Computer Aided Internal Optimization
CAO	Computer Aided Optimization
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CLT	Classical Laminat Theory = klassische Laminattheorie
CONLIN	Convex Linearization = Konvexe Linearisierung
DLF	Degraded Laminat Failure = sukzessives Versagen
DUAL, DUAL2	duale Lösungsalgorithmen in OptiStruct
EBB	EULER-BERNOULLI-Balken
ES	Einzelsschicht
ESZ	ebener Spannungszustand
FB	Faserbruch
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
FF	Fiber Failure = Faserbruch
FMC	Failure Mode Concept, Bezeichnung für ein Versagenskriterium
FPF	First Ply Failure = Erstschichtversagen
FVK	Faserverbundkunststoff
IFF	Interfiber Failure = Zwischenfaserbruch
LaRC	Langley Research Center, Bezeichnung für ein Versagenskriterium
LGS	lineares Gleichungssystem
LMF	Laminatmittelfläche
LPF	Last Ply Failure = Totalversagen
LTgSL	Lastmodellbasierte Topologieoptimierung mit generalisiertem Startentwurf und anschließender Laminatmodelloptimierung, neu entwickelte Optimierungsstrategie
MFD	Method of Feasible Directions = Methode der zulässigen Richtungen

MMA	Method of Moving Asymptotes = Methode der beweglichen Asymptoten
MSV	Mehrschichtverbunde
N2N	node-to-node Kontaktflächendiskretisierung
N2S	node-to-surface Kontaktflächendiskretisierung
pDGL	partielle Differentialgleichung
QDC	Quadratic Delamination Criterion
RVE	repräsentatives Volumenelement
S2S	surface-to-surface Kontaktflächendiskretisierung
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
SKO	Soft Kill Option
SLIDE	Kontakttyp: reibungsfreies Gleiten
SMEAR	unterdrückte Biege-Dehn-Kopplung in der Laminatberechnung
SOP	skalares Optimierungsproblem
SQP	Sequential Quadratic Programming = Sequentielle Quadratische Programmierung
STICK	Kontakttyp: haftend
TB	TIMOSHENKO-Balken
UD	unidirektional
UD-ES	unidirektionale Einzelschicht
VOP	Vektoroptimierungsproblem
ZFB	Zwischenfaserbruch

Schreibweisen

Buchstaben kursiv	Formelzeichen
Buchstaben fett und kursiv	Matrizen
$(\vec{\quad})$	Vektoren
$(\quad)_i, (\quad)_j$	Zählindex
$(\quad)_i, (\quad)_k, (\quad)_n$	1. variabler Index, 2. Größe der k -ten bzw. n -ten Einzelschicht
$(\quad)_z, (\quad)_D$	Differenzierung zwischen Zug und Druck
$[\quad]^T$	transponierter Vektor
$\text{Re}(\quad)$	Realteil einer komplexen Größe
$\text{Min}_{\bar{x}}(\quad)$	Minimiere über \bar{x}

Griechische Buchstaben bzw. Formelzeichen

α	Faserwinkel / Faserorientierung
β	Biegewinkel eines Biegebalkens
γ	Winkel eines Kreisausschnitts

$\bar{\epsilon}$	Verzerrungen im lokalen 1,2,3-Schichtkoordinatensystem zusammengefasst im Spaltenvektor $\bar{\epsilon} = [\epsilon_{11} \quad \epsilon_{22} \quad \epsilon_{33} \quad \gamma_{23} \quad \gamma_{13} \quad \gamma_{12}]^T$
$\bar{\epsilon}_{\text{ESZ}}$	Verzerrungen im lokalen 1,2,3-Schichtkoordinatensystem für den ebenen Spannungszustand zusammengefasst im Spaltenvektor $\bar{\epsilon}_{\text{ESZ}} = [\epsilon_{11} \quad \epsilon_{22} \quad \gamma_{12}]^T$
$\bar{\epsilon}_{\text{LMF}}$	Verzerrungen der Laminatmittelfläche im globalen x,y,z -Laminatkoordinatensystem zusammengefasst im Vektor $\bar{\epsilon}_{\text{LMF}} = [\epsilon_{xx} \quad \epsilon_{yy} \quad \gamma_{xy}]_{\text{LMF}}^T$
ζ, ξ	lokale Koordinaten in der Kontaktfläche
θ	Neigungswinkel der 2-Achse zur Bruchebene
θ_{Bruch}	Bruchebenenwinkel
κ	Schubkorrekturfaktor
$\bar{\kappa}_{\text{LMF}}$	Verwölbungen der Laminatmittelfläche im globalen x,y,z -Laminatkoordinatensystem zusammengefasst im Vektor $\bar{\kappa}_{\text{LMF}} = [\kappa_{xx} \quad \kappa_{yy} \quad \kappa_{xy}]_{\text{LMF}}^T$
μ	1. komplexer Parameter, 2. Reibungskoeffizient
ν	Querkontraktionszahl
ν_{ij}	Querkontraktionszahlen in j -Richtung bei Belastung in i -Richtung
ρ	Dichte
$\bar{\sigma}$	Spannungen im lokalen 1,2,3-Schichtkoordinatensystem zusammengefasst im Spaltenvektor $\bar{\sigma} = [\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \sigma_{33} \quad \tau_{23} \quad \tau_{13} \quad \tau_{12}]^T$
$\bar{\sigma}_{\text{ESZ}}$	Spannungen im lokalen 1,2,3-Schichtkoordinatensystem für den ebenen Spannungszustand zusammengefasst im Spaltenvektor $\bar{\sigma}_{\text{ESZ}} = [\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \tau_{12}]^T$
$\bar{\sigma}_H$	Hauptnormalspannungsvektor $\bar{\sigma}_H = \mathbf{S} \cdot \bar{n}_H$; $H = \text{I, II, III}$
σ_n	Normalspannung in der Bruchebene
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$	Spannungen im globalen x,y,z -Laminatkoordinatensystem
$\sigma_{\varphi\varphi}$	Umfangsspannung
τ_{n1}, τ_{nt}	Schubspannung in der Bruchebene parallel bzw. quer zur Faser
φ	Umfangsrichtung im Zylinderkoordinatensystem r,φ,z
ϕ'	komplexe Funktion
χ	normierter Dichtefaktor, Materialfüllgrad, normierte Elementdichte
ψ	Drehung um die y -Achse
Ω, ω	Basiswinkel und Winkelbereich

Lateinische Buchstaben bzw. Formelzeichen

A	Fläche
A	Dehnsteifigkeitsmatrix mit den Elementen A_{ij} ($i, j = 1, 2, 6$)
b	halbe Kontaktflächenbreite
B	Laminatbreite
B	Koppelsteifigkeitsmatrix mit den Elementen B_{ij} ($i, j = 1, 2, 6$)
C	Compliance = globale mittlere Nachgiebigkeit
C	Steifigkeitsmatrix
C_{red}	reduzierte Steifigkeitsmatrix
d	Durchmesser
D	Biegesteifigkeitsmatrix mit den Elementen D_{ij} ($i, j = 1, 2, 6$)
E	Elastizitätsmodul
E_{11}, E_{22}, E_{33}	Elastizitätsmodul parallel, quer zur Faser und in Schichtdickenrichtung
f	Bruchfunktionswert, Anstrengung
$f(\vec{x})$	Zielfunktion
$\vec{f}(\vec{x})$	Zielfunktionsvektor
F	Kraft
F()	Bruchfunktion
\vec{F}	Gesamtkraftvektor $\vec{F} = [F_x \quad F_y \quad F_z]^T$
$\vec{h}(\vec{x}), \vec{g}(\vec{x})$	Gleichheits-, Ungleichheitsrestriktionen
G	Schubmodul
G₁₂	Schubmodul in der Schichtebene
i	Variable, Anzahl
I_b	Flächenträgheitsmoment
k	Variable, Anzahl
k	Elementsteifigkeitsmatrix
K	Gesamtsteifigkeitsmatrix
l	Bolzenlänge
M_{ij}	Indentierungsmodul
\vec{M}	Schnittmomente $\vec{M} = [M_{xx} \quad M_{yy} \quad M_{xy}]^T$ im Laminatkoordinatensystem
n	Variable, Anzahl
\vec{n}_H	Hauptspannungsrichtungsvektor
\vec{N}	Schnittkräfte $\vec{N} = [N_{xx} \quad N_{yy} \quad N_{xy}]^T$ im Laminatkoordinatensystem
p	1. Kontaktdruck, 2. Bestrafungsexponent, 3. Flächenlast, 4. Anzahl
$P_{12Z}, P_{12D}, P_{22D}, P_{22Z}$	Neigungsparameter zur Anpassung der Bruchfunktionen
$\rho()$	Ersatzziel- oder Präferenzfunktion

q	1. Variable, 2. Anzahl, 3. Streckenlast
Q	Querkraft
r	1. Anzahl, 2. radiale Richtung im Zylinderkoordinatensystem r, φ, z
R	Radius
R_{i1z}, R_{i1D}	Zug- bzw. Druckfestigkeit einer Schicht in i -Richtung ($i = 1, 2, 3$)
R_{12}	Schubfestigkeit in der Schichtebene
R_{13}, R_{23}	Schubfestigkeit in Schichtdickenrichtung
R_{2n}, R_{nt}	wirkebenenbasierte Festigkeiten in der Theorie nach PUCK
R_{eH}, R_m	Streckgrenze und Zugfestigkeit
\bar{R}	Festigkeiten zusammengefasst in einem Vektor
\mathbf{S}	1. Nachgiebigkeitsmatrix mit den Elementen S_{ij} ($ij = 1, 2, 3, 4, 5, 6$), 2. Spannungstensor $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$
\mathbf{S}_{red}	reduzierte Nachgiebigkeitsmatrix
t	1. Schichtdicke, 2. Laminatdicke, 3. Länge der Kontaktfläche
u, v, w	Verschiebungen im kartesischen Koordinatensystem x, y, z
U	Formänderungsenergie
V	Volumen
\vec{v}	Verschiebungsvektor $\vec{v} = [u \ v \ w]^T$
W	Arbeit der äußeren Kräfte
x, y, z	Koordinaten eines kartesischen Koordinatensystems
\bar{x}	Entwurfsvariablen