

---

**Große, hochbelastete Biegeträger aus  
Faser-Kunststoff-Verbunden**  
Bauweisen, Konstruktion, Fertigung,  
Krafteinleitungen und Verbindungen

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur  
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
eingereichte

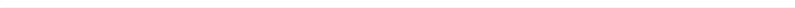
D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Max Georg von der Thüsen**

aus Berlin

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Wilfried Becker
Tag der Einreichung:	23.02.2015
Tag der mündlichen Prüfung:	21.04.2015



Schriftenreihe Konstruktiver Leichtbau mit  
Faser-Kunststoff-Verbunden

**Max Georg von der Thüsen**

**Große, hochbelastete Biegeträger  
aus Faser-Kunststoff-Verbunden**

Bauweisen, Konstruktion, Fertigung,  
Krafteinleitungen und Verbindungen

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4418-8

ISSN 1439-7390

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

---

## Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet *Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen*, des Fachbereichs Maschinenbau an der *Technischen Universität Darmstadt*.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. *Helmut Schürmann*, dem Leiter des Fachgebiets *Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen*, für seine ausgezeichnete fachliche Betreuung, Beratung und Zusammenarbeit.

Für die Bereitschaft zur Übernahme des Koreferats und wertvolle Hinweise bei Projektreffen danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. *Wilfried Becker*, dem Leiter des Fachgebiets *Strukturmechanik* der *Technischen Universität Darmstadt*.

Für die wertvolle Unterstützung bei der Durchführung von Versuchen danke ich besonders Herrn Dr.-Ing. *Erich Blohberger*, dem Akademischen Rat des Fachgebiets.

Meinen Büro- und Arbeitskollegen gilt mein Dank für fruchtbare Diskussionen und Unterstützung, sowie für die sehr angenehme und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre.

Den Mitarbeitern des Technikums danke ich für ihren Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit.

Den von mir betreuten Studenten danke ich für die gute Zusammenarbeit und die tatkräftige Unterstützung bei dieser Arbeit.

Darmstadt im Januar 2016

Max von der Thüsen



---

Meiner Frau Anke  
und  
meinen Kindern Carla und Finn  
gewidmet.



---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Vorwort .....	I
Inhaltsverzeichnis .....	V
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis .....	IX
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1. Zielsetzung, Einordnung und Kurzfassung der Arbeit.....	2
1.2. Stand der Technik .....	5
<b>2 Anforderungen an, sowie vergleichende Analyse und Bewertung von FKV-Biegeträger-Bauweisen.....</b>	<b>9</b>
2.1. Allgemeine Anforderungen an FKV-Biegeträger und getroffene Einschränkungen .....	9
2.2. Bauweisen und Träger aus der Literatur.....	11
2.3. Neuartige, modulare Bauweise .....	14
2.4. Eignung der FKV-Fertigungsverfahren für großformatige Biegeträger .....	15
2.5. Fazit zu Bauweisen und Fertigungsverfahren .....	18
<b>3 Laminat-Leichtbau-Optimierung für eine Kombination aus Normal- und Schubspannungen sowie Beulen ebener Platten .....</b>	<b>19</b>
3.1. Voraussetzungen, Definitionen und Werkstoffbeschreibung für die Laminat-Leichtbau-Optimierung.....	19
3.1.1 Definitionen: Kraftflüsse, Laminatspannungen und Ingenieurskonstanten.....	19
3.1.2 Verwendete Werkstoffkennwerte und daraus resultierende Ingenieurskonstanten von AWV-0°-Laminaten.....	21
3.1.3 Vorbemerkungen und Definitionen zur Laminatoptimierung.....	23
3.2. Laminat-Leichtbau-Optimierung nach Netztheorie für Laminatversagen.....	24
3.3. Laminat-Leichtbau-Optimierung nach CLT für Zfb und Laminatversagen ..	28
3.3.1 Vorgehen und Annahmen der Laminatoptimierung nach linearer und nichtlinearer CLT .....	28
3.3.2 Ergebnisse der Laminatoptimierung nach linearer und nichtlinearer CLT für AWV-0°-Laminat und Vergleich mit der Netztheorie.....	30
3.3.3 Symmetrische Zug-/Druckbelastung-Schubbelastung .....	35
3.3.4 Verbesserung der Ergebnisse nach linearer CLT-Berechnung .....	38
3.3.5 Laminatoptimierung für (0°/90°/±45°)-Flugzeugbau-Laminat und Vergleich mit AWV-0°-Laminaten.....	41
3.3.6 Diskussion des Langzeitverhaltens von CFK AWV-0°-Laminaten unter besonderer Berücksichtigung der faserparallelen Druckfestigkeit.....	42

3.4.	Beulen von gelenkig gelagerten Laminat-Platten zur Bestimmung der Schichtungsreihenfolge.....	47
3.5.	Diskussion von Sicherheitskonzepten bei der Laminat- und Biegeträgerauslegung.....	52
3.6.	Fazit der Laminatoptimierung und Auswahl geeigneter Biegeträgerlaminat.....	55
<b>4</b>	<b>Auslegung und Leichtbau-Optimierung von FKV-Biegeträgern .....</b>	<b>57</b>
4.1.	Analytische Auslegung und Dimensionierung von FKV Hohlkasten- und I-Träger nach EBT und SFT .....	57
4.1.1	Definition der Bezeichnungen, Koordinatensysteme, Abmessungen und Symmetrien für FKV-Biegeträger.....	57
4.1.2	Vor- und Nachteile von symmetrischen Biegeträgern .....	59
4.1.3	Bestimmung des Schwerpunkts eines FKV-Biegeträgers .....	62
4.1.4	Berechnung der Biegesteifigkeit nach Schubfeldtheorie .....	62
4.1.5	Berechnung der Biegesteifigkeit für doppelt-symmetrische Träger nach elementarer Biegetheorie – Näherung und Fehleranalyse .....	62
4.1.6	Hinweise zu Kraftflüssen und Laminatspannungen bei FKV-Biegeträgern .....	65
4.1.7	Laminatspannungen und Dimensionierung nach Schubfeldtheorie.....	66
4.1.8	Biegespannungen und -dehnungen nach EBT, Gurtdimensionierung und Fehlerbetrachtung.....	66
4.1.9	Berechnung der Schubflüsse und –Spannungen .....	68
4.1.10	Stegdimensionierung und -optimierung.....	70
4.1.11	Das Verhältnis von Normal- und Schubspannungen im Biegeträger allgemein und für ausgewählte Lastfälle.....	73
4.2.	Leichtbauoptimierung von Hohlkastenträgern unter Berücksichtigung von Festigkeits- und Beulrestriktionen .....	76
4.2.1	Leichtbauoptimierung nach Schubfeldtheorie .....	77
4.2.2	Leichtbauoptimierung nach elementarer Biegetheorie .....	83
4.2.3	Bewertung der optimalen Trägerhöhe mittels der Balkenschlankheit und der Durchbiegung für verschiedene Lastfälle .....	88
4.2.4	Optimierung unter Berücksichtigung der Biegesteifigkeit und des Bauraums – Abweichung von der optimalen Trägerhöhe .....	90
4.3.	Leichtbauoptimierung von Hohlkastenträgern mithilfe von Stringern oder Sandwichwänden in Gurt und Steg.....	92
4.3.1	Stringer und Sandwich im Steg.....	93
4.3.2	Stringer und Sandwich im Gurt.....	96
4.3.3	Stringer in Gurt und Steg .....	98
4.4.	Leichtbauoptimierung mithilfe von unterschiedlich ausgelegten Zug- und Druckgurten – Potenzial einfach symmetrischer Biegeträger .....	100
4.5.	Vergleich von I- und Hohlkastenträgern.....	102
4.6.	Fazit der analytischen Trägeranalysen und konstruktive Hinweise.....	103

<b>5</b>	<b>FKV-Demonstrator-Biegeträger Bau und Bruchversuche.....</b>	<b>105</b>
5.1.	Herstellung von CFK-Grundelementen mittels VBO-Verfahren .....	105
5.2.	Auslegung der modularen CFK-Demonstrator-Träger .....	106
5.3.	Kleinformatige, modular aufgebaute FKV-Demonstrator-Träger .....	109
5.4.	Kleinformatige FKV-Demonstrator-Träger für die Untersuchung von Trägerverbindungen und quasiduktilem Versagensverhalten .....	113
5.5.	Großformatiger, modular aufgebauter CFK-Demonstrator-Hohlkasten-träger	115
5.5.1	Verklebung der Grundelemente zum großformatigen CFK- Demonstratorträger .....	116
5.5.2	Versuchsprinzip und Prüfstand des großformatigen Demonstrator- Trägers.....	118
5.5.3	Bruchversuch des großformatigen CFK-Demonstratorträgers .....	121
5.5.4	Fazit zu dem großformatigen CFK-Demonstratorträger – Vergleich mit einem Stahlträger, dem Puck'schen Träger und dem kleinformatigen CFK-Träger .....	126
5.6.	Fazit zu den Demonstrator-Trägern und mögliche konstruktive Weiterentwicklung für sehr große Träger .....	129
<b>6</b>	<b>Konstruktionslösungen zu Kraffteinleitungen und Verbindungen von Hohlkasten-FKV-Biegeträgern .....</b>	<b>131</b>
6.1.	Anforderungen an Kraffteinleitungen und Verbindungen von FKV- Biegeträgern.....	131
6.2.	Kraffteinleitungen in FKV Biegeträger.....	132
6.2.1	Einteilung und Kategorisierung von Kraffteinleitungen .....	132
6.2.2	Druckkraffteinleitung in den Biegeträger-Gurt, resultierende Probleme und Referenz-Kraffteinleitungsfall.....	133
6.2.3	Konzeptentwicklung zu Kraffteinleitungen .....	135
6.2.4	Kraffteinleitung für den großformatigen Demonstratorträger und zugehörige Vorversuche.....	138
6.3.	Verbindungen von FKV Balken .....	143
6.3.1	Stand der Entwicklung von FKV-Balkenverbindungen .....	146
6.3.2	Prinzipien für Eck- und Längsverbindungen und deren Kategorisierung und Einschränkungen .....	147
6.3.3	Besondere Möglichkeiten der Fügung bei modular aufgebauten FKV- Biegeträgern .....	151
6.3.4	Analysierte und umgesetzte Eckverbindungen für FKV-Balken.....	152
6.3.5	Analysierte und umgesetzte Längsverbindungen für FKV-Balken ..	161
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>171</b>
7.1.	Zusammenfassung.....	171
7.2.	Ausblick .....	172

<b>Anhang</b> .....	<b>175</b>
A 1. Anhang zu Kapitel 1 .....	175
A 2. Anhang zu Kapitel 2 .....	176
A 3. Anhang zu Kapitel 3 Laminatoptimierung .....	177
A3.1. Werkstoffparameter für die Laminatoptimierung nach nichtlinearer und linearer CLT für eine CFK UD-Schicht.....	177
A3.2. FBL Laminatoptimierung.....	180
A3.3. Ergänzungen zum Beulen von orthotropen Platten – Kap. 3.4 .....	182
A3.4. Berechnung der Druckfestigkeit, Hinweise und Beschreibung durch ein Fitting-Polynom .....	182
A 4. Anhang zu Kapitel 4 .....	185
A4.1. Vollständiger Parametersatz zu den Standard-Laminaten für Gurt und Steg sowie den daraus resultierenden Verhältniszahlen .....	185
A 5. Anhang zu Kapitel 5 Demonstrator-Träger .....	186
A5.1. Herstellung des kleinformatigen CFK-Hohlkastenträgers .....	186
A5.2. Großformatiger CFK-Demonstratorträger .....	187
A 6. Anhang zu Kapitel 6 Krafteinleitung und Verbindungen .....	189
A6.1. Weitere Krafteinleitungs-Konzept-Varianten .....	189
A6.2. Krafteinleitung für den großformatigen Demonstratorträger.....	190
A6.3. Technische Zeichnungen zu den Eckverbindungen aus Kap. 7.7.4..	191
A6.4. Last-Weg-Diagramme zu den Eckverbindungen .....	195
A6.5. Last-Weg-Diagramme zu den Längsverbindungen .....	199
A6.6. Konzeptvariationen zu Eckverbindungen - Ergebnisse aus Brainstorming.....	201
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>205</b>

---

## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

---

### Abkürzungen

---

Abb	Abbildung
ASSET	EU gefördertes Projekt, bei dem die FKV-Brücke in England gebaut wurde ( <i>Advanced Structural Systems for Tomorrow infrastructure</i> ). Ein Resultat ist das ASSET-Brückendeck inzwischen von der Firma <i>Fiberline</i> vertrieben.
AWV	Ausgeglichener Winkelverbund
AWV-0°	Laminat bestehend aus 0°-Schichten und einem Ausgeglichene Winkelverbund (AWV)
CLT	Klassische Laminattheorie
CF	Kohlenstofffaser
CFK	Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbund
EBT	Elementare Biegetheorie (siehe auch EBT bei Indizes)
EMPA	Eidgenössische Material Prüf Anstalt
Fb	Faserbruch
FEM	Finite-Elemente-Methode
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund(e)
GF	Glasfaser
Gl	Gleichung
GFK	Glasfaser-Kunststoff-Verbund
KE	Krafteinleitung
KLuB	Fachgebiet <i>Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen</i> der TU Darmstadt
KOS	Koordinatensystem
lin	linear
MSV	Mehrschichtenverbund
nl	nichtlinear
red	reduziert
RTM	Resin-Transfer-Molding: Oberbegriff für Fertigungsverfahren bei denen die Matrix in trockene Faserlagen injiziert wird
sek	Sekanten (-Modul)
SFT	Schubfeldtheorie
SVE	Spannungs-Verzerrungs-Extrapolation (Degradationsmethode für CLT-Berechnungen)
UD	unidirektional
UHM	ultra-high-modulus (C-Faser Typ mit dem höchsten $E_{  }$ )
VBO	Vacuum Bag Only – Prepreg Fertigungsverfahren bei dem im Gegensatz zur Autoklaventechnik das Prepreg nur mit Vakuum beaufschlagt in einem Ofen aushärtet
Zfb	Zwischenfaserbruch
Zfb lin	Zwischenfaserbruch, der mittels linearer CLT ermittelt wurde

Zfb nl Zwischenfaserbruch, der nichtlinear mit *AlfaLam.nl* nach SVE berechnet wurde  
 urspr Ursprungs-(Modul)

Griechische Formelzeichen		Einheit
$\alpha$	Faserwinkel einer Schicht	$^{\circ}$ , rad
$\alpha$	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	1/K
$\beta$	Lastverhältniswinkel von $\hat{\sigma}_x$ - und $\hat{\tau}_{xy}$ -Spannungen: $\beta = \arctan(\hat{\tau}_{xy}/\hat{\sigma}_x)$	$^{\circ}$ , rad
$\Delta$	Differenz	-
$\varepsilon$	Dehnung	-, %
$\eta$	ein Plattenkennwert; in der Literatur auch Kreuzzahl genannt und oft auch mit dem Formelzeichen $K$ belegt	
$\gamma$	Sicherheitsbeiwert	-
$\varphi$	Faservolumenanteil	-
$\nu$	Querkontraktionszahl	-
$\rho$	Dichte	g/cm <sup>3</sup>
$\sigma$	Normalspannung	N/mm <sup>2</sup>
$\tau$	Schubspannung	N/mm <sup>2</sup>
$\omega$	AWV-Winkel: symbolisiert die Faserorientierung eines Ausgeglichenen Winkelverbunds	$^{\circ}$ , rad
$\xi_{Tr}$	orthotrope Balkendünnwandigkeit	-

## Indizes

$\sim$ , Dach	Alle mit $\sim$ = „Dach“ gekennzeichneten Größen beziehen sich auf den MSV d.h auf das Laminat, wird angewandt auf Kraft- und Momentenflüsse sowie Spannungen und E-Moduln.
$\square$	Hohlkastenträger
+	Zug (hochgestellter Index)
-	Druck (hochgestellter Index)
+/-	Zug oder Druck (hochgestellter Index)
+/-	als tiefgestellter Index wird ein Verhältnis aus Zug- und Druckkennwert gekennzeichnet (siehe $R_{+/-}$ oder $E_{-/+}$ ).
0°	indizierte Größe bezieht sich auf die 0°-UD-Schicht des Laminats
AWV	indizierte Größe bezieht sich auf den Ausgeglichenen Winkelverbund des Laminats
b	Biegung z. B. Biege-E-Modul einer Laminatplatte
b/h b/h	siehe $c_{b/h}$
cr	critical, bezieht sich auf kritische Beullasten und Beulspannungen
E	beinhaltet den E-Modul (siehe erweiterte Beulwerte: $k_{\sigma,E}$ , $k_{\tau,E}$ )
EBT	Elementare Biegetheorie; bedeutet, dass bei der Berechnung der Biegesteifigkeit Näherungen verwendet wurden
einf. sym	indizierter Wert bezieht sich auf einen einfach symmetrischen Querschnitt

erw	erweitert
exakt	exaktere Berechnung gegenüber einer Näherung
fracture	Der indizierte Wert bezieht sich auf eine Laminatversagen, d. h. Zfb Modus C oder Fb in mindestens einer Schicht. Nichtlinear berechnet mit <i>AlfaLam.nl</i> nach SVE.
Gu	Gurt
I-Tr	I-Träger
<i>i</i>	Laufvariable oder Werkstoffindex
<i>ij</i>	Matrixindizierung bei Indeschreibweise
<i>k</i>	Zählindex für Einzelschicht-Nummer
max	maximal
min	minimal
MSV	Mehrschichtenverbund
<i>n</i>	Zählvariable bei Iterationen, oder Werkstoffindex
Netz	Netztheorie
norm	normiert
oben	hochgestellt, indiziert die Trägeroberseite in negativer Träger-z-Richtung
opt	optimal (im Sinne des Leichtbaus)
<i>Q/M</i>	siehe $c_{Q/M}$
rel	relativ
S	Symmetrisches Laminat in Verbindung mit Laminatangaben
SFT	Schubfeldtheorie
Steiner	nur der Steineranteil wird berücksichtigt
St	Steg(e)
Stri	indiziert das Vorhandensein von Stringer(n) in Balken-x-Richtung
sym	symmetrisch (hoch- oder tiefgestellt)
t	Torsion, z. B. Torsions-Schubmodul einer Laminatplatte
Tr	Träger
unten	hochgestellt, indiziert die Trägerunterseite in positiver Träger-z-Richtung
Zfb nl	Der indizierte Wert bezieht sich auf eine Zwischenfaserbruch-Grenze, die nichtlinear mit <i>AlfaLam.nl</i> nach SVE berechnet wurde
$\varepsilon = 1\%$	indizierter Wert bezieht sich auf eine Dehnung von $\varepsilon_x = 1\%$
$\gamma$	indizierter Wert ist mit einen zugehörigen Sicherheitsbeiwert beaufschlagt
$\sigma$	zur Beschreibung des Druck-Belastungsfalls bei Beulen (siehe $k_{\sigma,E}$ )
$\tau$	zur Beschreibung des Schub-Belastungsfalls bei Beulen (siehe $k_{\tau,E}$ )

**Reihenfolge der Indizierung:**

1. Koordinatenindex, 2. Beschreibende Indizes außer Indizes für Gurt und Steg (Gu, St)
3. Indizierung für Gurt und Steg (Gu, St)

## Koordinatensysteme und Koordinatenindizes

1, 2, 3	Faserkoordinatensystem der unidirektionalen Schicht
, ⊥	UD-Schicht-KOS mit Bezeichnung längs und quer zur Faserrichtung. Für diese Arbeit gilt:    = 1- und ⊥ = 2-Richtung (interlaminare Größen in 3-Richtung werden nicht betrachtet)
x, y, z	Laminatkoordinatensystem
x, s, r	umlaufendes Koordinatensystem (mit der Trägerwandung)
x_Tr, y_Tr, z_Tr	Trägerkoordinatensystem, z entspricht Hauptbiegerichtung; die Hierzu gehörenden Verformungen der Balkenachse sind u, v, w,

**Anmerkung:** Die x-Koordinaten der letzten drei KOS sind identisch ( $x_{Tr} = x$ ). i. d. R. haben die „z“-Koordinaten (3, z, r) identische Orientierungen, aber nicht zwingend die gleiche Richtung.

## Lateinische Formelzeichen

Einheit

$A$	(Querschnitts-) Fläche	mm <sup>2</sup>
$a$	Jahr	Jahre
$b$	Breite (eines Biegeträgers oder einer Platte)	mm <sup>2</sup>
$c$	Konstante	-
$c_3$	Durchbiegungskonstante für die gilt: $w_{\max} = c_3 M_{\max} l^2 / EI$	-
$c_{b/h}$	$b/h = \text{konstant}$ (wird für die Optimierung zu 0,5 gesetzt)	-
$c_{Q/M}$	kennzeichnet einen Lastfall; es gilt $c_{Q/M} = l \cdot Q_{\max} / M_{\max}$	-
$[D]$	Plattensteifigkeitsmatrix	Nmm
$[\bar{D}]$	Auf Ingenieurkonstanten für Plattenbiegung normierte Plattensteifigkeitsmatrix	N/mm <sup>2</sup>
$E$	E-Modul; Elastizitätsmodul	N/mm <sup>2</sup>
$E_{-f_t}$	E-Modul-Verhältnis von Druck- zu Zug-Gurt: $E_{-f_t} = \hat{E}_{x, \text{Gu, Druck}} / \hat{E}_{x, \text{Gu, Zug}}$	-
$EI$	Biegesteifigkeit	Nmm <sup>2</sup>
$G$	Schubmodul	N/mm <sup>2</sup>
$h$	Balkenhöhe	mm
$h_{cr, \tau}$	Balkenhöhe, bei der im Steg Schubbeulen und Schubversagen gleichzeitig eintritt	mm
$h_{cr, \sigma}$	Balkenhöhe, bei der im Gurt Druckbeulen und Druckversagen gleichzeitig eintritt	mm
$h_{\text{norm}}$	normierte Balkenhöhe: $h_{\text{norm}} = h / h_{cr, \tau}$	-
$\tilde{h}_{\text{opt}}$	in Bereichen optimale Trägerhöhe bei der im Gurt die Festigkeit maßgebend ist und der Steg gegen Schubbeulen dimensioniert ist, nicht nach Schubfestigkeit	mm
$K$	Plattenparameter in der Literatur z. T. auch Kreuzzahl „ $\eta$ “ genannt	-

$k_{\sigma, E}$	erweiterter Druckbeulwert	N/mm <sup>2</sup>
$k_{\tau, E}$	erweiterter Schubbeulwert	N/mm <sup>2</sup>
$M$	Biegemoment (ohne Index: um die y-Trägerachse)	Nm
$M_{cr, \tau \tilde{h}}$	bereichsbegrenzendes Moment: $M_{cr, \tau \tilde{h}} = M(h = h_{cr, \tau} = \tilde{h}_{opt})$	Nm
$M_{cr, \tau \sigma}$	Basismoment für das normierte Moment: $M_{cr, \tau \sigma} = M(h = h_{cr, \tau} = h_{cr, \sigma, SFT})$	Nm
$M_{cr, \tilde{h} \sigma}$	bereichsbegrenzendes Moment: $M_{cr, \tilde{h} \sigma} = M(h = \tilde{h}_{opt, SFT} = h_{cr, \sigma})$	Nm
$M_{norm}$	normiertes Biegemoment: $M_{norm} = M/M_{cr, \tau \sigma}$	-
$n$	Kraftfluss	N/mm
$n_{Sti}$	Anzahl der Stringer in Balkenlängsrichtung	-
$Q$	Querkraft (ohne Index: in z-Trägerachse)	N
$[\bar{Q}]$	Steifigkeitsmatrix eines beanspruchten Werkstoffelements, transformiert in das Laminat-Koordinatensystem	N/mm
$R$	Festigkeit	N/mm <sup>2</sup>
$r$	Radius	mm
$R_{+/-}$	$R_{+/-} = \hat{R}_{x, Gu, \gamma}^+ / \hat{R}_{x, Gu, \gamma}^- \geq 1$ oder $R_{+/-} = \hat{R}_{x, Gu, \gamma}^+ / \hat{\sigma}_{x, cr, Gu, \gamma} \geq 1$	-
$S$	Schwerpunkt	
$t$	Wanddicke, bezieht sich auf den MSV, wenn nicht anders indiziert	mm
$t_{rel}$	relative Schichtdicke eines AWW-0°-Laminats: $t_{rel} = t_{AWV} / t$	-
$T$	Temperatur	°
$u, v, w,$	Verformungen der Balkenlängsachse, $w$ ist die Durchbiegung in Richtung der starken Achse	mm