
Gestaltung und Optimierung einer nichtschaltbaren Lamellenkupplung aus Glasfaser-Kunststoff-Verbund

Am Fachbereich Maschinenbau

an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

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

vorgelegt von

Jakob Katz, M. Sc.

aus Heidelberg

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Horst Idelberger
Tag der Einreichung:	04.08.2015
Tag der mündlichen Prüfung:	06.10.2015

D17



Schriftenreihe Konstruktiver Leichtbau mit
Faser-Kunststoff-Verbunden

Jakob Katz

**Gestaltung und Optimierung einer nichtschaltbaren
Lamellenkupplung aus Glasfaser-Kunststoff-Verbund**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4091-3

ISSN 1439-7390

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

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

Kurzfassung

Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung und Optimierung einer nichtschaltbaren Lamellenkupplung aus Glasfaser-Kunststoff-Verbund (GFK). Gegenüber dem klassischen Lamellen-Werkstoff Stahl bietet GFK die Vorteile einer höheren spezifischen Festigkeit, einer höheren Korrosionsbeständigkeit sowie einer elektrischen Isolation.

Zunächst werden voneinander unabhängige, theoretische Untersuchungen zum freien Bereich und zum Krafterleitungsbereich der Lamelle durchgeführt. Zum Krafterleitungsbereich, in dem eine Feinverzahnung zum Einsatz kommt, werden zusätzlich Versuche durchgeführt. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen werden Konstruktionsrichtlinien zur Auslegung von GFK-Lamellenkupplungen abgeleitet.

In einer weiteren theoretischen Untersuchung werden Eigenschaften der Kupplung, die einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten des Antriebsstrangs haben, untersucht. Dazu gehören die Festigkeit, die Steifigkeit sowie der Gleichlauf.

Anschließend werden mögliche Fertigungsverfahren vorgestellt und Versuche mit einer GFK-Lamellenkupplung durchgeführt. Die Versuchsergebnisse legen nahe, dass mit der untersuchten GFK-Lamellenkupplung ähnliche Leistungsdaten wie mit einer Referenz-Lamellenkupplung aus Stahl zu erreichen sind. Dabei weist die neuentwickelte Kupplung die oben genannten Vorteile auf.



Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Stand der Technik	2
1.3.1 Vorangegangene Arbeiten am Fachgebiet <i>KLuB</i>	2
1.3.2 Patentsituation	4
2 Definitionen und Grundlagen	9
2.1 Begriffsklärungen	9
2.1.1 Lamellenkupplung	9
2.1.2 Versatz und Verlagerung	9
2.1.3 Feinzahnung und Feinverzahnung	11
2.2 Berechnung von Faser-Kunststoff-Verbunden	11
2.2.1 Spannungs- und Verformungsanalyse	12
2.2.2 Festigkeitsanalyse	17
2.2.3 Beispielrechnung zur Festigkeitsanalyse	18
3 Theoretische Untersuchung des freien Bereichs	23
3.1 Zur Kinematik der Stränge	23
3.2 Die Stränge unter Last	27
3.2.1 Die Lamelle mit geraden Strängen unter Drehmomentlast	28
3.2.2 Die Lamelle mit vorgekrümmten Strängen unter Drehmomentlast und Axialverlagerung	33
3.3 Fazit zur Untersuchung des freien Bereichs	41
4 Untersuchung des Kräfteinleitungsbereichs	43
4.1 Probekörpergeometrie, Werkstoffe und Lastfälle	43
4.2 FEA des Kräfteinleitungsbereichs	45
4.2.1 Aufbau des FE-Modells	48
4.2.2 Ergebnisse der FEA	50



4.3	Experimentelle Untersuchung der Krafteinleitung	54
4.3.1	Versuchsplan	56
4.3.2	Versuchsdurchführung	57
4.4	Ergebnisse der Versuche und Vergleich mit den Ergebnissen der FEA	58
4.4.1	Quasistatische Last	58
4.4.2	Schwingende Last	61
4.5	Fazit zur Untersuchung des Krafteinleitungsbereichs	63
5	FEA der Gesamtkupplung	65
5.1	Das Kupplungs-Berechnungsprogramm	65
5.2	Aufbau des FE-Modells aus dem Berechnungsprogramm	66
5.2.1	Geometrie und Laminat	66
5.2.2	Randbedingungen und Rechenschritte	70
5.2.3	Vernetzung und Konvergenz	70
5.3	Eigenschaften der Gesamtkupplung	71
5.3.1	Gleichlauf	71
5.3.2	Kräfteaufteilung in die Stränge	72
5.3.3	Rückstellbiegemoment bei Winkelverlagerung	74
5.3.4	Axial-, Dreh- und Winkelfedersteifigkeit	74
5.3.5	Festigkeit	74
5.4	Fazit zur Analyse der Gesamtkupplung	75
6	Auslegung von FKV-Lamellenkupplungen	77
6.1	Vorgehen und Hinweise	77
6.2	Beispiel mit Parameterbetrachtung	80
6.2.1	Grobauslegung	81
6.2.2	Feinauslegung	82
6.3	Fazit zur Auslegung	86
7	Fertigung von FKV-Lamellenkupplungen	89
7.1	Pressverfahren	89
7.2	Wickelverfahren	93
7.3	Kombiniertes Harzinjektions-/Pressverfahren	95
7.4	Bewertung der Verfahren	98
7.5	Fazit	99
8	Experimentelle Untersuchung von GFK-Lamellenkupplungen	101
8.1	Prüfvorrichtung	101
8.2	Probekörper	101
8.3	Versuchsplan	103

8.4	Versuchsdurchführung	104
8.5	Versuchsergebnisse	106
8.6	Fazit	108
9	Zusammenfassung und Ausblick	111
	Literaturverzeichnis	113
A	Werkstoffdaten	121
B	Zum Knickstab nach EULERfall 4 oberhalb der Verzweigungslast	125
C	Die Gleichungen zum Kinematikmodell	131
D	Details zur Untersuchung der Krafteinleitung	135
	D.1 Zur Herstellung der Probekörper	135
	D.2 Zur Kontaktmodellierung	137
E	Zur technischen Umsetzung des Berechnungsprogramms	139



Symbolverzeichnis

Symbole mit mehrfacher Bedeutung sind hier mehrfach aufgeführt. Sie ergeben sich aus dem jeweiligen Kontext, in dem sie auftauchen.

Symbole, die nur im Anhang dieser Arbeit vorkommen, sind dort erklärt und hier nicht aufgeführt.

Abkürzungen

AWV	Ausgeglichener Winkelverbund
CFK	Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbund
CLT	Klassische Laminattheorie
Fb	Faserbruch
FE	Finite-Elemente
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FVA	Faservolumenanteil
GFK	Glasfaser-Kunststoff-Verbund
KOS	Koordinatensystem
MSV	Mehrschichtenverbund
SLS	Selektives Lasersintern
UD-Schicht	unidirektional faserverstärkte Schicht
Zfb	Zwischenfaserbruch

Griechische Formelzeichen

Einheit

α_{AWV}	AWV-Winkel; Winkel zwischen x -Richtung und 1-Richtung	$^{\circ}$
----------------	--	------------

α_k	Faserorientierungswinkel der k -ten Schicht; Winkel zwischen x -Richtung und 1-Richtung	°
$\alpha_{M,f,\parallel}, \alpha_{M,f,\perp}$	Quell-Ausdehnungskoeffizienten der Faser, längs und quer	-
$\alpha_{M,m}$	Quell-Ausdehnungskoeffizient der Matrix	-
$\alpha_{M,\parallel}, \alpha_{M,\perp}$	Quell-Ausdehnungskoeffizienten der UD-Schicht, längs und quer	-
α_0	Winkel zwischen zwei Armen der zwei Flansche im lastfreien Zustand	°
$\alpha_{T,f,\parallel}, \alpha_{T,f,\perp}$	thermische Ausdehnungskoeffizienten der Faser, längs und quer	$\frac{1}{K}$
$\alpha_{T,m}$	thermischer Ausdehnungskoeffizient der Matrix	$\frac{1}{K}$
$\alpha_{T,\parallel}, \alpha_{T,\perp}$	thermische Ausdehnungskoeffizienten der UD-Schicht, längs und quer	$\frac{1}{K}$
β	Spitzenwinkel der pyramidenförmigen Zähne	°
$\tilde{\gamma}_{\tilde{z},l}, \tilde{\gamma}_{\tilde{z},r}$	im FE-Modell verwendete Verdrehung des linken bzw. rechten Strangendes um die \tilde{z} -Richtung	°
$\gamma_{P,\hat{x}}, \gamma_{P,\hat{y}}, \gamma_{P,\hat{z}}$	Verdrehung des rechten Endes des Zugstrangs relativ zu seinem linken Ende um die \hat{x} -, \hat{y} - bzw. \hat{z} -Richtung	°
Δl	Längung des Strangs aufgrund von Verlagerungen	mm
η_{w1}	Schwächungsfaktor zur Berücksichtigung faserparalleler Spannungen	-
θ_{fp}	Bruchwinkel	°
κ	Schubkorrekturfaktor	-
μ	fiktiver Reibkoeffizient zur Berechnung der Feinverzahnung	-
ν	Querkontraktionszahl des Klemmbacken-Werkstoffs	-
$\nu_{f,\parallel}, \nu_{f,\perp\parallel}, \nu_{f,\perp\perp}$	Querkontraktionszahlen der Faser, längs-quer, quer-längs und quer-quer	-
$\nu_{\parallel}, \nu_{\perp\parallel}, \nu_{\perp\perp}$	Querkontraktionszahlen der UD-Schicht, längs-quer, quer-längs und quer-quer	-
ρ	Dichte des Verbunds	$\frac{g}{cm^3}$
ρ_f	Dichte der Faser	$\frac{g}{cm^3}$
ρ_m	Dichte der Matrix	$\frac{g}{cm^3}$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Normalspannungen im 123-KOS der UD-Schicht	$\frac{N}{mm^2}$
$\sigma_{d,M}, \sigma_{z,M}$	maximale Normalspannung im Druck- bzw. Zugstrang aufgrund eines Biegemoments	$\frac{N}{mm^2}$
$\sigma_{d,N}, \sigma_{z,N}$	Normalspannung im Druck- bzw. Druckstrang aufgrund einer Normalkraft	$\frac{N}{mm^2}$
$\sigma_{f,1}$	faserparallele Normalspannung in der Faser	-
σ_n	Normalspannung auf einer faserparallelen Ebene unter dem Winkel θ zur 13-Ebene	$\frac{N}{mm^2}$
$\tau_{23}, \tau_{31}, \tau_{21}$	Schubspannungen im 123-KOS der UD-Schicht	$\frac{N}{mm^2}$
$\tau_{d,Q}, \tau_{z,Q}$	maximaler Querkraftschub im Druck- bzw. Zugstrang	$\frac{N}{mm^2}$
τ_{n1}, τ_{nt}	Quer-Längs- bzw. Quer-Quer-Schubspannung auf einer faserparallelen Ebene unter dem Winkel θ zur 13-Ebene	$\frac{N}{mm^2}$
φ_1, φ_2	absoluter Drehwinkel von Flansch 1 bzw. Flansch 2	°
φ	Faservolumenanteil	-
ω_1, ω_2	Winkelgeschwindigkeit von Flansch 1 bzw. 2	$\frac{^\circ}{s}$

Indizes

-	Größe bezieht sich auf die UD-Schicht und ist im xyz -KOS angegeben
^	Größe bezieht sich auf den MSV (bzw. AWW) und ist im xyz -KOS angegeben
+,-	Zug bzw. Druck
, ⊥	faserparallel oder längs bzw. senkrecht oder quer
z, d	Zugstrang bzw. Druckstrang

Koordinatensysteme

123	Werkstoff-KOS der UD-Schicht
xyz	Werkstoff-KOS des Laminats bzw. des AWWs
xyz	ortsfestes KOS im Schwerpunkt von Flansch 1
$\hat{x}\hat{y}\hat{z}$	mit Flansch 1 mitrotierendes KOS

$\tilde{x} \tilde{y} \tilde{z}$ im FE-Modell zur Krafteinleitung verwendetes, ortsfestes KOS

Lateinische Formelzeichen		Einheit
a	Anzahl Bohrungen über den Umfang der Lamelle	-
A_K	Klemmfläche; entspricht der Größe der feingezahnten Oberfläche	mm ²
A_N	Nennquerschnitt der Schraube	mm ²
A_z	Querschnittsfläche des Zugstrangs	mm ²
b_z	Breite des Zugstrangs	mm
c_a	Axialfedersteifigkeit der Kupplung	$\frac{N}{mm}$
c_T	Drehfedersteifigkeit der Kupplung	$\frac{N \cdot mm}{\circ}$
c_w	Winkelfedersteifigkeit der Kupplung	$\frac{N \cdot mm}{\circ}$
ΔW_a	Axialverlagerung	mm
$\Delta W_{a,e}$	einseitig aufgebrachte Axialverlagerung	mm
ΔW_r	Radialverlagerung	mm
ΔW_w	Winkelverlagerung	°
E	Elastizitätsmodul des Klemmbacken-Werkstoffs	$\frac{N}{mm^2}$
$E_{f,\parallel}, E_{f,\perp}$	Elastizitätsmoduln der Faser, längs und quer	$\frac{N}{mm^2}$
E_m	Elastizitätsmodul der Matrix	$\frac{N}{mm^2}$
E_{\parallel}, E_{\perp}	Elastizitätsmoduln der UD-Schicht, längs und quer	$\frac{N}{mm^2}$
F_a	axiale Rückstellkraft bei Axialverlagerung	N
$f_{E0,Zfb}$	Zwischenfaserbruch-Anstrengung ohne Abminderung durch faserparallele Spannungen	-
$f_{E1,Fb}$	Faserbruch-Anstrengung mit Berücksichtigung der Behinderung der faserparallelen Querkontraktion durch die Matrix	-
$f_{E1,Zfb}$	Zwischenfaserbruch-Anstrengung mit Abminderung durch faserparallele Spannungen	-
$f_{E,Fb}$	Faserbruch-Anstrengung	-
$f_{\varepsilon,quad.,max.}$	Dehnungsvergrößerungsfaktor; Hilfsgröße zur mikromechanischen Berechnung von E_{\perp}	-

F_F	Summe der auf den Flanscharm wirkenden Normalkräfte	N
F, F_{\max}, F_{\min}	Zugkraft zur Prüfung der Krafteinleitung bzw. deren maximaler oder minimaler Wert	N
$f_{\gamma, \text{quad., max.}}$	Schiebungsvergrößerungsfaktor; Hilfsgröße zur mikromechanischen Berechnung von $G_{\perp\parallel}$	-
$F_{M\min}$	Mindest-Montagevorspannkraft der Schraube	$\frac{\text{kN}}{\text{mm}}$
$G_{f, \perp\parallel}, G_{f, \perp\perp}$	Schubmoduln der Faser, quer-längs und quer-quer	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
G_m	Schubmodul der Matrix	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
$G_{\perp\parallel}, G_{\perp\perp}$	Schubmoduln der UD-Schicht, quer-längs und quer-quer	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
h_{V_k}	Höhe der Vorkrümmung	mm
h_V	Höhe der Vorkrümmung in den Strängen	mm
k	WÖHLERKoeffizient	-
k_{dyn}	dynamische Steifigkeit, Quotient aus Lastmagnitude und zugehöriger Wegmagnitude	$\frac{\text{kN}}{\text{mm}}$
l_{V_k}	Länge des vorgekrümmten Bereichs	mm
b_z	Länge des Zugstrangs	mm
M	Feuchtegehalt; Zusatzmasse durch Feuchte geteilt durch Ausgangsmasse	-
m	Schwächungsparameter für Ende der Abschwächung	-
$m_{\sigma, f}$	mittlerer Vergrößerungsfaktor	-
M_w	Rückstellbiegemoment der Kupplung bei Winkelverlagerung	N m
N	Schwingenspielzahl	-
N_z, N_d	Normalkraft im Zug- bzw. Druckstrang	N
p, p_{zul}	tatsächliche bzw. zulässige mittlere Flächenpressung im Klemmbereich	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
$p_{\perp\parallel}^-, p_{\perp\parallel}^+$	Neigungsparameter der σ_n, τ_{n1} -Bruchkurve an der Stelle $\sigma_n = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	-
$p_{\perp\perp}^-, p_{\perp\perp}^+$	Neigungsparameter der σ_n, τ_{nt} -Bruchkurve an der Stelle $\sigma_n = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	-
Q_d	Querkraft durch Axialverlagerung im Druckstrang	N
Q_F	Differenz der auf den Flanscharm wirkenden Querkräfte in axialer Richtung	N

Q_z	Querkraft durch Axialverlagerung im Zugstrang	N
R	Lastverhältnis, Quotient aus minimaler und maximaler Last	-
R	Lochkreisradius der Lamelle	mm
$R_{f,\parallel}^-$	Druckfestigkeit der Faser, längs	$\frac{N}{\text{mm}^2}$
$R_{f,\parallel}^+$	Zugfestigkeit der Faser, längs	$\frac{N}{\text{mm}^2}$
$R_{\parallel}^-, R_{\parallel}^+$	Druck- und Zugfestigkeit der UD-Schicht, längs	$\frac{N}{\text{mm}^2}$
R_{\perp}^-, R_{\perp}^+	Druck- und Zugfestigkeit der UD-Schicht, quer	$\frac{N}{\text{mm}^2}$
$R_{\perp\parallel}$	Schubfestigkeit der UD-Schicht, quer-längs	$\frac{N}{\text{mm}^2}$
$R_{\perp\perp}^A$	Wirkebenen-Bruchwiderstand der UD-Schicht, quer-quer	$\frac{N}{\text{mm}^2}$
S	Abminderungsfaktor zur Abschätzung der Zeitfestigkeit aus der quasistatischen Festigkeit	-
s	Schwächungsparameter für Beginn der Abschwächung	-
S	Nachgiebigkeitsmatrix der UD-Schicht im 123-KOS	$\frac{\text{mm}^2}{N}$
\bar{S}	Nachgiebigkeitsmatrix der UD-Schicht im xyz -KOS	$\frac{\text{mm}^2}{N}$
\hat{S}	Nachgiebigkeitsmatrix des MSV im xyz -KOS	$\frac{\text{mm}^2}{N}$
t	Dicke der Kupplung	mm
T	Temperatur	K
$T_{\varepsilon,123 \rightarrow xyz}$	Matrix zur Dehnungstransformation vom 123-KOS in das xyz -KOS	-
$T_{\varepsilon,xyz \rightarrow 123}$	Matrix zur Dehnungstransformation vom xyz -KOS in das 123-KOS	-
T_K	auf die Kupplung wirkendes Drehmoment	N m
T_{KN}, T_{Kmax}	Nenndrehmoment und Maximaldrehmoment	N m
$T_{\sigma,123 \rightarrow xyz}$	Matrix zur Spannungstransformation vom 123-KOS in das xyz -KOS	-
$T_{\sigma,xyz \rightarrow 123}$	Matrix zur Spannungstransformation vom xyz -KOS in das 123-KOS	-
b_z	Dicke des Zugstrangs	mm
$\tilde{u}_l, \tilde{u}_r, \tilde{v}_l, \tilde{v}_r$	im FE-Modell verwendete Verschiebung des linken (l) bzw. rechten (r) Strangendes in \tilde{x} - bzw. \tilde{y} -Richtung	mm

$\hat{v}_p, \hat{v}_p, \hat{w}_p$	Verschiebungen des rechten Endes des Zugstrangs relativ zu seinem linken Ende in \hat{x} -, \hat{y} - bzw. \hat{z} -Richtung	mm
$u_{\ddot{u}}$	Verschiebung des Endes des Druckstrangs im überkritischen Bereich	mm
\tilde{w}	Verschiebung eines Punktes des Strangs in \tilde{z} -Richtung	μm