

TEIL I

Theorie der Tragfähigkeit und des
Deformationsverhaltens von kunstharzgebundenen
Glasfaserstoffen — Vergleich zwischen Theorie
und Meßergebnissen

(Dipl.-Ing. A. Puck)

Inhalt

Bezeichnungen	9
1. Einführung	15
2. Grundsätzliche Betrachtungen zum mechanischen Verhalten von Glasfaserkunststoff; Glasgehalt und spezifisches Gewicht	17
3. Glasfaserkunststoff bei einachsiger Beanspruchung durch Normalkräfte (Zug- oder Druckbeanspruchung)	22
3.1 Glasfaserkunststoff mit gleichgerichteten endlosen Fasern bei Beanspruchung parallel zur Faserrichtung	22
3.11 Theoretische Behandlung der Kraftaufnahme durch die im Glasfaserkunststoff vereinigten Stoffe	22
3.12 Berechnung von Festigkeit und Elastizitätsmodul aus den mechanischen Eigenschaften von Glasfasern und Kunstharz	26
3.13 Einführung spezieller Größen zur Kennzeichnung der Tragfähigkeit und des Deformationsverhaltens von kunstharzgebundenen Glasfasersträngen; Strang-Belastbarkeit und Strang-Elastizitätsgröße	29
3.14 Auf das spezifische Gewicht bezogene Werte für mechanische Eigenschaften	32
3.15 Zusammenfassung der wichtigsten bisherigen Ergebnisse des Abschnitts 3.1	33
3.16 Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zur Ermittlung mechanischer Eigenschaften parallel orientierter epoxydharzgebundener Glasseidenstränge bei Beanspruchung durch Normalkräfte parallel zur Faserrichtung	34
3.161 Bei der Auswertung der Messungen angewandte Methode	34
3.162 Deformationsverhalten bei Zug- und Druckbeanspruchung; Tragfähigkeit bei Zugbeanspruchung	36
3.163 Tragfähigkeit bei Druckbeanspruchung	43
3.2 Glasfaserkunststoff mit gleichgerichteten endlosen Fasern in zwei zueinander senkrechten Richtungen bei Beanspruchung durch Normalkräfte parallel zu einer der beiden Faserrichtungen	53
3.21 Berechnung von Festigkeit und Elastizitätsmodul aus den mechanischen Eigenschaften von Glasfasern und Kunstharz	53

3.22	Einführung spezieller Größen zur Kennzeichnung der Tragfähigkeit und des Deformationsverhaltens von Schichtstoffen aus Glasfasergeweben und Kunstharz; Lagen-Belastbarkeit und Lagen-Elastizitätsgröße	63
3.23	Auf das spezifische Gewicht bezogene Werte für mechanische Eigenschaften	67
3.24	Zusammenfassung der wichtigsten bisherigen Ergebnisse des Abschnitts 3.2	68
3.25	Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an Schichtstoffen aus kettverstärkten Glasseidengeweben und Epoxydharz	69
3.251	Zur Auswertung der Messungen	69
3.252	Deformationsverhalten bei Zug- und Druckbeanspruchung; Tragfähigkeit bei Zugbeanspruchung	70
3.253	Tragfähigkeit bei Druckbeanspruchung	78
4.	Glasfaserkunststoff bei Schubbeanspruchung	90
4.1	Betrachtung der Schubbeanspruchung als zweiachsiges Beanspruchung durch Normalkräfte	90
4.2	Glasfaserkunststoff bei Schubbeanspruchung; Faserverlauf unter 45° gegen die Richtungen des Schubflusses geneigt	91
4.21	Schubsteifigkeit eines orthotropen Glasfaserkunststoffes mit Fasern unter 45° zu den Richtungen des Schubflusses	91
4.211	Berechnung der Schubsteifigkeit aus Dehnsteifigkeiten und Querkontraktionszahlen	91
4.212	Ergebnisse experimenteller Untersuchungen	95
4.213	Betrachtung zur optimalen Verteilung der Glasfasern bei reiner Schubbeanspruchung eines platten- oder schalenförmigen GFK-Elementes	96
4.22	Tragfähigkeit eines orthotropen Glasfaserkunststoffes mit Fasern unter 45° zu den Richtungen des Schubflusses	96
4.3	Glasfaserkunststoff bei Schubbeanspruchung; Faserverlauf parallel zu den Richtungen des Schubflusses	97
5.	Verallgemeinerte Dimensionierungs-Gleichungen und -Werte für den Entwurf von GFK-Bauteilen	104
6.	Zusammenfassung	114
7.	Literaturverzeichnis	117

Bezeichnungen

b	.....	Breite, gemessen senkrecht zur Richtung von Normalkräften P bzw. parallel zur Richtung von Schubkräften P_s
c	.....	Längenabmessung
d	.....	Elementarfaden-Durchmesser
e, f	.....	Längenabmessungen
g	.....	Gewicht je Längeneinheit eines Stabes aus GFK
g^*	.....	Gewicht je Längeneinheit eines Glasfaserstranges (Rovings)
i	.....	Anzahl der Elementarfaseren in einem Glasfaserstrang (Roving)
$k_{||} \equiv \frac{G_{G||}}{G_G}$	.....	Gewichtsanteil der parallel zur Beanspruchungsrichtung verlaufenden Glasfasern am Gewicht aller Glasfasern
l, l', m	.....	Längenabmessungen
$\Delta l, \Delta m$	.....	Änderung der Länge l bzw. m
n	.....	Anzahl gleicher Gewebelagen in einem Laminat
$p \equiv P/b$	.....	Normalkraft je Einheit der Breite \equiv Normalstreckenlast \equiv Normalkraftfluß
$p_s \equiv P_s/b$	.....	Schubkraft je Längeneinheit \equiv Schubfluß
$p_B \equiv P_B/b \equiv \sigma_B \cdot t \equiv \bar{\sigma}_B \cdot n$	.....	Bruchlast je Einheit der Breite
p_x, p_y	.....	Normalstreckenlast, in x- bzw. y-Richtung wirkend
q	.....	Gewicht je Flächeneinheit eines GFK-Laminates
\bar{q}	.....	Gewicht je Flächeneinheit eines Glasfasergewebes
$\bar{q}_{||} \equiv k_{||} \cdot \bar{q}$	.....	Gewicht je Flächeneinheit des in Beanspruchungsrichtung verlaufenden Glases einer Glasfasergewebelage
s	.....	Längenabmessung
t	.....	Dicke \equiv Wandstärke
t_G	.....	fiktive Glasdicke
$\Delta w_{\textcircled{1}}; \Delta w_{\textcircled{2}}$	.....	absolute Schiebungen
x, y	.....	Bezeichnung zweier Richtungen, die miteinander einen Winkel von 90° bilden
z	.....	Anzahl der in einem GFK-Stab enthaltenen gleichen Glasfaserstränge (Rovings)
C	.....	Konstante
E	.....	Elastizitätsmodul
E_G	.....	im Verbundstoff GFK wirksam werdender Elastizitätsmodul der Glasfasern

E_H	Elastizitätsmodul des Harzes
E_{\perp}	Elastizitätsmodul in Richtung senkrecht zum Faserverlauf einer GFK-Schicht, die nur in einer Richtung Glasfasern enthält
E_z	Elastizitätsmodul für Zugbeanspruchung
E_d	Elastizitätsmodul für Druckbeanspruchung
E_s	Sekantenmodul
E_{sH}	Sekantenmodul des Harzes
E_t	Tangentenmodul
E^*	Strang-Elastizitätsgröße
E_z^*	Strang-Elastizitätsgröße für Zugbeanspruchung
E_d^*	Strang-Elastizitätsgröße für Druckbeanspruchung
\bar{E}	Lagen-Elastizitätsgröße
$\bar{E}_{\parallel} \equiv \bar{E}$	Lagen-Elastizitätsgröße (in Richtung des Faserverlaufs)
\bar{E}_z	Lagen-Elastizitätsgröße für Zugbeanspruchung
\bar{E}_d	Lagen-Elastizitätsgröße für Druckbeanspruchung
F	Querschnittsfläche
F_G	Gesamt-Querschnittsfläche von Glasfasern
F_H	Querschnittsfläche von Harz
F_{\parallel}	Querschnittsfläche einer GFK-Schicht mit Faserverlauf parallel zur Beanspruchungsrichtung
$F_{G\parallel}$	Gesamt-Querschnittsfläche der Glasfasern, die parallel zur Beanspruchungsrichtung verlaufen
F_{\perp}	Querschnitt einer GFK-Schicht mit Faserverlauf senkrecht zur Beanspruchungsrichtung
F^*	Gesamt-Querschnittsfläche aller in einem Glasfaserstrang (Roving) enthaltenen Glasfasern
\bar{F}_{\parallel}	Gesamt-Querschnittsfläche aller in einer Glasfaserwebelage je Einheit der Breite enthaltenen, in Beanspruchungsrichtung verlaufenden Glasfasern
G	Gewicht bzw. Schubmodul
\bar{G}	Lagen-Schubelastizitätsgröße
G_G	Gewicht von Glasfasern bzw. Schubmodul von Glasfasern
G_H	Gewicht von Harz bzw. Schubmodul des Harzes
G_L	Gewicht eingeschlossener Luft
$G_{G\parallel}$	Gewicht der Glasfasern, die in Beanspruchungsrichtung verlaufen
$G_{G\perp}$	Gewicht der Glasfasern, die senkrecht zur Beanspruchungsrichtung verlaufen
G_{\parallel}	Schubmodul für Schubfußrichtungen parallel zum Faserverlauf

$\bar{G}_{||}$	Lagen-Schubelastizitätsgröße für Schubflußrichtungen parallel zum Faserverlauf
G_{\times}	Schubmodul für Schubflußrichtungen unter 45° gegen Faserverlauf geneigt
\bar{G}_{\times}	Lagen-Schubelastizitätsgröße für Schubflußrichtungen unter 45° gegen Faserverlauf geneigt
K	Charakteristische Größe für eine Gruppe von Glasfaser- verstärkungen
K_E	Charakteristische Dehnsteifigkeitsgröße
K_G	Charakteristische Schubsteifigkeitsgröße
$K_{G_{\times}}$	Charakteristische Schubsteifigkeitsgröße für Schubfluß- richtungen unter 45° Neigung gegenüber Richtungen des Faserverlaufs
$K_{G_{||}}$	Charakteristische Schubsteifigkeitsgröße für Schubfluß- richtungen parallel zum Faserverlauf
K_{σ}	Charakteristische Tragfähigkeitsgröße für eine Gruppe von Glasfaserverstärkungen
K_{σ_z}	Charakteristische Tragfähigkeitsgröße für Zugbean- spruchung
K_{σ_d}	Charakteristische Tragfähigkeitsgröße für Druckbean- spruchung
K_{τ}	Charakteristische Tragfähigkeitsgröße für Schubbean- spruchung
$K_{\tau_{\times}}$	Charakteristische Tragfähigkeitsgröße für Schubbean- spruchung bei Schubflußrichtungen unter 45° Neigung gegenüber Richtungen des Faserverlaufs
P	Kraft (Normalkraft)
P_G	von Glasfasern aufgenommene Kraft
P_H	vom Harz aufgenommene Kraft
P_B	Bruchlast
P_{zB}	Bruchlast bei Zugbeanspruchung
P_{dB}	Bruchlast bei Druckbeanspruchung
$P_{||}$	Kraft, die auf einer GFK-Schicht wirkt, deren Fasern parallel zur Beanspruchungsrichtung verlaufen
$P_{zB||}$	Bruchlast einer GFK-Schicht, deren Fasern parallel zur Beanspruchungsrichtung verlaufen
P_{\perp}	Kraft, die auf einer GFK-Schicht wirkt, deren Fasern senkrecht zur Beanspruchungsrichtung verlaufen
P_s	Schubkraft
ΔP_z	auf einen Fadenkreuzungspunkt wirkende Zugkraft
ΔP_d	auf einen Fadenkreuzungspunkt wirkende Druckkraft
S	Schubkraft
V	Volum
V_G	Volum von Glasfasern

V_H	Volum von Harz
V_L	Volum eingeschlossener Luft
$V_f = V_G + V_H$	Volum der festen Komponenten eines GFK
γ	spezifisches Gewicht
γ_G	spezifisches Gewicht von Glasfasern
γ_H	spezifisches Gewicht von Harz
γ_s	Schubwinkel
δ, Δ	relative Abweichungen der Ergebnisse exakter Gleichungen von den Ergebnissen der jeweiligen Näherungsgleichungen
ϵ	Dehnung
ϵ_G	Dehnung von Glasfasern
ϵ_H	Dehnung des Harzes
ϵ_{\perp}	Dehnung in Richtungen senkrecht zum Faserverlauf bei Beanspruchung senkrecht zum Faserverlauf
ϵ_B	Bruchdehnung
ϵ_{BG}	Bruchdehnung von Glasfasern
ϵ_{zBH}	Bruchdehnung des Harzes bei Zugbeanspruchung
$\epsilon_{z\max\perp}$	höchstmögliche Dehnung (Bruchdehnung) in Richtung senkrecht zum Faserverlauf eines GFK mit parallelen Fasern in nur einer Richtung
ϵ_x, ϵ_y	Dehnung in x- bzw. y-Richtung
ξ, η	Bezeichnungen für zwei zueinander senkrechte Richtungen
$1 \mu \triangleq 1 \text{ Mikron} \triangleq 10^{-3} \text{ mm} \triangleq 10^{-6} \text{ m}$	
ν	Querkontraktionszahl
ν_G	Querkontraktionszahl von Glasfasern
ν_H	Querkontraktionszahl von Harz
ν_{xy}	Verhältnis der Querkontraktion in y-Richtung zur Längsdehnung in x-Richtung infolge einer Beanspruchung in x-Richtung
ν_{yx}	Verhältnis der Querkontraktion in x-Richtung zur Längsdehnung in y-Richtung infolge einer Beanspruchung in y-Richtung
$\sigma \equiv P/F$	Spannung
σ_G	Spannung in Glasfasern
$\sigma_{G\parallel} \equiv \sigma_G$	Spannung in Glasfasern (parallel zur Beanspruchungsrichtung)
σ_H	Spannung im Harz
σ_{\parallel}	Spannung in einer GFK-Schicht mit parallel zur Beanspruchungsrichtung verlaufenden Fasern
σ_{\perp}	Spannung in einer GFK-Schicht mit senkrecht zur Beanspruchungsrichtung verlaufenden Fasern

σ_B	Bruchspannung \equiv Festigkeit
σ_{zB}	Zugfestigkeit
σ_{dB}	Druckfestigkeit
σ_{zBG}	Zugfestigkeit von Glasfasern
σ_{zBH}	Zugfestigkeit von Harz
σ_{BG}	bei Bruch (Höchstlast) des Verbundstoffes in den parallel zur Beanspruchungsrichtung verlaufenden Glasfasern erreichte Zug- bzw. Druckspannung
σ^*	Strangbelastung
σ_B^*	Strang-Belastbarkeit
σ_{zB}^*	Strang-Zugbelastbarkeit
σ_{dB}^*	Strang-Druckbelastbarkeit
$\bar{\sigma}$	Lagenbelastung
$\bar{\sigma}_B$	Lagen-Belastbarkeit
$\bar{\sigma}_{zB}$	Lagen-Zugbelastbarkeit
$\bar{\sigma}_{dB}$	Lagen-Druckbelastbarkeit
$\bar{\sigma}_{dB||} \equiv \bar{\sigma}_{dB}$	Lagen-Druckbelastbarkeit (parallel zum Faserverlauf)
τ	Schubspannung
τ_B	Bruchschubspannung \equiv Schubfestigkeit
$\bar{\tau}_B$	Lagen-Schubbelastbarkeit
$\bar{\tau}_{B\otimes}$	Lagen-Schubbelastbarkeit für Schubflußrichtungen unter 45° gegenüber Richtungen des Faserverlaufs geneigt
φ	Glasvolumanteil (bezogen auf Gesamtvolum einschließlich Lufteinschlüssen)
φ_f	Glasvolumanteil (bezogen auf Festkörpervolum)
ψ	Glasgewichtsanteil
$(EF) \equiv P/\epsilon$	Dehnsteifigkeit
$(Et) \equiv p/\epsilon$	Dehnsteifigkeit je Einheit der Breite
$(Et)_x, (Et)_y$	Dehnsteifigkeit in x- bzw. y-Richtung je Einheit der Breite
$(Et)_{||}$ .....	Dehnsteifigkeit parallel zum Faserverlauf
$(GF) \equiv P_s/\gamma_s$	Schubsteifigkeit
$(Gt) \equiv p_s/\gamma_s$	Schubsteifigkeit je Einheit der Breite
$(Gt)_{\otimes}$	Schubsteifigkeit je Einheit der Breite bei Schubflußrichtungen unter 45° Neigung zum Faserverlauf
$(Gt)_{||}$ .....	Schubsteifigkeit je Einheit der Breite bei Schubflußrichtungen parallel zum Faserverlauf
$(\sigma_B \cdot F) \equiv P_B$	Bruchlast
$(\sigma_B \cdot t) \equiv p_B$	Bruchlast je Einheit der Breite
$(\tau_B \cdot F) \equiv P_{sB}$	Schub-Bruchlast
$(\tau_B \cdot t) \equiv p_{sB}$	Bruch-Schubfluß