

Einfluss konstruktiver Details auf Klebungen pultrudierter GFK-Lamellen

Die Tragfähigkeit geklebter Anschlüsse zu bestimmen, ist eine zum Teil immer noch offene Frage. Insbesondere der oft unterstellte direkte Zusammenhang zwischen Spannungen und Traglast ist komplizierter, als es die klassische Mechanik impliziert. In diesem Zusammenhang erscheint es sinnvoll, auch die konstruktiven Details einer Klebverbindung zu betrachten.

Andreas Kruse, Cordula Grunwald, Marvin Kaufmann, Morten Voß, Till Vallée

Einführung

Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) stellen immer mehr eine ernstzunehmende Alternative zu klassischen Werkstoffen, wie Stahl oder Aluminium, dar, denn sie bieten die ideale Kombination aus geringem Gewicht, hoher Festigkeit und Dauerhaftigkeit [1] [2] [3] [4]. Viel mehr als bei den klassischen Materialien spielt die Verbindungstechnik bei den Faserverbundwerkstoffen eine Schlüsselrolle [5]. Auch wenn die Verbundwerkstoffe konventionell geschraubt werden [6], ist der allgemeine Konsens, dass das Kleben die am besten geeignete Füge-technik für diesen faserigen Werkstoff ist [7]. Der Klebtechnik wird im Bauwesen allerdings noch mit einiger Skepsis begegnet. Zum einen liegt dies daran, dass sie kein „traditionelles“ Fügeverfahren ist und somit auch wenig Erfahrung vorliegt [8]. Zum anderen aber auch, weil die Bemessung geklebter Anschlüsse immer noch schwer fassbar – und vor allem nicht genormt – ist [9].

Das Verhalten geklebter Anschlüsse ist nicht immer intuitiv zu erfassen, was immer wieder zu Missverständnissen führt. Die daraus resultierende kompensatorische, teilweise übertriebene Vorsicht kann die Klebtechnik aller-

dings auch behindern. Eine Reihe solcher Missverständnisse resultiert aus dem Reflex, die Mechanik von Klebverbindungen als reines Spannungsproblem zu betrachten und daraus Rückschlüsse zum Einfluss bestimmter Parameter auf das Traglastverhalten bzw. die Traglast zu ziehen [10]. Im Folgenden wird am Beispiel dreier Versuchsserien gezeigt, welchen Einfluss bestimmte konstruktiven Details einer Klebverbindung auf deren Traglast hat.

Materialien und Methoden

• GFK-Lamellen

Es wurden pultrudierte GFK-Lamellen der Firma Fiberline A/S verwendet – jeweils Flachprofile in 5 mm und 10 mm Stärke. Das Material wurde in vorangegangenen Studien [7] [11] ausführlich hinsichtlich Querzug- und Scherfestigkeit charakterisiert (*Tabelle 1*). Für alle Klebungen kam das zweikomponentige Epoxid Sikadur330 zum Einsatz.

• Probekörper

Die geklebten Verbindungen wurden mit GFK-Lamellen hergestellt, die 500 mm lang und 100 mm breit waren; die Dicke betrug 5 mm bzw. 10 mm. Als Überlappungslängen der einlagigen Fugen wurden bei allen

Probekörpern 100 mm gewählt. Die Werte für die Querzug- und Schubfestigkeit des GFK sind in *Tabelle 2* aufgelistet.

Bild 1 zeigt die Grundform der Probekörper, auf deren Basis die folgenden Variationen durchgeführt wurden. Die Klebstoffschicht war bei allen Proben 2 mm dick. Dies wurde durch kalibrierte Glaskugeln gewährleistet. Vor dem Kleben wurden die GFK-Lamellen zunächst mit Methyl-ethylketon (MEK) gereinigt, danach mit einem Handschleifer angeraut und abschließend wieder mit MEK gereinigt. In der Grundform wurde die Klebschicht in einem Winkel von 90° zu den Lamellen, also ohne Ausrundungsradius, ausgeführt. Nach der Aushärtung der Klebverbindungen (7 Tage bei 23 °C) wurden alle Probekörper weggesteuert (0,25 mm/min) mechanisch geprüft.

• Klebstoffausrundungen

Hier wurden neben der Grundform zwei verschiedene Ausrundungen ausgeführt (*Bild 2*): erstens über die Dicke der Klebfuge ($r_a = 2$ mm) und zweitens bis zur Oberkante der GFK-Lasche ($r_a = 2 + 5 = 7$ mm bzw. $2 + 10 = 12$). Hinter dieser Versuchsserie steht der Gedanke, dass die Spannungsspitzen durch die zunehmende Ausrundung der Klebfuge abgebaut werden. Die experimentellen Untersuchungen sol-

Material	Zugfestigkeit [MPa]	E-Modul [MPa]
GFK-Profil (5 mm)	434 ± 18	3440 ± 60
GFK-Profil (10 mm)	332 ± 14	3250 ± 130
2K-Klebstoff: Sikadur330	38,1 ± 2,6	4600 ± 100

Tabelle 1 > Materialkennwerte (5 Einzelversuche)

© Fraunhofer IFAM

Laminatstärke [mm]	Querzugfestigkeit [MPa]	Schubfestigkeit [MPa]
5	9,2	21,3
10	8,0	19,7

Tabelle 2 > Querzug- und Schubfestigkeit des GFK

© Fraunhofer IFAM

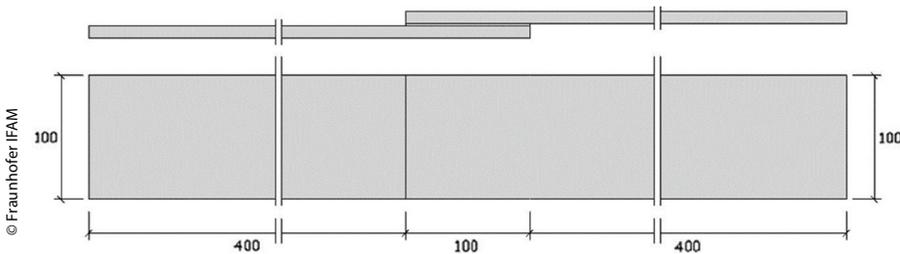


Bild 1 > Prinzipieller Aufbau der Probekörper (alle Maße in mm)

len dann zeigen, ob sich dadurch auch die entsprechenden Traglasten steigern lassen.

• **Unterbrechung der Klebfuge**

Bei der zweiten gewählten Methode zur Spannungsreduzierung wurden Metallstreifen in die Mitte der Überlappung eingefügt, um die Kontinuität der Klebschicht zu unterbrechen. Die Metallstreifen waren 100mm lang, 10mm bzw. 30mm breit und hatten mit 2mm die gleiche Dicke wie die Klebschicht. Hintergrund dieser Maßnahme war es, den Einfluss von Fehlstellen in der Klebfuge abzubilden. Um die Metallstreifen nach dem Aushärten des Epoxids leicht entfernen zu können und zu verhindern, dass diese an den Lamellen kleben blieben, wurde ein Stück Teflon zum Umwickeln verwendet. Die Metallstreifen

wurden entfernt, sobald das Epoxidharz ausgehärtet war.

• **Hybride Verbindung mit vorgespannten Schrauben**

Bei der dritten Methode wurden auf Basis der Grundkonfiguration zusätzlich M12-10.9-Schrauben eingebracht, welche nach Aushärtung des Klebstoffes vorgespannt wurden (Bild 3). Die Vorspannung erfolgte über einen Drehmomentschlüssel (M = 80kNm). Danach wurde sofort zerstörend geprüft.

Ergebnisse

• **Mechanische Prüfung**

Aus der Literatur ist bekannt, dass geklebte Anschlüsse aus GFK-Profilen ex-

trem spröde versagen [7] [9] [10] [11]. Dieses Bruchverhalten wurde mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera (2000 Bilder/s) festgehalten (Bild 4). Klar erkennbar ist, dass das Versagen durch einen Riss in einer der GFK-Lamellen entsteht, wie in Bild 5 schematisch dargestellt. Demnach ist es vor allem die Festigkeit der Lamellen, welche die Tragfähigkeit bestimmt. Dieses Verhalten wurde bei allen Versuchen beobachtet. Die Probekörper mit vorgespannten Schrauben versagen analog – zumindest bei Initiierung des Versagens. Auch wenn die Bruchbilder (Bild 6) ein Lochleibungsversagen des Laminats andeuten, ist dieses erst nach dem Abreißen der Deckschicht entstanden.

• **Bruchlasten**

Die Versuche mit verschiedenen Ausrundungsradien sind in Bild 7a zusammengefasst. Wie eindeutig zu erkennen ist, hat die Ausrundung der Klebfuge am Ende der Überlappung trotz des zu erwartenden spannungsreduzierenden Effekts keinen signifikanten Einfluss auf die Tragfähigkeit der geklebten 5 mm dicken Laminatproben. Ähnlich, wenn auch nicht ganz so eindeutig, ist die Situation für die 10 mm dicken Lamine. Hier zeigt sich in Bild 7b zumindest im Ansatz eine wahrnehmbare Erhöhung der Tragfähigkeit, wenngleich diese nicht statistisch relevant ist. Während die Festigkeiten kaum zunehmend steigen, ist die Streuung ausgeprägt.

Der Einfluss der Unterbrechung der Klebfuge ist in Bild 7c für die 5 mm bzw. in Bild 7d für die 10 mm dicken Lamine dargestellt. Bei den dünneren Laminaten zeigt sich eine kaum wahrnehmbare Abnahme der Tragfähigkeit; diese liegt jedoch noch im Streuband der einzelnen Versuchsserien. Dies gilt auch für die 10 mm dicken ge-

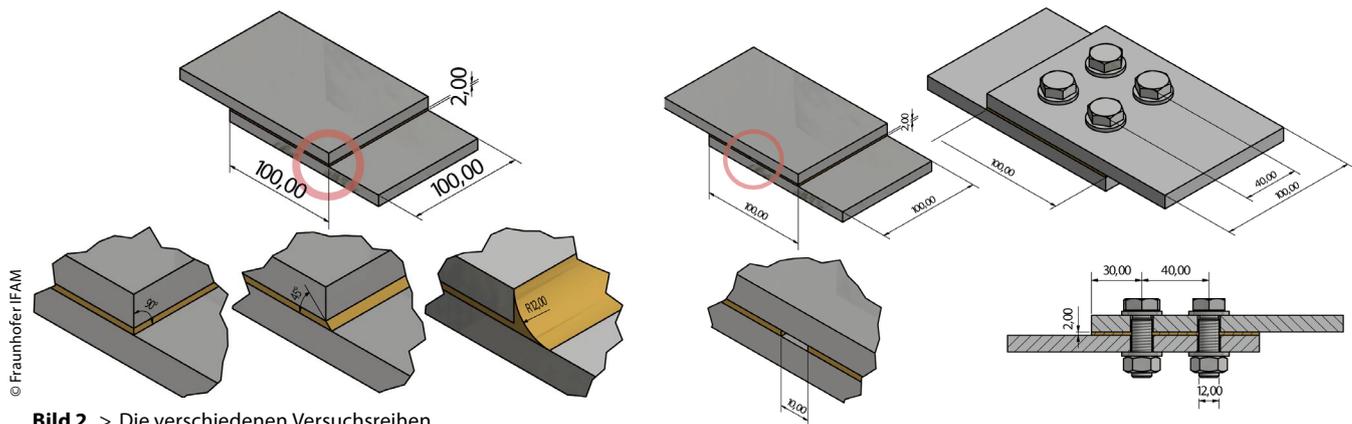


Bild 2 > Die verschiedenen Versuchsreihen



Bild 3 > Vorgespannte Hybridverbindung

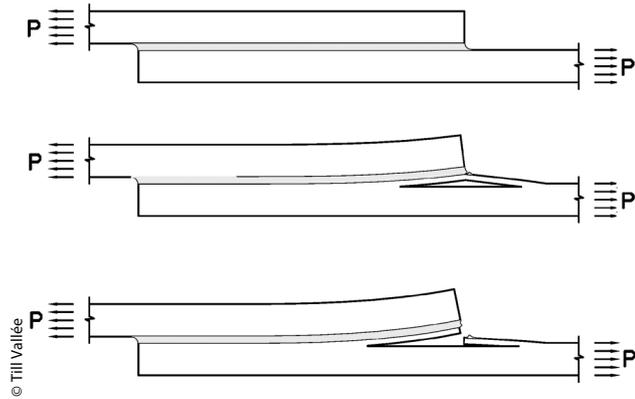


Bild 5 > Schematischer Ablauf des Versagens der geklebten Anschlüsse

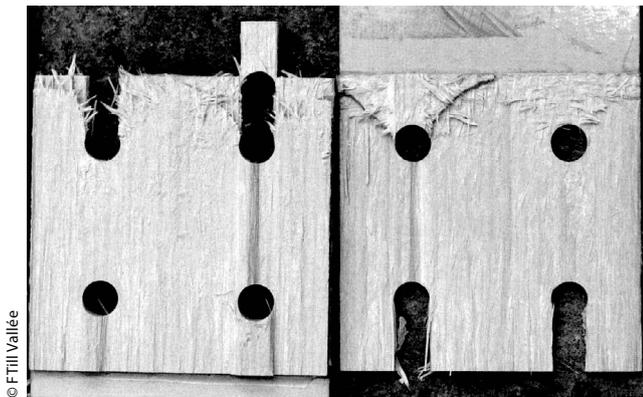


Bild 6 > Aufnahme nach dem Versagen eines Probekörpers mit vorgespannten Schrauben

klebten Probekörper, wobei der Grundwert der Zugfestigkeit von vornherein schon deutlich höher ist.

Ganz anders verhält es sich bei dem Einfluss der hybriden, geklebt-vorgespannten Laschenverbindungen. Die Tragfähigkeit der 5 mm dicken Laminat ließ sich auf über das Dreifache steigern – bei den

10 mm dicken Laminaten immerhin noch um das 2,5-Fache (*Bild 8*).

Diskussion

• Ausrundungen

Die Ausrundung der Klebstofffuge am Ende der Überlappung hatte, wie bereits ge-

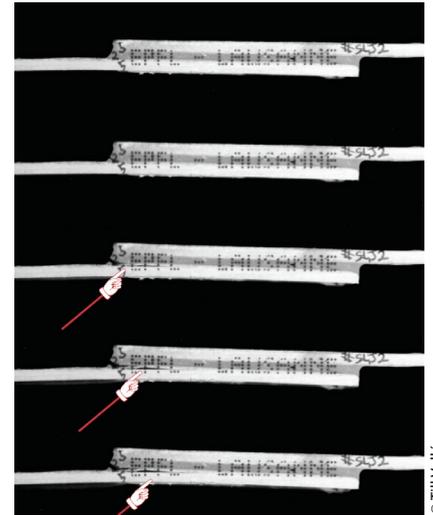


Bild 4 > Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim Bruch (2000 Bilder/s), links: Rissfortschritt

zeigt, keinen nennenswerten Einfluss auf die Tragfähigkeit der entsprechenden geklebten Anschlüsse. Dabei geht sowohl aus der Anschauung als auch aus der Literatur [12] [13] [14] hervor, dass die Tragfähigkeit der Anschlüsse einen erheblichen Einfluss auf die Ausbildung der Spannungsspitzen hat. Um dies nochmals zu bestätigen, wurden die betrachteten Konfigurationen mithilfe der Finiten-Elemente-Methode (FEM) berechnet (*Bild 9*). Es konnte dabei gezeigt werden, dass sowohl die Maxima der Querzug- als auch der Schubspannungen bei der „kleinen“ Ausrundung (im Mittel) jeweils um 30 % und bei den „großen“ Ausrundungen um 60 % reduziert wurden. Dieses Ergebnis zeigt einmal mehr sehr deutlich, dass kein direkter linearer Zusammenhang zwischen Spannungsspitzen und Festigkeit des Anschlusses existiert [10] [15].

• Unterbrechungen

Die Untersuchungen an den unterbrochenen Fugen, bei denen effektiv 10 % bzw. 30 % Klebstoff entfernt wurden, zeigen, dass dieser wesentliche Eingriff kaum einen Effekt auf die Tragfähigkeit hat. Würde man letztere anhand der mittleren Schubspannung abschätzen, ergäbe sich theoretisch ein Festigkeitsabfall von 11 % bzw. 43 %. Allerdings zeigt die FEM, dass die Unterbrechung der Klebfuge keinen Einfluss auf die Maximalwerte der Querzug- und Schubspannungen hat. Erst bei einer (nicht getesteten) Unterbrechung von 80 % würden diese signifikant steigen. Der scheinbare Widerspruch zwischen bei-

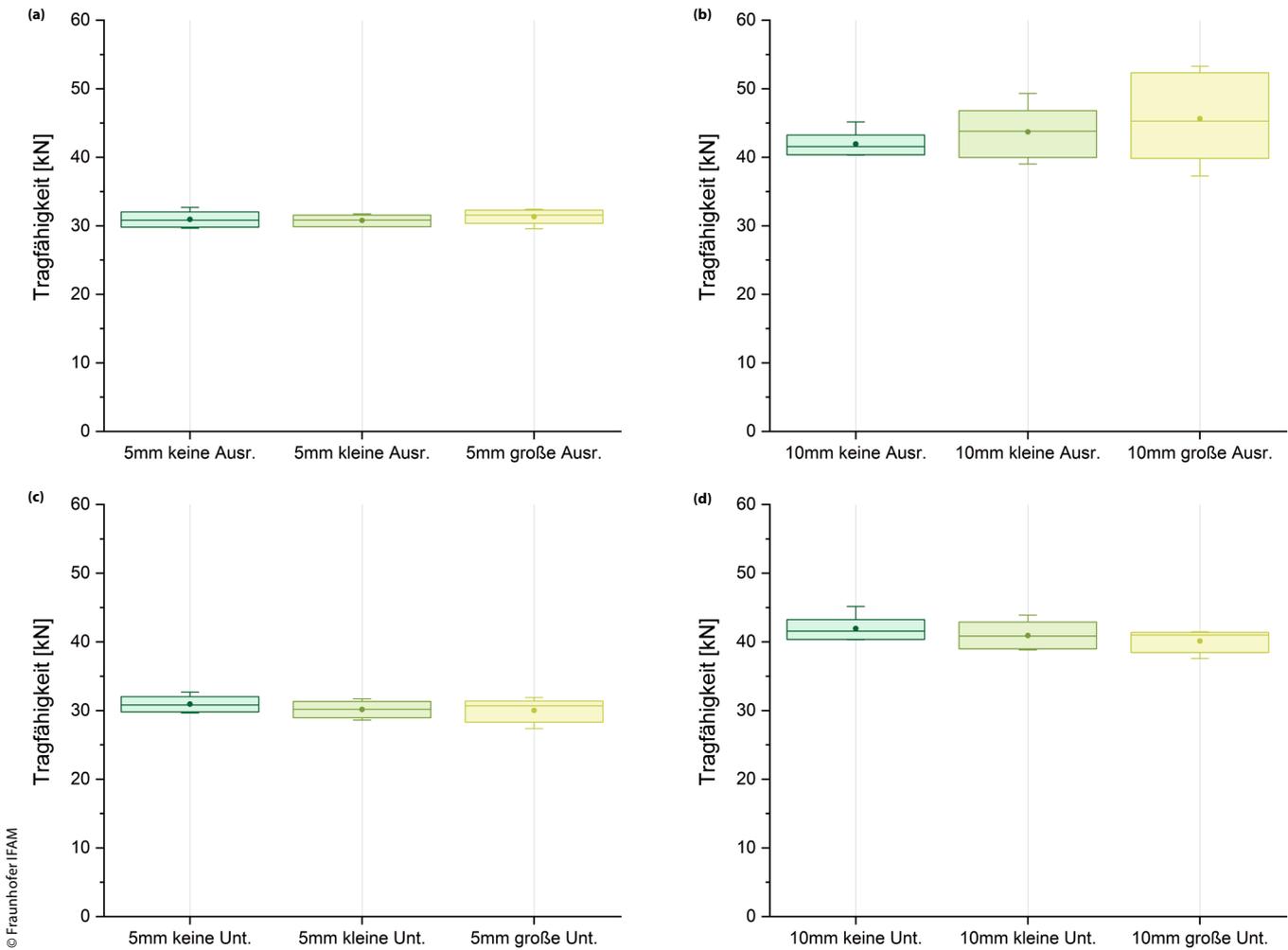


Bild 7 > Einfluss der Ausrundungsradien und Klebstoffunterbrechung auf die Tragfähigkeit – (a) Einfluss des Ausrundungsradius (t=5 mm), (b) Einfluss des Ausrundungsradius (t=10 mm), (c) Einfluss der Unterbrechung (t=5 mm), (d) Einfluss der Unterbrechung (t=10 mm)

den Ansätzen ist darauf zurückzuführen, dass der Lastabtrag in Klebverbindungen im Wesentlichen an den Enden stattfindet. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass der Effekt von möglichen Defekten ganz stark davon abhängig ist, an welcher Stelle diese vorkommen [16].

● **Vorspannung der Schrauben**

Die Versuchsreihe mit den hybriden Anschlüssen zeigt einen ausgeprägten Einfluss durch die Vorspannung der Schrauben. In einer rein auf (gemittelten) Schubspannungen und dazugehöriger Schubfestigkeit ausgerichteten Logik würde man im Prinzip kaum einen Effekt der Vorspannung erwarten. Da aber das beobachtete Versagen der Probekörper (Bild 4) nahelegt, dass das Versagen durch die simultane Wirkung von Querkzug- und Schubspannungen (und die entsprechenden Festigkeiten) ausgelöst wird, wie in Bild 5 skizziert, ist die Erhöhung der Festigkeit noch zu erklären. Durch die vorge-

spannten Schrauben wird die Klebfuge signifikant überdrückt, was sich bis zu den Enden der Überlappung positiv auswirkt. Dies wurde auch in anderen Studien verifiziert [17]. Laut FEM führt die Vorspannung zu einer Reduktion der Spannungspitzen an den Enden der Überlappung, und zwar bei den 5 mm dicken Laminaaten auf ca. ein Drittel des Ausgangswertes bzw. auf etwa die Hälfte bei den 10 mm dicken Proben.

Fazit

Die Tragfähigkeit geklebter Anschlüsse zu bestimmen, ist eine zum Teil immer noch offene Frage. Insbesondere der von Praktikern oft unterstellte direkte Zusammenhang zwischen Spannungen und Traglast ist komplizierter als es die klassische Mechanik impliziert. Um den Einfluss lokaler Aspekte, wie Fehlstellen im Klebstoff, Ausrundungen und hybride Anschlüsse ad-

äquat zu berücksichtigen, bedarf es höherwertiger Theorien, wie beispielsweise der Bruchmechanik [18], den Kohäsivzonenmodellen [19] oder der Probabilistik [20]. //

Literaturverzeichnis

[1] Fangueiro, R.: Fibrous and composite materials for civil engineering applications. Cambridge Woodhead Pub. (2011)
 [2] Mouritz, A., Gellert, E., Burchill, P., Challis, K.: Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. Composite Structures 53 (2001) [1] 21-42, [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(00\)00175-6](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00175-6)
 [3] Uddin, N.: Developments in fiber-reinforced polymer (FRP) composites for civil engineering. Cambridge Woodhead Pub. (2013)
 [4] Zoghi, M.: The international handbook of FRP composites in civil engineering. Boca Raton, CRC Press (2014)

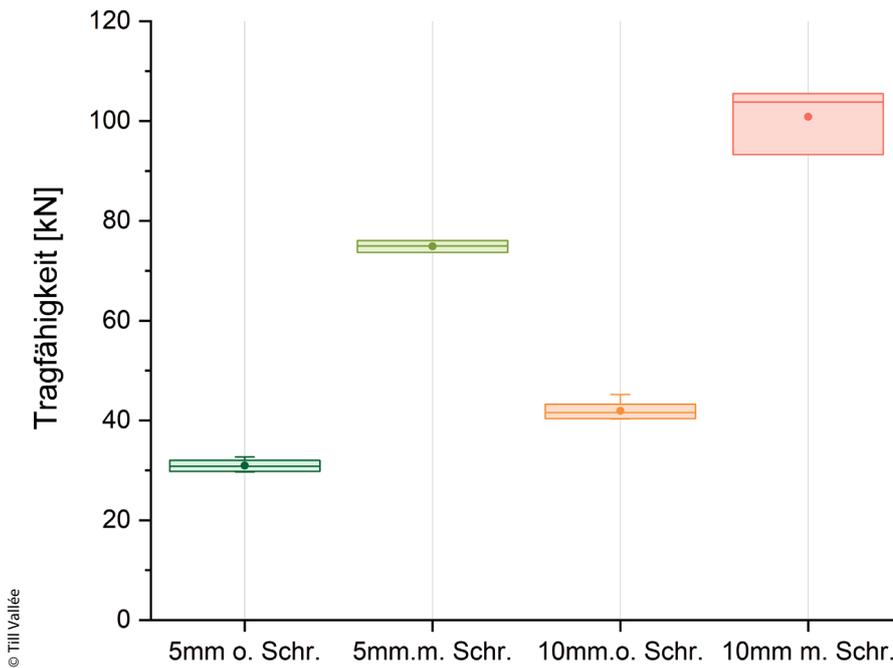


Bild 8 > Einfluss der Vorspannung auf die Tragfähigkeit

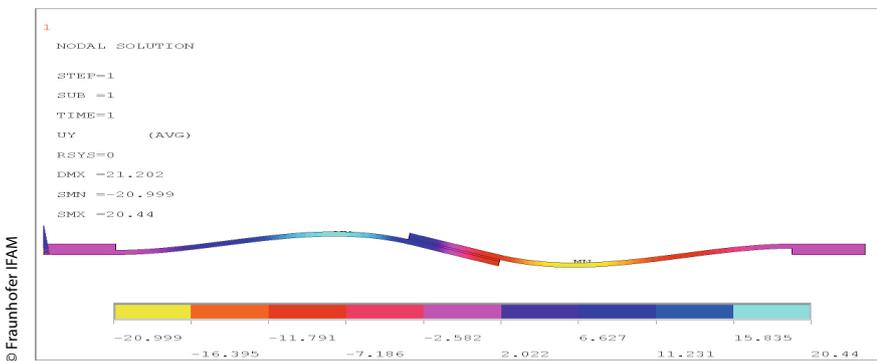


Bild 9 > FEM der geklebten GFK-Anschlüsse

[5] Mosallam, A.S.: Design guide for FRP composite connections. American Society of Civil Engineers (2011)

[6] Russo, S.: On failure modes and design of multi-bolted FRP plate in structural joints. *Composite Structures* 218 (2019) 27-38, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.048>

[7] Keller, T., Vallée, T.: Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles, Part I: stress-strain analysis and failure modes. *Composites Part B: Engineering* 36 (2005) [4] 331-40, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.11.001>

[8] Vallée, T., Grunwald, C., Fecht, S.: Erfahrungen und Perspektiven. *adhäsion KLEBEN + DICHTEN* 56 (20212) [12] 6-21, <https://doi.org/10.1365/s35145-012-0180-9>

[9] Banea, M.D., Da Silva, L.F.M.: Adhesively bonded joints in composite ma-

terials: An overview. *Proceedings of the IMechE* 223 (2009) [1] 1-18, <https://doi.org/10.1243/14644207JMDA219>

[10] Vallée, T., Tannert, T., Murcia-Delso, J., Quinn, D.J.: Influence of stress-reduction methods on the strength of adhesively bonded joints composed of orthotropic brittle adherends. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 30 (2010) [7] 583-94, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2010.05.007>

[11] Vallée, T., Correia, J.R., Keller, T.: Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles, Part I: Experimental and numerical investigations. *Composites Science and Technology* 66 (2006) [13] 1903-14, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.04.007>

[12] Tsai, M.Y., Morton, J.: The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in lami-

nated composite single-lap joints. *Composite Structures* 32 (1995) [1-4] 123-31, [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(95\)00059-3](https://doi.org/10.1016/0263-8223(95)00059-3)

[13] Frostig, Y., Thomsen, O.T., Mortensen, F.: Analysis of Adhesive-Bonded Joints, Square-End, and Spew-Fillet – High-Order Theory Approach. *Journal of Engineering Mechanics* 125 (1999) [11] 1298-307, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1999\)125:11\(1298\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1999)125:11(1298))

[14] Crocombe, A.D., Adams, R.D.: Influence of the Spew Fillet and other Parameters on the Stress Distribution in the Single Lap Joint. *The Journal of Adhesion* 13 (1981) [2] 141-55, <https://doi.org/10.1080/00218468108073182>

[15] Vallée, T., Fecht, S., Grunwald, C., Adam, M.: Einsatz von Faserverbundwerkstoffen im Bauwesen. *adhäsion KLEBEN + DICHTEN* 61 (2017) [10] 32-7, <https://doi.org/10.1007/s35145-017-0078-7>

[16] Grunwald, C., Fecht, S., Vallée, T., Tannert, T.: Adhesively bonded timber joints – Do defects matter? *International Journal of Adhesion and Adhesives* 55 (2014) 12-17, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.07.003>

[17] Fricke, H., Vallée, T.: Hybrid joining techniques. *Advanced Joining Processes* (2021) 353-81, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820787-1.00010-3>

[18] Myslicki, S., Vallée, T., Bletz-Mühldorfer, O., Diehl, F., Lavarec, L.C., Créac'Hcadc, R.: Fracture mechanics based joint capacity prediction of glued-in rods with beech laminated veneer lumber. *The Journal of Adhesion* 95 (2019) [5-7] 405-24, <https://doi.org/10.1080/00218464.2018.1538879>

[19] Alfano, G.: On the influence of the shape of the interface law on the application of cohesive-zone models. *Composites Science and Technology* 66 (2006) [6] 723-30, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.12.024>

[20] Haupt, J., Voß, M., Kaufmann, M., Grunwald, C., Vallée, T., Bode, M.: Schnellhärtung geklebter FVK-Rohre durch Induktion (Teil 2). *adhäsion KLEBEN + DICHTEN* 65 (2021) [3] 44-48, <https://doi.org/10.1007/s35145-021-0480-z>

Die Autoren

Andreas Kruse
Dipl.-Ing. Cordula Grunwald
M.Sc. Marvin Kaufmann
M.Sc. Morten Voß
Dr. ès Sc. Till Vallée

– korrespondierender Autor –
 (till.vallee@ifam.fraunhofer.de)
 Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und
 Angewandte Materialforschung IFAM, Bremen