

# Kurzbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 01IF21550N

## Thema

Tacitus FAQs – Eruierung und Klärung von Aspekten für eine wirtschaftliche Anwendung von Laubholzkonstruktionen mit eingeklebten Stäben

*Cordula Grunwald<sup>1</sup>, Till Vallée<sup>1</sup>, Pascal Franck<sup>2</sup>, Ronja Scholz<sup>2</sup>, Frank Walther<sup>2</sup>, Jens Schmidt<sup>3</sup>, Oliver Bletz-Mühldorfer<sup>3</sup>, Leander Bathon<sup>3</sup>*

## Berichtszeitraum

01.01.2021 – 30.06.2024

## Forschungsvereinigung

Internationaler Verein für technische Holzfragen e.V. (iVTH)

## Forschungseinrichtungen

1. Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)
2. Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Werkstoffprüftechnik (WPT)
3. Hochschule RheinMain, Labor für Holzbau (HSRM)

## Inhalt

1 Einleitung.....	3
2 Experimenteller Teil .....	3
2.1 Langzeituntersuchungen .....	3
2.2 Untersuchungen zur Variation der Stabanordnung.....	5
3 Experimentelle Versuchsreihen zur Variation der Stabanordnung .....	5
4 Numerische Modellierung.....	5
4.1 Ergebnisse der Modellierung .....	6
4.1.1 Spannungsverläufe in GiR .....	6
4.2 Vorhersage der Tragfähigkeiten.....	6
5 Fazit .....	8
<i>Reference</i> .....	8

# 1 Einleitung

Eingeklebte Stahlstäbe sind im Ingenieurholzbau bewährte Verbindungselemente für Nadelholz und gelten dort als Stand der Technik. Für Laubholz, insbesondere in den Nutzungsklassen 2 und 3 sowie bei variiertem Stabanordnung, fehlen jedoch bislang fundierte Erkenntnisse. Mit der Klärung dieser Aspekte durch das geplante Forschungsvorhaben kann eine signifikante Weiterentwicklung im Ingenieurholzbau erreicht werden.

## 2 Experimenteller Teil

Im Projekt wurde das Langzeitverhalten eingeklebter Gewindestangen in Laubholz unter Temperatur- und Feuchtebelastung untersucht. Zum Einsatz kamen vier Holzarten (Buche BSH/FSH, Eiche, Esche) und zehn Klebstoffe auf Epoxid- bzw. PUR-Basis. Zur Auslegung der Prüfstände wurden zunächst die mechanischen Eigenschaften der Einzelkomponenten sowie die quasistatischen Festigkeiten der Verbundsysteme bestimmt.

### 2.1 Langzeituntersuchungen

Die statischen Langzeituntersuchungen wurden an drei Prüfständen mit abgestimmten Materialkombinationen über bis zu 18 Monate durchgeführt.

Am ersten Prüfstand, betrieben unter Laborbedingungen (20 °C, 50 % r. F.), wurde eine konstante Last über einen Hebelarm auf mehrere Prüfkörper aufgebracht. Das gewählte Lastniveau von zunächst 2,6 kN führte über Monate zu keiner relevanten Materialreaktion. Auch bei Erhöhung auf 6 kN blieb die Verformung gering und kein Versagen trat ein.

Der zweite Prüfstand, aufgebaut in einer Klimakammer, erlaubte kontrollierte Temperatur- und Feuchteschwankungen. Bei Prüfkörpern mit Eiche und zwei Klebstoffen (CR821, GSA) zeigte sich anfänglich Kriechen, das jedoch im Verlauf stagnierte. Nach einem Monat stieg die mittlere Tragfähigkeit leicht an; nach 3, 6 und 12 Monaten fiel sie moderat ab, wobei die Restfestigkeiten nach 3 und 12 Monaten ähnlich blieben (vgl. Abbildung 1). Insgesamt führte die Klimabelastung zu keinem signifikanten Festigkeitsverlust.

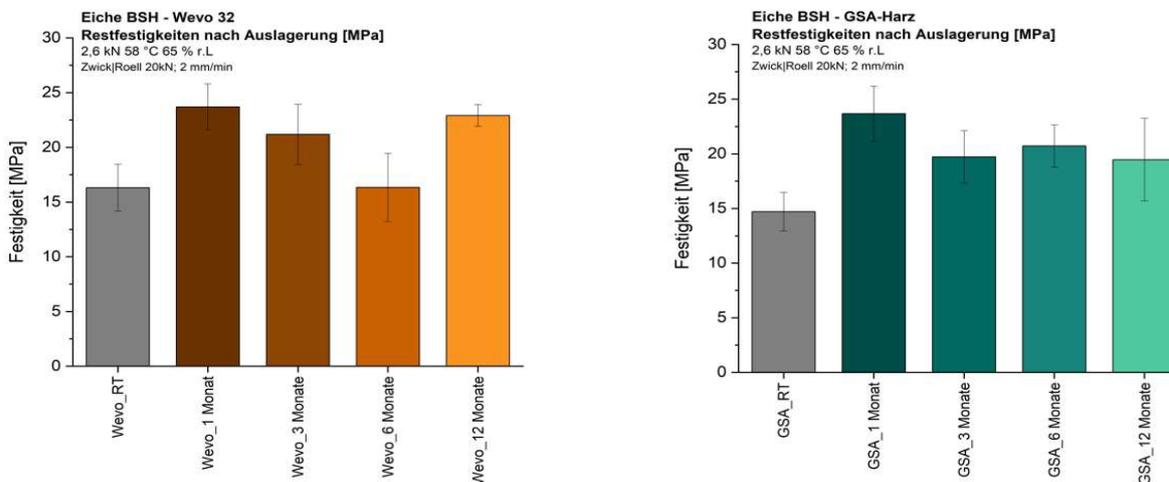


Abbildung 1: Restfestigkeiten der Prüfkörper Eiche/Wevo 32 (links) und Eiche/ GSA-Harz (rechts) nach 1, 3, 6 und 12 Monaten im Vergleich zum Referenzwert bei RT (nicht ausgelagerte Prüfkörper) [Quelle:IFAM]

Stäbe in BauBuche versagten unter kombinierter Belastung aus Temperatur, Feuchte und Last bereits nach wenigen Stunden, sodass kein Kriechverhalten erfasst werden konnte. Ersatzweise wurden Buche BSH-Stäbe geprüft, die ein typisches Kriechverhalten mit anfänglicher Verformung und späterer Stagnation zeigten.

Der dritte Prüfstand wurde in einem Glashaus installiert, um das Langzeitverhalten unter natürlichen, teils verstärkten Klimaschwankungen zu untersuchen. Temperatur- und Feuchteverläufe wurden über 18 Monate aufgezeichnet, ebenso die Materialreaktionen. Während des Prüfzeitraums kam es ganzjährig zu Versagensfällen. Prüfkörper, die im Winter entnommen wurden, wiesen höhere Holzfeuchten auf und zeigten in nachfolgenden Auszugversuchen deutlich geringere Resttragfähigkeiten als im Sommer getestete Proben.

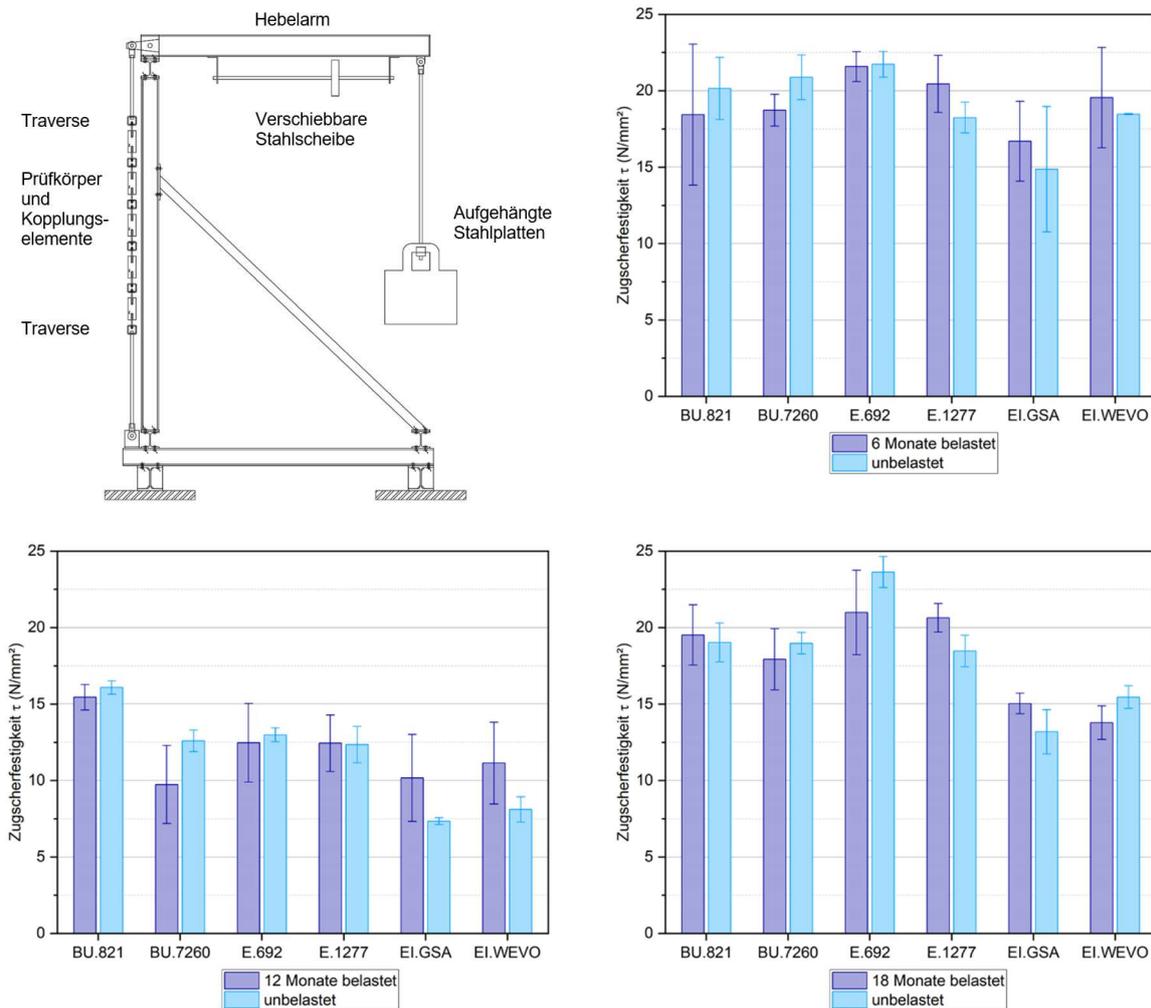


Abbildung 2: Hebelarmkonstruktion zur Aufhängung der Prüfkörper im Glashaus (oben links); Mittelwerte der Zugshearfestigkeiten und Fehlerbalken der Holz-Klebstoff-Kombinationen nach 6 (oben rechts), 12 (unten links) und 18 Monaten (unten rechts) Monaten [Quelle: HSRM]

Zusammenfassend lässt sich zum Langzeitverhalten der eingeklebten Stäbe unter statischer Last sagen, dass die Prüfkörper mit den ausgewählten Lastniveaus unter Laborbedingungen kaum Materialreaktionen gezeigt haben. Während diese Lastniveaus unter erhöhten Luftfeuchten und Temperaturen bei einigen Materialkombinationen bereits häufig zu einem vorzeitigen Versagen im Kriechversuch geführt haben. Grundsätzlich zeigte sich für die meisten Klebstoffe in Kombination mit Laubhölzern eine gute Eignung für statische Langzeitbelastungen.

## 2.2 Untersuchungen zur Variation der Stabanordnung

Das Projekt untersuchte verschiedene Einklebetiefen, Mindestabstände und Gruppenanordnungen eingeklebter Stäbe, wobei Eiche mit Fichte verglichen wurde. Prüfkörper aus Eiche zeigten vor allem in Einzelversuchen höhere Festigkeiten und seltener Aufreißversagen, selbst bei reduzierten Mindestabständen. Fichte schnitt teils schwächer ab. Die Ergebnisse bestätigen die Ausgangsthese, dass Laubhölzer für technische Anwendungen wie den Holzbau gut geeignet sind und deren gezielte Erforschung sinnvoll ist.

## 3 Experimentelle Versuchsreihen zur Variation der Stabanordnung

Zur Untersuchung des Randabstands bei einzelnen und gruppierten Stäben wurde ein Testprogramm mit verschiedenen Konfigurationen erstellt (vgl. Tabelle 1 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die daraus generierten Ergebnisse werden als Referenzwerte für die modellierten Werte herangezogen und sind gesamtheitlich in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 1: Versuchsreihen zur Variation der Stabanordnung [Quelle: HSRM]

Versuchsreihe	Anordnung	Mindestabstände			Einbindetiefe
		Abk.	$a_{2,c}$	$a_2$	
I	singulär	RA	1,75d		10d
II	singulär	NA	2,5d		10d
III	singulär	RA	1,75d		6d
IV	singulär	NA	2,5d		6d
V	Gruppe	RA	1,75d	3,5d	10d
VI	Gruppe	NA	2,5d	5d	10d
VII	Gruppe	RA	1,75d	3,5d	6d
VIII	Gruppe	NA	2,5d	5d	6d
„RA“ reduzierte Mindestabstände $a_{2,c}$ Abstand zum Rand		„NA“ normale Mindestabstände $a_2$ Abstand untereinander			

## 4 Numerische Modellierung

Alle numerischen Modellierungen erfolgten mit Ansys 2023.R2. Die Geometrie wurde detailliert modelliert, wobei die Stablänge verkürzt wurde. Aufgrund der Symmetrie wurde nur ein Viertel der Geometrie berücksichtigt (vgl. Abbildung 3). Der Holzblock war unten fixiert, die Zugkraft gleichmäßig oben auf den Stab verteilt. Ein feines Netz aus Solid185-Elementen wurde verwendet, besonders verfeinert in relevanten Bereichen. Die Materialkennwerte basieren auf experimentellen Werten; Klebstoff und Stahl wurden als linear elastisch betrachtet. Die Holzarten wurden transversal isotrop modelliert.

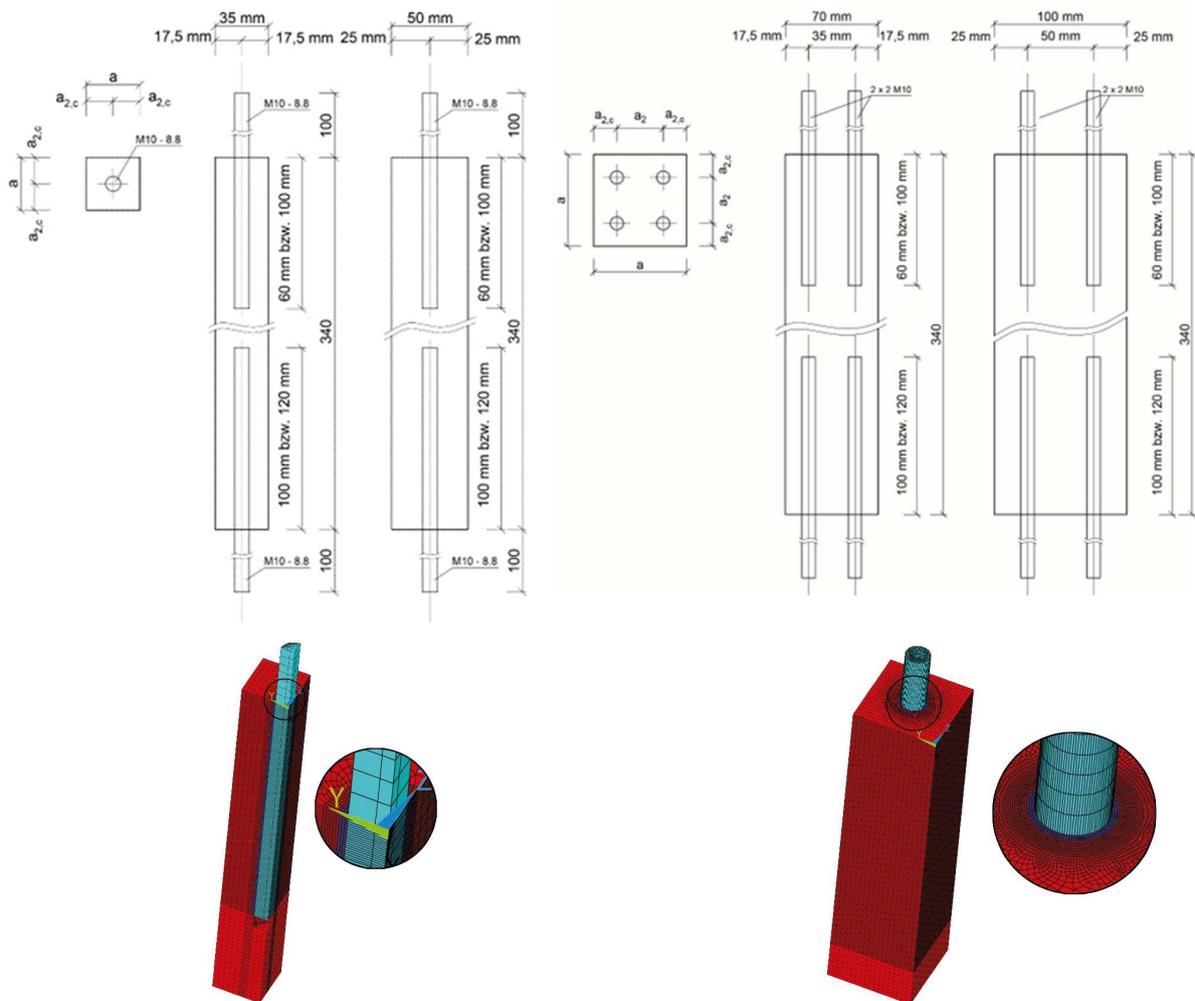


Abbildung 3: Geometrie der experimentell untersuchten Versuchsreihen mit FEM-Modelle eingeklebter Stäbe; jeweils  $\frac{1}{4}$  Stab; (rechts) singulär eingeklebter Stab, (links) Gruppenanordnung von 4 Stäben

Ein probabilistischer Ansatz basierend auf der bekannten Weibull-Theorie wurde verwendet, um die Tragfähigkeit von eingeklebten Stabverbindungen (GiR) vorherzusagen. Diese Methode wurde bereits ausführlich in früheren Publikationen [1] [2–5] präsentiert.

## 4.1 Ergebnisse der Modellierung

### 4.1.1 Spannungsverläufe in GiR

Bei Einzelstäben führten kurze Einbettungslängen (60 mm) zu hohen Scherspannungsspitzen bis 35 MPa, während längere Einbettungen (100 mm) die Spannungen gleichmäßiger verteilten. Ein größerer Randabstand ( $2,5d$ ) reduzierte zusätzlich die Spannungsspitzen im Vergleich zu kleineren Abständen ( $1,75d$ ).

In Vierergruppen traten an der Klebstoff-Holz-Grenzfläche geringere Spannungen auf, jedoch lagen die Querspannungen mit ca. 70 MPa deutlich über denen der Einzelstäbe (ca. +75 %), ebenso wie die mittlere Scherspannung (40 MPa, +33 %). Geringe Randabstände in Gruppenanordnungen führten zu erhöhten Spannungsspitzen im Vergleich zu Einzelstabkonfigurationen.

## 4.2 Vorhersage der Tragfähigkeiten

Die prognostizierten Tragfähigkeiten variieren mit Verankerungslänge und Randabstand (vgl. Tabelle 2). Für Eiche erreicht eine  $10d$ -Einbettung bei reduziertem Randabstand 28,8 kN (+21 %), bei

normalem 43,0 kN (-6 %). Bei 6d betragen die Werte 25,5 kN (-1 %) bzw. 31,4 kN (-8 %). In Gruppenanordnung liegen die Tragfähigkeiten bei 101,0 kN (+6 %) bzw. 111,1 kN (-8 %) bei 10d und bei 77,2 kN (-3 %) bzw. 86,4 kN (+8 %) bei 6d.

Für Fichte zeigen sich bei 10d reduzierte/normale Abstände mit 26,2 kN (+3 %) bzw. 37,3 kN (-38 %), bei 6d mit 22,2 kN ( $\pm 0$  %) bzw. 25,4 kN (-3 %). In Gruppenanordnung liegen die Werte bei 105,5 kN ( $\pm 0$  %) bzw. 115,4 kN (-6 %) bei 10d sowie 80,4 kN (+5 %) bzw. 88,4 kN (-4 %) bei 6d.

Tabelle 2: Ergebnisse der experimentellen Versuchsreihen der Serien I - VII

Serie	Holz	Einb. länge	Stab		Rand abstand.	F <sub>u,exp</sub> [kN]		τ <sub>avg</sub> [MPa]		F <sub>u,pred</sub> [kN]			
			#	Stahlgüte		Mittelwert.	SD	Mittelwert.	SD	Mittelwert	-1SD	+1SD	Abw.
I	Eiche	10d	1	8.8	red.	36.6	3.8	11.7	1.2	28.8	24.9	32.3	21%
I	Fichte	10d	1	4.8	red.	27.1	-	8.6	-	26.2	18.1	34.1	3%
I	Fichte	10d	1	8.8	red.	25.5	2.1	8.1	0.7				-3%
II	Eiche	10d	1	8.8	norm.	40.6	3.6	12.9	1.1	43.0	37.1	48.3	-6%
II	Fichte	10d	1	4.8	norm.	27.0	0.3	8.6	0.1	37.3	25.7	48.5	-38%
II	Fichte	10d	1	8.8	norm.	29.2	2.5	9.3	0.8				-28%
III	Eiche	6d	1	8.8	red.	25.3	0.8	13.4	0.4	25.5	22.0	28.6	-1%
III	Fichte	6d	1	4.8	red.	22.2	1.8	11.8	1.0	22.2	15.3	28.9	0%
III	Fichte	6d	1	8.8	red.	23.7	1.9	12.6	1.0				6%
IV	Eiche	6d	1	8.8	norm.	29.0	2.0	15.4	1.1	31.4	27.1	35.2	-8%
IV	Fichte	6d	1	4.8	norm.	24.6	2.0	13.1	1.1	25.4	17.5	33.0	-3%
IV	Fichte	6d	1	8.8	norm.	24.0	2.8	12.7	1.5				-6%
V	Eiche	10d	4	8.8	red.	107.7	1.5	8.6	0.1	101.0	92.2	124.0	6%
V	Fichte	10d	4	4.8	red.	105.6	4.2	8.4	0.3	105.5	93.6	137.1	0%
V	Fichte	10d	4	8.8	red.	105.2	7.5	8.4	0.6				0%
VI	Eiche	10d	4	8.8	norm.	102.9	4.0	8.2	0.3	111.1	101.3	136.3	-8%
VI	Fichte	10d	4	4.8	norm.	108.6	-	8.6	-	115.4	102.3	149.9	-6%
VI	Fichte	10d	4	8.8	norm.	114.3	6.8	9.1	0.6				-1%
VII	Eiche	6d	4	8.8	red.	74.7	6.6	9.9	0.9	77.2	70.4	94.7	-3%
VII	Fichte	6d	4	4.8	red.	84.8	9.3	11.2	1.2	80.4	71.3	104.4	5%
VII	Fichte	6d	4	8.8	red.	79.7	1.8	10.6	0.3				-1%
VIII	Eiche	6d	4	8.8	norm.	94.4	6.0	12.5	0.8	86.4	77.4	113.6	8%
VIII	Fichte	6d	4	4.8	norm.	84.7	5.3	11.2	0.7	88.4	78.4	114.8	-4%
VIII	Fichte	6d	4	8.8	norm.	69.0	8.5	9.2	1.1				-28%

## 5 Fazit

Die in den vorherigen Arbeitspaketen gewonnenen Versuchsergebnisse wurden schrittweise in die Modellierung integriert. Durch die Erweiterung des Modells wird nun eine zuverlässige Vorhersage der Tragfähigkeiten bei variierenden Geometrien ermöglicht. Die numerischen Vorhersagen ergaben eine systematisch höhere Leistung bei in Eiche eingeklebten Stäben im Vergleich zu denen, die in Fichte eingeklebt wurden, unabhängig von der jeweiligen Konfiguration. Abschließend wurde die Vorhersagegenauigkeit der in dieser Studie angewandten probabilistischen Methode bestätigt.

## References

- [1] Hassanieh A, Valipour HR, Bradford MA, Jockwer R. *Glued-in-rod timber joints: analytical model and finite element simulation. Materials and Structures* 2018;51(3). <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1189-9>.
- [2] Vallée T, Rakesh HR, Tannert T. *Load-carrying capacity prediction of single rods glued into cross-laminated timber. European Journal of Wood and Wood Products* 2022;80(5):1041–55. <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01835-1>.
- [3] Grunwald C, Vallée T, Fecht S, Bletz-Mühdorfer O, Diehl F, Bathon L et al. *Rods glued in engineered hardwood products part II: Numerical modelling and capacity prediction. International Journal of Adhesion and Adhesives* 2019;90:182–98. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.05.004>.
- [4] Vallée T, Kaufmann M, Adams RD, Albiez M, Correia JR, Tannert T. *Are probabilistic methods a way to get rid of fudge factors? Part II: Application and examples. International Journal of Adhesion and Adhesives* 2023;124:103364. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103364>.
- [5] Vallée T, Kaufmann M, Adams RD, Albiez M, Correia JR, Tannert T. *Are probabilistic methods a way to get rid of fudge factors? Part I: Background and theory. International Journal of Adhesion and Adhesives* 2022;119:103255. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103255>.

Das IGF-Vorhaben 01IF21550 N der Forschungsvereinigung Internationaler Verein für Technische Holzfragen e. V. wurde über die AiF sowie dem DLR Projektträger im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Der vollständige Bericht kann bestellt werden bei: Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. (iVTH e.V.) Riedenkamp 3, 38108 Braunschweig.