

Ermüdungsfestigkeit von axial belasteten Stahlstäben, eingeklebt in Brettschichtholz aus europäischer Esche

Bruno Maurer¹, Ernst Gehri, Thomas Strahm, René Steiger, Christian Affolter

Zusammenfassung

Eingeklebte profilierte Stäbe zählen zu den leistungsfähigsten Verbindungsmitteln im modernen Ingenieurholzbau. Besonders unter axialer Belastung zeichnen sie sich durch hohe Tragfähigkeit und hohe Steifigkeit aus. Zudem lassen sich Verbindungen mit Stäben aus Stahl auf ein duktilen Versagen auslegen, damit in Verbindungen und Verstärkungen die spröden Versagensmodi des Holzes ausgeschlossen sind. Bei Brücken kann die Ermüdung einen massgebenden Grenzzustand der Tragsicherheit darstellen. Ausgehend vom angestrebten Bemessungswert einer Stange in der Praxis wird in diesem Paper das geforderte Lastniveau für die übliche Verbinder-Konfiguration hergeleitet. Basierend auf experimentellen Untersuchungen wird aufgezeigt, wie sich die unerwünschten gemischten Versagensmodi umgehen lassen. Zudem werden die Auswirkungen der Belastungsfrequenz und des damit verbundenen Temperaturanstiegs im Prüfkörper aufgezeigt und diskutiert. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen bestätigen die Brauchbarkeit des Systems mit eingeklebten Stäben unter den geprüften Bedingungen.

Schlüsselwörter: Eingeleimte Stahlstäbe, eingeklebte Gewindestangen, Ermüdung, europäisches Eschen-Brettschichtholz, Laubholz, Duktilität

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die GSA-Technologie ist ein praxis-erprobtes System zum Einkleben von Stahlstäben mit metrischem Gewinde in Holzbauteile. Die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (Z-9.1-778), wie auch die Europäische Technische Bewertung (ETA-19/0752) bestätigen die Tauglichkeit des verwendeten Epoxidharzklebstoffs (EP) und stärken das Vertrauen aller Projektbeteiligten in die fachgerechte Ausführung dieser leistungsfähigen Verbindungen. Bezüglich dem Verwendungsbereich nennen beide Dokumente die Nadelhölzer als Substrat und Tragwerke mit vorwiegend ruhenden Belastungen. Grund für diese Einschränkungen ist, dass bei der Entwicklung der Zulassungen keine Ermüdungsprüfungen gemacht wurden und auch in den bisher gültigen Normen (z.B. EN 1995) die Ansätze zur Bemessung auf Ermüdung für solche Verbindungstypen fehlen.

Bei Tragwerken oder Tragwerksteilen die häufig wiederkehrenden Belastungen mit grossen Amplituden ausgesetzt sind, werden Ermüdungsnachweise verlangt. Dabei ist aufzuzeigen, dass kein Versagen oder grössere Schäden infolge Ermüdung auftreten, d.h. die Beeinträchtigung der Verbindung oder eines Bauteils durch zyklische Belastung. In der Literatur sind verschiedene Nachweisverfahren zur Ermüdung von Bauteilen aufgeführt, die zum Teil Eingang in der Normung gefunden haben, so zum Beispiel in die schweizerische Norm SIA 265:2003 [1] und im Eurocode 5 (EN 1995-2:2004 [2] und späteren Fassungen). Die Verfahren unterscheiden sich wesentlich, insbesondere durch Bezugnahme auf andere Parameter in den Bemessungsgleichungen: Beispielsweise basiert die Nachweismethode in der Norm SIA 265 auf Spannungsdifferenzen, während jene in der EN 1995-2 das Verhältnis der Spannungen sowie maximale Spannungen verwendet. Letzteres Vorgehen wird heute für Holzkonstruktionen als geeigneter und zuverlässiger betrachtet [3]. Eine Darstellung dieser Nachweismethode findet sich in den Papers der letzten ICTB [4]. Dem interessierten Leser werden auch die Publikationen [5] und [6] (auf Deutsch) empfohlen. In der aktuellen Fassung des Eurocode 5 [2] sind lediglich die Ermüdungsbeiwerte (a und b) für Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln festgelegt. Aufgrund publizierter Arbeiten im Rahmen des Projekts «TACITUS» darf davon ausgegangen werden, dass eine Erweiterung des Nachweisverfahrens auf eingeklebte Anker möglich ist [7].

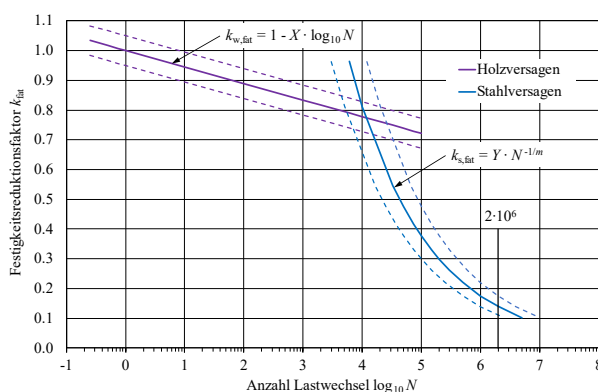
Im Dezember 2019 konnten erste Ermüdungsprüfungen unter Anwendung der GSA-Technologie durch die Abteilung Ingenieur-Strukturen der Empa - Materials Science and Technology erfolgreich durchgeführt werden. Prüfkörper aus Brettschichtholz aus europäischer Esche (*Fraxinus excelsior*) mit identischen Hirnholzverbindungen, bestehend aus zwei eingeklebten Stahlstäben mit metrischem Gewinde M16, wurden in einer Zug-Zug-Konfiguration geprüft. In dieser ersten Prüfsérie wurden die Stangen mit einem kontrollierten Drehmoment gegen das Stirnholz vorgespannt. Mit dieser Massnahme und unter Verwendung von Gewindestangen aus rostfreiem Duplexstahl konnten $2 \cdot 10^6$ Lastzyklen gefahren werden, ohne dass ein Ermüdungsversagen eintrat. Die Frequenz der sinus-förmigen Belastung wurde von anfänglich 5 Hz schrittweise gesteigert. Schliesslich wurden die meisten Zyklen mit einer Frequenz von 12 Hz

¹ Zuständiger Autor, F&E-Ingenieur, neue Holzbau AG, Lungern, Schweiz, brm@neueholzbau.ch

gefahren, was eine erfreuliche Reduktion der Prüfungsdauer mit sich brachte. Bei einem Prüfkörper wurden sogar je 50'000 Zyklen mit einer Frequenz von 15, respektive 20 Hz gefahren. Die vier Thermolemente in den Klebefugen (eines an jeder Stange) verzeichneten nur moderate Temperatur-Steigerungen von unter 2°C über die Versuchsdauer. Im Sommer 2021 wurden weitere Prüfkörper an der Empa geprüft. Nebst dem Verzicht auf die Vorspannung, wurden die Rand- und Zwischenabstände leicht reduziert. Ziel dieser Untersuchungen war es, die Leistungsfähigkeit des GSA-Klebstoffs zu ermitteln und mit Ergebnissen aus der Literatur zu vergleichen.

1.2 Versagensmodi

Der Bemessungsansatz in EN 1995-2:2004 wird als geeignet angesehen, um die Ermüdung von Holz selbst zu berücksichtigen. Schwierigkeiten treten jedoch bei gemischten Ausbildungen mit Holz und Stahl auf. Je nach Versagensart – Holzversagen oder Stahlversagen – sind andere Nachweisarten durchzuführen (Figur 1). Im vorliegenden Beispiel erfolgt im Bereich von 10^4 bis 10^5 Lastwechseln (Schwingspielen) ein Übergang vom Holzversagen zum Stahlversagen.



Figur 1: Festigkeitsreduktionsfaktor für Ermüdung k_{fat} unter Berücksichtigung von zwei Versagensarten

Für kleinere Lastwechselzahlen erfolgt ein **Ausziehversagen des eingeklebten Stabes** (bei EP-Verklebung ein Scherversagen im Holz). Dem Ansatz in EN 1995-2:2004 entsprechend, kann die Abnahme der Tragfähigkeit als linear in Funktion des Logarithmus der Anzahl Lastwechsel umschrieben werden (Figur 1). Der Faktor X ist seinerseits eine Funktion der Verhältniszahl R ($= F_{min,fat} / F_{max,fat}$), der konstruktiven Ausbildung sowie der Holzart. Seine Definition ist identisch mit dem Neigungs-Parameter A nach [4].

Bei grösseren Lastwechselzahlen erfolgt ein **Ermüdungsbruch im Stahlgewinde**; die Abnahme der Leistung ergibt sich hier in Funktion der Kraft- bzw. der Spannungsdifferenz $\Delta\sigma_{fat}$; der übliche Ansatz für Bauteile aus Stahl wird hier übernommen. Der Faktor Y ist hier eine Funktion des Kerbgrades (eingeschnittenes Gewinde, kalt- oder warmgerollt), der konstruktiven Ausbildung, sowie der Werkstoffeigenschaften des Stahles (Festigkeit). Bei der Bemessung von Stahl (z. B. [8]) wird für den Parameter m im Bereich unterhalb von $5 \cdot 10^6$ Lastwechseln in der Regel ein Wert von 3 angenommen.

Durch Optimierung der Verbindung und der Prüfparameter lässt sich der Lastwechselbereich, bei welchem der Übergang vom Holzversagen zum Stahlversagen eintritt, in einen grossen Bereich verschieben, z.B. bis auf rund 10^7 Lastwechsel. Wie nachfolgend aufgezeigt, wird damit eine getrennte Untersuchung der beiden Versagensarten möglich.

1.3 Zielwerte

Basis der Bemessung der Prüfkörper bildet der charakteristische Auszieh Widerstand $F_{w,k}$ eines GS-Ankers M16 in Laubholz parallel zur Faser von 100 kN. Das Laubholz wurde gewählt, weil sich hier bei identischer Konfiguration deutlich höhere Lasten anschliessen lassen als im Nadelholz und damit die Klebefuge stärker belastet ist. Die hohe Festigkeit des eingesetzten Stangenmaterials erfordert eine deutliche Reduktion des Querschnitts zur Gewährleistung der Duktilität im Grenzzustand der Tragsicherheit. Ausgehend von $f_u = 1000 \text{ N/mm}^2$, als in Prüfungen ermittelter Zugfestigkeit, würde für die Praxis ein reduzierter Durchmesser von 11.5 mm ($A_C = 104 \text{ mm}^2$) gewählt. Nach Norm SIA 263 [9] ergibt sich daraus ein Tragwiderstand der Stahlstange von $F_{t,Rd} = 74.8 \text{ kN}$. Der Bemessungswert des Auszieh Widerstandes wäre also mit $100/1.5 = 66.7 \text{ kN}$ noch massgebend und ein kleinerer Stahlquerschnitt somit denkbar. Unter Berücksichtigung des Partialfaktors von $\gamma_Q = 1.5$ dürfte der Stange eine veränderliche Nutzlast von knapp 45 kN zugetraut werden. Für die zu prüfenden Konfiguration ergibt sich daraus die angestrebte Prüflast von 45 kN pro Stange. Als Verhältniszahl R wurde ein Wert von 0.1 gewählt. Dieses Verhältnis wird für ein leichtes Tragwerk mit grosser veränderlicher Nutzlast als praxisrelevant angesehen. Zudem ist hier ein Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur möglich [7]. Als Zielwert wurden $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel definiert, weil auch die Stahlbaunormen ihre Kerbgruppen [8] in der Regel auf diese Anzahl beziehen.

2 Material und Methode

2.1 Prüfungen an Stahlstäben und Innengewinden

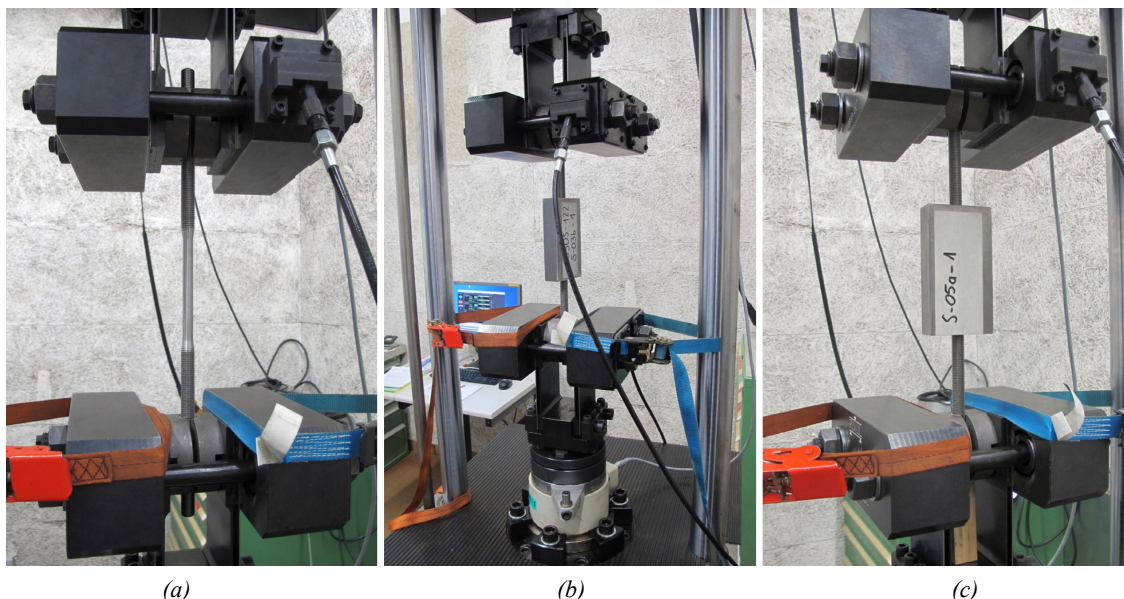
Durch die vorgängige Bestimmung des Faktors Y (Figur 1) soll das gemischte Auftreten der Versagensmodi in der Hauptprüfserie weitgehend vermeiden werden. Deshalb wurde eine erste Serie von Prüfungen an reinen Stahlprüfkörpern ohne Einkerbung durchgeführt. Mit dem Ziel, die Ermüdungsfestigkeit zu bestimmen, führte die Abteilung «Mechanical Systems Engineering» der Empa Einstufen-Schwingversuche und Laststeigerungsversuche an Gewindestangen M16 und ihrer Verbindung an ein Stahlteil durch (Figur 2).



Figur 2: Stahl-Prüfkörper; Verbindung mit Innengewinde (oben) und abgedrehte Gewindestangen (unten)

Als Verbindung wurde ein metrisches Innengewinde gewählt, welches in die Schmalseite einer 30 mm dicken Platte aus Stahl S355J2 geschnitten wurde. Die Gewindestangen aus rostfreiem Duplex-Stahl wurden gemäss der Praxis beim Einkleben nach dem Standard der GSA-Technologie [10] über eine bestimmte Länge auf einen definierten Durchmesser bearbeitet. Dieser als «Einschnürung» bezeichnete Bereich war 110 mm lang, mit einem linearen Übergangsbereich zum vollen Stangendurchmesser über eine Länge von 15 mm auf beiden Seiten. Es wurden Prüfkörper mit Einschnürungszonen in drei verschiedenen Durchmessern (11.5 mm, 12.0 mm, 12.5 mm) vorbereitet. Schliesslich wurden nur die Prüfkörper mit den kleinsten Einschnürungsdurchmessern geprüft, weil bereits diese drei Proben die Erwartungen übertrafen. Auch bezüglich der Verbindungen wurden vier verschiedene Varianten vorbereitet. Allerdings lieferte auch hier die ökonomischste Option bereits befriedigende Ergebnisse, weshalb auf die Prüfung der restlichen Varianten verzichtet wurde.

Für die Schwingversuche kam eine elektrodynamische Hochfrequenz-Resonanzprüfmaschine («HFP») des Typs Rusenberg, Rumul Testronic 8601.11-1 (150 kN) zum Einsatz. Die Maschine verfügt über hydraulische Klemmbaken («Hydrogrip»), in welchen die Enden der Gewindestangen von den Proben direkt geklemmt wurden. Dabei wurde ein Futterblech aus rostfreiem Stahl eingesetzt, um die äussere Last gleichmässig über Schub in die Gewindegänge der Gewindestange M16 einzuleiten. Die freie Länge zwischen den 80 mm langen Klemmbaken betrug 270 mm. Die Figur 3 zeigt drei verschiedene Prüfkörper während den Schwingversuchen unter dynamischer Zugbelastung.



Figur 3: Eingebaute Prüfkörper; (a) Gewindestange abgedreht auf den Durchmesser 11.5 mm, (b) Verbindung «S-03b-1», (c) Verbindung «S-05a-1»

Geprüft wurden drei Gewindestangen mit abgedrehtem Mittelbereich. Die Verhältniszahl $R (= F_{\min} / F_{\max})$ wurde konstant auf einem Wert von 0.2 gehalten und die Frequenz lag bei allen Proben dieser Serie bei etwa 72 Hz. Beim ersten Prüfkörper wurde die Oberlast $F_{\max}$ alle 10^6 Lastwechsel um 5 kN gesteigert (Blockprogramm). Insgesamt wurden diesem Prüfkörper $4 \cdot 10^6$ Lastwechsel mit einer maximalen Oberlast $F_{\max}$ von 65 kN aufgebracht. Die zwei weiteren Proben wurden auf dieser höchsten Laststufe bis auf 5 Millionen Lastwechsel geprüft. Der rostfreie Duplex-Stahl dieser Gewindestangen ertrug somit eine Spannungsdifferenz im Zugschwellbereich $\Delta\sigma$ von 500 N/mm².

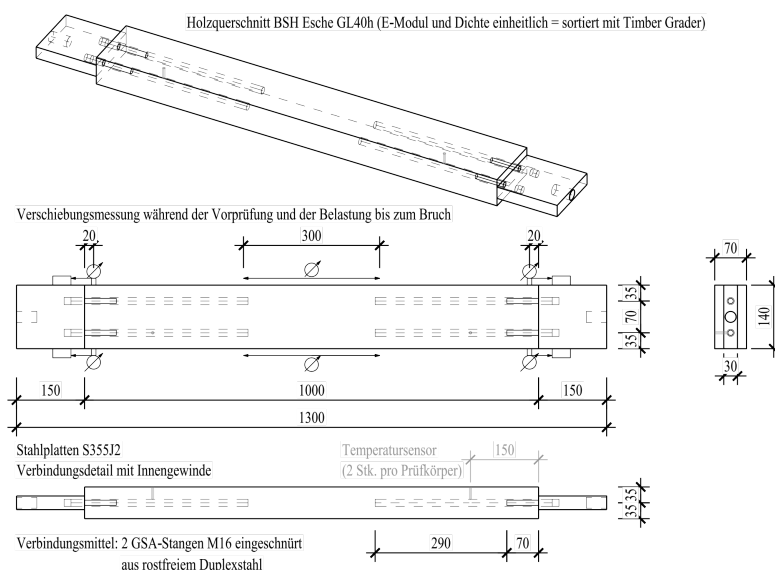
Von den Verbindungen wurde zuerst die Probe «S-03b-1» mit einer konservativen Gewindelänge geprüft. Nachdem diese 10^6 Lastwechsel auf $F_{\max} = 65$ kN mit $R = 0.2$ überstanden hatte, wurden die Prüfkörper mit dem als optimal erachteten Detail eingesetzt. Hiervon wurden drei Proben ebenfalls auf 10^6 Lastwechsel mit identischer Belastung geprüft. Da die Gewindestangen keine Einschnürung mehr aufwiesen, lässt sich die Belastung auf den Spannungsquerschnitt A_S von 157 mm² beziehen, was eine Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ von 255 N/mm² ergibt. Die Frequenz lag hier um 80 Hz.

Eine weiterer Prüfkörper wurde mit 50 kN Oberlast und reduzierter Verhältniszahl von $R = 0.1$ erfolgreich während $5 \cdot 10^6$ Lastwechsel geprüft. Schliesslich wurde für den Prüfkörper «S-05a-1» erneut ein Blockprogramm definiert. Dieses begann mit $F_{\max} = 55$ kN. Wiederum wurde die Oberlast alle 10^6 Lastwechsel um 5 kN gesteigert, bei einer konstanten Verhältniszahl R von 0.1. Nach total $5 \cdot 10^6$ Lastwechseln, mit einer Spannungsdifferenz im letzten Block von $\Delta\sigma = 430$ N/mm², wurde auch diese Prüfung ohne Versagen beendet.

Die Temperaturen der Proben wurden während der Versuche periodisch mit einem Infrarot-Thermometer überwacht (vor allem im Einspannbereich und bei Innengewinden). Eine Erhöhung der Temperatur hätte ein Indiz für Reibermüdung oder Reibkorrosion sein können. Die Temperaturen blieben im Allgemeinen unter 50 °C (gemessenes $T_{\max} = 56$ °C bei der zweiten Prüfung einer abgedrehten Gewindestange).

2.2 Prüfungen an in Brettschichtholz aus europäischer Esche eingeklebten Stäben

Für die Prüfungen an eingeklebten Stäben wurden vier identische Prüfkörper geplant und hergestellt. Sie bestanden aus Brettschichtholz aus europäischer Esche der Festigkeitsklasse GL40h. Die Lamellen aus Esche (*Fraxinus excelsior*) wurden mit dem Timber Grader MTG (Gerät zur Festigkeitssortierung von Holz basierend auf der Ermittlung des dynamischen Elastizitätsmoduls aus der Messung der Eigenfrequenz und der Rohdichte) so sortiert, dass die Elastizitätsmoduln und Dichten der Prüfkörper eine einheitliche Verteilung aufwiesen. In die aus jeweils vier verklebten Lamellen zusammengesetzten Brettschichtholzteile wurden an beiden Stirnseiten je zwei Gewindestangen M16 nach dem Standard der GSA-Technologie parallel zur Faserrichtung des Holzes eingeklebt. Der eingesetzte Klebstoff war ein 2-Komponenten-Epoxidharz und als Bohrlochdurchmesser wurden 18 mm gewählt. Die Einklebelänge betrug 290 mm (d.h. $16.1 \cdot d_{\text{drill}}$) mit einer Versenkung (nicht verklebte Länge) von 70 mm. Zur Einleitung der Kraft von der Prüfmaschine in die Prüfkörper dienten 30 mm dicke Stahlplatten der Festigkeitsklasse S355J2. Das Verbindungsdetail zu den beiden Gewindestangen entsprach der zuvor geprüften Ausführung (siehe Abschnitt 2.1). Die Prüfkörper wiesen zudem je zwei Bohrungen auf, welche den Einbau von Temperatursensoren in zwei Klebefugen erlaubten. Die geometrischen Abmessungen der Prüfkörper sind in Figur 4 dargestellt.



Figur 4: Aufbau und Abmessungen (in mm) der vier Holz-Prüfkörper, die auf Ermüdung geprüft wurden

Die Prüfkörper wurden durch die neue Holzbau AG (n'H) hergestellt und anschliessend nahe an ihren charakteristischen Auszieh Widerstand (185 kN) belastet, um deren einwandfreie Fertigung und Aushärtung zu bestätigen. Während dieser Vorbelastung wurden die in Figur 4 mit einem Ø-Symbol bezeichneten Verschiebungen gemessen. Anhand der Messstrecke im Mittelteil wurde der statische Elastizitätsmodul des Holzes bestimmt. Die Abteilung «Structural Engineering» der Empa führte danach die Hauptprüfserie durch. Dafür kam eine servohydraulische Ermüdungsprüfmaschine des Typs Walter & Bai, *LFV-500* (500 kN) zum Einsatz. Die Maschine verfügt über hydraulische Klemmbanken, in welchen die Stahlplatten auf einer Länge von 90 mm direkt geklemmt wurden. Die Verschiebungen in Richtung der Längsachse der Prüfkörper wurden mit der in der Prüfmaschine eingebauten Traversen-Messeinrichtung aufgezeichnet. Zusätzlich zu den Messwerten des Klimaloggers in der Halle (Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit) wurde ein dritter Temperatursensor in der Nähe der Prüfmaschine platziert

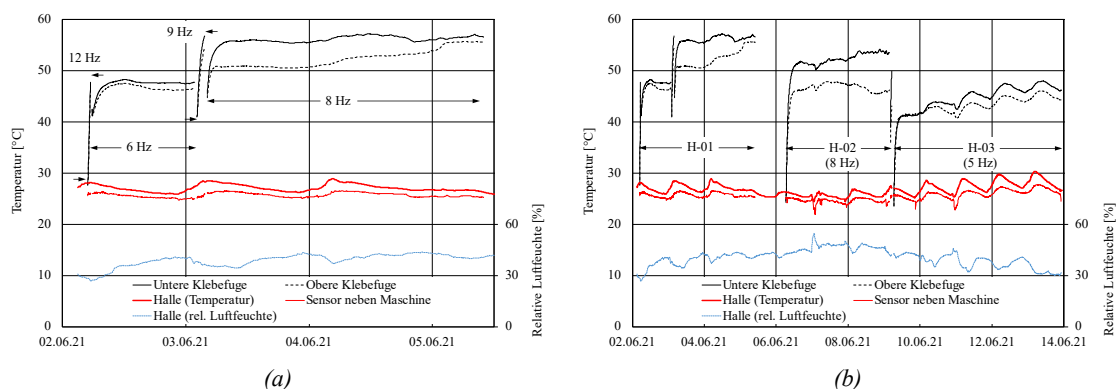
Von den vier Prüfkörpern konnten mit dem verfügbaren (Zeit-)Budget deren drei geprüft werden. Eingangs wurde jeder Prüfkörper statisch auf Zug bis zur Oberlast $F_{\max}$ von 100 kN belastet (Belastungsrate 2 kN/s, kraftgeregelt), um die Steifigkeit des Systems ermitteln zu können. Für die nachfolgenden Dauerschwingversuche wurde eine Sinus-Wellenform mit konstanter Amplitude und einer Verhältniszahl R von 0.1, bei kraftgeregelter Lastaufbringung angewendet. Bezüglich der Querschnittsfläche im Bereich der Einschnürung ($2 \cdot A_C = 265 \text{ mm}^2$) ergab dies eine Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ von 340 N/mm² im Zugschwellbereich. Die Vorgabe für die Frequenz lautete: So hoch wie möglich, jedoch ohne die Temperatur in einer Klebefuge über 55 °C steigen zu lassen.

Nach der erfolgreichen Ermüdungsprüfung wurde schliesslich ein Prüfkörper durch die n'H statisch bis zu seinem Zugversagen geprüft. Die Prüfkörper «H-01» und «H-03» wurden nach dem Dauerschwingversuch aufgeschnitten, um den Zustand der Klebefugen beurteilen zu können. Mit dem Mittelstück jedes Prüfkörpers wurde die Dichte sowie anhand von zwei Darrproben die Holzfeuchte ermittelt.

3 Resultate und Diskussion

3.1 Frequenzen und Temperaturen

Für den ersten Prüfkörper «H-01» wurde die Prüffrequenz zu Beginn auf 12 Hz festgelegt. Wie die Figur 5a zeigt, stellte sich jedoch innert kurzer Zeit (d.h. 30 Minuten) eine starke Erwärmung in den Klebefugen ein, so dass die Frequenz vorerst halbiert wurde (d.h. 6 Hz). Nach total ca. 455'000 Lastwechseln wurde die Frequenz auf 9 Hz erhöht. Zwischenzeitlich wurde ein Ventilator neben der Prüfmaschine auf den Boden gestellt, um den Prüfkörper zu kühlen. Da sich jedoch nicht die gewünschte Wirkung zeigte und die Temperaturen weiter anstiegen, wurde der Ventilator wieder entfernt. Wegen erneuter übermässiger Zunahme der Temperatur in den Klebefugen wurde die Frequenz nach total ca. 505'000 Lastwechseln auf 8 Hz eingestellt.



Figur 5: Temperaturen in den Klebefugen und in der Umgebung, sowie die relative Luftfeuchte in der Prüfhalle in Funktion der Zeit; (a) Prüfkörper «H-01», (b) Zusammenfassung über alle Prüfkörper

Die Frequenz von 8 Hz wurde für den Prüfkörper «H-02» übernommen und während den ganzen $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln beibehalten. Durch einen Ausfall in der Stromversorgung der Hydraulikpumpen musste der Ermüdungsversuch kurz vor dem Ende neu gestartet werden. Die Temperaturmessungen in den Klebefugen zeigen deshalb einen Wiederanstieg. Weil sich diese Messungen im zweiten Prüfkörper um 50 °C einstellten, wurde für die Prüfung des Prüfkörpers «H-03» eine Frequenz von nur noch 5 Hz gewählt. Hier zeichnete sich in den Klebefugentemperaturen deutlich die Schwankung der Umgebungstemperatur ab. Die Reduktion der Frequenz um 3 Hz führte zu einer um 5 °C niedrigeren Durchschnittstemperatur (48.3 °C bei H-02, 43.3 °C bei H-03), obschon die Umgebungstemperatur während der dritten Prüfung deutlich höher war (Sensor neben der Maschine im Durchschnitt 1.2 °C, die Prüfhalle 1.8 °C wärmer), wobei diese Unterschiede in der Grössenordnung der Genauigkeit von Temperaturmessungen liegen.

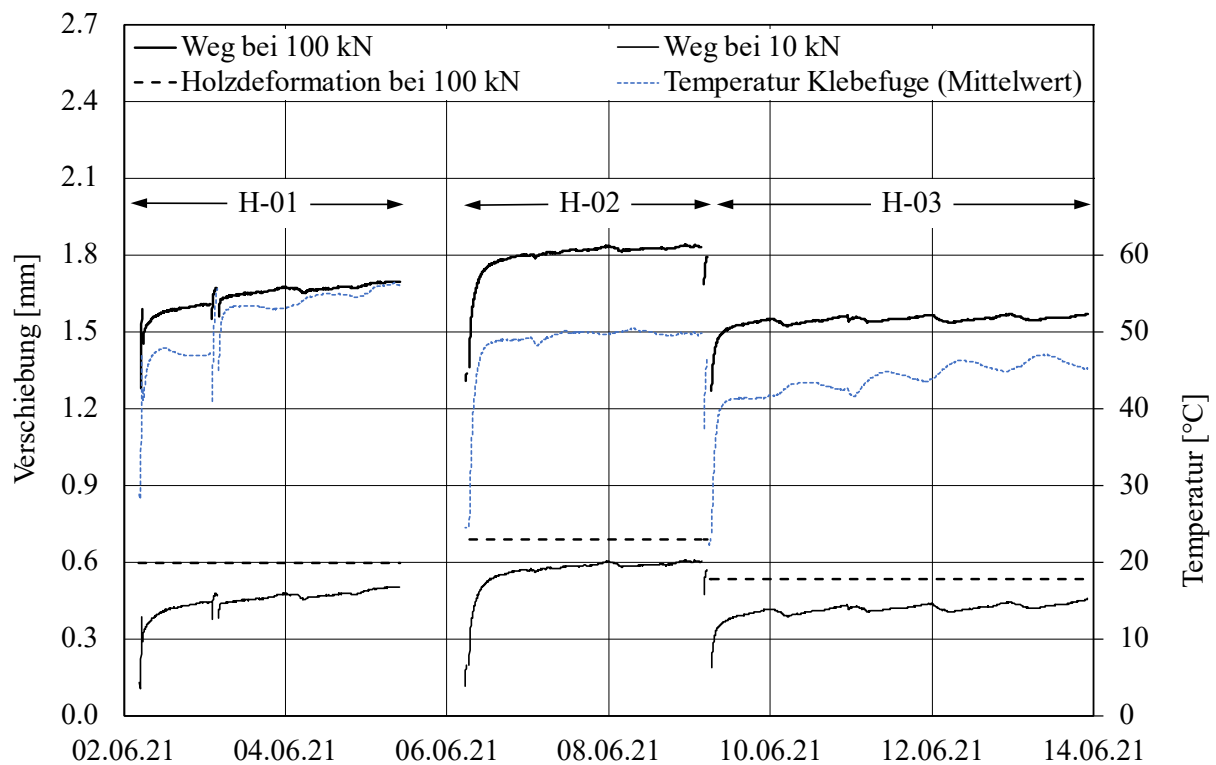
3.2 Bruchwiderstand und Steifigkeit

Die aus den Verschiebungsmessungen der Vorprüfungen errechneten Elastizitätsmoduln sind in Tabelle 1 angegeben. Bei der Ermittlung der Versagenskraft F_U nach der Ermüdungsprüfung zeigte sich keine Veränderung beim gemessenen statischen Elastizitätsmodul des Holzes E_{timber} . Der Prüfkörper versagte spröde bei einer Kraft von 246 kN und somit 23 % über dem charakteristischen Wert für statische Kurzzeitprüfungen von GSA-Stangen eingeklebt in Laubholz. Da der für die Ermüdungsprüfungen gewählte Einschnürungsdurchmesser von 13.0 mm absichtlich nicht darauf ausgelegt war, ein duktiler Versagen zu erzielen, entsprach der beobachtete Versagensmodus, d.h. Ausziehversagen mit Aufspalten des Holzes, den Erwartungen.

Tabelle 1: Eigenschaften und Anzahl Lastwechsel in der Ermüdungsprüfung für die Prüfkörper aus Brettschichtholz aus europäischer Esche

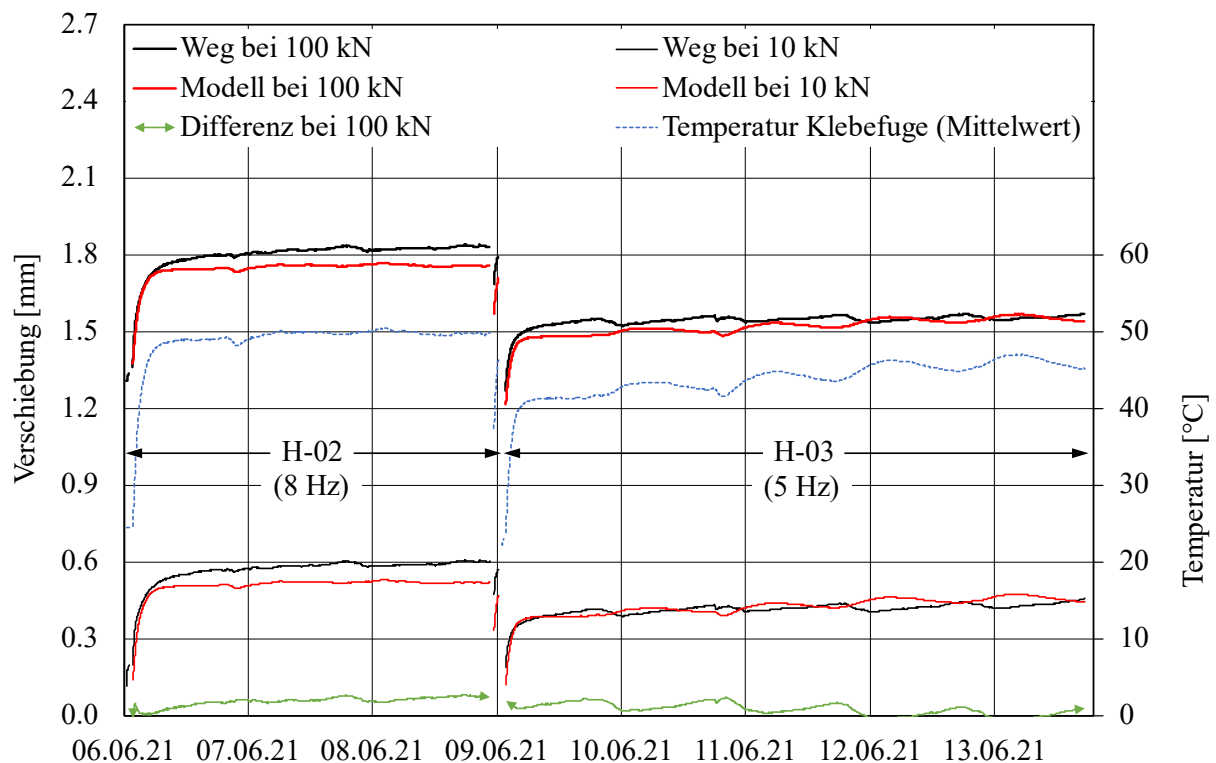
Bezeichner	Dichte [kg/m³]	Holzfeuchte [%]	E_{timber} [N/mm²]	Anzahl Lastwechsel, N	F_U [kN]
H-01	702	8.0	15'000	2'054'712	nicht ermittelt
H-02	679	7.7	13'000	2'010'000	246
H-03	696	8.2	16'900	2'010'000	nicht ermittelt

Der Maschinenweg wurde mit zunehmender Anzahl Lastwechsel tendenziell grösser, wobei sich die gemessene Verschiebung gleichförmig mit der Klebefugentemperatur entwickelte. Der Effekt der Temperatur wird überlagert durch die unterschiedlichen Steifigkeiten der Holzprüfkörper (Figur 6).



Figur 6: Traversenweg und Mittelwert der Klebefugentemperatur in Funktion der Zeit; alle Prüfkörper mit Verschiebungsanteil des Holzstabes

Diese Unterschiede reichen nicht aus, um die Differenzen zwischen den Prüfkörpern zu begründen. Deshalb wurde versucht, den gemessenen Traversenweg anhand von linear-elastischen Verschiebungsanteilen in Holz und Stahl zu modellieren. Zusätzlich wurde die Erwärmung der Gewindestange mit einem konstanten Wärmeausdehnungskoeffizienten berücksichtigt. Die Figur 7 zeigt, dass dies beim Prüfkörper «H-03» gut gelingt. Beim Prüfkörper «H-02» zeigt sich hingegen bei der Unterlast und bei der Oberlast die gleiche Differenz zwischen Messwerten und analytischem Modell. Daraus lässt sich schliessen, dass die Erwärmung von gegen 50 °C einen weiteren, kleinen, aber irreversiblen Verschiebungsanteil verursacht. Es ist naheliegend, dass dieser Anteil im Klebstoff entstand.



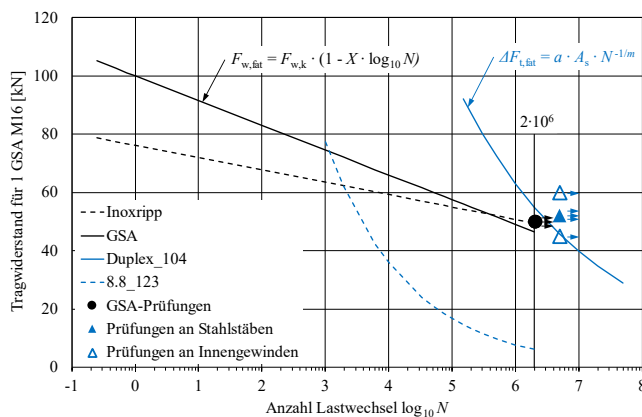
Figur 7: Traversenweg und Mittelwert der Klebefugentemperatur in Funktion der Zeit; Prüfkörper «H-02» und «H-03» mit analytischem Steifigkeits-Modell

Bei der visuellen Analyse der Prüfkörper nach der Ermüdungsprüfung war beim Prüfkörper «H-02» eine Öffnung der Fuge zwischen Stahlplatte und Stirnholz erkennbar. Eine solche Fuge trat beim dritten Prüfkörper nur schwach in Erscheinung.

3.3 Ermüdungsfestigkeit

Die durchgeführten Prüfungen an bearbeiteten Stahl-Gewindestangen, Innengewinden und in europäischem Eschen-Brettschichtholz eingeklebten Stäben führten in keinem Fall zu einem Ermüdungsversagen. Weil nur ein Lastniveau mit nur einer Verhältniszahl geprüft wurde, lässt sich daraus nur bedingt eine gültige Beziehung für die Bemessung ableiten. Der Vergleich mit dem Vorschlag «Inoxripp» nach Myslicki et al. [7] zeigt jedoch, dass die Leistung des geprüften Systems durchaus im Bereich von bisherigen Ergebnissen liegt (Figur 8). In der Vergangenheit wurden Verbindungsmittel nur auf der Grundlage der Neigung der Kurve verglichen, welche den Festigkeitsreduktionsfaktor k_{fat} beschreibt [4]. Die Darstellung als axialer Tragwiderstand pro Stange enthüllt, dass der Neigungs-Parameter X immer im Zusammenhang mit dem quasi-statischen Tragwiderstand $F_{w,k}$ zu beurteilen ist. Zudem müssen die zahlreichen Konfigurations-Unterschiede, wie zum Beispiel die Grösse der Klebefläche A_b , berücksichtigt werden. Es könnte die Frage aufgeworfen werden, ob die Extrapolation auf der Grundlage einer geprüften Scherfestigkeit der Klebefuge, wie sie in den gängigen Bemessungsverfahren üblich ist, in Bezug auf die Ermüdung ausreichend konservativ ist. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung werden in dieser Hinsicht als zuverlässiger erachtet, da die geprüfte Konfiguration (Einklebelänge, Randabstand, usw.) sowie der gewählte Zug-Zug-Aufbau sehr gut der tatsächlichen Realität in der Baupraxis entsprechen.

Die Figur 8 zeigt auch mögliche Kurven für den Ermüdungswiderstand der Stahlkomponenten in der Verbindung. Für die Darstellung der Gewindestangen aus rostfreiem Duplex-Stahl wurde für den Parameter m ein Wert von 5 gewählt. Zum Vergleich wurde eine Kurve skizziert, wie sie für eine Gewindestange der Festigkeit 8.8 gelten könnte. Diese Kurve repräsentiert eine Kerbgruppe von 50 nach Eurocode 3 [8]. Bei der GSA-Technologie wird der Spannungsquerschnitt der Gewindestange A_s durch die Querschnittsfläche der Einschnürung A_C ersetzt. Für beide Stangentypen wurde für A_C ein Wert angenommen, der als realistisch für die Baupraxis angesehen wird.



Figur 8: Ermüdungswiderstand von axial beanspruchten GSA M16 in Laubholz unter Berücksichtigung der Stahlkomponenten ($R = 0.1$)

Tabelle 2: Parameter der Kurven zur Beschreibung des Ermüdungswiderstands

Kurve	$F_{w,k}$ [kN]	X [-]	A_b [mm ²]
Inoxripp	76.16	0.056	10'050
GSA	100.00	0.085	16'400

	a [-]	A_c [mm ²]	m [-]
Duplex	9.62	104	5
FK8.8	6.30	123	3

4 Zusammenfassung

Die in diesem Artikel präsentierte experimentelle Untersuchung soll einen Beitrag zur Entwicklung eines praxis-tauglichen Nachweisverfahrens für Verbindungen mit eingeklebten profilierten Stäben in Holzkonstruktionen unter Ermüdungsbeanspruchungen leisten. Es liessen sich geeignete Gewindestangen und ein passendes Verbindungsdetail zum Stahlteil finden, so dass Ermüdungsprüfungen mit über $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln ohne Versagen absolviert werden konnten. Bei Belastungsfrequenzen von mehr als 5 Hz stiegen die Temperaturen der Klebefugen auf über 45 °C. Dies wird als unvorteilhaft erachtet, weil daraus irreversible Verschiebungen hervorgingen, die vermuten lassen, dass es aufgrund der erhöhten Temperaturen zu Veränderungen im Klebstoff kam. Trotzdem blieb die Steifigkeit der Verbindungen während der gesamten Prüfungen sehr hoch. Die abschliessende Belastung bis zum Versagen in einer statischen Prüfung deutete ebenfalls auf eine hohe Beständigkeit des Tragwiderstandes hin. Die Ergebnisse dieser Untersuchung liefern zusätzliche Argumente dafür, dass die GSA-Technologie auch im Falle von Ermüdungsbeanspruchungen bestens geeignet ist, um zuverlässige und dauerhafte Tragwerke zu realisieren.

5 Danksagung

Diese Arbeit wurde durch die neue Holzbau AG finanziert. Die Unterstützung durch die Empa - Materials Science and Technology (Abteilungen Mechanical Systems Engineering und Ingenieur-Strukturen) und durch Professor Gehri wird herzlich verdankt. Das englische Original dieses Artikels wurde an der ICTB 2021^{PLUS} in Biel veröffentlicht.

6 Referenzen

- [1] SIA, Swiss Society of Engineers and Architects (2003) SIA 265: Timber Structures, Zurich, Switzerland.
- [2] CEN, European committee for standardization (2004) EN 1995-2:2004: Design of timber structures. Part 2: Bridges, Brussels, Belgium.
- [3] Malo K. A., Holmestad A., Larsen P. (2006) Fatigue Strength of Dowel Joints in Timber Structures. In: Proc. of the World Conference on Timber Engineering WCTE, Portland, USA.
- [4] Stamatoopoulos H., Malo K. A. (2017) Fatigue strength of axially loaded threaded rods embedded in glulam at 45° to the grain. In: 3rd International Conference on Timber Bridges ICTB, Skellefteå, Sweden
- [5] DIN, German Institute for Standardization (2016) DIN 50100: Load controlled fatigue testing - Execution and evaluation of cyclic tests at constant load amplitudes on metallic specimens and components, Berlin, Germany
- [6] Aicher S., Christian Z. (2015) Ermüdungsverhalten von Holz und geklebten Holzbauteilen, In: 21st International Forum Wood Building IHF, Garmisch, Germany
- [7] Myslicki S., Bletz-Mühdorfer O., Diehl F., Lavarec C., Vallée T., Scholz R. & Walther F. (2019) Fatigue of glued-in rods in engineered hardwood products - part I: experimental results, The Journal of Adhesion, 95:5-7, 675-701, DOI: <https://doi.org/10.1080/00218464.2018.1555477>.
- [8] CEN, European committee for standardization (2005) EN 1993-1-9:2005: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue, Brussels, Belgium.
- [9] SIA, Swiss Society of Engineers and Architects (2003) SIA 263: Steel Structures, Zurich, Switzerland.
- [10] Neue Holzbau AG, (2021) Merkmale der GSA-Technologie, [Online], abrufbar: gsa-technologie.ch/gsa-technologie/gsa-grundlagen-2.