

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Abteilung Wald
CH-3003 Bern

Fachlicher Schlussbericht an die Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz

zum Thema

Naturfaserverbundwerkstoffe zur Bewehrung von Fichtenholz

mit den Projektpartnern

Empa

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf



Materials Science and Technology

Bcomp AG

Passage du Cardinal 1
CH-1700 Fribourg



Balteschwiler AG

Kaiserstrasse 3
CH-5080 Laufenburg



Inhaltsverzeichnis

1	Projektübersicht.....	3
2	Vorwort und Danksagung.....	5
3	Abstracts	6
4	Ausgangslage	8
4.1	Massivholzvorräte und Qualität	8
4.2	Einführung in Verbundwerkstoffe	9
4.2.1	Abkürzungen	9
4.2.2	Verbundwerkstoffe.....	9
4.2.3	Faserverstärkte Kunststoffe (FRP)	9
4.2.4	Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFRP)	10
4.2.5	Herstellungsverfahren von faserverstärkten Kunststoffen.....	12
5	Material & Methoden	13
5.1	Methodik	13
5.2	Materialien und Prüfkörper	15
6	Ergebnisse	17
6.1	AP-1: Prüfkörperherstellung für Zug- und Zugscherversuche.....	17
6.2	AP-2: Zug- und Zugscherversuche	18
6.2.1	Zugprüfung.....	18
6.2.2	Zugscherprüfung.....	20
6.3	AP-3: Prüfkörperherstellung für 4-Punkt Biege- und Schlagbiegeversuche.....	22
6.3.1	Prüfkörperherstellung für die 4-Punkt Biegeversuche	22
6.3.2	Prüfkörperherstellung für die Schlagbiegeversuche	24
6.4	AP-4: 4-Punkt Biege- und Schlagbiegeversuche	25
6.4.1	4-Punkt Biegeprüfung	25
6.4.2	Schlagbiegeprüfung.....	30
6.5	AP-5: Homogenisierungsmodell	32
7	Diskussion und Ausblick	33
8	Verzeichnisse	35
8.1	Literaturverzeichnis.....	35
8.2	Abbildungsverzeichnis.....	37
8.3	Tabellenverzeichnis.....	38

1 Projektübersicht

Projekttitle

Naturfaserverbundwerkstoffe zur Bewehrung von Fichtenholz

Projektverantwortung

Empa - Cellulose & Wood Materials
Überlandstrasse 129
8600 Dübendorf

Roman Elsener
roman.elsener@empa.ch
058 765 65 71

Industriepartner

Bcomp AG
Passage du Cardinal 1
1700 Fribourg

Dr. Julien Rion
julien@bcomp.ch
026 558 84 02

Balteschwiler AG
Kaiserstrasse 3
CH-5080 Laufenburg

Markus Fuhrer
markus.fuhrer@balteschwiler.ch
062 869 41 54

Projektstart – Projektende und Anzahl Monate

02.01.2023 – 30.06.2024 (18 Monate)

Projektfortschritt (abgeschlossen per 30.06.2024)

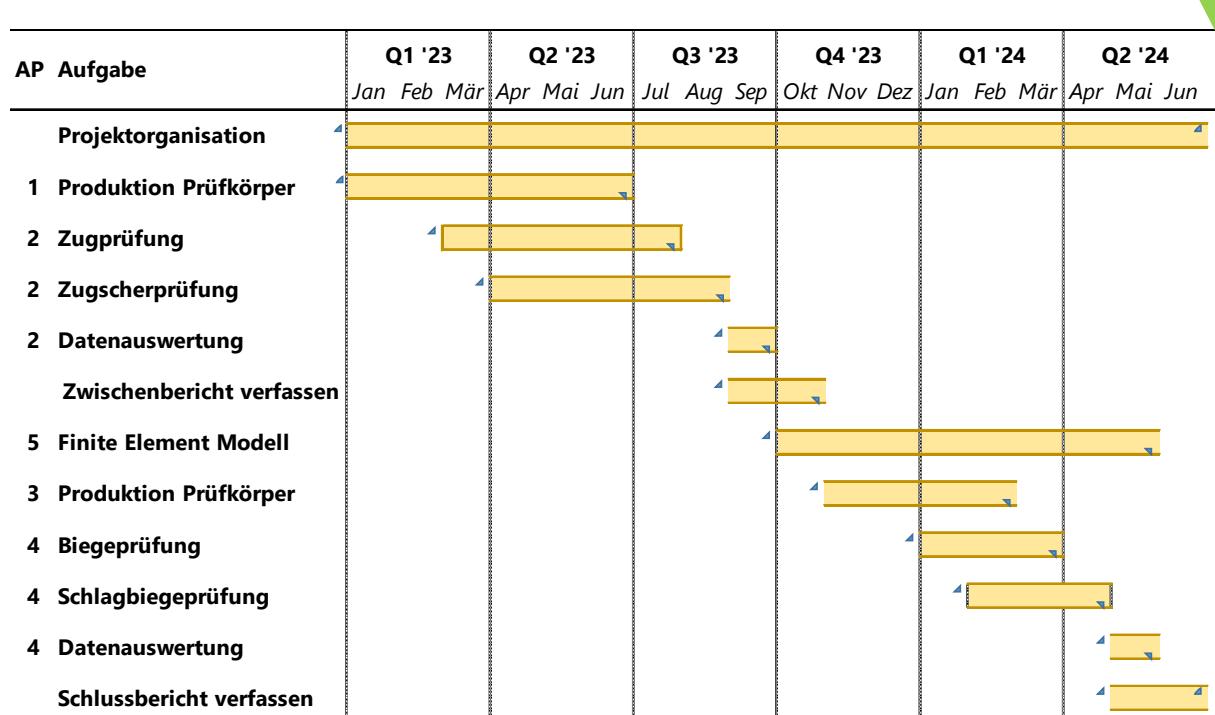


Abbildung 1: Projektzeitplan & Fortschritt

Arbeitspakete (AP)

- AP-1: Probenherstellung für Zug- & Zugscherversuche / Handlaminierung & VARTM
- AP-2: Durchführen der Zug- & Zugscherversuche, Datenanalyse
- AP-3: Probenherstellung für 3-Punkt Biegeversuche & Schlagbiegeversuche analog zum AP-1
- AP-4: Durchführen der 3-Punkt Biegeversuche & Schlagbiegeversuche
- AP-5: Finite-Element Homogenisierungsmodell

Arbeitsplan

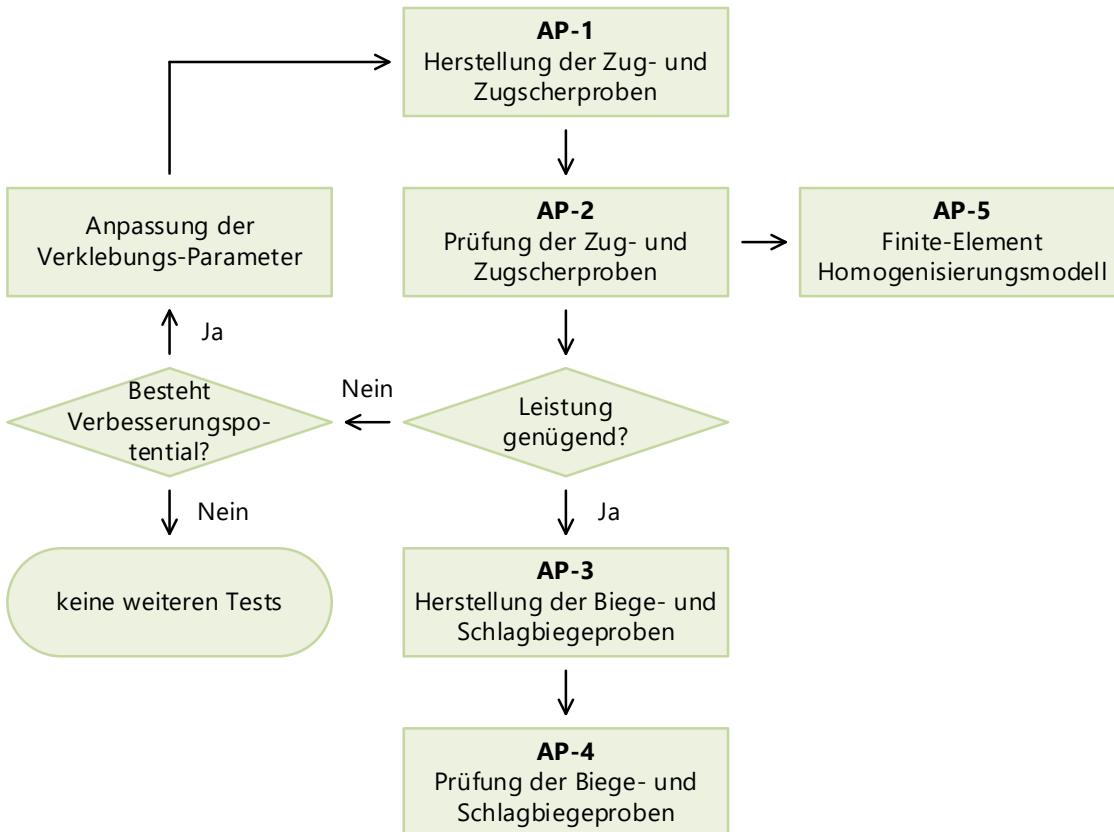


Abbildung 2: Projekt-Arbeitsplan

Projektziele

- 1) Bestimmung der leistungsfähigsten Produktionsmethode zur Verstärkung von Biegebalken (Laminate vs. trockene Fasern)
- 2) Bestimmung des leistungsfähigsten Klebstoffes, bzw. Matrix zum Verbund der Fasern untereinander und mit dem Holz (unter Berücksichtigung der Materialfeuchte)
- 3) Nachweis des Homogenisierungseffektes einer NFRP-Faserverstärkung eines Brettschichtholzträgers bei einer Biegebelastung

2 Vorwort und Danksagung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse des Projektes WHFF-CH 2022.08 "Naturfaser-verbundwerkstoffe zur Bewehrung von Fichtenholz".

Folgende Organisationen und Personen waren massgeblich an der Realisierung des Projektes beteiligt:

- Empa, Gruppe WoodTec: Roman Elsener, Mark Schubert
- Empa, Gruppe Ingenieurwissenschaften: Pedro Palma
- ETH Studenten & Zivildienstleistende: Simone Nicoli, Silvan Wegenast
- Bcomp AG: Yann Lebaupin, Julien Rion
- Balteschwiler AG: Markus Fuhrer
- Bundesamt für Umwelt BAFU: Claire-Lise Suter Thalmann, Christian Aebischer

An dieser Stelle möchte sich die Empa, Gruppe WoodTec bei allen Personen und Institutionen für das Engagement, die wertvollen Inputs und die motivierende Zusammenarbeit, die zum Gelingen des Projektes beigetragen haben, bedanken.

Ein grosses Dankeschön geht auch an die Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz WHFF-CH des Bundesamtes für Umwelt, BAFU, das durch die finanzielle Unterstützung dieses Projekt ermöglicht hat.

Basierend auf den vielversprechenden Ergebnissen ist es geplant, dass Teile des Projektes publiziert werden.

3 Abstracts

Abstract Deutsch

Der mitteleuropäische Fichtenbestand steht aufgrund der klimatischen Veränderungen unter Druck. Infolge von Trockenstress und dem daraus resultierenden verstärkten Insekten- und Pilzbefall sind in den letzten Jahren grosse Mengen an Fichtenholz minderer Qualität angefallen. Dies wird in absehbarer Zeit zu einer Verknappung des Fichtenholzes in A-Qualität führen. Dieses Phänomen steht im Gegensatz zur steigenden Nachfrage nach Bauholz in A-Qualität, das für den boomenden Holzbaumarkt benötigt wird. Bei Biegebalken wirkt sich eine Bewehrung auf der Zugseite positiv auf die mechanischen Eigenschaften, das Bruchverhalten und die Homogenität aus. Dies kann den Druck auf die Fichte mindern, da auch minderwertigeres Holz für den Bausektor verwendet werden kann. Naturfaserverbundwerkstoffe (NFRP) bieten einen offensichtlichen Vorteil, da sie sich als biologisches Material ideal mit Holz ergänzen und zusammen mit diesem rezykliert oder in einer Kaskadenverwendung eingesetzt werden können. In dieser Arbeit wurden mittels Zug- und Zugscherversuchen Naturfaserlaminate, die mit Epoxid- (EPO) und biobasierter Polyfurfurylalkohol-(PFA) Matrix gebunden und unter verschiedenen Parametern hergestellt wurden, getestet. Die Lamine mit der besten Performance wurden anschliessend mit den gängigen Holzklebstoffen Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF) und Polyurethan (PUR) auf Fichten-Furnierschichtholz (LVL) Prüfkörper aufgeklebt. Diese wurden in 4-Punkt Biege- und Schlagbiegeversuchen charakterisiert und mit Prüfkörpern welche mit Laminaten aus mit synthetischen Fasern verstärkt wurden, verglichen.

Die Ergebnisse zeigten, dass sich beide Matrixmaterialien und beide Klebstoffe eignen, um eine Klebeverbindung herzustellen, die einen erfolgreichen Verbund von Naturfaserlaminaten mit Fichtenholz und damit die Herstellung von naturfaserverstärkten Holzbalken ermöglicht. Je nach Matrix und Belastungsfall sind die Verstärkungs- und Homogenisierungseffekte von Naturfaserlaminaten denen von synthetischen Fasern wie Glas und Carbon ebenbürtig. Die Zug- und 4-Punkt-Biegeversuche wurden mit Proben durchgeführt, die bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten konditioniert wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass der Einfluss der Feuchtigkeit auf die mechanische Leistungsfähigkeit der mit NFRP verstärkten Fichtenprüfkörper linear verläuft und die NFRP-Lamine über das gesamte Feuchtigkeitsspektrum hinweg einen positiven Verstärkungseffekt auf den Holzprüfkörper haben. Mittels 4-Punkt-Biegeversuchen an Prüfkörpern mit unterschiedlichen Laminatdicken konnte die optimale Verstärkung ermittelt und deren Effekt auf das plastische Verformungsverhalten aufgezeigt werden.

Die Resultate waren insgesamt, und insbesondere im Fall der biobasierten PFA-Matrix, sehr positiv. Es konnten Verbundbalken aus Holz, Naturfasern und biobasierter PFA-Matrix hergestellt werden, die eine vergleichbare Leistungsfähigkeit wie Prüfkörper, die mit synthetischen Fasern und erdölbasierter Epoxidharz-Matrix verstärkt wurden, erreichten. Dies zeigt, dass Fichtenholz mit den passenden Verarbeitungsmethoden und Materialien durch Lamine, die vorwiegend aus biobasierten Materialien hergestellt wurden, verstärkt werden kann und einen vielversprechenden Lösungsansatz zur Nutzung von minderwertigem Fichtenholz darstellt.

Abstract English

The Central European spruce population is under pressure due to climatic changes. Due to drought stress and the resulting increase in insect and fungal infestation, large quantities of low-quality spruce wood have accumulated in recent years. This will lead to a shortage of A-quality spruce wood in the foreseeable future. This phenomenon is in contrast to the increasing demand for A-quality construction timber, which is needed for the booming timber construction market. For bending beams, a reinforcement layer on the tension side has a positive effect on the mechanical properties, fracture behavior and homogeneity. This can reduce the pressure on spruce wood, as lower quality wood can also be used for the construction sector. Natural fiber composites (NFRP) offer an obvious advantage as they complement wood ideally as a biological material and can be recycled together with it or used in a cascade application. In this work, natural fiber laminates bonded with epoxy (EPO) and bio-based polyfurfuryl alcohol (PFA) matrix, manufactured with different production parameters were tested, using tensile and tensile shear tests. The laminates with the best performance were then bonded to spruce laminated veneer lumber (LVL) specimens, using the common wood adhesives melamine-urea-formaldehyde (MUF) and polyurethane (PUR), characterized in 4-point bending and impact bending tests, and compared with specimens that were reinforced with laminates made with synthetic fibers.

It was shown that both matrix materials and both adhesives are suitable for producing an adhesive connection that enables the successful bonding of natural fiber laminates with spruce wood and thus the production of natural fiber-reinforced wooden beams. Depending on the matrix and load case, the reinforcing and homogenizing effect of natural fiber laminates is equal to that of synthetic fibers such as glass and carbon. The tensile and 4-point bending tests were carried out with samples that were conditioned in different humidity levels. The results showed that the influence of humidity on the mechanical performance of the NFRP-reinforced spruce specimens is linear and that the NFRP laminates have a positive reinforcing effect on the wood specimen across the entire humidity spectrum. By means of 4-point bending tests on test specimens with different laminate thicknesses, the optimum reinforcement could be determined and its effect on the plastic deformation behavior demonstrated.

The results were generally very positive, especially in the case of the bio-based PFA matrix. Composite bending test specimens made of wood, natural fibers and a bio-based PFA matrix were produced, achieving a performance comparable to test specimens reinforced with synthetic fibers and a petroleum-based epoxy resin matrix. This shows that with the right processing methods and materials, spruce wood can be reinforced with laminates made from predominantly bio-based materials and represents a promising approach to the use of low-quality spruce wood.

4 Ausgangslage

4.1 Massivholzvorräte und Qualität

Holz ist bekannt für seine guten spezifischen mechanischen Eigenschaften, die es zu einem äusserst wertvollen und nachhaltigen Baustoff machen. Im Holzbau werden diese Eigenschaften seit vielen Jahren zur Konstruktion von Wohnhäusern, Industriebauten, Brücken, etc. genutzt. Seit einigen Jahren befindet sich der Holzbau in einem Aufschwung, der sich unter anderem in der Anwendung von Holz für immer anspruchsvollere Anwendungen widerspiegelt. Dies wurde durch eine Anpassung der Schweizer Brandschutznorm (VKF 2015) begünstigt, welche die letzten Einschränkungen für Holz als Baumaterial beseitigt hat. So können im mehrgeschossigen Holzbau immer höhere Häuser erstellt werden, wo teilweise auch Liftschächte und Treppenhäuser komplett aus Holz konstruiert werden.

Aufgrund seiner Heterogenität und Anisotropie unterliegen die Holzeigenschaften allerdings grossen Schwankungen, was es schwierig macht, die exakten Materialeigenschaften vorauszusagen. Die Biegefesteitigkeit hängt direkt mit Schwachstellen wie Ästen, Schrägfaserigkeit und Keilzinken im Zugbereich zusammen, welche die mechanischen Holzeigenschaften gegenüber fehlerfreien Proben deutlich verringern. Dies hat zur Folge, dass eine Sortierung des Holzes in Festigkeitsklassen nötig wird.

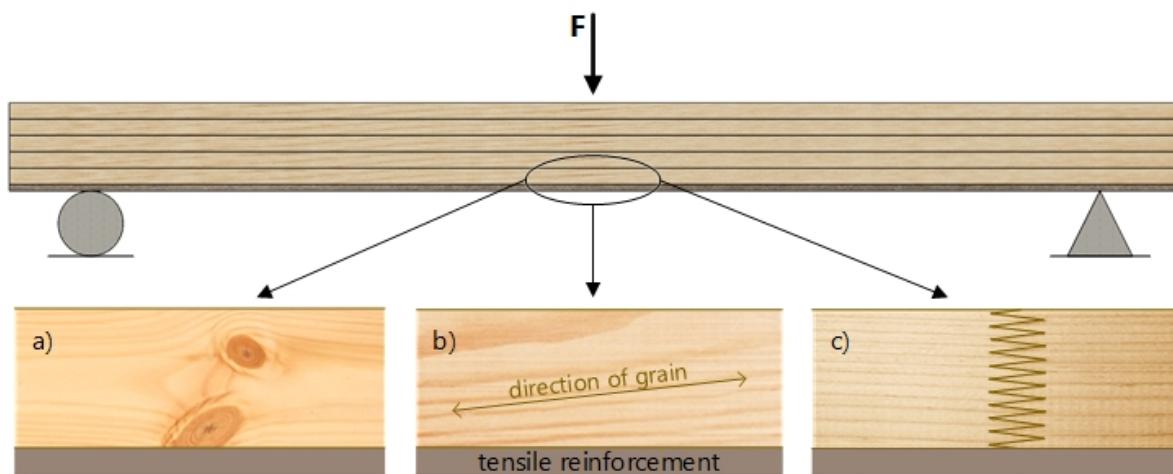


Abbildung 3: Überbrückungsfunktion einer Verstärkung bei einer Schwächung des Holzes eines auf Biegung belasteten Balkens auf der Zugseite: a) Äste, b) Schrägfaserigkeit, c) Keilzinken

Das sich ändernde globale Klima hat in den vergangenen Jahren zu heissen und trockenen Sommern geführt, was der wichtigsten Baumart für die Holzbaustoffe, der Fichte (*Picea abies*), stark zusetzt und diese anfällig für Schädlinge macht. Der massive Ausbruch von verschiedenen Borkenkäferarten ist zum Beispiel einer der Faktoren, die das Angebot und die Qualität des Fichtenholzes in Europa beeinflussen. Ist ein Baum befallen, kommt es bereits nach einem Jahr zu einer Abnahme der Zug- und Druckfestigkeit in den äusseren Schichten des Baumstamms (Bárta, Lukeš, and Homolová 2021). Unter normalen Bedingungen greifen Borkenkäfer nur schwache Bäume an, doch mit dem Klimawandel führen längere Trockenperioden dazu, dass die Bäume ein geschwächtes Abwehrsystem haben und es zu einem Massenbefall kommen kann. In absehbarer Zukunft ist daher mit einem erhöhten Aufkommen von Fichtenholz in geringerer Qualität und einer Verknappung an hochwertigem Holz zu rechnen. Dieses Phänomen steht dem erhöhten Bedarf an Bauholz in hoher Qualität gegenüber.

Abbildung 3 zeigt schematisch die Funktion einer Zugverstärkung zur Überbrückung von mechanischen Schwächungen auf der Zugseite eines Biegebalkens. Auf Biegung belastetes Massivholz versagt normalerweise auf Zug. Holzfehler und konstruktionsbedingten Schwachstellen können die

Tragfähigkeit von Biegebalken zusätzlich deutlich mindern. Ein durchgehendes Zugband mit konstanten mechanischen Eigenschaften kann zu einer Homogenisierung des Holzes und dessen Tragfähigkeit beitragen. Innerhalb dieses Projektes wurden Methoden untersucht, wie mit naturfaserbasierten Kompositen als Zugbewehrung die Leistungsfähigkeit von Holz mit geringerer Qualität und tieferen mechanischen Eigenschaften aufgewertet werden kann.

4.2 Einführung in Verbundwerkstoffe

4.2.1 Abkürzungen

Zum besseren Verständnis ist nachfolgend eine Liste von häufig verwendeten Abkürzungen in der Verbundwerkstoffindustrie aufgeführt:

- FRP Fiber Reinforced Polymers / Faserverstärkte Kunststoffe
- NFRP Natural Fiber Reinforced Polymers / Naturfaserverstärkte Kunststoffe
- CFRP Carbon Fiber Reinforced Polymers / Karbonfaserverstärkte Kunststoffe
- GFRP Glass Fiber Reinforced Polymers / Glasfaserverstärkte Kunststoffe
- VARTM Vacuum Assisted Resin Transfer Molding / Vakuum-Harzinfusion
- UD Unidirektional (Faserrichtung)

4.2.2 Verbundwerkstoffe

In Verbundwerkstoffen werden mindestens zwei verschiedene Materialien mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften kombiniert. Das Zusammenführen von zwei unterschiedlichen Materialien erlaubt es, Werkstoffe mit spezifischen Eigenschaften herzustellen, die sich von den ursprünglichen Materialien unterscheiden. Die Geometrie und die Anordnung der Materialien spielt dabei ebenfalls eine zentrale Rolle. Dieses Prinzip wird z.B. im Bauwesen bei Stahlbeton genutzt, wo Bewehrungsstahl mit seiner hohen Zugfestigkeit auf der Zugseite von Bauelementen, z.B. Decken, eingesetzt wird. Der Beton, welcher im Vergleich zur Druckfestigkeit eine tiefe Zugfestigkeit aufweist, wird nur auf Druck belastet. Daraus resultiert ein leistungsfähiger Kompositwerkstoff der die Vorteile beider Materialien ausnutzt.

Mit dem Ziel, die Festigkeit, Steifigkeit und das duktile Verhalten von Holz zu verbessern, wurde das Prinzip von Holz-Verbundwerkstoffen bereits seit den 1960er Jahren in Forschungsarbeiten untersucht. Dabei wurde Holz mit Stahl- und Aluminiumplatten (Silker 1962), (Borgin, Loedolff, and Saunders 1968) und Stahlstäben (Lantos 1970), (Dziuba 1985), (Bulleit, Sandberg, and Woods 1989) auf der Zugseite verstärkt. Obwohl erhöhte Biegefesteigkeiten und Steifigkeiten erreicht werden konnten, hat sich keine Form dieser Armierungen durchgesetzt. Dies hängt zum einen mit der zeitaufwendigen und komplizierten Applikation oder der mangelnden Zuverlässigkeit in Bezug auf die Langzeitleistung zusammen.

4.2.3 Faserverstärkte Kunststoffe (FRP)

Während das Konzept von Verbundwerkstoffen bereits seit mehreren Jahrtausenden existiert, ist die Verwendung von faserverstärkten Kunststoffen (FRP) weniger als ein Jahrhundert alt. Bei diesen Verbundmaterialien werden die Fasern mittels einer thermoplastischen oder duroplastischen Matrix gebunden. Die Matrix ist ein zäher, aber relativ schwacher Kunststoff, der durch festere und steifere Fasern verstärkt wird. Eine Verstärkung der Matrix liegt dann vor, wenn das FRP-Laminat eine erhöhte Festigkeit oder Elastizität im Vergleich zur Festigkeit und Elastizität der Matrix allein aufweist (Erhard 2006). In welchem Maße die Festigkeit und Elastizität eines FRP erhöht werden, hängt von den mechanischen Eigenschaften der Fasern und der Matrix, ihrem Volumen im Verhältnis zueinander sowie der Faserlänge und -ausrichtung innerhalb der Matrix ab (Smallman and Bishop 1999). Nur durch einen

optimalen Verbund der Matrix mit den Fasern kann die hohe Festigkeit und Steifigkeit der Fasern genutzt werden. Im Bauwesen werden dank der guten mechanischen Eigenschaften vorwiegend duroplastische Matrix-Materialien wie Epoxid- und Polyesterharze eingesetzt. Bei den Fasern gehören Glas aufgrund seines günstigen Preises und Kohlenstofffasern wegen der guten mechanischen Eigenschaften zu den am häufigsten eingesetzten Materialien. Für spezifische Anwendungen kommen auch Aramid-, Basalt- und Naturfasern zum Einsatz.

(Wangaard 1964) und (Theakston 1965) gehörten zu den ersten, welche FRP's in der Form von Glasfasern (GFRP) zur Verstärkung von Massivholz einsetzten. (Biblis 1965) nutzte GFRP-Lamine für Holzkern-Sandwichplatten und (Mitzner 1973) verstärkte erstmals Sperrholz mit GFRP's. 1993 setzten (Plevris, Triantafillou, and Member 1993) erstmals auch Karbonfaserverbundwerkstoffe (CFRP) zur Verstärkung von Holz in Biegeversuchen ein. Diese Studien an Holz und weitere Untersuchungen an Stahlbetonträgern, etwa von (Meier 1987) an der Empa und (Kaiser 1989) an der ETH haben gezeigt, dass FRP's mit unidirektional ausgerichteten Fasern ideal sind, um die Rolle der Zugbewehrung zu übernehmen und die Steifigkeitseigenschaften einer Struktur zu erhöhen. Seither wurden Untersuchungen von verschiedenen Wissenschaftlern mit Faserverbundwerkstoffen an Holz durchgeführt (Johns and Lacroix 2000), (Fiorelli and Dias 2003), (De La Rosa García, Escamilla, and Nieves González García 2013), (Subhani et al. 2017), (Blank 2018), (Bhat 2021) und es besteht ein breiter Konsens darüber, dass die Verstärkung in der Zug-Zone von Holzbalken die Tragfähigkeit, Steifigkeit und die Duktilität des Versagensmechanismus verbessert. (Johns and Lacroix 2000) kamen zum Schluss, dass die Eignung von FRP Verstärkungen die Holzfestigkeit zu erhöhen daran liegt, dass lokale Holzrisse überbrückt werden und (Svecova and Eden 2004) berichten von einem Homogenisierungseffekt der Ertüchtigung.

Heute werden in der Praxis vorwiegend CFRP-Lamine zur Ertüchtigung von Holztragwerken im Bestand eingesetzt. Der Einsatz von kohlefaser verstärkten Holzbauteilen für Neubauten konnte sich bisher nicht durchsetzen. Dies mag mit den hohen Kosten von Karbonfasern zusammenhängen, aber vor allem auch mit der Tatsache, dass synthetische Fasern aus Sicht der Nachhaltigkeit, Verarbeitbarkeit und Rezyklierbarkeit kein idealer Werkstoff in Kombination mit Holz sind. Karbonfasern werden aus Polyacrylnitril, einem Derivat von Erdöl, unter hohen Temperaturen von bis zu 1500°C hergestellt. Der Rohstoff Erdöl und der grosse Energieaufwand während dem Herstellungsprozess führen zu einem hohen Global Warming Potential (GWP). Für das Recycling von Karbonfaserverbundwerkstoffen gibt es zwar Lösungen, welche aber noch teuer und wenig verbreitet sind, weshalb viele Bauteile am Ende ihrer Nutzungsdauer in Mülldeponien landen. Naturfaserverstärkte Kunststoffe hingegen bieten viele Vorteile welche in den folgenden Kapiteln beschrieben sind.

4.2.4 Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFRP)

Pflanzenfasern von Hanf, Flachs und Jute wurden nachweislich schon seit mehreren tausend Jahren in Europa, Asien und Afrika zur Herstellung von Textilien, Schnüren, Netzen, etc. genutzt. In Europa findet Flachs in Anbaugebieten in Nordfrankreich, Belgien sowie auch in der Schweiz ideale Voraussetzungen zum Wachsen. Dies erlaubt einen schonenden Anbau mit minimalem Einsatz an Fungiziden und Pestiziden und ohne zusätzliches Bewässern. Der Flachsanbau konkurriert auch nicht mit der Nahrungsmittelproduktion, da Flachs dank der positiven Effekte auf den Boden oft als Rotationskultur angebaut wird. Das natürliche Wuchsgebiet und die verwurzelte Verarbeitungsindustrie in Zentraleuropa bieten zudem kurzmögliche Transportwege. Im Vergleich zu anderen Naturfasern gehören die mechanischen Eigenschaften von Flachs zu den Besten, was ideale Voraussetzungen für die Anwendung in Kompositen sind.

Ähnlich wie beim Holz erleben auch Naturfaserverbundwerkstoffe aktuell einen starken Aufschwung. Im letzten Jahrzehnt sind in Europa und den USA mehrere Firmen entstanden, die Naturfaser-Textilien speziell für die Anwendung in Kompositen entwickeln. Mit der Bcomp AG unterstützt der weltweite Marktführer in der Entwicklung und Implementation von Flachsfaser-Verstärkungen dieses Projekt. Diese sogenannten technischen Textilien weisen dank der optimierten Spinn- und Webetechniken deutlich bessere mechanische Eigenschaften in Kompositen auf als herkömmliche Textilien, welche anfänglich auch für Komposite eingesetzt wurden.

Die Verbindung von Holz, einem natürlichen Verbundwerkstoff der aus Zellulose, Hemicellulose und Lignin besteht, mit Flachsfasern ist naheliegend, da die Kombination von Holz mit Naturfasern als Verstärkungsmaterial mehrere Vorteile bietet:

- End-of-Life-Lösungen:
 - NFRP verstärktes Holz kann verbrannt werden, während für synthetische Fasern keine praktikable End-of-Life Lösung besteht und diese oft in Mülldeponien enden
 - NFRP verstärktes Holz kann nach Erreichen seiner Nutzungsdauer im Bauwesen zur Verarbeitung in Spanplatten recycelt werden
- Flachsfasern sind CO₂-negativ
- Die Bearbeitung von NFRP-Laminaten ist mit herkömmlichen Holzbearbeitungsmaschinen und Werkzeugen möglich
- Keine gesundheitlichen Risiken für den Menschen durch die Fasern beim Schneiden, Hobeln oder Schleifen von NFRP-Laminaten
- Kostenvorteil gegenüber Kohlenstofffasern
- Höhere Akzeptanz von naturfaserverstärktem Holz bei der verarbeitenden Industrie und den Kunden

Parallel zu den Anstrengungen biologische Fasern zu fördern, arbeiten namhafte Chemiekonzerne, Startups und Hochschulen daran, biobasierte Harzsysteme zu entwickeln. Kommerziell sind bereits einige Produkte erhältlich, die einen Bioanteil von maximal ca. 30% enthalten und eine gleichbleibende Leistungsfähigkeit bieten. Zu den leistungsfähigsten komplett biobasierten Harzen gehört Polyfurfuryl Alkohol (PFA). Diese Harze werden aus Furfural hergestellt, welches wiederum aus hemicellulosereichen landwirtschaftlichen Abfällen gewonnen wird. (Crossley, Schubel, and Stevenson 2014) testeten PFA-Harz in Kombination mit Glas- und Flachsfasern. Obwohl PFA in Kombination mit Glasfasern ebenbürtig mit Epoxidharz abschnitt, wiesen die Zugfestigkeit und der Zugmodul der PFA/Flachs-Kombination deutlich geringere Werte auf. Tests von Composites Evolution, einem PFA-Pregpreg-Hersteller, zeigten jedoch deutlich bessere mechanischen Eigenschaften. Bei diesen Tests war die Steifigkeit ca. 10 % geringer als bei einem Epoxidharz, während die Festigkeit rund 40 % tiefer lag.

In den letzten zehn Jahren haben eine Reihe von Forschern mit naturfaserverstärkten Polymeren zur Verstärkung von Massivholz und Holzprodukten experimentiert. (Speranzini and Tralascia 2010) führten 4-Punkt Biegeversuche an Weisstannen Massivholz durch welche sie mit NFRP, gefertigt aus Flachsfasern in einer Epoxidharzmatrix, auf der Zugseite verstärkten. Die NFRP bewehrten Proben wiesen eine um 24 % höhere Biegesteifigkeit und eine um 36 % höher Biegefestigkeit als die unverstärkten Proben auf. Im Vergleich zu den GFRP verstärkten Proben, welche einen um 25 % höheren E-Modul und eine 10 % höhere Festigkeit auswiesen, schnitten die NFRP Proben besser ab. Diese Resultate sind bemerkenswert da Flachsfasern eine tiefere Zugfestigkeit aufweisen als Glasfasern. Allerdings ist nicht bekannt wie die Fasern verarbeitet wurden und welche Menge an Fasern zu dieser Erhöhung der mechanischen Eigenschaften führte. (Borri, Corradi, and Speranzini 2013) testeten kleine, fehlerfrei Flachs-FRP verstärkte Biegebalken in 4-Punkt Biegeversuchen mit einer Spannweite von 1000 mm und verzeichneten eine 24 % Erhöhung des E-Modul und eine 35 % Erhöhung der Biegefestigkeit der

bewehrten gegenüber den unbewehrten Proben. Die Forscher berichteten ebenfalls von einem Homogenisierungseffekt der Faserverstärkung welcher vor allem einen positiven Effekt auf Proben mit Holzfehlern hatte. Biegeversuche an Flachs-FRP verstärktem Brettsperrholz von (Valdes et al. 2020) ergaben ähnliche Steigerungen in der Biegesteifigkeit im Vergleich zu unverstärkten Proben.

(Jorda et al. 2021) führten eine Reihe von Zug-, Zugscher- und Biegeprüfungen an selbst hergestelltem Buchenfurnier / Flachsfasern-Sperrholz durch. Für die Herstellung der Muster wurden unter anderem Epoxidharz, PUR und MUF Klebstoffe verwendet. Die Flachs-FRP Verstärkungen führten generell zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, wobei die Matrix aber eine signifikante Rolle spielte. Vor allem beim PUR-Klebstoff im Zusammenspiel mit den Flachsfasern konnte ein Zusammenhang zwischen der Feuchte und den mechanischen Eigenschaften festgestellt werden. Die Forscher glauben, dass das schlechtere Abschneiden beim PUR Klebstoff auch auf Probleme beim Klebstoffauftrag während des Herstellungsprozesses hindeuten kann und empfehlen weitere Tests durchzuführen. Klebstoffe auf Polyurethanbasis werden aufgrund ihrer ausgezeichneten Haftfestigkeit, der schnellen Aushärtung und Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse für eine Vielzahl von Anwendungen verwendet (Dodangeh et al. 2020). Außerdem haben mehrere Studien bewiesen, dass Polyurethan-Klebstoffe die Leistung von Epoxidharzen in Bezug auf quasistatische, dynamische, schlagartige und zyklische Belastung übertreffen. Dazu kommen die geringeren Kosten von Polyurethan-Klebstoffen im Vergleich zu Epoxidharzen (Somarathna et al. 2018). Deshalb wurde in diesem Projekt ebenfalls ein PUR-Leim zum direkten Vergleich getestet.

4.2.5 Herstellungsverfahren von faserverstärkten Kunststoffen

Verstärkungsfasern können entweder trocken oder als Laminat mit einem Brettschichtholzträger verklebt werden. Wird mit trockenen Fasern gearbeitet können diese direkt zwischen zwei Holzlamellen verklebt werden wie in Abbildung 4 a) dargestellt. Lamine hingegen können zwischen, aber auch auf die Unterseite einer Lamelle geklebt werden wie in Abbildung 4 b) gezeigt.

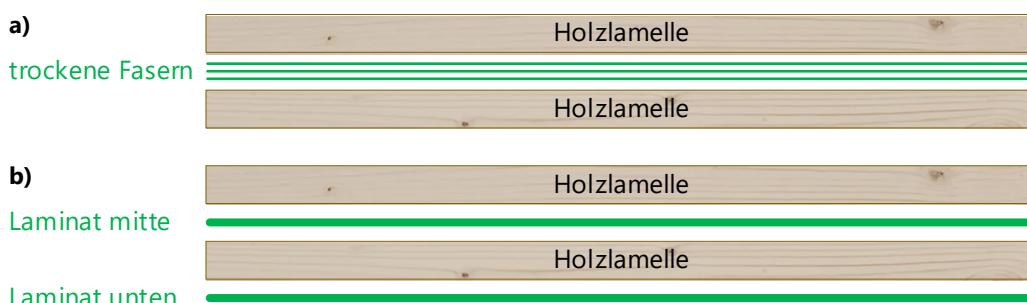


Abbildung 4: Anwendung von trockenen und laminierten Fasern in Verbindung mit einem Brettschichtholzträger

Die Lamine können mittels verschiedener Produktionsmethoden hergestellt werden. Bei der Handlaminierung (Abbildung 5, a) werden die trockenen Textilien in eine Form gelegt und mittels einer Rolle oder Spachtels manuell mit Harz getränkt. Die benötigte Anzahl Lagen werden nacheinander aufeinandergelegt bis das finale Layup komplett ist. Nach dem Aushärten kann das Teil aus der Form gelöst werden. Bei flachen Lamineaten kann das Teil auch in einer Presse ausgehärtet werden um die Lagen zu kompaktieren, wie dies oft z.B. bei der Skiproduktion der Fall ist.

Bei der Vakuum-Infusion (Abbildung 5, b) wird das komplette Layup ebenfalls mit trockenen Fasern aufgebaut und dann mit den nötigen Fliesshilfen, Harz- und Vakuumleitungen bestückt bevor das Ganze mit einem Vakuumsack mittels speziellem doppelseitigem Klebeband luftdicht abgeschlossen wird. Dann wird ein Vakuum gezogen und das Harz aufgrund des Druckunterschieds durch die trockenen Fasern gezogen, welche im Prozess benetzt werden. Wenn die nötige Harzmenge eingeflossen ist

werden die Zu- und Ableitung abgeklemmt bis das Teil ausgehärtet ist und das Verbrauchsmaterial beseitigt werden kann.

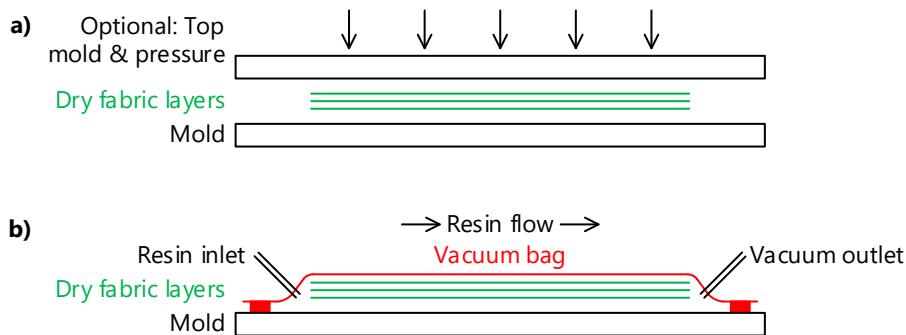


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Herstellungsprozesse: a) Handlaminat,
b) Vakuum-Infusion

Basierend auf der Produktionsmethode enthalten Naturfaserlaminate einen tieferen oder höheren Faseranteil. Dies hängt damit zusammen, dass Naturfasern im Gegensatz zu synthetischen Fasern radial elastisch und auch nicht gleich geschmeidig sind und sich daher ohne Druck nur schwierig kompaktieren lassen. Dies führt dazu, dass der Faseranteil vor allem bei von Hand laminierten Teilen deutlich geringer ausfällt. Wird das Gelege aber mittels Vakuum, einer Presse oder in einem Autoklav kompaktiert, kann ein deutlich höherer Faseranteil und dadurch bessere Festigkeits- und Steifigkeitswerte erreicht werden.

5 Material & Methoden

5.1 Methodik

Aufbauend auf den Vorversuchen wurden im ersten Schritt verschiedene Klebstoffe mit den Flachsfaser-Textilien zu Laminaten verarbeitet und mittels mechanischer Materialprüfungen getestet. In einem zweiten Schritt wurden die trockenen Flachfasern und die vorgefertigten Laminate im Verbund mit Holz als Trägermaterial getestet. Die Materialkenndaten der vielversprechendsten Kombinationen dienten als Grundlage für ein Finite-Elemente-Modell, mit dem der Verstärkungs- und Homogenisierungseffekt simuliert werden konnte, um das Potential eines NFRP-Holz-Verbundes aufzuzeigen.

Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften und der Leistungsfähigkeit der NFRP-Verstärkungen in Biegebalken wurden statische und dynamische Biegeprüfungen durchgeführt. Als Vergleichswerte wurden die Holz- / NFRP-Prüfkörper mit Proben verglichen, die mit synthetischen Fasern verstärkt wurden.

Die nachfolgend beschriebenen Arbeitspakete wurden wie in Abbildung 6 dargestellt, durchgeführt.

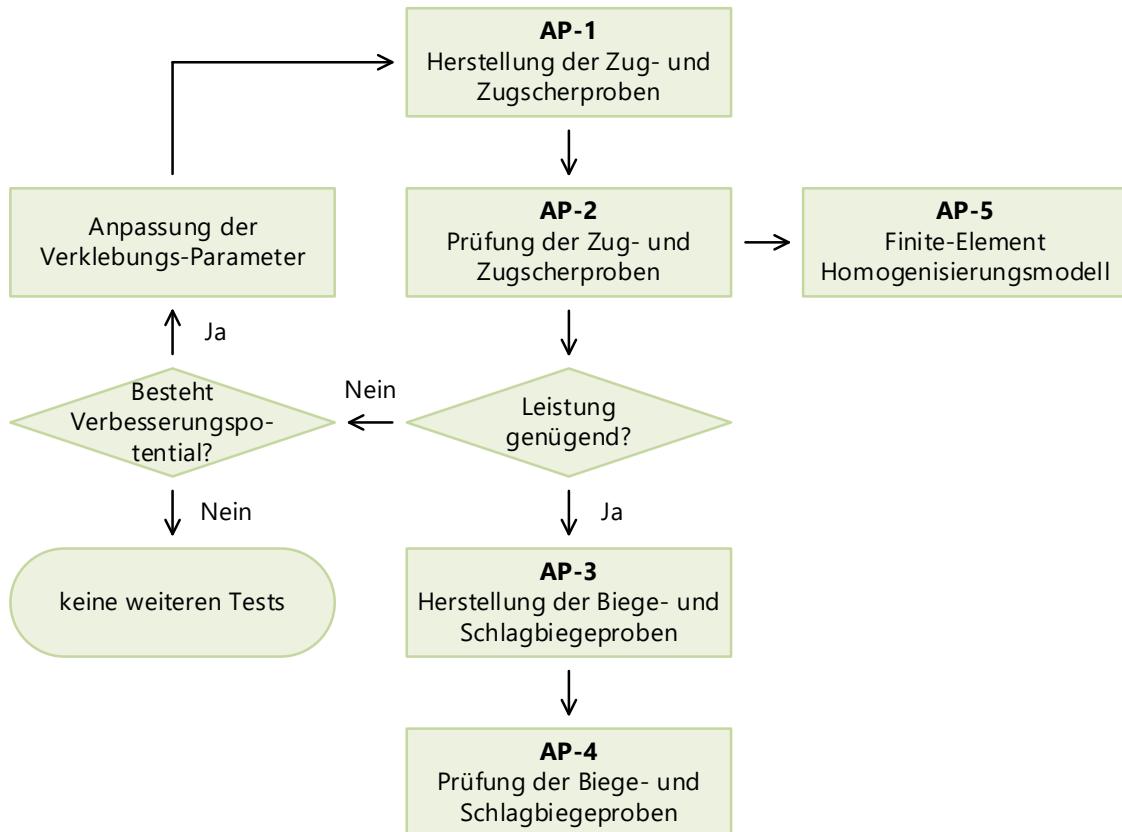


Abbildung 6: Projekt-Arbeitsplan

Die Probenherstellung für die Zug- und Zugscherproben bzw. die Biegeproben wurde in zwei Arbeitspakete aufgeteilt. Da PUR- und MUF-Klebstoffe nicht für das Verkleben von Fasern entwickelt wurden, war es möglich, dass beim Laminieren von Hand eine mangelhafte Faserbenetzung und dadurch ein ungenügender Faser-/Matrix-Verbund entstand. Wo dies der Fall war, wurden diese Klebstoffe für die Handlaminat-Versuche im AP-3 & 4 nicht weiter berücksichtigt. Von den Epoxy- und PFA-Proben wurden gute Resultate erwartet, und diese Klebstoffe wurden auf jeden Fall für die Herstellung der Biege- und Schlagbiegeproben verwendet. Die folgenden Prüfmaschinen und -Normen kamen zum Einsatz:

Zugversuche & Zugscherversuche

- Universalprüfmaschine ZwickRoell Z100
- Normen:
 - Zugversuche
 - DIN EN ISO 527-5: 2021
 - Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 5
 - Prüfbedingungen für unidirektionale faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe
 - Zugscherversuche
 - DIN EN 302-1: 2013
 - Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Prüfverfahren
 - Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit

4-Punkt Biegeversuche & Schlagbiegeversuche

- Universalprüfmaschine ZwickRoell Z100

- Pendelschlagwerk Wolpert PW15
- Normen:
 - 4-Punkt Biegeversuche
DIN 52186:1978
Prüfung von Holz: Biegeversuch
 - Schlagbiegeversuche
DIN 52189:1981
Schlagbiegeversuch
Bestimmung der Bruchschlagarbeit

5.2 Materialien und Prüfkörper

Als Naturfaserverstärkung für die Prüfkörper kam das unidirektionale (UD) Flachsfasertextil ampliTEx™ #5025 mit einem Flächengewicht von 280 g/m² der Bcomp AG zum Einsatz, wie in Abbildung 7 A) in trockener (unten) und laminierter (oben) Form dargestellt. Die synthetischen Glas- und Karbonfasern waren in 300 g/m² Flächengewicht als Trägermaterial wurde Fichten-Furnierschichtholz verwendet, wie dargestellt in Abbildung 7 B). Durch die konstanteren mechanischen Eigenschaften konnten die natürlichen Schwankungen von Massivholz eliminiert und der Einfluss der FRP-Verstärkungen besser gemessen werden.

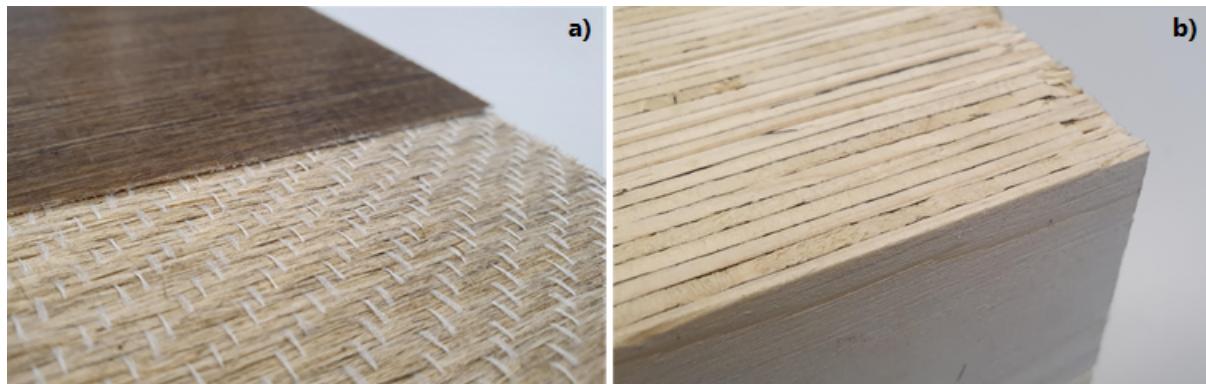


Abbildung 7: a) Unidirektionale Flachsfasertextilien (ampliTEx™ #5025) oben: laminiert, unten: trocken, b) Furnierschichtholz Fichte

Als Klebstoffe, bzw. Matrix kamen ein Epoxidharz, ein biobasiertes Polyfurfuryl-Alkohol (PFA) Harz, ein Leim auf Polyurethan-Basis (PUR) und ein Melamin Harnstoff Formaldehyd (MUF) Klebstoff zum Einsatz wie in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Übersicht der Klebstoffe/Matrix und der entsprechenden Verarbeitungsmethoden

Matrix / Klebstoff	Handlaminat	VARTM
PUR – Loctite HB S709 Purbond, Henkel	x	
MUF – Prefere 4543 mit Härter 5035	x	
Epoxidharz – R&G Epoxidharz-L mit Härter GL-2	x	x
PFA-Harz – Transfurans Biorez	x	x

Die Produktionsschritte des Handlaminierens unterschieden sich von der VARTM- Produktion dadurch, dass beim Handlaminieren die trockenen Fasern direkt zwischen zwei Holzlamellen geklebt werden konnten. Beim VARTM-Prozessen wurde zunächst ein Laminat hergestellt, das erst in einem zweiten

Schritt mit den Holzlamellen verklebt werden konnte. Zudem war bei der Vakuum-Infusion die Harzmenge aufgrund des Prozessdrucks vorgegeben, während für das Handlaminat Erfahrungswerte für die Harzaufnahme der entsprechenden Fasern mit einem Klebstoff erforderlich waren. Für die PUR und MUF Klebstoffe wurden deshalb im Rahmen von Arbeitspaket 1 Vorversuche durchgeführt, um die nötige Menge Leim zu Bestimmen. (Jorda et al. 2021) gaben die Leimmengen an welche sie für ihre Versuche benutztten. Diese Werte dienten zusammen mit den Herstellerangaben als Anhaltspunkte.

Das PFA-Harz von Transfurans sollte die Leistungsfähigkeit von Naturfasern mit einer komplett biobasierten Matrix aufzeigen. Diese Resultate sollten auch als Vergleich zu den Werten von (Crossley et al. 2014) dienen, welche bei ihren Untersuchungen einen ungenügenden Faser/Matrix Verbund feststellten.

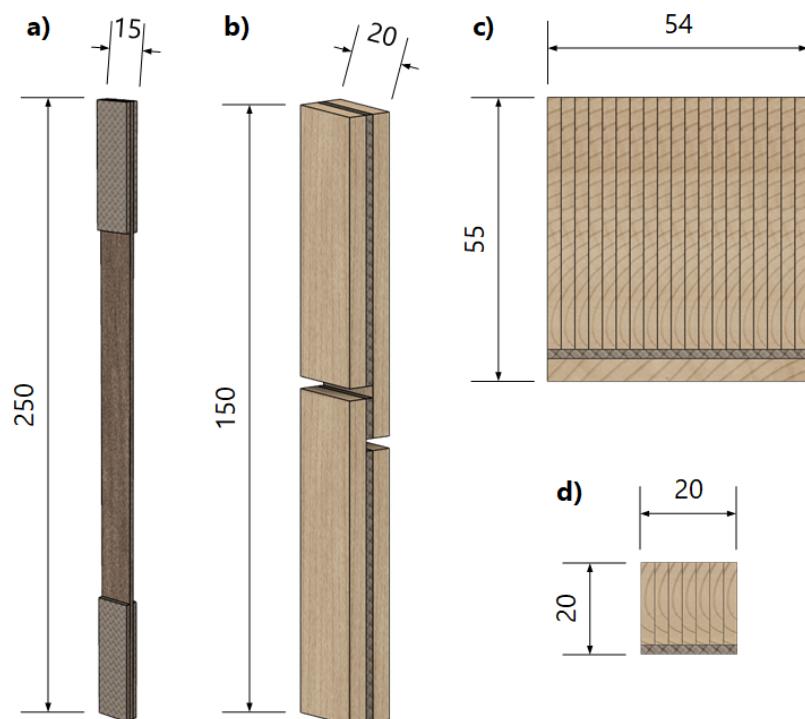


Abbildung 8: Übersicht der Prüfkörper für die a) Zugprüfung, b) Zugscherprüfung, und Querschnitte für die c) Biegeprüfung und d) Schlagbiegeprüfung

Für die Zugprüfungen der Arbeitspakete 1 & 2, gem. Abbildung 8 a) und DIN EN ISO 527 (Deutsche Norm 2010), wurden Flachsfaserlaminate mit den verschiedenen Matrixsystemen aus Tabelle 1 hergestellt, geprüft und verglichen. Für die Prüfkörper der Zugscherprüfungen gem. Abbildung 8 b) und in Anlehnung an DIN EN 302-1 (Deutsche Norm 2013) wurden die NFRP's unter Anwendung der jeweiligen Produktionsmethode zwischen zwei 5mm dicke Buchenholz-Platten geklebt. Die Prüfkörper für die Biegeprüfungen gem. DIN 52186 (Deutsche Norm 1978) und die Schlagbiegeprüfungen gem. DIN 52189 (Deutsche Norm 1981) wurden in (Abbildung 8, c) und (Abbildung 8, d) dargestellt und innerhalb des Arbeitspakets 4 getestet. Wo nicht anders vermerkt, wurden alle Proben, ob Laminate oder Laminat-/ Holzproben, bei einem Klima von 20°C / 65 % rH konditioniert und getestet. Die trockenen Flachsfasern wurden vor der Imprägnation mit PUR und MUF im gleichen Klima gelagert. Vor der Imprägnation mit EPO und PFA wurden die trockenen Fasern im 20°C / 35 % rH Klima konditioniert.

6 Ergebnisse

6.1 AP-1: Prüfkörperherstellung für Zug- und Zugscherversuche

Innerhalb des Arbeitspakets 1 wurden die Zug- und Zugscherprüfkörper hergestellt. Am 18.11.2022 fand dazu ein erstes Projektmeeting mit Dr. Yann Lebaupin, Forschungs & Entwicklungingenieur bei Bcomp AG in Fribourg statt, um die Versuchsaufbauten und den Materialbedarf zu planen. Dabei wurden die Tests wie folgt definiert:

- Flachfasern: ampliTEx™ #5025 – Unidirektional, 280 g/m²
- Matrix/Klebstoff: Polyurethan (PUR), Melamin Urea Formaldehyde (MUF), Epoxidharz (EPO), Polyfurfuryl-Alkohol (PFA)
- Verarbeitung: Handlaminat gepresst bei 1 MPa, Vakuum Infusion (VARTM)

In ersten Versuchen mit Handlaminieren und anschliessendem Pressen konnten gute Laminatqualitäten und hohe Faseranteile erreicht werden. Das VARTM-Verfahren konnte nur mit Epoxidharz angewendet werden, da die Viskosität des PFA sowie von PUR und MUF für diese Herstellungsmethode zu hoch war. Das Laminieren von Hand wurde mit einem Spachtel durchgeführt, was es ermöglichte, auch Klebstoffe mit höherer Viskosität ausreichend in das Gewebe einzuarbeiten, um eine ausreichende Benetzung der Fasern zu erreichen. Der Pressdruck von 1 MPa entsprach einem gängigen Wert für strukturelle Holzverklebungen, weshalb derselbe Pressdruck für die Herstellung der Laminate gewählt wurde. Nur ein Versuch wurde mit Epoxy beim doppelten Pressdruck von 2 MPa durchgeführt.

Bei Faserverbundwerkstoffen wird generell ein möglichst hoher Faseranteil angestrebt, weil dadurch die mechanischen Eigenschaften und die Kosten optimiert werden können. Die erreichten Fasergewichtsanteile (Fiber Weight Fraction - FWF) und entsprechenden Faservolumenanteile (Fiber Volume Fraction - FVF) aller produzierten Laminate sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Übersicht der Fasergewichtsanteile (FWF) und der entsprechenden Faservolumenanteile (FVF) abhängig von den verschiedenen Matrix-Materialien

Matrix	FWF	FVF
	%	%
PUR	56.0	49.6
PUR (10% DGDE)	61.7	55.5
MUF	54.9	49.9
MUF (10% MET)	56.2	51.3
Epoxy	62.2	56.4
Epoxy (2 MPa)	63.6	59.0
Epoxy (infused)	49.7	43.3
PFA	66.6	57.2
PFA (lowest)	55.4	45.4
PFA (highest)	71.7	62.9

Mit Ausnahme des Laminats "Epoxy infused", das mit dem VARTM-Prozess hergestellt wurde, wurden alle Laminate in der Presse mit einem Druck von 1 MPa verpresst. Ein Laminat (Epoxy 2 MPa) wurde mit dem doppelten Druck verpresst, um den Einfluss auf die FWF zu ermitteln. Die höhere Viskosität der PUR- und MUF-Klebstoffe im Vergleich zur Epoxy- und PFA-Matrix machte eine vollständige Imprägnation der Fasern schwieriger. Deshalb wurden Varianten beider Laminate mit jeweils 10 % Lösungsmittel verdünnten Leimen hergestellt. Für den PUR-Klebstoff wurde Diethylene Glycol Dimethyl

Ether (DGDE) und für den MUF Methanol (MET) verwendet. Im Falle von PUR konnte der Fasergewichtsanteil dadurch um 5.7 % erhöht werden, während beim MUF eine Erhöhung um 1.3 % erreicht wurde.

Der Faseranteil des PFA schwankte stark, abhängig von der Temperatur und den Pressparametern. Die optimalen Herstellungsparameter führten zu einem Fasergewichtsanteil von 66.6 %. Bei diesen Laminaten waren der E-Modul und die Festigkeit am ausgewogensten.

6.2 AP-2: Zug- und Zugscherversuche

Innerhalb des Arbeitspakets 2 wurden die mechanischen Prüfungen mit den Prüfkörpern, welche im Arbeitspaket 1 hergestellt wurden, durchgeführt und die Ergebnisse analysiert. Die Versuche erfolgten in Anlehnung an die aufgeführten Normen. Die Resultate aus AP-2 dienten als Grundlage für die Prüfkörper-Produktion und die Tests im AP-3 und AP-4. Zudem lieferten sie die Materialkennwerte für das Finite-Element-Modell im AP-5.

6.2.1 Zugprüfung

Die Resultate der Zugversuche an den verschiedenen Laminaten sind in Abbildung 9 dargestellt. Die Eigenschaften von mit Epoxidharz gebundenen Flachfasern sind am besten bekannt und dienten als Referenz. Das in der Presse hergestellte Epoxy Laminat erzielte einen E-Modul von 22.7 GPa und mit 344 MPa die höchste Festigkeit. Interessanterweise erzielte das durch Vakuum-Infusion hergestellte Laminat den gleichen E-Modul bei einer geringeren Festigkeit von 286 MPa. Dies lag möglicherweise an der besseren Benetzung der Fasern beim VARTM Verfahren.

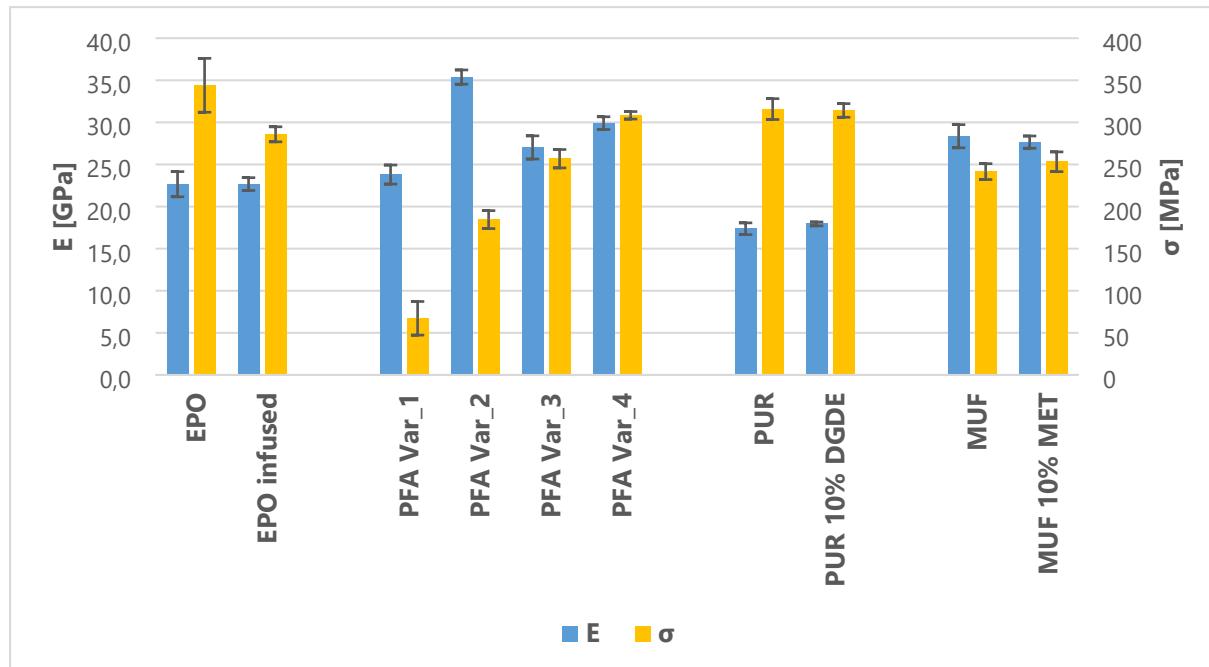


Abbildung 9: Steifigkeit und Festigkeit einer Auswahl der hergestellten Lamine

Bei der PFA-Matrix hatten die Herstellungsparameter, wie in Arbeitspaket-1 beschrieben, einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Lamine. PFA Var_1 bis Var_3 zeigen einige der gemessenen Steifigkeiten und Festigkeiten bei unterschiedlichen Produktionsparametern. Das PFA-Laminat Var_4 erzielte die optimale Balance zwischen einer hohen Steifigkeit von 29.9 GPa und einer Festigkeit von 308 MPa. Zwar war der E-Modul von Var_2 mit 35.4 GPa um 18.4 % höher, allerdings

bei einer Reduktion der Festigkeit um 39.9 %, was ein spröderes Bruchverhalten des Laminates zur Folge hatte.

Die PUR- und MUF-Holzklebstoffe wurden in ihrer ursprünglichen Form und jeweils 10 % verdünnt getestet. Obwohl die Flachsfasern, wie in Arbeitspaket-1 beschrieben, in verdünnter Form einfacher imprägniert werden konnten und eine höhere FWF erreicht werden konnte, führte dies zu keiner messbaren Steigerung der mechanischen Eigenschaften. Deshalb wurden die Klebstoffe für die weiteren Tests unverdünnt eingesetzt.

Die gemessenen Steifigkeiten und Festigkeiten der Lamine, hergestellt mit beiden Matrix-Materialien und Klebstoffen, übertrafen die in der Literatur beschriebenen Werte deutlich. (Crossley et al. 2014) massen Zugsteifigkeiten von 8.8 GPa für Flachs/EPO- und 5.6 GPa für Flachs/PFA-Lamine und Zugfestigkeiten von 168 MPa für Flachs/EPO- und 41 MPa für Flachs/PFA-Lamine. Diese Lamine wurden mittels Vakuum-Infusion hergestellt und wiesen eine FWF von 30 % und 31.5 % auf. Alle Angaben liegen deutlich unter den in diesem Projekt gemessenen Werten. Die Bcomp AG gibt im technischen Datenblatt einen Wert von 32.1 GPa für die Zugsteifigkeit und 394 MPa für die Zugfestigkeit bei einer FVF von 54 % für Flax/EPO-Lamine an. Diese Werte liegen leicht über den in diesem Projekt gemessenen Werten, allerdings wurden die Bcomp-Lamine mittels Vakuum-Infusion imprägniert und anschliessend bei 6 Bar gepresst. Die Imprägnation der Fasern mag dadurch besser sein als beim manuellen Harzauftrag wie in diesem Projekt.

(Jorda et al. 2021) berichteten von einer Reduktion der Zugfestigkeit von Flachs/PUR verstärktem Buchen-Sperrholz. Allerdings wurden die trockenen Flachsfasern mit einem Flächengewicht von 200 g/m² mit beidseitig nur 150 g/m² PUR-Klebstoff zwischen die Fülllagen geklebt, was wahrscheinlich zu einer ungenügenden Beleimung und verhungerten Klebstofffugen führte.

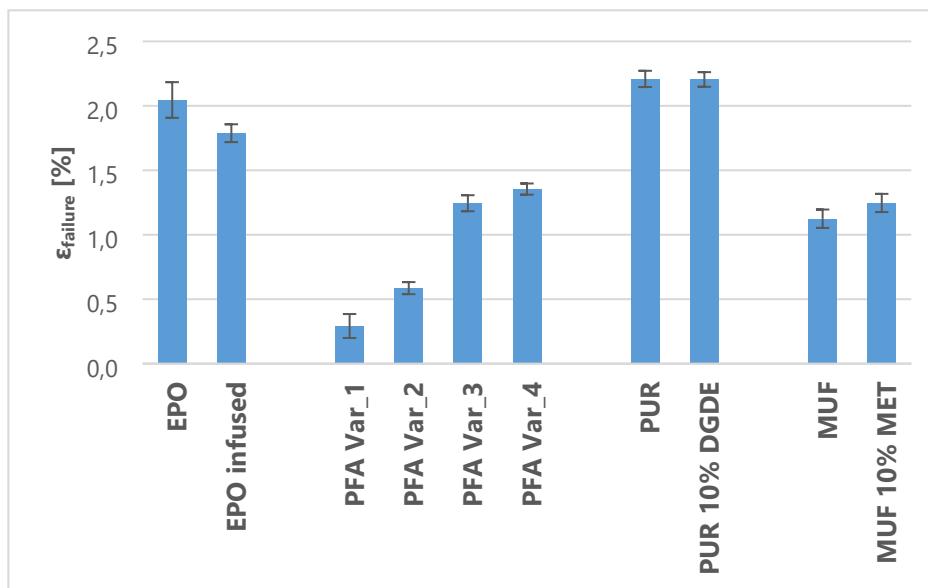


Abbildung 10: Bruchdehnungen aller gemessenen Proben

Die Bruchdehnung ($\varepsilon_{failure}$) der gemessenen Proben ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Werte der PUR-(2.21 %) und der EPO-Proben (2.05 %) lagen deutlich über denen der PFA Var_4- (1.35 %) und MUF-Proben (1.12 %). Bei den PUR- und MUF-Prüfkörpern hatten auch die Zugabe von DGDE und MET keinen signifikanten Einfluss auf die Bruchdehnung. Die durch Vakuum-Infusion hergestellten EPO-Muster wiesen eine um 13 % tiefere Bruchdehnung gegenüber den in der Presse hergestellten Proben auf. Am deutlichsten waren die Unterschiede allerdings bei den PFA-Mustern. Die verschiedenen Herstellungs-Parameter wiesen Werte von 0.29 % für Var_1 bis 1.35 % für Var_4 auf. Auch bei der Bruchdehnung zeigt

sich, dass die gewählte Var_4 die grösste Flexibilität und damit die besten Eigenschaften als Verstärkungslaminat aufweist. PFA Var_2 wies zwar den höchsten E-Modul auf, allerding bei einem deutlich spröderen Bruchverhalten.

Um den Einfluss der Feuchtigkeit auf die Laminate zu Testen wurde eine Serie von Epoxidharz- und PFA gebundenen Mustern in drei verschiedenen Klimas (35 %, 65 %, 85 % bei 20°C) bis zur Ausgleichsfeuchte gelagert und im gleichen Zug-Testsetup getestet. Die Resultate sind in Abbildung 11 dargestellt. Bei beiden Matrix-Systemen konnte eine Reduktion des E-Moduls festgestellt werden, während die Festigkeiten gleichblieben, oder im Falle der Epoxy-Laminate, einen leichten Anstieg zeigten.

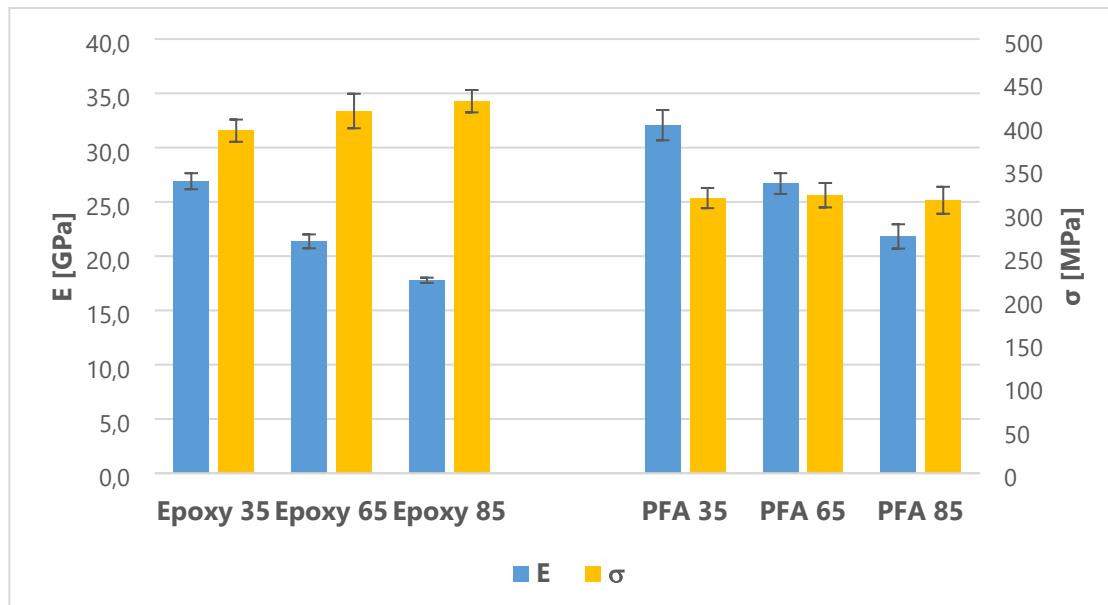


Abbildung 11: Feuchteabhängiges Verhalten von Epoxy- und PFA-Laminaten. 35, 65 und 85 stehen für die relative Luftfeuchte, bei der die Lamine konditioniert wurden

In Abbildung 12 ist die lineare Abnahme des E-Moduls der Lamine mit steigender Feuchtigkeit dargestellt. Zum Vergleich ist in Grau das Verhalten von Fichtenholz, basierend auf Literaturwerten, abgebildet. Während bei Fichtenholz bei einer Feuchtezunahme von 35 % auf 85 % der E-Modul um 16 % sinkt, ist der Einfluss der Feuchte auf die Epoxy- und PFA-gebundenen Flachsfaserlaminate mit einer Reduktion von 32 % und 34 % deutlich stärker. Deshalb wurde der Feuchteinfluss auch im Rahmen der Biegeversuche in AP-4 nochmals untersucht.

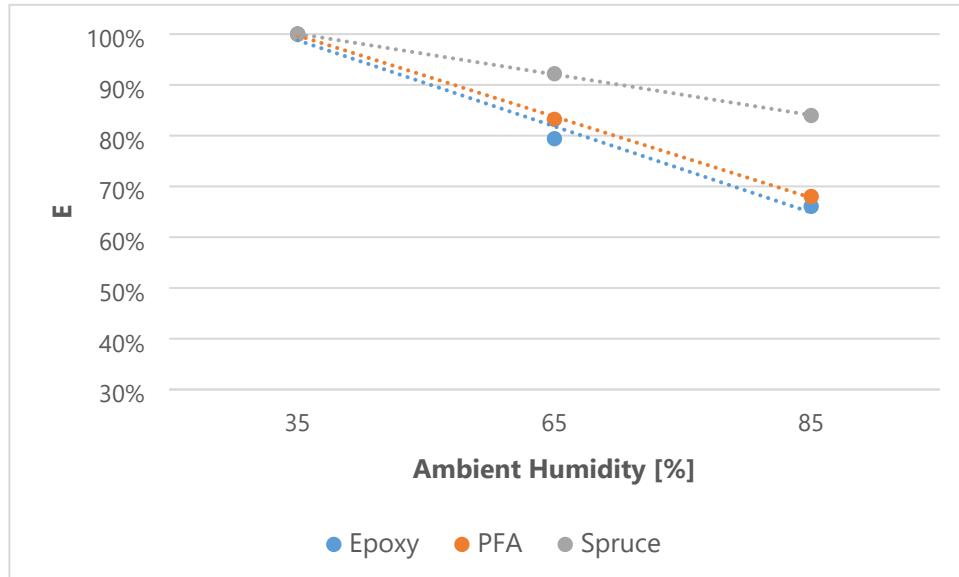


Abbildung 12: Feuchteabhängige relative Änderung der Steifigkeit von den Epoxy & PFA Laminaten im Vergleich zu Fichtenholz

6.2.2 Zugscherprüfung

In Abbildung 13 sind die Resultate der Zugscherfestigkeit (Tensile Shear Strength - TSS), des Holzbruchanteils (Wood Fracture - WF) und des interlaminaren Schubversagens (Interlaminar Shear Failure - ILSF) aller durchgeführten Zugscherversuche dargestellt. Es wurden Laminate sowie auch trockene Fasern zwischen die Trägerplatten verklebt. Die mit PUR und MUF verklebten Prüfkörper ergaben eine deutlich höhere Zugscherfestigkeit als die mit Epoxidharz (EPO) verklebten Muster. Der Holzbruchanteil war bei den mit MUF verklebten Mustern am höchsten, gefolgt vom PUR und dem Epoxy. Nur bei den mit MUF trocken verklebten Flachfasern wurde ein signifikantes interlaminares Schubversagen festgestellt, welches, wie beschrieben, mit der hohen Viskosität des Klebstoffes und der dadurch schwierigeren Imprägnierbarkeit der Fasern zusammenhing.

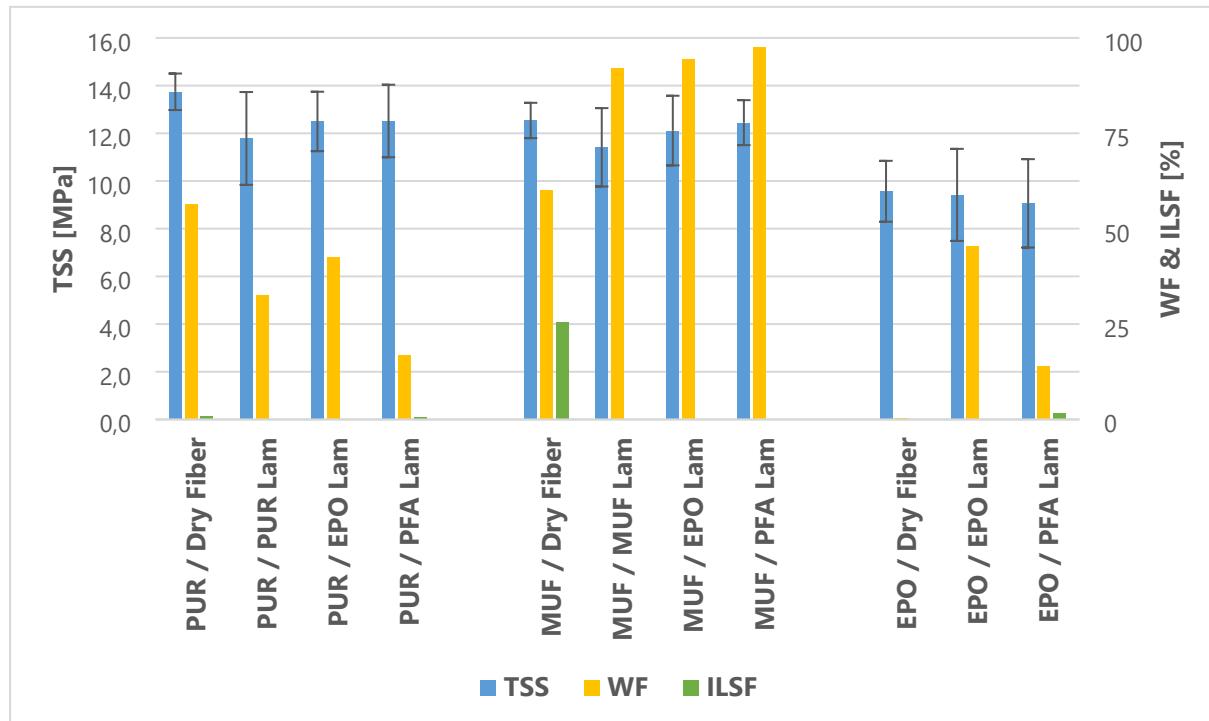


Abbildung 13: Zugscherfestigkeit (TSS), Holzbruchanteil (WF) und interlaminares Schubversagen (ILSF) aller durchgeföhrten Zugscherversuche

Der Grund für das im Vergleich schlechte Abschneiden der Epoxy-Prüfkörper hing mit grosser Wahrscheinlichkeit mit der niedrigeren Viskosität des Epoxidharzes zusammen. Der Epoxy drang sehr schnell ins Buchenholz ein, was zu einer verhungerten Klebstoff-Fuge und ungenügender Adhäsion zu den Trägerplatten führte. Epoxy wurde daher für die folgenden Biege- und Schlagbiegeprüfungen nicht mehr als Klebstoff verwendet. PFA konnte als Klebstoff nicht eingesetzt werden, da es zum Aushärten Hitze benötigt, die bei grösseren Holzdicken nicht innerhalb nützlicher Zeit über die Heizplatten bis zur Klebstoff-Fuge vordringen könnte.

In Abbildung 14 sind die Scherflächen einiger ausgewählter Prüfkörperserien abgebildet, die die verschiedenen Versagensarten zeigen. Die Kombination von Epoxy mit trockenen Flachfasern zeigt, dass diese Verklebung fast ausschliesslich zu Adhäsionsversagen führte, während das mit MUF verklebte PFA-Laminat fast durchwegs zu Holzbruch führte. Die Kombination von MUF-Klebstoff mit trockenen Flachfasern zeigte mit 25.5 % das höchste interlaminare Schubversagen.



Abbildung 14: Ausgewählte Prüfkörper nach dem Zugscherversuch mit typischem Adhäsionsversagen (oben), hohem Holzbruchanteil (mittig) und einer Mischung aus Holzbruch und interlaminarem Schubversagen (unten)

Als positiv ist zu bewerten, dass die Schubfestigkeit der Lamine die Schubfestigkeit des Holzes durchgehend übertrifft und eine mögliche Laminat-Lage keine Schwachstelle in einem mit Naturfasern verstärkten Holzbalken darstellt.

6.3 AP-3: Prüfkörperherstellung für 4-Punkt Biege- und Schlagbiegeversuche

Zur Vorbereitung der Arbeiten innerhalb der Arbeitspakete 3 & 4, fand am 26. Juni 2023 ein Projektmeeting mit Jörg Langheim (CEO) und Markus Fuhrer (CTO) der Balteschwiler AG statt. Dabei wurden die Produktionsmethoden, das Vorspannen der Lamine und der Materialbedarf besprochen. Basierend auf dieser Besprechung und den Erkenntnissen und Ergebnissen aus den zwei vorangegangenen Arbeitspaketen wurden im Arbeitspaket 3 die Prüfkörper für die 4-Punkt Biege- und Schlagbiegeversuche hergestellt.

6.3.1 Prüfkörperherstellung für die 4-Punkt Biegeversuche

Für die 4-Punkt Biegeversuche wurden Prüfkörper hergestellt um den Einfluss der Leime und Matrix, der Holzfeuchte, der Laminatdicke, des Vorspannens und den Vergleich mit Glas- und Karbonfaserverstärkten Lamine zu untersuchen. Insgesamt wurden, ohne Vorversuche, 192 Prüfkörper hergestellt. Um eine Effiziente Herstellung zu gewährleisten wurden das LVL-Trägermaterial zu Platten verklebt welche die Länge der Prüfkörper aufwiesen und in der Breite das Zuschneiden von sieben Biegeproben ermöglichten. Für die Herstellung der Epoxidharz-Lamine und zum Verkleben der Lamine auf die LVL Platten wurde eine 600 kN Presse verwendet. Da die beheizbare Presse an der Empa für die Herstellung der PFA-Lamine zu klein war, konnte eine beheizbare Presse der ETH Gruppe "Wood Materials Science" benutzt werden, die die erforderliche Größe aufwies. Es wurden die gleichen Produktionsparameter wie zur Herstellung der Proben für die Zug- und Zugscherversuche verwendet. Alle Proben wurden bei 20°C / 65 % rH konditioniert. Für die Proben, bei denen der Einfluss der Holzfeuchte untersucht wurde, wurden zusätzliche Prüfkörper in jeweils einem Klimaraum mit 35 % und 85 % Luftfeuchte konditioniert. Die LVL-Platten, die Lamine, und wo zutreffend auch die trockenen Fasern, wurden vor der Probenherstellung bis zur Ausgleichsfeuchte im jeweiligen Klima gelagert. Nach

dem Verkleben lagerten die Prüfkörper mindestens 8 Wochen im jeweiligen Klimaraum, bevor sie getestet wurden.

Einfluss der Holzfeuchte

Es wurden Lamine mit Epoxidharz und PFA Matrix hergestellt, die jeweils mit MUF und PUR Klebstoffen auf die LVL-Trägerplatten aufgeleimt wurden. Es wurden 21 Prüfkörper pro Variant produziert, wovon jeweils sieben bei 35 %, 65 % und 85 % Luftfeuchte bei 20 °C konditioniert wurden, um den Einfluss der Feuchte zu messen.

Einfluss der Laminatdicke

Basierend auf den Vorversuchen wurde ein Standard-Laminat mit 560 g/m² (2 Lagen à 280 g/m²) Flachsfasern gewählt, da bei dieser Verstärkung eine deutlichere plastische Verformung stattfand, die Verstärkung jedoch letztendlich versagte. Zum Vergleich wurden auch Prüfkörper mit einer Laminatdicke von 840 g/m² (3 Lagen à 280 g/m²) hergestellt, um eine potentielle Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und der Homogenisierung zu untersuchen. Während Prüfkörper mit Epoxidharz und PFA Matrix hergestellt wurden, wurde bei den Klebstoffen nur MUF verwendet.

MUF & PUR Matrix

Aufgrund des überraschend guten Abschneidens der mit MUF- und PUR-Leim imprägnierten Flachsfasern wurde auch für die 4-Punkt Biegeversuche je ein Satz Proben hergestellt, obwohl sich die Benetzung der Fasern mit den hochviskosen Leimen als schwierig herausgestellt hatte. Die trockenen Flachsfasern wurden dabei mit dem entsprechenden Klebstoff beleimt und anschliessend direkt zusammen mit der LVL Trägerplatte bei Raumtemperatur in die Presse gelegt. Diese Methode hatte den Vorteil, dass die Prüfkörper direkt in einem Prozessschritt hergestellt werden konnten.

Einfluss des Vorspannens

Zur Herstellung der Prüfkörper mit Vorspannung wurde eine Pressform aus Birkensperrholz gefräst. Diese wurde so gestaltet, dass der Prüfkörper bei der Verklebung in der Mitte eine Durchbiegung von 5 mm aufwies. Diese Durchbiegung war aufgrund von Biege-Vorversuchen an LVL-Proben ermittelt worden und entsprach im Durchschnitt 50 % der elastischen Verformung. Zur optimalen Druckverteilung wurde während des Pressvorgangs oben und unten eine Gummimatte eingelegt. Die vorgespannten Proben wurden im 20/65 Klima vorkonditioniert und bei diesem Klima getestet. Abbildung 15 zeigt die Pressform mit einem Prüfkörper während des Pressvorgangs in der Presse.

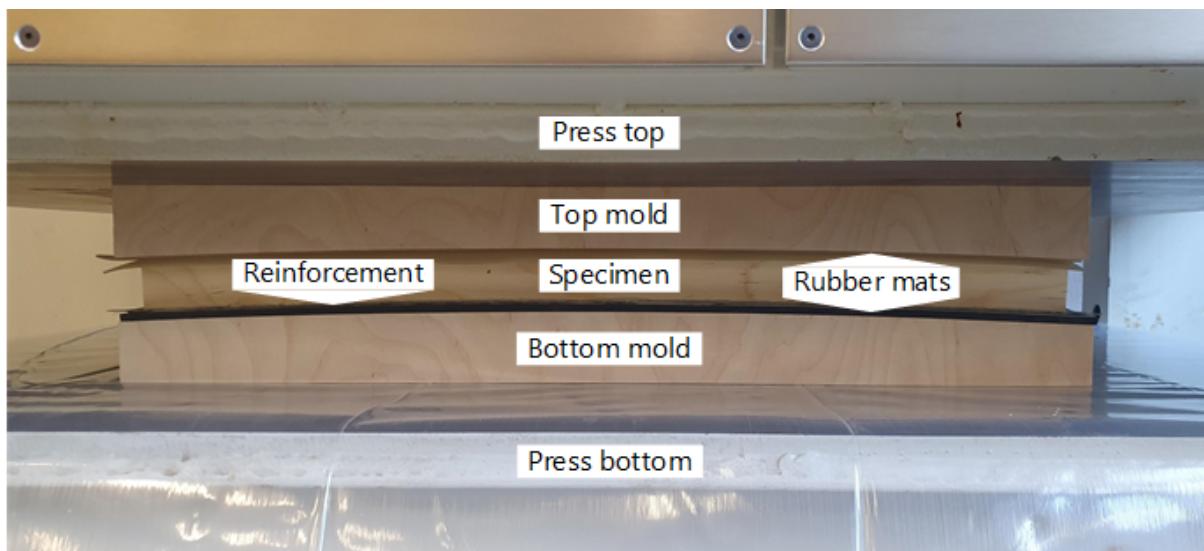


Abbildung 15: Pressvorrichtung zur Herstellung der vorgespannten Prüfkörper

Es wurden die gleichen Probenserien mit Laminaten mit EPO- und PFA-Matrix hergestellt, welche mit MUF und PUR auf das Trägermaterial geklebt wurden. Neben den Standard-Laminaten mit 560 g/m^2 wurden auch wieder 840 g/m^2 Laminate hergestellt um auch den Einfluss der Laminatdicke unter Vorspannung aufzeigen zu können. Die Prüfkörper wurden jeweils über Nacht verpresst, um dem Klebstoff genügend Zeit zum Aushärten zu geben. Wenn die Prüfkörper aus der Presse genommen wurden zeigten sie noch eine sichtbare Krümmung, welche in der Mitte ca. 2 mm betrug, wenn sie auf einer ebenen Fläche lagen. Beim Zuschneiden, etwa zwei Wochen nachdem die ersten Prüfkörper verklebt worden waren, zeigte sich noch immer eine leichte Vorspannung. Vor der Prüfung, die weitere sechs Wochen später stattfand, war die Vorspannung nicht mehr messbar.

Karbon- und Glasfaserlaminate

Zum Vergleich mit Laminaten, die mit synthetischen Fasern verstärkt sind, wurden im Pressverfahren Laminate mit Glas- und Karbonfasern in einer Epoxidharzmatrix hergestellt. Epoxidharz wurde gewählt, da die Kompatibilität mit den gewählten Fasern nachgewiesen ist. Die Produktionsparameter wurden im Vergleich zur Herstellung der Naturfaserlaminate nicht verändert.

6.3.2 Prüfkörperherstellung für die Schlagbiegeversuche

Analog zur Herstellung der Prüfkörper für die 4-Punkt Biegeversuche wurden auch die Proben für die Schlagbiegeversuche durch die Herstellung von Platten produziert. Insgesamt wurden, ohne Vorversuche, 148 Prüfkörper hergestellt. Die Schlagbiegeversuche wurden ausschliesslich an Proben durchgeführt, die im Standard-Klima $20^\circ\text{C} / 65\% \text{ rH}$ konditioniert wurden. Die LVL-Platten und die vorgefertigten Laminate wurden vor der Probenherstellung bis zur Ausgleichsfeuchte in diesem Klima gelagert. Nach dem Verkleben lagerten die Prüfkörper nochmals mindestens 8 Wochen im Klimaraum, bevor sie getestet wurden.

Einfluss der Laminatdicke

Das Hauptaugenmerk der Schlagbiegeversuche lag auf dem Einfluss der Matrix (Epoxidharz und PFA), dem Klebstoff (MUF & PUR) und der Laminatdicke. Daher wurden von jeder Matrix-/Leimkombination Proben mit Laminaten in vier verschiedenen Gewichten hergestellt (280 g/m^2 , 560 g/m^2 , 840 g/m^2 und 1120 g/m^2).

Karbon- und Glasfaserlaminate

Zum Vergleich der Naturfaserlaminate mit Laminaten aus synthetischen Fasern wurden Prüfkörper mit Glas- und Karbonfaserlaminaten hergestellt. Die Gewichte der Glasfaserlaminate lagen bei 300 g/m², 600 g/m² und 900 g/m², während bei den Karbonfaserlaminaten aufgrund der höheren Steifigkeit und Festigkeit nur Laminate mit 300 g/m², 600 g/m² Fasern getestet wurden.

6.4 AP-4: 4-Punkt Biege- und Schlagbiegeversuche

6.4.1 4-Punkt Biegeprüfung

Dieser Abschnitt präsentiert die Resultate der 4-Punkt Biegeprüfung. Die Resultate sind in Abschnitte aufgeteilt, die den Einfluss der Holzfeuchte, der Laminatdicke, des Vorspannens, und den Vergleich mit glas- und karbonfaserverstärkten Laminaten präsentieren. Die Ergebnisse der 4-Punkt Biegeversuche zeigten keinen messbaren Einfluss des Klebstoffes (MUF oder PUR) auf die mechanischen Eigenschaften. In Fällen, in denen Proben mit beiden Leimen hergestellt wurden, wurden die Ergebnisse zusammengefasst und als eine Gruppe behandelt.

Einfluss der Holzfeuchte

In Abbildung 16 und Tabelle 3 werden die Resultate der 4-Punkt Biegeprüfung der mit Flachs/EPO und Flachs/PFA Laminat verstärkten Proben verglichen. Die durchgezogenen Linien zeigen den E-Modul, während die gestrichelten Linien die Biegsteifigkeit darstellen. Die Abnahme der Steifigkeit und Festigkeit mit zunehmender Feuchte verhält sich dabei linear, wobei die R²-Werte von 0.981 bis 0.999 für alle sechs Serien reichen. Die Steifigkeit der verstärkten Proben ist mit der PFA-Matrix am höchsten und führte bei 35% Luftfeuchte zu einer Erhöhung von 13.2 % im Vergleich zu den Referenz-Proben, während die EPO-Matrix eine um 6.5 % höhere Steifigkeit ergab. Bei den bei 85 % Luftfeuchtigkeit konditionierten Proben lag die Steifigkeit der verstärkten Proben noch um 7.4 % und 6.0 % über dem Wert der Referenzproben.

Bei der Biegefesteitgkeit war der Anstieg noch ausgeprägter. Wiederum ergaben die mit dem PFA-Laminat verstärkten, bei 35 % Luftfeuchte konditionierten Proben mit einem Anstieg von 27.6 % die höchsten Werte, während die mit EPO-Laminat verstärkten Proben eine Erhöhung von 22.5 % ergaben. Bei 85 % Luftfeuchtigkeit führten die Lamine zu einer Erhöhung der Festigkeit um 14.8 % bei Verwendung des PFA-Laminats und 13.8 % mit dem EPO-Laminat.

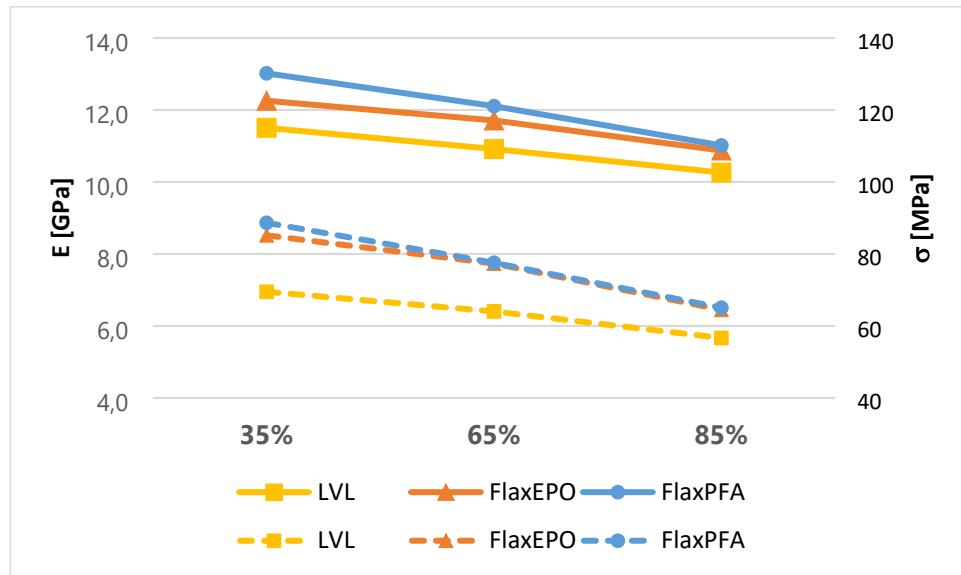


Abbildung 16: Biegesteifigkeit (durchgezogene Linie) und Biegefestigkeit (gestrichelte Linie) bei verschiedenen Luftfeuchten. Referenz-Proben (LVL) und Proben verstärkt mit Flachs/Epoxy Laminat (FlaxEPO) und Flachs/PFA Laminat (FlaxPFA)

Der Variationskoeffizient der Referenzproben aus Furnierschichtholz lag im Durchschnitt bei 2.9 % für den E-Modul und 3.9 % für die Festigkeit. Bei den verstärkten Prüfkörpern, FlaxEPO lag er bei 3.3 % und 4.8 % während die FlaxPFA Proben Werte von 2.8 % und 4.6 % aufwiesen. Diese niedrigen Variationskoeffizienten belegen, dass das LVL die erhoffte Homogenität der Materialeigenschaften aufwies, die für die präzise Messung des Laminat-Einflusses erforderlich waren.

Tabelle 3: Mittelwert (\bar{x}), Variationskoeffizient (COV) und relative Erhöhung (Erh) der Biegesteifigkeit und -Festigkeit der verstärkten Proben zu den Referenz-Proben

rF	E [Gpa]							
	LVL		FlaxEPO			FlaxPFA		
	\bar{x}	COV	\bar{x}	COV	Erh	\bar{x}	COV	Erh
35%	11.5	2.6%	12.3	3.3%	6.5%	13.0	4.5%	13.2%
65%	10.9	2.5%	11.7	4.7%	7.3%	12.1	2.8%	10.9%
85%	10.3	3.6%	10.9	4.3%	6.0%	11.0	3.4%	7.4%

rF	σ [MPa]							
	LVL		FlaxEPO			FlaxPFA		
	\bar{x}	COV	\bar{x}	COV	Erh	\bar{x}	COV	Erh
35%	69.5	4.5%	85.2	5.1%	22.5%	88.6	5.4%	27.6%
65%	64.0	3.7%	77.3	5.5%	20.8%	77.5	5.1%	21.1%
85%	56.7	3.5%	64.5	3.7%	13.8%	65.1	3.4%	14.8%

Eine statistische einfaktorielle Varianzanalyse (one-way ANOVA) wurde durchgeführt, um die statistische Signifikanz der Resultate aufgrund der Verstärkungen zu überprüfen. Ein Signifikanzniveau von 0.05 wurde gewählt. Die ANOVA-Analyse ergab für den Einfluss der Verstärkung und auch der Feuchte Werte, die sich null annäherten. Daher konnte die Nullhypothese ausgeschlossen werden, und die gemessenen Werte sind statistisch relevant.

Einfluss der Laminatdicke

In Abbildung 17 sind die gemessenen Biegesteifigkeiten und -festigkeiten der 4-Punkt Biegeversuche mit 560 g/m² und 840 g/m² Laminaten mit EPO- und PFA-Matrix, klimatisiert im 20°C/65 % rH Klima und verklebt mit MUF-Leim, dargestellt.

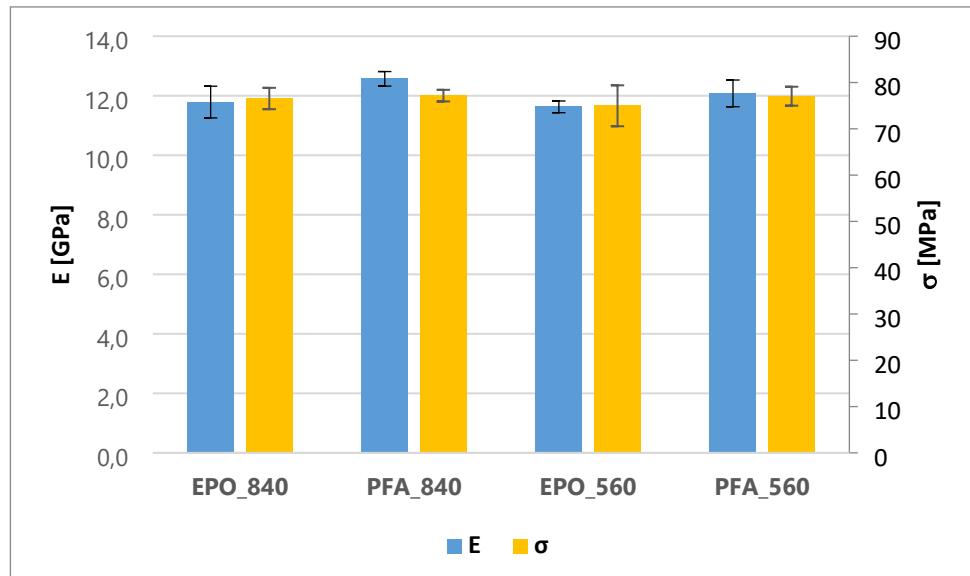


Abbildung 17: Einfluss des Laminat-Gewichtes auf die Biegesteifigkeit (E) und -Festigkeit (σ)

Schon aus der Abbildung ist ersichtlich, dass das dickere Laminat keinen deutlichen Einfluss auf die Biegesteifigkeit oder die Biegefesteitkigkeit hatte. Dies bestätigten die t-Tests zwischen den Laminaten mit zwei oder drei Lagen Fasern. Bei einem Signifikanzniveau von 0.05 wurden weder in der Steifigkeit (p-Wert: EPO 0.61, PFA 0.11) noch in der Festigkeit (p-Wert: EPO 0.35, PFA 0.93) signifikante Verbesserungen festgestellt. Der einzige statistisch signifikante Unterschied ergab sich erneut beim E-Modul zwischen den EPO_840 und PFA_840 Prüfkörpern (p-Wert: 0.001), wobei bei den mit PFA-Laminaten verstärkten Proben eine um 6.6 % höhere Steifigkeit gemessen wurde. Auch auf die Standardabweichung hatte die zusätzliche Verstärkung keinen deutlichen Einfluss.

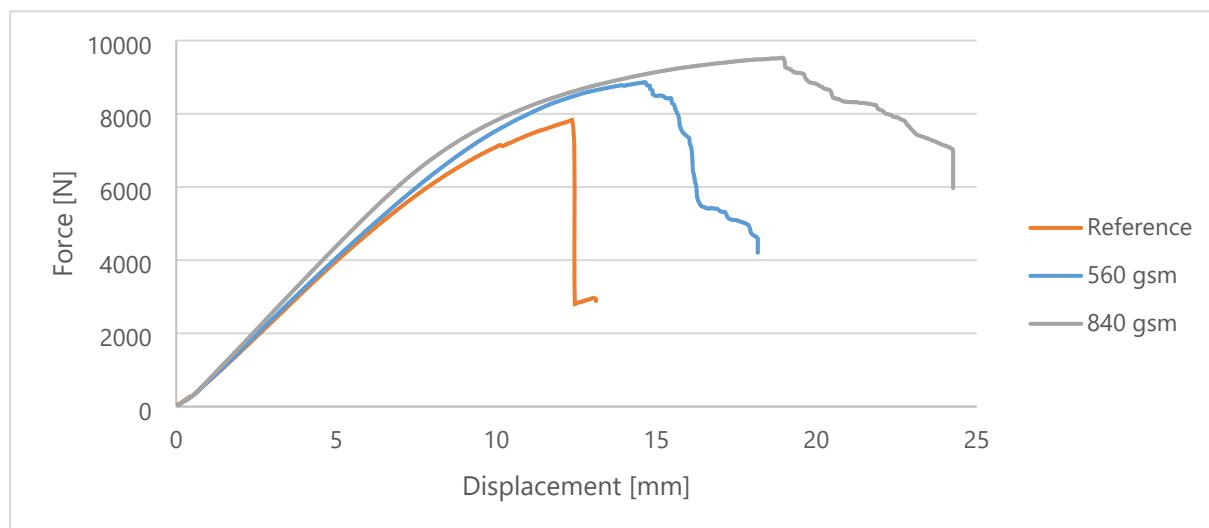


Abbildung 18: Kraft-Weg-Diagramm einer Referenzprobe und von Proben verstärkt mit 560 g/m² und 840 g/m² Flachsfasern mit EPO Matrix

Der Effekt der Verstärkung kann am deutlichsten mittels eines Kraft-Weg-Diagramms, wie in Abbildung 18 dargestellt, veranschaulicht werden. Während ein Laminat mit 560 g/m² Flachfasern zu einer messbaren Erhöhung des E-Moduls und der Festigkeit führte, bewirkte ein 840 g/m² Laminat keine signifikante Erhöhung der mechanischen Eigenschaften, zeigte jedoch einen nochmals deutlich ausgeprägteren plastischen Verformungsanteil vor dem vollständigen Versagen der Probe. Dies tritt auf, da die Prüfkörper im Druckbereich oben noch mehr gestaucht wurden, bevor das Laminat riss und zum endgültigen Versagen der Proben führte. Mit der Laminatdicke kann somit der Versagensmodus deutlich beeinflusst werden, was einen Vorteil für Ingenieure darstellen kann, insbesondere beim Design von Gebäuden und Brücken.

MUF & PUR als Matrix

Abbildung 19 zeigt die Ergebnisse der Proben welche mit MUF- und PUR-imprägnierten Flachfasern verstärkt wurden, im Vergleich zu den Referenzproben und den mit EPO- und PFA-Laminat verstärkten Proben. Im Vergleich zur Referenz führte die PUR-Matrix zur geringsten, respektive keiner Erhöhung der Biegesteifigkeit. Dies stimmt mit den Ergebnissen aus den Zugversuchen überein, bei denen die mit PUR imprägnierten Laminate ebenfalls die geringste Steifigkeit zeigten. Allerdings wurde bei den MUF-Laminaten in den Zugversuchen, zusammen mit den PFA-Laminaten, die höchsten Steifigkeiten gemessen. Diese Ergebnisse wiederspiegeln sich jedoch nicht in den Biegeprüfungen wieder, und es wurde eine statistisch insignifikante Erhöhung der Steifigkeit festgestellt (p-Wert: 0.22). Bei den Festigkeiten war eine signifikante Erhöhung der Werte beim PUR und MUF messbar (p-Wert: MUF 0.0015, PUR 0.00002), allerding war die Steigerung immer noch geringer als bei EPO und PFA.

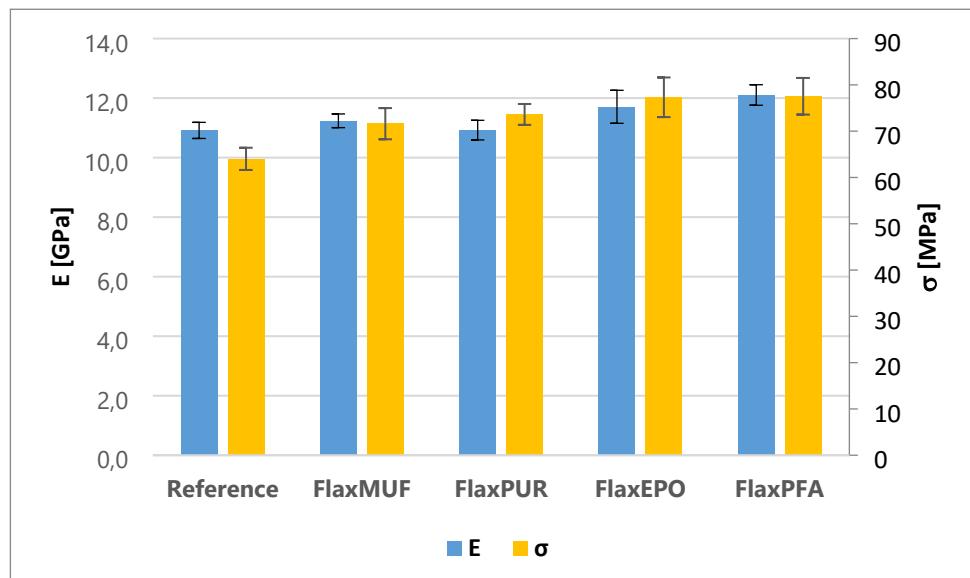


Abbildung 19: Vergleich der Steifigkeit (E) und Festigkeit (σ) der MUF und PUR Verstärkung mit den EPO- und PFA-Laminat verstärkten Proben

Obwohl die mit MUF und PUR imprägnierten Flachfasern wahrscheinlich immer noch zu einer Homogenisierung eines Holzbalkens beitragen würde, ist der Verstärkungseffekt deutlich kleiner. Die ungenügende Leistung kann auf die hohe Viskosität beider Leimsysteme im Vergleich zu EPO und PFA zurückgeführt werden, was es schwieriger machte, die Flachfasern ausreichend zu imprägnieren. Durch die grössere Fläche im Vergleich zu den Zugproben war es noch schwieriger, die Leime gleichmässig in die Fasern einzuarbeiten. Eine industrielle Anwendung wird daher auf diese Weise erschwert, obwohl ein einzelner Prozessschritt zur Verleimung von Vorteil wäre.

Einfluss des Vorspannens

Wie im Kapitel 6.3 beschrieben, wurden vorgespannte Prüfkörper hergestellt, die nach dem Verkleben eine sichtbare Vorspannung von ca. 2 mm Durchbiegung in der Mitte behielten. Diese Vorspannung war allerdings bis zum Zeitpunkt der Prüfung nicht mehr messbar. Dies war bei beiden Matrix-Materialien, Klebstoffen und auch bei den Prüfkörpern mit den dickeren Laminaten der Fall. Wie aufgrund dieses Verhaltens der Prüfkörper anzunehmen war, entspannte sich die Vorspannung in den Laminaten durch ein Kriechen oder eine Ermüdung in den Laminaten. Dies führte dazu, dass kein messbarer Vorteil des Vorspannens mehr vorhanden war und die Resultate sich innerhalb der Varianz der bereits getesteten, nicht vorgespannten Prüfkörper befanden.

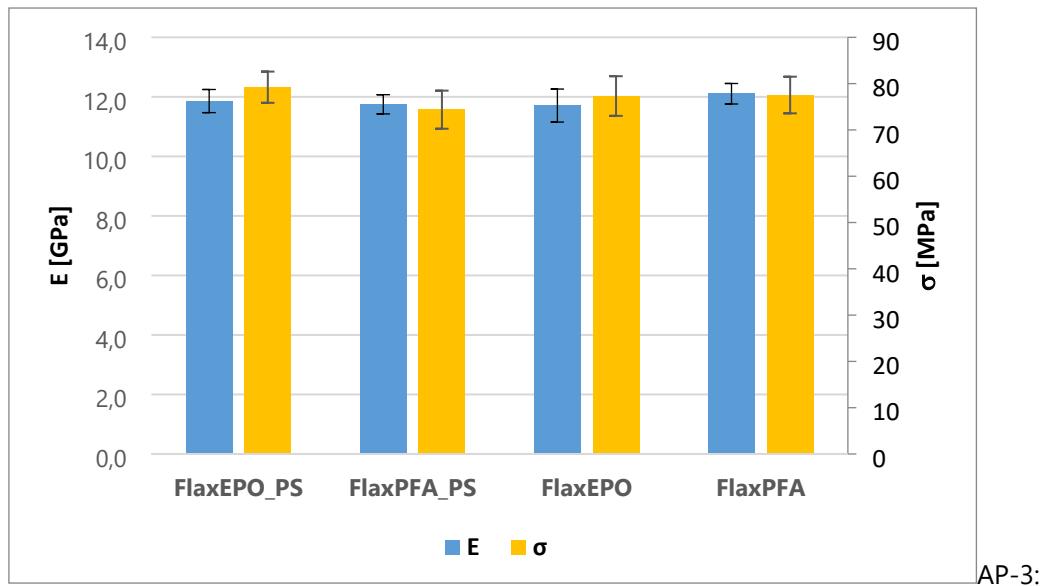


Abbildung 20: Vergleich der Steifigkeit (E) und Festigkeit (σ) der Vorgespannten (PS) Proben mit den nicht vorgespannten mit den gleichen Laminaten

Abbildung 20 zeigt den Vergleich der vorgespannten (PS) Proben mit den äquivalenten Prüfkörpern ohne Vorspannung. Die Ergebnisse der vorgespannten Serien liegen innerhalb der Standardabweichung der Referenzserien und zeigen keine Verbesserung. Es ist geplant, vorgespannte Prüfkörper mit Glas- und Karbonfaserlaminaten herzustellen, um herauszufinden, ob dieses Phänomen mit den Naturfasern zusammenhängt.

Karbon- und Glasfaserlaminate

Schlussendlich wurden zum Vergleich noch je ein Satz Prüfkörper mit Karbon- und Glasfasern verstärkt. Abbildung 21 zeigt den Vergleich der Prüfkörper mit Epoxidharzmatrix und den synthetischen Fasern mit den Epoxidharz/Flachs-Laminaten. Wie bereits aus den Tests mit den dickeren 840 g/m² Flachslaminaten ersichtlich, bringt ab einem gewissen Punkt eine weitere Verstärkung auf der Zugseite keine zusätzlichen Vorteile, da das initiale Versagen der Biegeprüfkörper bereits auf der Druckseite passiert. Deshalb zeigen auch die Karbon- und Glasfasern keine Steigerung gegenüber den Naturfasern.

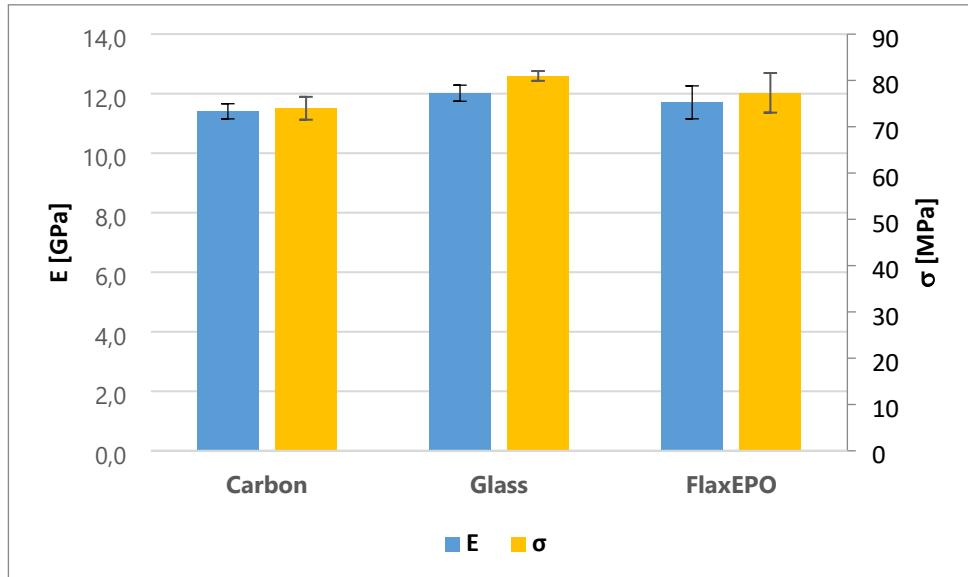


Abbildung 21: Vergleich der Steifigkeit (E) und Festigkeit (σ) der mit Karbon- und Glasfaserlaminat verstärkten Prüfkörper mit den Epoxidharz/Flachs verstärkten

6.4.2 Schlagbiegeprüfung

Insgesamt wurden Prüfkörper mit vier verschiedene Lamine der Schlagbiegeprüfung unterzogen: Flachsfasern gebunden mit EPO und PFA sowie Glas- und Karbonfasern mit EPO-Matrix. Bei den Flachsfaserlaminaten wurde wiederum Prüfkörper mit den beiden Klebstoffen PUR und MUF hergestellt, während für die Lamine mit synthetischen Fasern nur PUR verwendet wurde. Wie schon bei den 4-Punkt Biegeversuchen waren sowohl der PUR- als auch der MUF-Leim in der Lage eine exzellente Klebeverbindung des Lamine mit dem LVL herzustellen. Deshalb waren die Resultate praktisch identisch und wurden für die Darstellung der Resultate zu einer Gruppe zusammengefasst. Abbildung 22 und Tabelle 4 zeigen die Bruchschlagarbeit in Abhängigkeit vom Fasergewicht der verschiedenen Lamine.

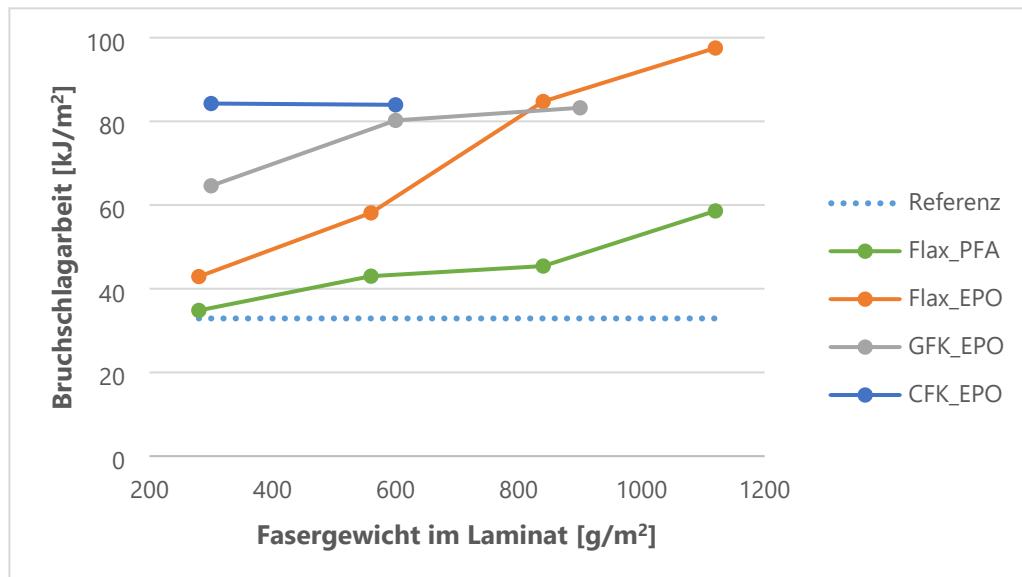


Abbildung 22: Bruchschlagarbeit der Schlagbiegeversuche, der verschiedenen Lamine mit jeweils 280 g/m² bis 1200 g/m² Verstärkungsfasern

Der Durchschnitt der Werte der Referenzproben ist in Abbildung 22 als blau gestrichelte Linie eingezeichnet. Bei der dynamischen Belastung ergaben die mit Flachfasern und PFA-Matrix hergestellten Laminate im Vergleich zur EPO-Matrix die niedrigeren Werte. Das 280 g/m² Flax_PFA Laminat führte zu einer Erhöhung der Bruchschlagarbeit von nur 5.8 %. Allerdings halbierte sich der Variationskoeffizient von 21.2 % der Referenzproben auf 10.9 % bei den verstärkten Proben, wodurch ein Homogenisierungseffekt beobachtet werden konnte. Die Werte nahmen mit höherem Fasergewicht kontinuierlich zu, und bei 1200 g/m² lag die Erhöhung bei 78 %. Allerdings wurde der Variationskoeffizient mit zunehmendem Fasergewicht wieder grösser und lag beim schwersten Laminat bei 17.9 %.

Tabelle 4: Werte der Bruchschlagarbeit, der Standardabweichung (Stdev) und deren Änderung und des Variationskoeffizienten (COV) und dessen Änderung im Vergleich zur Referenz

	Bruchschlagarbeit <i>kJ/m²</i>	Stdev <i>kJ/m²</i>	BSA_{change} %	COV %	COV_{change} %
Referenz (LVL)	32.9	7.0	-	21.2	-
FlaxPFA_280	34.8	3.8	5.8	10.9	-10.3
FlaxPFA_560	43.0	4.9	30.6	11.4	-9.8
FlaxPFA_840	45.4	5.9	38.0	13.0	-8.2
FlaxPFA_1120	58.6	10.4	78.0	17.9	-3.4
FlaxEPO_280	42.9	7.6	30.3	17.7	-3.5
FlaxEPO_560	58.1	6.9	76.6	12.2	-9.0
FlaxEPO_840	84.8	12.0	157.4	14.1	-7.1
FlaxEPO_1120	97.5	20.9	196.2	21.4	0.2
GFK_EPO_300	64.6	9.6	96.2	14.9	-6.3
GFK_EPO_600	80.2	11.5	143.7	14.3	-6.9
GFK_EPO_900	83.2	13.7	152.9	16.5	-4.7
CFK_EPO_300	84.3	31.5	155.9	37.4	16.2
CFK_EPO_600	84.0	35.6	155.0	42.4	21.2

Bei den FlaxEPO-Prüfkörpern war allerdings ein deutlich grösserer Verstärkungseffekt zu beobachten, der beim 1120 g/m² Laminat fast zu einer Verdoppelung der Bruchschlagarbeit führte. Dies stellte den höchsten gemessenen Wert aller Proben dar. Bei den Glasfaserverstärkten Proben war von 300 g/m² zum 600 g/m² zwar eine Steigerung zu messen, allerdings führte ein weiteres Verstärken der Probe zu keinem signifikanten Anstieg der Werte mehr. Bei den Karbonfaserverstärkten Proben wurde bereits bei 300 g/m² das Maximum erreicht, und höhere Fasergewichte führten zu keiner weiteren Verbesserung der Werte. Das unterschiedlich ausgeprägte Verstärkungseffekt der Laminate kann durch das Versagensbild der Proben erklärt werden, welches in Abbildung 23 dargestellt ist.

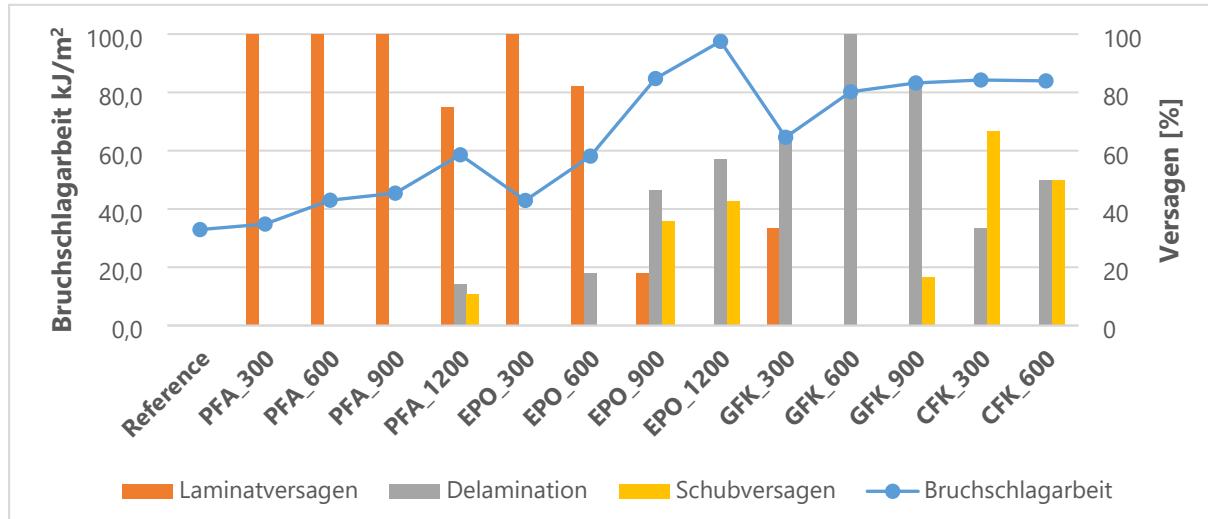


Abbildung 23: Vergleich der Versagensmodi mit der Bruchschlagarbeit aller Proben

Aus Abbildung 23 wird ersichtlich, dass der Versagensmodus mit der benötigten Energie korreliert, die zum Brechen einer Probe nötig ist. Bei allen Proben, wo der Verstärkungseffekt gegenüber den Referenzproben klein war, war der dominante Versagensmodus das Laminatversagen. Dabei versagte das Verstärkungslaminat zusammen mit dem Trägermaterial, ohne dass es zu einer Delamination oder zum Versagen des Trägermaterials auf Schub kam. Sobald das Laminat dem Aufprall wiederstehen konnte, führte dies zu einem der zwei weiteren Versagensmodi und die Bruchschlagarbeit wurde grösser. Der Grund für das bessere Abschneiden der FlaxEPO-Proben hing mit den zäheren Materialeigenschaften dieser Laminate zusammen. Die FlaxEPO-Laminate zeigten einen faserigen Bruch, der sich über eine grosse Länge der Probe erstreckte, während die FlaxPFA-Laminate sehr lokal und spröde versagten. Die FlaxPFA-Proben waren die einzigen, bei denen bis zu 840 g/m² Fasergewicht ausschliesslich die Laminate versagten und erst bei 1120 g/m² vereinzelt die weiteren Versagensmodi ausgelöst wurden. Bei den FlaxEPO-Proben war dies bereits bei 560 g/m² der Fall und bei den Glas- und Karbonlaminaten bereits bei den 300 g/m² Laminaten. Dies kann damit zusammenhängen, dass es sich bei synthetisch herstellten Fasern um Endlosfasern handelt, welche sich über die ganze Länge des Laminats erstrecken. Bei Naturfaserlaminaten werden die Garne hingegen aus Faserbündeln mit einer finiten Länge hergestellt. Der Grund, warum das 1120 g/m² FlaxEPO besser abschnitt als beide synthetischen Fasern, könnte darin liegen, dass die weniger dichten Flachsfasern dazu führen, dass die Laminate und daher die Dicke des ganzen Prüfkörpers grösser wurde.

6.5 AP-5: Homogenisierungsmodell

In Arbeitspaket 5 wurde ein Finite-Element-Modell (FE-Modell), auf Basis der FE-Software OpenSeesPy, von Brettschichtholzträger-Querschnitten erstellt. Dabei wurden jeder Holzlamelle zufällige, aber realistische und auf Literaturdaten basierende Materialparameter der Steifigkeit und Festigkeit zugeordnet. Der Homogenisierungsgrad der generierten digitalen Querschnitte wurde durch die Standardabweichungen der Eingabeparameter gesteuert und das Biegewiderstandsmoment dieser Querschnitte wurde berechnet.

Anschliessend wurden zu den generierten digitalen Querschnitten eine NFRP-Verstärkungsschicht mit den in Arbeitspaket 2 erarbeiteten Materialeigenschaften hinzugefügt. Ziel war es, die Wirkung der Verstärkung auf die Reduktion der Variabilität des Biegewiderstandsmoments zu zeigen und den Homogenisierungseffekt einer Faserverstärkung auf der Zugseite bei einer Biegebelastung eines Balkens zu simulieren.

Bei der Simulation der verstärkten Balken traten bei der Simulation allerding wiederholt Probleme auf und das FE-Modell konnte die Verstärkung nicht akkurat simulieren. Auch nach wiederholtem Troubleshooting und grossem Zeitaufwand konnten bisher keine brauchbaren Resultate produziert werden. Deshalb liegen aktuell zum AP-5 keine Ergebnisse vor.

7 Diskussion und Ausblick

Innerhalb dieses Projektes wurden Produktionsmethoden sowie Klebstoffe und Matrixmaterialien geprüft, welche eine möglichst effiziente Herstellung von NRFP-verstärkten Fichtenholz-Biegebalken mit bestmöglicher Steifigkeit und Festigkeit ermöglichen. Das Augenmerk lag auf den besten Materialkombinationen sowie dem Einfluss der Feuchtigkeit, der Laminatdicke und des Vorspannens auf die mechanische Leistungsfähigkeit der Prüfkörper.

Beide getesteten Holz-Klebstoffe, MUF und PUR, sowie die zwei geprüften Matrixmaterialien, EPO und PFA, ermöglichen das Herstellen von leistungsfähigen NFRP Komposite-Prüfkörpern. Die Verwendung der Klebstoffe als Matrix und der Matrix als Klebstoff war zwar möglich, führte jedoch zu schlechteren mechanischen Eigenschaften und war weniger geeignet für einen effizienten Herstellungsprozess. Deshalb stellte sich auch der zweistufige Verarbeitungsprozess, wobei zuerst ein Laminat hergestellt wird, welches danach auf das Trägermaterial geklebt wird, als praktischer und leistungsfähiger heraus. Die Idee eines Einschritt-Prozesses ist zwar verlockend, allerdings stellte sich das Arbeiten mit trockenen Fasern bereits im kleinen Massstab als schwierig heraus, während Laminate einfacher gehandhabt werden konnten. Das Arbeiten mit trockenen Fasern bedingte zudem den Einsatz nur eines Klebstoffes, was sich mit den gängigen PUR und MUF-Leimen als ungenügend herausstellte. Im Gegensatz dazu kann im Zweischritt-Verfahren die beste Matrix für die Fasern mit dem optimalen Holzklebstoff kombiniert werden.

Eine positive Erkenntnis war zudem, dass der formaldehydfreie PUR-Klebstoff in Kombination mit der bio-basierten PFA-Matrix zu exzellenten Ergebnissen bei den 4-Punkt Biegeversuchen führte. Bei der dynamischen Schlagbiegeprüfung ergab die Epoxidharzmatrix die besseren Resultate. Bei beiden Versuchsreihen war es erfreulich zu sehen, dass die mit Naturfasern verstärkten Prüfkörper mit den Proben welche mit synthetischen Fasern verstärkt wurden, kompetitiv waren. Einzig bei den vorgespannten Prüfkörpern wurden die Erwartungen nicht erfüllt, da die Vorspannung im Zeitraum zwischen der Probenherstellung und dem Testen nachliess und keine verbesserte Steifigkeit gemessen werden konnte. Diese Versuche werden mit Prüfkörpern mit synthetischen Fasern wiederholt werden um zu prüfen, ob dieses Phänomen auf die Verwendung von Naturfasern zurückzuführen ist.

Das Homogenisierungsmodell konnte aufgrund von unvorhergesehenen Schwierigkeiten innerhalb der Laufzeit des Projektes keine brauchbaren Daten liefern. Es ist jedoch geplant, die Arbeiten am Modell weiterzuführen und den Homogenisierungseffekt basierend auf den in diesem Projekt erarbeiteten Materialdaten zu simulieren.

Wie bereits mit Laminaten mit synthetischen Fasern gezeigt, sind auch Naturfaserlaminate in der Lage, Fichte-Biegebalken effektiv zu verstärken, was zu einer Erhöhung der Biegesteifigkeit- und Festigkeit, einem duktileren Versagen und einer Homogenisierung der mechanischen Eigenschaften führt. Die Projektbeteiligten sind mit den ausgeführten Arbeiten und den erzielten Ergebnissen sehr zufrieden und sehen Potential, dass diese Technologie auf industrielle Größen hochskaliert werden kann. Deshalb besteht das Ziel, diese Arbeiten innerhalb eines Innosuisse Projekts weiterzuführen.

8 Verzeichnisse

8.1 Literaturverzeichnis

- Bárta, Vojtěch, Petr Lukeš, and Lucie Homolová. 2021. "Early Detection of Bark Beetle Infestation in Norway Spruce Forests of Central Europe Using Sentinel-2." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 100. doi: 10.1016/j.jag.2021.102335.
- Bhat, Javed Ahmad. 2021. "Effect of CFRP-Reinforcement Variation on the Strength Parameters of Different Timber Beams." *Materials Today: Proceedings* 44:2785–91. doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.783.
- Biblis, E. J. 1965. "Analysis of Wood–Fiberglass Composite Beams within and beyond the Elastic Region." *Forest Products Journal* 15(2):81–88.
- Blank, Lukas. 2018. "Bending Resistance and Deformation Capacity of Fibre Reinforced Glulam Beams." ETH Zurich.
- Borgin, Karl B., Gerrit F. Loedolff, and Gerald R. Saunders. 1968. "Laminated Wood Beams Reinforced with Steel Strips." *Journal of the Structural Division* 94(7):1681–1705. doi: 10.1061/JSDEAG.0002011.
- Borri, A., M. Corradi, and E. Speranzini. 2013. "Reinforcement of Wood with Natural Fibers." *Composites Part B: Engineering* 53:1–8. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.04.039.
- Bulleit, William M., Bogue L. Sandberg, and Greg J. Woods. 1989. "Steel-Reinforced Glued Laminated Timber." *Journal of Structural Engineering* 115(2):433–44. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:2(433).
- Crossley, Richard, Peter Schubel, and Anthony Stevenson. 2014. "Furan Matrix and Flax Fibre as a Sustainable Renewable Composite: Mechanical and Fire-Resistant Properties in Comparison to Phenol, Epoxy and Polyester." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 33(1):58–68. doi: 10.1177/0731684413502108.
- Deutsche Norm. 1978. *DIN 52186 - Biegeversuch*.
- Deutsche Norm. 1981. *DIN 52189 - Schlagbiegeversuch - Bestimmung Der Bruchschlagarbeit*.
- Deutsche Norm. 2010. *DIN EN ISO 527-5 - Kunststoffe – Bestimmung Der Zugeigenschaften – Teil 5: Prüfbedingungen Für Unidirektional Faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe*.
- Deutsche Norm. 2013. *DIN EN 302-1:2013 - Klebstoffe Für Tragende Holzbauteile – Prüfverfahren – Teil 1: Bestimmung Der Längszugscherfestigkeit*.
- Dodangeh, F., M. S. Seyed Dorraji, M. H. Rasoulifard, and H. R. Ashjari. 2020. "Synthesis and Characterization of Alkoxy Silane Modified Polyurethane Wood Adhesive Based on Epoxidized Soybean Oil Polyester Polyol." *Composites Part B: Engineering* 187(January):107857. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.107857.
- Dziuba, T. 1985. "The Ultimate Strength of Wooden Beams with Tension Reinforce- Ment." *Holzforschung Und Holzverwertung* 37(6):115–19.
- Erhard, G. 2006. *Designing with Plastics*. Hanser Gardner Publications.
- Fiorelli, Juliano, and Antonio Alves Dias. 2003. "Analysis of the Strength and Stiffness of Timber Beams Reinforced with Carbon Fiber and Glass Fiber." *Materials Research* 6(2):193–202. doi: 10.1590/s1516-14392003000200014.
- Johns, Kenneth C., and Simon Lacroix. 2000. "Composite Reinforcement of Timber in Bending." *Canadian Journal of Civil Engineering* 27(5):899–906. doi: 10.1139/l00-017.
- Jorda, Johannes, Günther Kain, Marius Catalin Barbu, Alexander Petutschnigg, and Pavel Král. 2021.

- "Influence of Adhesive Systems on the Mechanical and Physical Properties of Flax Fiber Reinforced Beech Plywood." *Polymers* 13(18):1–15. doi: 10.3390/polym13183086.
- Kaiser, H. 1989. "Strengthening of Reinforced Concrete with Epoxy-Bonded Carbon-Fiber Plastics." ETH Zürich.
- De La Rosa García, Pilar, Alfonso Cobo Escamilla, and M. Nieves González García. 2013. "Bending Reinforcement of Timber Beams with Composite Carbon Fiber and Basalt Fiber Materials." *Composites Part B: Engineering* 55:528–36. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.07.016.
- Lantos, G. 1970. "The Flexural Behavior of Steel Reinforced Laminated Timber Beams." *Wood Science* 2(3):136–43.
- Meier, Urs. 1987. "Bridge Repair with High Performance Composite Materials." *Material Und Technik* 4(January 1987):125–28.
- Mitzner, R. C. 1973. *Plywood Overlaid with Fiberglass-Reinforced Plastic: Durability and Maintenance*. Vol. 119.
- Plevris, By Nikolaos, Thanasis C. Triantafillou, and Associate Member. 1993. "FRP-Reinforced Wood as Structural Material." 4(3):300–317.
- Silker, A. 1962. "Reinforced Wood Laminated Beams." *Forest Products Journal* 12(1):91–96.
- Smallman, R. E., and R. J. Bishop. 1999. *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering*. Elsevier Science.
- Somarathna, H. M. C. C., S. N. Raman, D. Mohotti, A. A. Mutalib, and K. H. Badri. 2018. "The Use of Polyurethane for Structural and Infrastructural Engineering Applications: A State-of-the-Art Review." *Construction and Building Materials* 190:995–1014. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.166.
- Speranzini, Emanuela, and Simone Tralascia. 2010. "Engineered Lumber: LVL and Solid Wood Reinforced with Natural Fibres." *11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010* 2(September 2015):1685–90.
- Subhani, Mahbube, Anastasia Globa, Riyadh Al-Ameri, and Jules Moloney. 2017. "Flexural Strengthening of LVL Beam Using CFRP." *Construction and Building Materials* 150:480–89. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.027.
- Svecova, D., and R. J. Eden. 2004. "Flexural and Shear Strengthening of Timber Beams Using Glass Fibre Reinforced Polymer Bars - an Experimental Investigation." *Canadian Journal of Civil Engineering* 31(1):45–55. doi: 10.1139/l03-069.
- Theakston, F. H. 1965. "A Feasibility Study for Strengthening Timber Beams with Fibreglas." *Canadian Agriculture Engineering* 17–19.
- Valdes, Monica, Gian Felice Giaccu, Daniel Meloni, and Giovanna Concu. 2020. "Reinforcement of Maritime Pine Cross-Laminated Timber Panels by Means of Natural Flax Fibers." *Construction and Building Materials* 233:117741. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117741.
- VKF. 2015. *Brandschutznorm*.
- Wangaard, Frederick. 1964. "Elastic Deflection of Wood-Fiberglass Composite Beams." *Forest Products Journal* 14(6):256–60.

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektzeitplan & Fortschritt	3
Abbildung 2: Projekt-Arbeitsplan	4
Abbildung 3: Überbrückungsfunktion einer Verstärkung bei einer Schwächung des Holzes eines auf Biegung belasteten Balkens auf der Zugseite: a) Äste, b) Schrägfaserigkeit, c) Keilzinken.....	7
Abbildung 4: Anwendung von trockenen und laminierten Fasern in Verbindung mit einem Brettschichtholzträger.....	11
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Herstellungsprozesse: a) Handlaminat, b) Vakuum-Infusion, c) Autoklav.....	12
Abbildung 6: Projekt-Arbeitsplan.....	13
Abbildung 7: a) Unidirektionale Flachsfasertextilien (ampliTEx™ #5057) oben: laminiert, unten: trocken, b) Furnierschichtholz Fichte.....	14
Abbildung 8: Übersicht der Prüfkörper für die a) Zugprüfung, b) Zugscherprüfung, und Querschnitte für die c) Biegeprüfung und d) Schlagbiegeprüfung.....	16
Abbildung 9: Steifigkeit und Festigkeit einer Auswahl der hergestellten Lamine.....	18
Abbildung 10: Feuchteabhängiges Verhalten von Epoxy und PFA Laminaten. 35, 65 und 85 stehen für die relative Luftfeuchte bei der die Lamine gelagert wurden	19
Abbildung 11: Feuchteabhängige relative Änderung der Steifigkeit von den Epoxy & PFA Laminaten im Vergleich zu Fichtenholz.....	20
Abbildung 12: Zugscherfestigkeit (TSS), Holzbruchanteil (WF) und interlaminares Schubversagen (ILSF) aller durchgeföhrten Zugscherversuche.....	21
Abbildung 13: Ausgewählte Prüfkörper nach dem Zugscherversuch mit typischem Adhäsionsversagen (Oben), hohem Holzbruchanteil (Mitte) und einer Mischung aus Holzbruch und interlaminarem Schubversagen (Unten)	22
Abbildung 14: Pressvorrichtung zur Herstellung der vorgespannten Prüfkörper.....	23
Abbildung 15: E-Modul (durchgezogene Linie) und Biegefesteigkheit (gestrichelte Linie) bei verschiedenen Luftfeuchten. Referenz-Proben (LVL) und Proben verstärkt mit Flachs/Epoxy Laminat (FlaxEPO) und Flachs/PFA Laminat (FlaxPFA)	25
Abbildung 16: Einfluss des Laminat-Gewichtes auf die Biegesteifigkeit (blaue Säulen) und -Festigkeit (gelbe Säulen)	26
Abbildung 17: Kraft-Weg-Diagramm einer Referenzprobe und von Proben verstärkt mit Laminaten mit 600 g/m ² und 900 g/m ² Flachfasern mit EPO Matrix	27
Abbildung 18: Vergleich der Steifigkeit (blaue Säulen) und Festigkeit (gelbe Säulen) der MUF und PUR Verstärkung mit den EPO- und PFA-Laminat verstärkten Proben	28
Abbildung 19: Vergleich der Steifigkeit (blaue Säulen) und Festigkeit (gelbe Säulen) der Vorgespannten (PS) Proben mit den nicht vorgespannten mit den gleichen Laminaten.....	29
Abbildung 20: Vergleich der Steifigkeit (blaue Säulen) und Festigkeit (gelbe Säulen) der mit Karbon- und Glasfaserlaminat verstärkten Prüfkörper mit den Epoxidharz/Flachs verstärkten.....	30
Abbildung 21: Bruchschlagarbeit der Schlagbiegeversuche, der verschiedenen Lamine mit jeweils 300 g/m ² bis 1200 g/m ² Verstärkungsfasern	30
Abbildung 22: Vergleich der Versagensmodi mit der Bruchschlagarbeit aller Proben.....	31

8.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Klebstoffe/Matrix und der entsprechenden Verarbeitungsmethoden	15
Tabelle 2: Übersicht der Fasergewichtsanteile (FWF) und der entsprechenden Faservolumenanteile (FVF) abhängig von den verschiedenen Matrix-Materialien	17
Tabelle 3: Mittelwert (\bar{x}), Variationskoeffizient (COV) und relative Erhöhung (Erh) der Biegesteifigkeit und -Festigkeit der verstärkten Proben zu den Referenz-Proben.....	25
Tabelle 4: Werte der Bruchschlagarbeit, der Standardabweichung (Stdev) und deren Änderung und des Variationskoeffizienten (COV) und dessen Änderung im Vergleich zur Referenz	31

Hiermit bestätigen wir die Richtigkeit und Vollständigkeit dieses Schlussberichts

Dübendorf, 30. Juni 2024

Projektleiter:

Roman Elsener



Gruppenleiter:

Dr. Mark Schubert



Empa – Eidgenössische Forschungs- und Materialprüfungsanstalt, Cellulose & Wood Materials