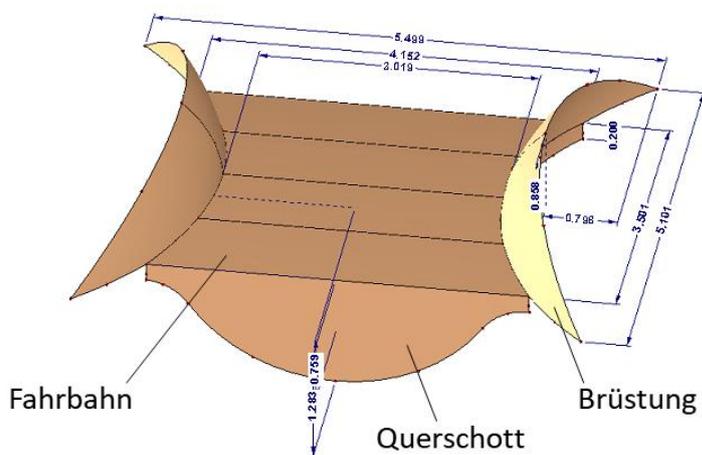


## Schlussbericht zum Vorhaben

**Thema:** Selbsttragende Freiformflächen aus Laubholz furnier -Hybridwerkstoffen für den Einsatz in Fußgänger- und Fahrradbrücken



**Zuwendungsempfänger:**

- TV 1: Herstellung von Hybridwerkstoffen
- TV 2: Projektierung einer Brückenkonstruktion
- TV 3: Herstellung / Optimierung von Laubholz furnieren
- TV 4: Herstellung der Brückendemonstratoren

**Förderkennzeichen:**

- 2220HV039A Fraunhofer WKI
- 2220HV039B TU Braunschweig
- 2220HV039C Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH
- 2220HV039D all ahead composites GmbH

**Laufzeit:**

01.02.2020 – 31.01.2023 verlängert bis zum 31.7.2023

**Erstellung:**

11. Dezember 2023

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.



## Inhaltsverzeichnis

<b>I. Kurzbericht</b> .....	<b>1</b>
1. Aufgabenstellung .....	1
2. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	1
3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse .....	1
a) Arbeitspakete und Meilensteine .....	1
b) Zusammenfassung .....	9
II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse .....	10
1. Erzielte Ergebnisse .....	10
Arbeitspaket 1: Optimierung der Herstellung der Halbzeuge bestehend aus Schäl furnieren und textiler Matten mittels Vakuumtrocknung .....	10
Arbeitspaket 1.1: Vorbehandlung und Schälen verschiedener Furniere .....	10
Arbeitspaket 1.2: Optimierung des Trocknungsprozesses frischer Furniere .....	11
Arbeitspaket 1.3: Evaluation der Trocknung von verschiedenen textilen Halbzeugen .....	12
Arbeitspaket 2: Herstellung von Hybridwerkstoffen im Vakuuminfusionsverfahren und Tests .....	18
Arbeitspaket 2.1: Herstellung von Hybridwerkstoffen verschiedener Größe und Form .....	18
Arbeitspaket 2.2: Tränkung des Furnier- Faserverbundes .....	23
Arbeitspaket 2.3: Test verschiedener Hybrid Prüfkörper .....	24
Arbeitspaket 3: Material- und Grenzflächenuntersuchung mit $\mu$ -CT und Thermographie sowie CFD- Simulation .....	26
Arbeitspaket 3.1: Grenzflächen- und Materialuntersuchung mittels Thermographie .....	26
Arbeitspaket 3.2: Grenzflächen- und Materialuntersuchung mittels $\mu$ -CT .....	28
Arbeitspaket 3.3: Materialsimulation .....	28
Arbeitspaket 4: Lastenheft für Vorhangschalen als baulicher Holzschutz und eine Brückenkonstruktion 33	
Arbeitspaket 5: Herstellung (skalierter) Demonstratoren und ihre Optimierung .....	56
<b>Herstellung und Optimierung des Fertigungsprozesses</b> .....	<b>60</b>
<b>Herstellung großer Brückenbauteile</b> .....	<b>61</b>
Arbeitspaket 6: Life Cycle Assessment / Carbon Footprint .....	63
Arbeitspaket 7: Koordination .....	68
2. Verwertung .....	69
a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen .....	69
b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende .....	69
c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende .....	69
d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit .....	69
3. Erkenntnisse von Dritten .....	69
4. Veröffentlichungen .....	69
<b>ANHANG</b> .....	<b>70</b>
Teilvorhaben 1: Herstellung von Hybridwerkstoffen .....	70
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....	70
2. Bearbeitete Arbeitspakete .....	70
Arbeitspaket 1.1: Vorbehandlung und Schälen verschiedener Furniere .....	70
Arbeitspaket 1.3: Evaluation der Trocknung von verschiedenen textilen Halbzeugen .....	71

Arbeitspaket 2.2: Tränkung des Furnier - Faserverbundes .....	72
Arbeitspaket 2.3: Test verschiedener Hybrid Prüfkörper .....	72
Arbeitspaket 3.1: Grenzflächen- und Materialuntersuchung mittels Thermographie.....	72
Arbeitspaket 3.2: Grenzflächen- und Materialuntersuchung mittels $\mu$ -CT .....	74
Arbeitspaket 3.3: Materialsimulation .....	75
Arbeitspaket 5.1: Fertigung von skalierten Brücken(elementen) .....	75
Arbeitspaket 5.2: Optimierung mechanischer, dynamischer & ökologischer Eigenschaften.....	76
Arbeitspaket 5.3: Bau eines realen Bauteils für die bauliche Anwendung.....	77
Arbeitspaket 6.2: Bilanzierung der Werkstoffkombinationen .....	78
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	79
Teilvorhaben 2: Projektierung einer Brückenkonstruktion.....	81
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....	81
1. Bearbeitete Arbeitspakete .....	81
2. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	81
Teilvorhaben 3: Herstellung / Optimierung von Laubholz Furnieren .....	86
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....	86
2. Bearbeitete Arbeitspakete .....	86
Arbeitspaket 1.1 - Vorbehandlung und Schälen verschiedener Furniere .....	86
Arbeitspaket 1.1 - Vorbehandlung und Schälen verschiedener Furniere .....	86
Arbeitspaket 1.2 – Optimierung des Trocknungsprozesses frischer Furniere .....	88
Arbeitspaket 5.3 - Bau eines realen Bauteils für die bauliche Anwendung .....	88
Arbeitspaket 5.4 - Bau einer realen Fußgängerbrücke .....	88
Arbeitspaket 6 - Life Cycle Assessment / Carbon Footprint .....	88
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	88
Teilvorhaben 4: Herstellung der Brückendemonstratoren.....	89
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....	89
2. Bearbeitete Arbeitspakete .....	89
Arbeitspaket 2: Herstellung von Hybridwerkstoffen im Vakuuminfusionsverfahren und Tests... 89	
Arbeitspaket 4: Lastenheft für Vorhangschalen als baulicher Holzschutz und eine Brückenkonstruktion .....	89
Arbeitspaket 5: Herstellung (skalierter) Demonstratoren und ihre Optimierung .....	89
Arbeitspaket 6: Life Cycle Assessment / Carbon Footprint.....	89
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	90
3.1. Konzipierung und Herstellung der Werkzeuge .....	90
3.2. Erarbeitung und Optimierung des Fertigungsprozesses.....	91
3.3. Herstellung der Demonstratorbauteile .....	93

## I. Kurzbericht

### 1. Aufgabenstellung

Ziel dieses Projektes ist es, Hybridwerkstoffe aus einer Kombination von frisch geschälten, feuchten und damit noch flexiblen Laubholzurnieren in Verbindung mit Glas-, Kohle- Natur- und insbesondere Basaltfasern in einem speziellen Vakuumtrocknungs- und Infusionsverfahren für die Herstellung selbsttragender 3D-Freiformflächen herzustellen. Der Fokus zielt unter anderem auf die Einsatzmöglichkeiten im Holzbrückenbau, sowohl als statisch integrativer Bestandteil der Primärkonstruktion wie auch für Belag- und Deckschichten oder Vorhangschalen als Sekundärbauteile.

### 2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die ursprüngliche Planung des Projekts beruhte auf der Idee einer Rotorblattfirma (Carbon Rotec), einfache Fahrradbrücken aus einer Kombination aus Carbon und Holz im Vakuuminfusionsverfahren herzustellen.

Nach der Insolvenz dieser Firma stellte sich einer der Partner (all ahead) zur Verfügung die Fertigung der finalen großen Teile in ihren neuen Räumen zu übernehmen.

Das Projekt begann im Februar 2020 mit Beginn der Corona Pandemie und zeigte starke Verzögerungen dadurch das viele Personen im „Homeoffice“ waren, z.T. die Werkstätten nicht mehr genutzt werden konnten, die Firmen zeitweise alle Arbeiter nach Hause geschickt haben bzw. so viel produzierten das keine Zeit mehr für das Projekt verblieb.

Darüber hinaus wurden die Arbeiten am Projekt durch den Brand des Trockners der Firma Pollmeier und die damit verbundenen Mehrarbeiten und sehr welligen Furniere bis zum Ende deutlich beeinträchtigt.

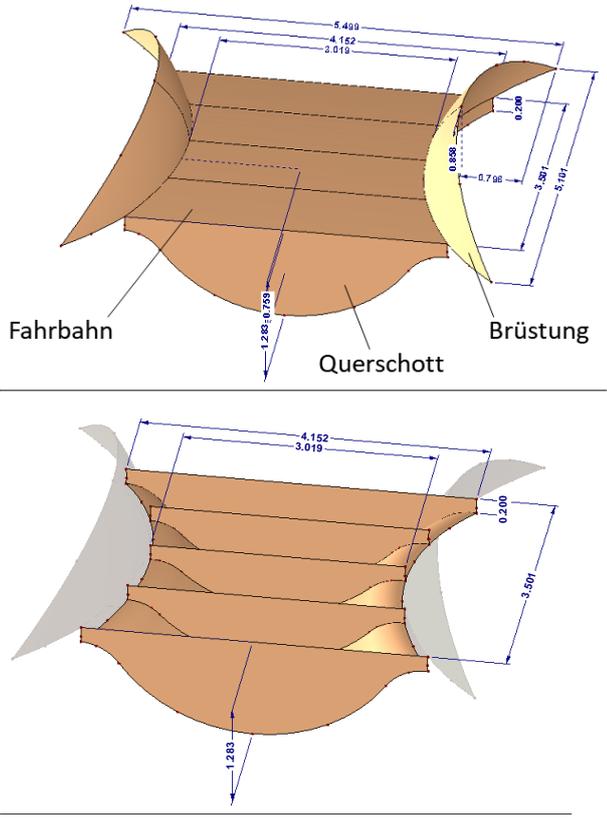
### 3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

#### a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum m (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1: (WKI / HNT, HOFZET, Pollmeier, Unterauftrag Müller) Optimierung der Herstellung der Halbzeuge bestehend aus Schälurnieren und textiler Matten mittels Vakuumtrocknung.	02/2020 bis 02/2021	Vergleich gesägter und geschälter Furniere sowie die Entscheidung im weiteren Projekt nur geschälte Furniere zu nutzen. Optimierung der Herstellung von Schälurnieren bis zu sehr geringen Dicken von bis zu 0,1mm. Herstellung und Vergleich von Halbzeugen die aus trockenem bzw. feuchtem Furnier hergestellt wurden.
AP 1.1 - Vorbehandlung und Schälen verschiedener Furniere (WKI, Pollmeier), (Vorbehandlung gesägter Furniere (WKI + Müller).	02/2020 bis 07/2020	Die Beschaffung, das Kochen und schälen von Hainbuchenstämmen aus dem Harz oblag dem WKI. Für das Kochen hat sich eine Temperatur von 90 °C über mindestens 2 Tage (Wochenende) als optimal herausgestellt. Aus gekochten noch warmen Hainbuchenstämmen wurden 1 mm und 2 mm dicke Furniere geschält. Die dünneren Stämme sorgten in den Verbänden für größere Festigkeiten als die 2 mm dicken Furnieren. Jedoch wird auch deutlich mehr Harz (ca. doppelte Menge) benötigt.  Weitere 2 mm dicke Furniere wurden aus Buchen, Fichten und Robinien geschält, um vergleichende Untersuchungen durchzuführen.  Aus ähnlichen Stämmen mit derselben Vorbehandlung wurden unmittelbar bei Herrn Müller vergleichbare Sägefurniere in 2 mm Dicke hergestellt.  Von der Firma Pollmeier konnten nur trockene Buchenschälurniere mit ca. 3,5 mm Dicke hergestellt und zur Verfügung gestellt werden. Ein kleiner Teil davon wurde vom WKI für Testkörper genutzt, wohingegen der größere Teil von all ahead für die Realversuche verwendet wurden.
AP 1.2 – Optimierung des	08/2020 bis 02/2021	Für den Versuchsaufbau zur Vakuumtrocknung wurde die optimale Technik in der Vakuumpresse beim WKI ermittelt.

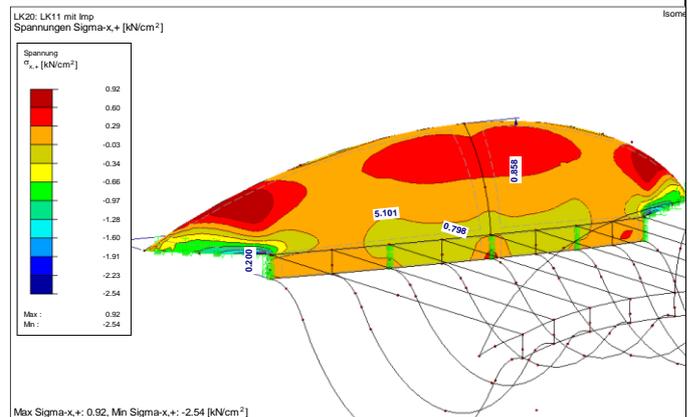
<p>Trocknungsprozesses frischer Furniere (WKI, Pollmeier).</p>		<p>Mehrere Aufbauten, Heiztemperaturen und Heizzeiten wurden hierfür überprüft. Dabei wurden sowohl reine Stapel aus Holzfurnieren aber auch welche mit Zwischenlagen aus verschiedenen Gelegen und Geweben getestet (Basaltfasern, Naturfasern, GFK, CFK etc.). Zum Teil verklebte die Schlichte auf den Basaltfasern bei der gewählten Temperatur 70°C bereits mit den Furnieren. Verschiedene Trocknungsversuche wurden auch durchgeführt um zu ermitteln, wieviel Wasser von den Geweben und Gelegen aufgenommen wird und inwieweit hierdurch die Schlichte beeinflusst wird.</p> <p>Auch die Frage nach dem Nutzen der Schlichte wurde in diesem AP untersucht (siehe auch AP 1.3). Für den Versuchsaufbau zur Vakuumtrocknung wurde als optimale Technik in der Vakuumpresse die VAP Folientechnik gewählt.</p> <p>Da die ursprünglich gelieferten Basaltfasern mit Ihrer Schlichte bei der gewählten Temperatur 70 °C bereits mit den Furnieren verklebten und die Schlichte eine schlechte Anbindung an das verwendete Harz aufwies, wurde in weiteren Versuchen Basaltfaser ohne Schlichte verwendet (siehe auch AP 1.3). Hierfür wurden einige Quadratmeter Basaltfaser auf dem Webstuhl des WKI hergestellt, um sie später in dem Demonstrator in AP 5 zu verwenden.</p> <p>Durch Corona und den Brand des Furniertrockners bei der Firma Pollmeier gab es stärkere Verzögerungen bei der Lieferung von ca. 3,5 mm dicken Buchenfurnieren. Außerdem waren die Furniere bei der erneuten Nutzung des alten, reaktivierten Trockners deutlich unebener als die zuvor mit dem zerstörten, neuen Trockner.</p>
<p>AP 1.3 - Evaluation der Trocknung von verschiedenen textilen Halbzeugen (WKI).</p>	<p>08/2020 bis 02/2021</p>	<p>Untersuchung des Einflusses der kombinierten Trocknung von Holzfurnieren und Geweben auf die Gewebe-Schlichte sowie daraus resultierende Grenzflächenmechanismen ist am WKI erfolgt</p>
<p>AP 2: (WKI / HNT, all ahead, TU BS, Time out, Unterauftrag Lutz) Herstellung von Hybridwerkstoffen im Vakuuminfusionsverfahren und Tests</p>	<p>02/2021 bis 02/2022</p>	<p>Optimierung der Herstellung von Hybridwerkstoffen aus frisch geschälten Furnieren und textilen Matten (aus nachwachsenden Rohstoffen und Basaltfasern) in der Vakuumtrocknung und anschließender Vakuuminfusion sowie anschließender Tests.</p>
<p>AP 2.1 – Herstellung von Hybridwerkstoffen verschiedener Größe und Form (WKI, all ahead, Time out, Unterauftrag Lutz).</p>	<p>02/2021 bis 02/2022</p>	<p>Prüfkörper aus Furnieren verschiedener Holzarten, Dicken, Lagen, Gewebe- bzw. Gelegearten sowie Infusionsharze wurden vom WKI in Zusammenarbeit mit Lutz hergestellt. Ebene Prüfkörper dienten mechanischen Tests (siehe AP 2.3) und bis zu 1m lange, gebogene und bis 2cm dicke Probekörper zu Machbarkeitsuntersuchungen von Vorhängeschalen. Unterstützung bei dem Aufbau und der Herstellung wurde vom Gutachter Lutz geliefert.</p> <p>Erste Probelamine wurden im Vakuuminfusionsverfahren bei all ahead hergestellt, um das Harzsystem in seiner Verarbeitbarkeit kennenzulernen und eine Strategie für die Fertigung des späteren Demonstrators zu entwickeln.</p>
<p>AP 2.2 – Tränkung des Furnier - Faserverbundes (WKI, all ahead, Unterauftrag Lutz).</p>	<p>10/2021 bis 02/2022</p>	<p>In diesem AP wurden Versuche zur Tränkbarkeit der Furniere in Abhängigkeit von verschiedenen Variablen wie Holzart, Oberflächenqualität oder Rissigkeit durchgeführt. Auch die Penetration des Harzes in die Lumen des Holzes wurde für verschieden Holzarten betrachtet.</p>
<p>AP 2.3 – Test verschiedener Hybrid Prüfkörper (WKI, TU BS, Unterauftrag Lutz).</p>	<p>05/2021 bis 02/2022</p>	<p>Die in AP 2.1 hergestellten Prüfkörper wurden auf ihre Biege-, Zug-, Druck- und Scherfestigkeit getestet. Die Biege-E-Module der Hybrid Prüfkörper erreichen in Längsrichtung Werte von ca. 17.500 N und in Querrichtung von nur 4.500 N. Diese Werte lassen sich nur mit der Nutzung von Basaltfasergewebe ermöglichen.</p> <p>Die ermittelten Festigkeitswerte wurden mit bekannten Größen der Firma Pollmeier für BauBuche verglichen und für die Modell- Brückenberechnungen der TU Braunschweig genutzt.</p>

<p>AP 3: (WKI / HNT, HOFZET, Schadensgutachter + Unterauftrag Müller) Material- und Grenzflächenuntersuchung mit <math>\mu</math>-CT und Thermographie sowie CFD-Simulation...</p>	<p>05/2021 bis 05/2022</p>	<p>Untersuchung von Grundmaterialien (Furnieren verschiedener Baumarten), verklebter Materialien (Sperrholz) sowie Hybridmaterialien (Furnier – textiler Matten) mit modernsten Methoden wie CT, Thermographie, 3D-Vermessung aber auch mit klassischen Auszugtests.</p> <p>Neben den klassischen mechanischen Tests (Biege-, Zug-, Scherfestigkeit) wurden feuchtebedingte Tests (Waseraufnahme, Quellverhalten) aber auch UV-Stabilitätstests oder Tests zum Langzeitverhalten von verschiedenen Furnieren in Bodenkontakt (Fäule) durchgeführt.</p>
<p>AP 3.1 Grenzflächen- und Materialuntersuchung mittels Thermographie (HNT, Schadensgutachter Müller).</p>	<p>05/2021 bis 05/2022</p>	<p>Thermographie-Messungen wurden an verschiedenen ebenen und gebogenen Prüfkörpern durchgeführt und Lunker als auch fehlende Verklebungen gefunden werden.</p>
<p>AP 3.2 Grenzflächen- und Materialuntersuchung mittels <math>\mu</math>-CT (WKI, Schadensgutachter Müller).</p>	<p>05/2021 bis 05/2022</p>	<p>Die Grenzflächenuntersuchungen konnten mittels CT durchgeführt werden. Weitere CT Messungen wurden bei einer Industriefirma durchgeführt die spezialisiert auf die Detektion von Lunkern ist.</p>
<p>AP 3.3 Materialsimulation (WKI).</p>	<p>08/2021 bis 05/2022</p>	<p>Die Software GeoDict wurde gekauft, installiert und unter anderem im Rahmen einer Masterarbeit getestet.</p> <p>Modellierungen verschiedener Holzwerkstoffverbünde ergaben Biege-E-Module, die mit den real gemessenen Werten übereinstimmen. Insbesondere die E-Module parallel zur Holzfaserrichtung sind in guter Übereinstimmung mit dem Materialmodell und den Zugversuchen. Weitere Untersuchungen mit der Software GeoDict um Kraft – Dehnungskurven zu simulieren und mit realen Werten zu korrelieren haben zum Teil sehr gute Übereinstimmungen ergeben.</p> <p>Details zu diesen Untersuchungen sind in der Masterarbeit von Markus Schnellen „Herstellung, Test und Simulation von Hybridmaterialien aus Holzfurnieren und Faserverbundwerkstoffen“ der TU-Braunschweig vom 21.9.2020 nachzulesen.</p> <p>Weitere (nicht rechnergestützte) Simulationen wurden zum Thema UV-Beständigkeitstest durchgeführt. Hierbei wurden sowohl unbehandelte Furniere als auch unterschiedlich behandelte Sperrhölzer sowohl der Freibewitterung als auch einem QUV Test am WKI unterzogen.</p> <p>Furniere bleiben bei der Freibewitterung ebenso wie bei der künstlichen Bewitterung intakt, vergrauen nur an der Oberfläche.</p> <p>Verschiedene UV-Schutzmittel (Partikel im Harz als auch Oberflächenschutz) bewirken einen unterschiedlich guten UV-Schutz des Holzes aber insb. der Harze.</p> <p>Simulationen von Furnieren im Bodenkontakt zeigen einen sehr schnellen Abbau des Holzes bei Hainbuchen- und Buchenholz im Verhältnis zu Robinienholz.</p>
<p>AP 4: (TU Braunschweig, all ahead, Unterauftrag Müller) Lastenheft für Vorhangschalen als baulicher Holzschutz und eine Brückenkonstruktion</p>	<p>06/2020 bis 08/2021</p>	<p>Die Anforderungen an Fußgänger- und Radwegbrücken wurden unter Beachtung von Aspekten der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit nach geltender Normung zusammengestellt. Die Projektierung der Brückenkonstruktion erfolgte fristgemäß und in Absprache mit den weiteren Projektbeteiligten unter Beachtung der zusammengetragenen Randbedingungen. Die Brücke wurde in ihre Elemente aufgeteilt (schalenförmige Hauptträger, ebene Nebenträger, leicht gekrümmte Fahrbahn, mehraxial gekrümmte Verkleidung), um das Tragverhalten in den Teilmodellen möglichst realistisch abbilden zu können. In der Nachweisführung zu den Grenzzuständen der Tragfähigkeit wurden die Eigenschaften des zugelassenen</p>

		<p>Furnierwerkstoffs „BauBuche® Q“ der Firma Pollmeier mit den in den projektinternen Versuchen ermittelten Tragfähigkeiten verglichen und bewertet.</p> <p>Die für den weiteren Projektablauf nicht kritischen Detaillösungen zum konstruktiven Holzschutz wurden nachgeliefert. Festlegungen in Normen und weitere Anforderungen an den baulichen Holzschutz wurden zusammengestellt und im Rahmen der Detailplanung für die Brücke unter Verwendung von Vorhangschalen in Absprache mit dem Unterauftragnehmer zum konstruktiven Holzschutz Müller umgesetzt.</p>
<p>AP 4.1 Erarbeitung Lastenheft (TU BS, Müller, all ahead, Lutz)</p>	<p>06/2020 bis 11/2020</p>	<p>Die Erarbeitung des Lastenheftes durch die TU BS, Müller, all ahead und Lutz erfolgte im Hinblick auf die Anwendung des neuen Hybridmaterials in einer Fußgängerbrücke. Dabei wird neben den schützenden Bauteilen auch das zu schützende Primärtragwerk aus dem neu entwickelten Hybridwerkstoff erstellt. Anforderungen an den baulichen Holzschutz, Aspekte der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit für Holzbrücken sowie zu berücksichtigende Lasten und Entwurfsparameter werden zusammengestellt (siehe Anhang TV 2). Basierend darauf wurden Anforderungen an das Hybridmaterial und die Konstruktion zusammengestellt.</p> <p>Bei der Erarbeitung des Lastenheftes wurde Zuarbeit in Bezug auf die Herstellbarkeit durch all ahead geleistet. Ideen, welche innerhalb der Projektteilnehmer gesammelt wurden, hat all ahead auf Fertigungsmöglichkeiten, Kosten und Formenbau untersucht.</p>
<p>AP 4.2 Verifizierung, Optimierung (TU BS, all ahead).</p>	<p>12/2020 bis 08/2020</p>	<p>Der im ersten Jahr erarbeitete Brückenentwurf wurde durch die TU BS und all ahead einer detaillierten Betrachtung unterzogen und im Hinblick auf die in AP 4.2 herausgearbeiteten Anforderungen an Fußgängerbrücken hin untersucht. Die Konstruktion wurde in drei Haupttragelemente aufgeteilt, um insbesondere Anschlusssituationen realistisch modellieren zu können. Angelehnt an das System einer Trogbücke wurde ein Haupt-Nebenträger-System aufgebaut (Brüstung = Hauptträger, Querschott = Nebenträger). Zudem wurden in Absprache mit der Firma all ahead die maximal zulässigen Konstruktionsmaße aus den Randbedingungen der Fertigung spezifiziert.</p>  <p style="text-align: center;"><b>Konstruktionsaufbau Brückendemonstrator</b></p>

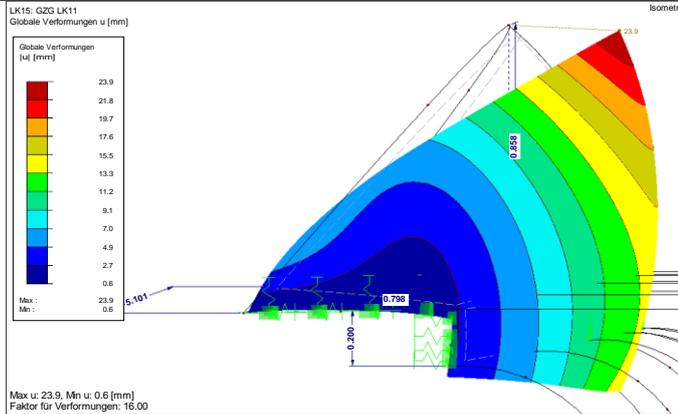
Die hauptsächlichen Anforderungen an Brückenkonstruktionen entstehen aus Aspekten der Tragfähigkeit, der Gebrauchstauglichkeit und der Dauerhaftigkeit. Auf diese Aspekte wird nachfolgend fokussiert eingegangen, eine detailliertere Ausführung und Darstellung kann dem Anhang zum TV 2 entnommen werden.

Die Finite-Elemente-Modellierung der Bauteile wurde im Programm RFEM der Firma dlubal unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse aus den Materialtests (AP 2.3) vorgenommen. Die ausgelesenen Spannungen wurden mit den Materialfestigkeiten aus den Versuchsergebnissen der Projektpartner und einem bauaufsichtlich zugelassenen Produkt (BauBuche S und BauBuche Q der Firma Pollmeier) verglichen und somit die Nachweisführung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) durchgeführt. Der Vergleich mit dem bauaufsichtlich zugelassenen Furnierschichtholz ermöglichte eine Einordnung und Bewertung der Ergebnisse. Es konnte so gezeigt werden, dass bei der Herstellung gekrümmter Freiformflächen aus Furnierschichtholz häufig die Querkzugfestigkeit des Materials die kritische Einflussgröße ist. Insbesondere tritt dies natürlich für den Hauptträger auf. Die Querschotte sind ebenfalls durch Druck rechtwinklig zur Faserrichtung beansprucht (insbes. Lastfall konzentrierte Einzellast). In der Vergleichsrechnung war es somit zielführend, Furnierschichtholz mit Querlagen zu verwenden, da die Querkzug- und auch die Querkdruckfestigkeit damit deutlich erhöht werden konnten. Aus diesem Grund wird basierend auf den Ergebnissen für die Herstellung des Demonstrators die Verwendung von Furnier mit Querlagen (bei der BauBuche Q 15% der Längslagen) zu verwenden. Zudem kann basierend auf den Versuchsergebnissen die Querkzugfestigkeit durch Einbringen der Faserverstärkung deutlich erhöht werden, sodass die für den Demonstrator benötigten Festigkeitswerte erzielt werden können. Dies zeigt, dass mit einer Faserverstärkung von Furnierschichtholz der Bau noch komplexerer und optisch ansprechender Konstruktionen aus nachwachsenden Rohstoffen möglich wird.



**Beispiele für Flächenspannung: Brüstung – Flächenspannung  $\sigma_{x+}$  bei LK 20 (EG + N + W)**

g. Für die drei Haupttragelemente wurden diese Analysen mit den entsprechenden Zusatzmodulen des Programms RFEM durchgeführt. Die kritischste Verformung ergab sich erwartungsgemäß für den Hauptträger (Brüstung), da diese durch ihre gekrümmte Form eine exzentrische Belastung erfährt und damit einer Momentenbeanspruchung ausgesetzt ist. Die veranschlagten Grenzwerte können eingehalten werden. Die Analysen verdeutlichen, dass es sich um eine sehr schlanke Konstruktion mit einem hohen Anspruch an Bemessung und Ausführung handelt, mit der das Potential des neuen Hybridmaterials eindrucksvoll demonstriert werden kann.



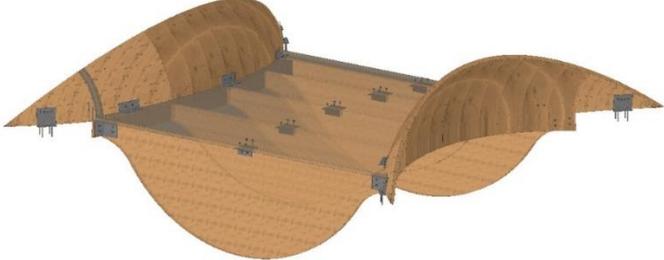
### **Maximale Verformung der Brüstung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit**

Eine der zentralen Herausforderungen in diesem Projekt besteht ebenfalls in der Umsetzung der Anforderungen an die Dauerhaftigkeit. Diese soll mit konstruktiven Holzschutzmaßnahmen erreicht werden. Die aus der DIN 68800 („Holzschutz“) und der DIN EN 1995-2 („Bemessung von Holzbauten, Teil 2 Brücken“) entstehenden Anforderungen wurden im ersten Zwischenbericht umfangreich dargestellt und wurden im vergangenen Projektjahr auf den Demonstrator angewendet. Zentral dabei ist die Ausführung der Haupttragelemente als geschützte Bauteile, da Furnierschichtholz insbesondere aus Hölzern, die nicht mit einer hohen natürlichen Dauerhaftigkeit bewertet werden, nicht als tragende Elemente im bewitterten Bereich eingesetzt werden dürfen.

Folgende grundlegende zu beachtenden Anforderungen ergeben sich zur Sicherstellung der geforderten Dauerhaftigkeit:

- Für Anschlüsse mit Stahlbauteilen sind geeignete nichtrostende Stähle zu verwenden. Alternativ dürfen nach DIN EN 1995.2/NA:2021-06 Stahlteile 4 mm dicker ausgeführt und mit einer Zinkschichtdicke von mindestens 85 µm versehen werden. Dies kann für die geplanten Bleche angewendet werden. Verbindungsmittel sind aus nicht-rostenden Stählen zu verwenden.
- Die Konstruktion Fahrbahn / Querschotte / untere Verkleidung führt zu einem geschlossenen Hohlraum innerhalb der Brücke. Durch Tauwasser kann es zu Feuchtigkeitsausfall innerhalb dieses Hohlkörpers kommen. Aus diesem Grund sind nachträglich zur Herstellung Entwässerungsöffnungen in die untere Verkleidung in jedem Feld einzubringen. Diese sind jeweils am tiefsten Punkt der Verkleidung vorzusehen.
- Die Festlegungen zur Inspektion und Wartung von Ingenieurbauwerken müssen beachtet werden, um Schäden rechtzeitig zu erkennen und Verschleißteile auszutauschen.

Zentraler Punkt für Modellierung und Ausführung ist die Umsetzung der Bauteilanschlüsse sowie des Widerlagers. Generell wird bei Konstruktionen im Außenbereich die Verwendung innenliegender Verbindungsmittel empfohlen, um einen Wassereintritt in die Konstruktion zu verhindern. Aufgrund der geringen Materialstärken können für diese Konstruktion jedoch die Mindestrandabstände nicht eingehalten werden, weshalb auf außenliegende Verbindungsmittel zurückgegriffen werden muss. Zudem müssen mechanische Verbindungsmittel verwendet werden, da geklebte Anschlüsse auf der Baustelle nur mit spezieller Qualifikation des ausführenden Unternehmens ausgeführt werden dürfen. Das Verkleben der Bauteile im Werk ist nicht möglich, da ein Transport der Brücke im Ganzen den Rahmen

		<p>der im Projekt verfügbaren Mittel sprengen würde. Da die Tragkonstruktion jedoch zur Erzielung der Anforderungen an die Dauerhaftigkeit vollständig verkleidet werden muss, sind damit auch die Anschlüsse vor Feuchteintrag geschützt. Weitere Details der Anschlüsse werden zur Sicherstellung der praktischen Anwendbarkeit im Rahmen der individuellen Möglichkeiten und in enger Abstimmung mit der Firma all ahead durchgeführt.</p>  <p><b>Darstellung der Bauteilanschlüsse (Bauteile ohne Verkleidung und Verschleißschichten)</b></p> <p>Die Planung der Brückenkonstruktion wurde im Projektjahr 2 planmäßig abgeschlossen. In Abstimmung mit der Fertigung und dem restlichen Konsortium wurden Anschlusslösungen optimiert und weitere Detailnachweise geführt. Die Beschreibung dieser Arbeiten erfolgt zugeordnet zum AP 5.2.</p>
<p>AP 5: (WKI/ HNT, HOFZET, TU BS, all ahead) Herstellung (skalierter) Demonstratoren und ihre Optimierung.</p>	<p>03/2022 bis 07/2023</p>	<p>Skalierte Demonstratoren wurden im Maßstab 1:10 hergestellt.</p>  <p>Dazu wurden entsprechende Formen mittels 3D-Druck bzw. als massive Holzbauteile hergestellt. Auf diesen Formen erfolgte die Herstellung der skalierten Bauteile. Der Zusammenbau dieser einzelnen Formteile gab Aufschluss über zu erwartende montagebedingte Herausforderungen beim Bau von Konstruktionen aus gekrümmten Freiformflächen.</p>
<p>AP 5.1 Fertigung von skalierten Brücken(elementen) (all ahead).</p>	<p>03/2022 bis 10/2022</p>	<p>In Zusammenarbeit zwischen der TU-BS und dem WKI wurden Teile eines skalierbaren Modells aus Hainbuchen hergestellt. Die Form hierfür wurde von der TU-BS im Laserdruckverfahren bzw. vom WKI im Massivholzverfahren gefertigt.</p> <p>Durch all ahead wurden Recherche nach geeigneten Firmen für den Formenbau durchgeführt und grobe CAD Skizzen eines möglichen Werkzeugs konstruiert, um den Firmen eine Basis für Angebote und Machbarkeit zu geben.</p> <p>Letztendlich wurden sowohl für die ebenen Großbauteile als auch für Vorhängeschale eigenen Konstruktionen als Form in Holzspantenbauweise hergestellt.</p>
<p>AP 5.2 Optimierung mechanischer, dynamischer &amp;</p>	<p>03/2022 bis 10/2022</p>	<p>Von Seiten der TU BS wurde im Rahmen dieses Arbeitspaketes eine detaillierte Anschlussbemessung für die Brückenkonstruktion durchgeführt. Aufgrund der statischen</p>

ökologischer Eigenschaften (WKI, TU BS).		Unbestimmtheit des Systems, sowie der kombinierten Scheiben- und Plattenbeanspruchung beeinflusst die Modifikation von Auflager- und Anschlussausbildungen die Schnittgrößenverteilung in den Bauteilen. Für eine valide Interpretation der Ergebnisse wurde das Brückenbauwerk im Rahmen der numerischen Untersuchungen in die jeweiligen Tragkomponenten zerlegt und einzelnen betrachtet. Für eine realitätsnahe Abbildung des Trag- und Verformungsverhaltens wurden Auflager- und Anschlussausbildungen mittels entsprechender Rotations- und Translationfedern modelliert. Daraus resultierende Änderungen der Schnittgrößen wurden in einem iterativen Verfahren überprüft und die entsprechenden Nachweise geführt. Für eine detaillierte Ergebnisdarstellung wird auf den Anhang zum TV 2 verwiesen.
AP 5.3 Bau eines realen Bauteils für die bauliche Anwendung (WKI, Pollmeier, all ahead, Lutz).	01/2023 bis 07/2023	Einzelne ebene Bauteile wurden zu Testzwecken von all ahead hergestellt insb. im Hinblick auf die Optimierung des Vakuuminfusionsprozess. Große ebene Bauteile (Schotte) wurden hergestellt und die damit verbundenen Skalierungseffekte betrachtet. Bei gekrümmten Bauteilen (Vorhängeschale) zeigen sich noch größere Probleme bei der Herstellung als bei den planen Bauteilen.
AP 5.4 Bau einer realen Fußgängerbrücke (all ahead, Pollmeier, Unterauftrag Müller).	01/2023 bis 07/2023	Teile der Brücke wurden gebaut.  Eine komplette Brücke konnte aber aus technischen und zeitlichen Gründen nicht hergestellt werden.
AP 6: (WKI / HOFZET, all ahead, TU BS, RUB) Life Cycle Assessment / Carbon Footprint.	08/2022 bis 02/2023	Die Erstellung der Life Cycle Analyse wurde durch den Unterauftragnehmer Ruhr Universität Bochum (RUB) vorgenommen. Materialdaten und Bauteilvolumina wurden durch die Projektpartner zur Verfügung gestellt.
AP 6.1 Erstellung eines Tools für die Erstabschätzung (HOFZET).	05/2020 bis 01/2023	Das entwickelte Bauprodukt FreiFo-Platte mit einer Fläche von 3,91 m <sup>2</sup> (Stärke: 2 cm) wurde in der Berechnungssoftware GaBi (Version 10.5.0.78) nach DIN 15804 bilanziert. Der Detaillierungsgrad der Untersuchung leitet sich aus der Datengrundlage ab, die zur Verfügung gestellt wurde: alle bis zu dem Zeitpunkt der Modellierung verfügbaren Informationen, bezogen auf Materialien und Prozesse, wurden in die Bilanzierung einbezogen. Aufgrund der zum Teil nicht ausreichenden Datengrundlage für bestimmte Prozesse bzw. Materialströme innerhalb des Lebenszyklus mussten teilweise Datensätze aus den zur Verfügung stehenden Datenbanken ausgewählt werden.
AP 6.2 Bilanzierung der Werkstoffkombinationen (HOFZET, all ahead, TU BS).	11/2023 bis 01/2023	Die Arbeiten der LCA wurden unter Mitarbeit aller Partner durch die Ruhr Universität Bochum (RUB) ausgeführt.  Die zugrundeliegenden Informationen zu eingesetzten Werkstoffen und Materialmengen wurden dazu aus der von der TU Braunschweig erarbeiteten Konstruktion entnommen und in die LCA-Analyse einbezogen. Ein eigener Bericht liegt dazu vor.
AP 7 (WKI / HNT) Koordination	01/2020 bis 07/023	Alle Arbeiten wurden durch das WKI initiiert und koordiniert. Während der Coronazeit (März 2020 – Oktober 2022) waren sowohl Arbeiten bei den Instituten als auch in den Firmen nur sehr eingeschränkt durchführbar. Reale Treffen fanden in dieser Zeit überhaupt nicht statt.  <b>Gemeinsame Treffen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 27.2.2020 Kick-Off Meeting im WKI Braunschweig</li> <li>➤ 29.4.2020 Virtuelles Kick-Off Meeting</li> <li>➤ 30.7.2020 Virtuelles Treffen</li> <li>➤ 15.10.2020 Virtuelles Treffen</li> <li>➤ 6.12.2020 Virtuelles Treffen</li> <li>➤ 24.2.2021 Virtuelles Treffen</li> <li>➤ 9.4.2021 Präsentation Schalen von Furnieren und Vakuuminfusion</li> <li>➤ 20.11.2021 Virtuelles Treffen</li> <li>➤ 20.1.2022 Virtuelles Treffen</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 25.1.2022 Virtuelle Besprechung zur LCA</li> <li>➤ 09.06.2022 Virtuelles Treffen</li> <li>➤ 27.07.2022 Arbeitstreffen bei all ahead</li> <li>➤ 05.10.2022 Virtuelles Treffen</li> <li>➤ 25.-26.10.2022 Virtueller Workshop mit RUB zu LCA</li> <li>➤ 18.11.2022 Virtuelles Treffen mit RUB zu LCA</li> <li>➤ 14.12.2022 Virtuelles Treffen</li> <li>➤ 10.03.2023 Virtuelles Treffen</li> <li>➤ 16. – 17.3.2023 Statusseminar-Münster</li> <li>➤ Abschlusstreffen auf der LIGNA Messe am 16.5.2023</li> </ul>
--	--	---

<b>Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)</b>	<b>Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)</b>	<b>Zielerreichung</b>
M1: Herstellung von ebenen Handmustern für die mechanischen und hygri-schen Tests in AP2 sowie von Hybrid-Freiformflächen für die Abdeckungen von Rundpfählen und Vorhänge für Rammpfähle im Hafenanbau.	02/2022	Sowohl ebene als auch halbrunde Handmuster für mechanisch – hygri-sche Tests wurden bis zum Zielmonat hergestellt.
M2: Herstellung (skalierter) Brückenelemente in AP 5 für simulierte und reale Belastungstests.	11/2022	Die Herstellung von Brückenelementen im Maßstab 1:10 wurde erst kurz vor dem Ablauf des Projektes fertig. Simulierte / reale Belastungstests wurden am Model durchgeführt.

## **b) Zusammenfassung**

Am Anfang stand die Erarbeitung eines Lastenheftes mit dem Fokus auf die Anwendung des neuen Hybridmaterials in einer Fußgängerbrücke

Hierbei waren die Anforderungen an den baulichen Holzschutz, Aspekte der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit für Holzbrücken sowie zu berücksichtigende Lasten und Entwurfsparameter zu berücksichtigen.

Hieraus wurden Brückenentwürfe erarbeitet und während des Projektes immer weiter verfeinert und optimiert.

Eine Finite-Elemente-Modellierung der Bauteile wurde im RFEM Programm unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse aus den Materialtests vorgenommen. Die ausgelesenen Spannungen wurden mit den Materialfestigkeiten aus den Versuchsergebnissen der Projektpartner und einem bauaufsichtlich zugelassenen Produkt (BauBuche S und BauBuche Q der Firma Pollmeier) verglichen und somit die Nachweisführung im Grenzzustand der Tragfähigkeit durchgeführt. Die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit umfassen umfangreiche Verformungs- und Schwingungsanalysen.

In der Materialherstellung konnte die prinzipielle Machbarkeit zur Herstellung von Hybridwerkstoffe aus einer Kombination von frisch geschälten, feuchten und damit noch flexiblen Laubholz Furnieren in Verbindung mit Natur- und Basaltfasern in einem speziellen Vakuumtrocknungs- und Infusionsverfahren erfolgreich gezeigt werden.

Probleme des mangelhaften UV Schutzes der Harzsysteme sowie der schwierigen Verbindungstechniken in den neuen Hybridwerkstoffen konnten gelöst werden.

Probleme traten im Wesentlichen bei der Infusion der großen Teile (Schotten / Brüstung) auf. Dies wurde zum großen Teil durch die dicken (~3,5mm), stark gewellten Buchenholz Furniere (ungeeignete Trocknung) verursacht.

Die Durchführung der LCA durch die Ruhr Universität Bochum (RUB) verlief sehr gut und professionell obwohl einige der von der Firma Pollmeier erwarteten Grunddaten bis zum Ende des Projektes nicht geliefert werden konnten.

## II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

### 1. Erzielte Ergebnisse

#### Arbeitspaket 1: Optimierung der Herstellung der Halbzeuge bestehend aus Schäl furnieren und textiler Matten mittels Vakuumtrocknung

##### Arbeitspaket 1.1: Vorbehandlung und Schalen verschiedener Furniere

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden vom WKI diverse Hainbuchenstämme aus dem Südharz beschafft. Wegen des nicht optimalen Beginns des Projektes (Corona) und der schwierigen Bodenverhältnisse (durchweichte Winterböden) konnten nur wenige Stämme besorgt werden, deren Durchmesser gering und Gradheit für das Schalen nicht optimal waren (Abbildung 1).

Aus ersten Untersuchungen an anderen Holzarten waren die optimalen Vorbehandlungsparameter wie notwendige Kochtemperatur, Dauer des Kochens aber auch Messergeometrie und der Anstell- bzw. Freiwinkel ermittelt worden. Aus jeweils einem gekochten und noch heißen, einem abgekühlten und einem ungekochten Hainbuchenstamm wurden 1 mm und 2 mm dicke Furniere geschält (Abbildung 2, Abbildung 3). Die Materialfeuchte der Stämme beträgt dabei mehr als 50%.



Abbildung 1: Eingespannter Hainbuchenstamm vor dem Schalen.



Abbildung 2: Verbliebener Rest des Hainbuchenstamms aus Abbildung 1 nach dem Schalen.



Abbildung 3: 1 mm dicke (links) und 2 mm dicke Furniere (rechts) des Hainbuchenstamms.

Ähnliche Stämme die dieselbe Vorbehandlung erfahren hatten wurden unmittelbar zum Projektpartner Müller gefahren, und dort aus ihnen dünne Furniere zu sägen. Dabei wurde ein gekochter Stamm thermisch gut eingepackt, um ihn vor Ort noch heiß zu 2 mm dicken Furnieren zu zersägen. Allerdings kühlte das Holz auf der Säge (Abbildung 4, links), bedingt durch den zeitaufwendigen Versuchseinschnitt, rasch ab und wies zum Ende des Einschnitts lediglich noch 25 °C auf. Auch der abgekühlte, und der ungekochte Stamm wurden zu 2 mm dicken Furnieren aufgesägt (Abbildung 4, rechts). 1 mm dicke Furniere ließen sich mit der Säge nicht herstellen.



Abbildung 4: Hainbuchenstamm auf dem Sägebett (links) und während der Freilufttrocknung der 2mm dicken Furniere (rechts).

Durch die Schwierigkeit, die relativ dicken und getrockneten Buchenholzurniere der Firma Pollmeier (~3,5mm) in eine 3D-Form zu zwingen war die Notwendigkeit deutlich geworden, dünnere und damit flexible Furniere zu produzieren.

Hierzu mussten weitere Untersuchungen an Hainbuchen- und Buchenstämmen durchgeführt werden um hieraus Furniere von weniger als 1 mm herzustellen.

Nach einer Modifikation der Messergeometrie und Härtung des Metalls im Jahr 2022 konnten deutlich bessere Messerstandzeiten am WKI erreicht werden. Dadurch wurden weniger Scharten im Holz erzeugt und es war möglich auch Furniere mit Dicken von Sub-Millimetern (~0,5mm) herzustellen.

### Arbeitspaket 1.2: Optimierung des Trocknungsprozesses frischer Furniere

In diesem Arbeitspaket sollte der Versuchsaufbau zur Vakuumtrocknung optimiert werden, der anschließend auch zur Vakuuminfusion dient. Mehrere Aufbauten, Heiztemperaturen und Heizzeiten wurden hierfür überprüft. Dabei wurden sowohl einzelne Furniere, reine Stapel aus Holzurnieren, aber auch welche mit Zwischenlagen aus verschiedenen Gelegen und Geweben getestet (Basaltfasern, Naturfasern, GFK, CFK etc.).

Zum Teil verklebte die Schlichte auf den Basaltfasern bei den gewählten Temperaturen von über 70°C bereits mit den Furnieren.

Verschiedene Trocknungsversuche wurden auch durchgeführt, um zu ermitteln, wieviel Wasser von den Geweben und Gelegen aufgenommen wird und inwieweit hierdurch die Schlichte beeinflusst wird.

Auch die Frage nach dem Nutzen der Schlichte wurde in diesem AP untersucht (siehe auch AP 1.3).

Erste Versuche wurden durchgeführt, um herauszufinden, welche Biegeradien mit frisch geschälten Hainbuchenurnieren in welcher Richtung erzielbar sind (Abbildung 5).

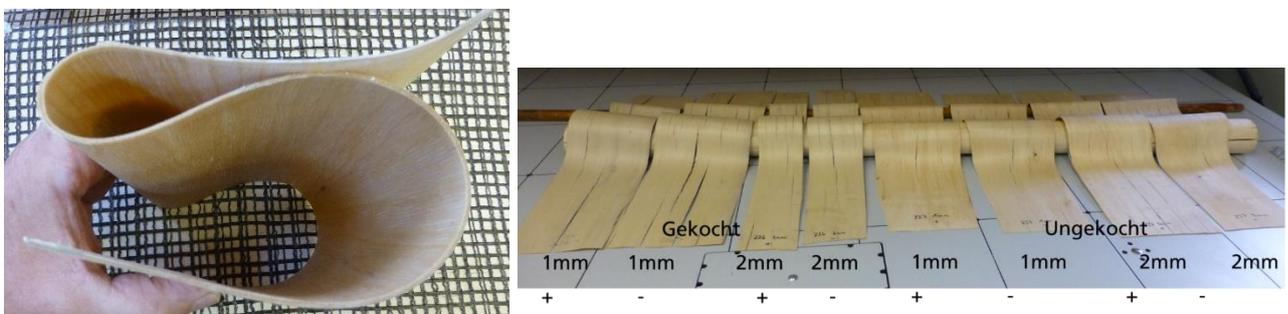


Abbildung 5: Feuchte Hainbuchenurniere in der manuellen Biegeprüfung entlang der Faser (links) und nach dem Vakuumtrocknen parallel zur Faser (rechts).

Da selbst die Hainbuchenurniere mit nur 1 mm Dicke sich nicht optimal in beide Richtungen biegen lassen wurden weitere Versuche mit gelaserten Furnieren durchgeführt. Hierzu wurden von der Hochschule für

bildende Künste in Braunschweig verschiedene Furniere mit einem Laser bearbeitet um sie biegsamer zu machen (Abbildung 6).

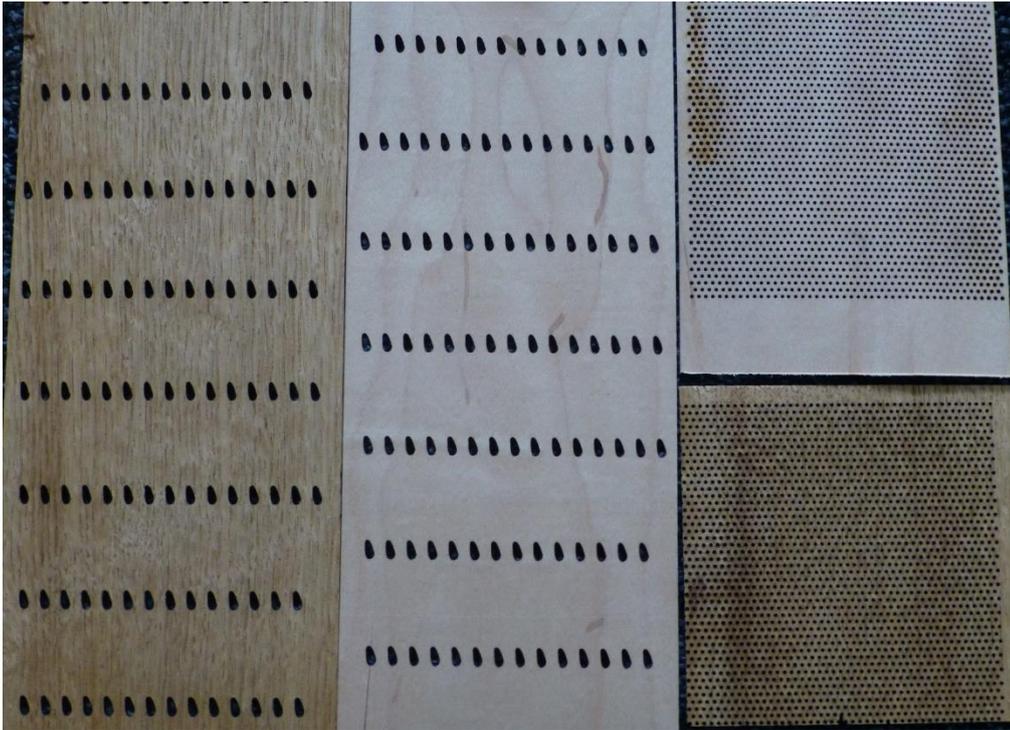


Abbildung 6: Unterschiedliche Holzurniere wurden mit einem Laser perforiert um sie biegsamer zu machen.

Da diese perforierten Furniere nicht der gewünschten Biegsamkeit entsprachen wurden Versuche mit der Delignifizierung von Furnieren getestet. Hierzu werden die Furniere mit unterschiedlichen Chemikalien behandelt um Teile der des Lignins aus dem Holz zu entfernen und sie damit weicher zu machen. Da diese Behandlung zeitaufwändig und nicht sehr erfolgreich war wurden auf dem Markt befindliche sogenannten 3D-Furnieren der Firma Danzer (Abbildung 7, links) als auch NUO – Holztextilien der Firma Schorn & Gro getestet (Abbildung 7, rechts).



Abbildung 7: Mit längs-geschlitzten 3D-Furnieren (links) und in zwei Richtungen geschlitzten NUO – Holztextilien (rechts) wurden verschiedene Versuche unternommen, auch kleine Biegeradien in unterschiedlichen Richtungen herzustellen.

Da die NUO Furniere kaum noch eine Festigkeit durch die Holzstruktur besitzen, sondern lediglich durch die darunter geklebten Textilien wurde weiterhin im Wesentlichen mit 3D-Danzer Furnieren gearbeitet. Diese wurden in vielen Fällen von der 1 mm Dicke auf 0,5 mm heruntergeschliffen.

### **Arbeitspaket 1.3: Evaluation der Trocknung von verschiedenen textilen Halbzeugen**

Die Untersuchungen in AP 1.3 erfolgten an fünf unterschiedlichen Faserarten bzw. Fasern unterschiedlicher Beschichtung, die in Tabelle 1 aufgeführt und in den Abbildung 9 bis Abbildung 12 abgebildet sind. Es wurden hierzu die fünf verschiedenen Fasertypen in Form von Geweben/Gelegen zunächst mit Furnieren geschichtet und getrocknet. Die Abführung der Feuchtigkeit erfolgte durch Spiralschläuche, die auf der obersten Furnierlage platziert wurden (Abbildung 8). Damit nimmt Kontaktzeit der Halbzeuge mit dem Extrakt von der untersten zur obersten Lage zu.



Abbildung 8: Aufbau zum Trocknen der Furnierpakete im Vakuum.

Tabelle 1 Übersicht der untersuchten Textilien

Nr.	Fasertyp	Material	Schlichte	Halbzeug
1	Naturfaser	AmpliTex 5040	Stärke	Gewebe
2	Carbonfaser	200 g/m <sup>2</sup> Carbongewebe Köper   HP-T200C	Epoxidbasiert	Gewebe
3	Glasfaser	Interglas 05507, Aero, Finish FK 144, KP	Finish, basiert auf Chrom 3	Gewebe
4	Basaltfaser	Basalt Gewebe 160 g/m <sup>2</sup> Köper 2/2	Silanschlichte	Gewebe
5	Naturfaser	FLAXPLY-UD150	Epoxidbasiert	UD



Abbildung 9: NF-Gewebe: AmpliTex 5040.

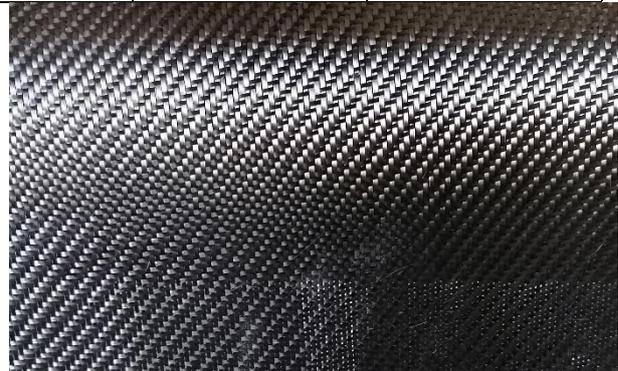


Abbildung 10: CF-Gewebe Köper: HP-T200C.

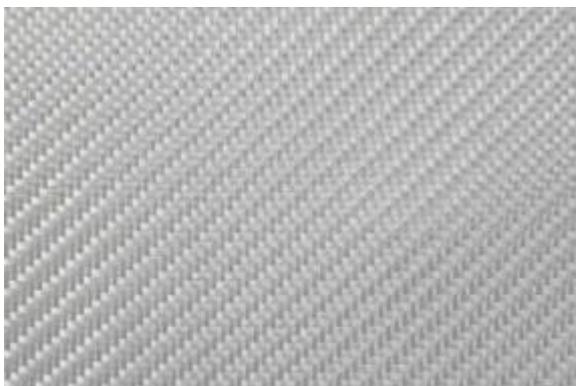


Abbildung 11: GF-Gewebe: Interglas 05507.



Abbildung 12: BF-Gewebe 160 g/m<sup>2</sup>.

Die Infusion der Halbzeuge zur Herstellung der FVK erfolgt mit dem teil-biobasierten Epoxidharzsystem SICOMIN SR Greenpoxy 56 und dem petrobasierten Härter SC 8822.

Die am WKI in Braunschweig getrockneten Materialien wurde in dem alternierenden Aufbau aus Textil und Holz in Tüten verschweißt und an das WKI in Hannover geschickt, wo die Weiterverarbeitung erfolgte. Vor der Verarbeitung zu FVK erfolgte die Öffnung der Tüten und die Lagerung in einem konditionierten Raum bei

Normklima, damit sowohl die Referenzen, als auch die behandelten Textilien bei denselben Bedingungen verarbeitet werden konnten.

Grundsätzlich erfolgt der Vergleich zwischen den nicht mit Holz getrockneten Textilien (Referenzen) mit den gemeinsam mit Holz getrockneten Materialien. Der Ergebnisse werden in Bezug zur jeweiligen Referenz gesetzt, wobei diese als 100 % angenommen wird. So lässt sich die prozentuale Veränderung abbilden.

Außerdem wurden Faserauszugstests an Basaltfasern durchgeführt, um die interlaminare Scherfestigkeit, also die Haftung zwischen Faser und Matrix, zu bestimmen. Dabei sind eine einzelne Faser oder ein Faserbündel mittig in eine Matrix eingebettet, woraufhin eine äußere Last in die Faser eingeleitet wird. Die Faser wird mit konstanter Geschwindigkeit aus der Matrix herausgezogen, wobei der Kraft-Verschiebungs-Verlauf gemessen wird. Für diesen Versuch wurden Basaltfaserbündel verwendet, wie sie Abbildung 13 zeigt. Dabei wurde zwischen Faserbündeln ohne Schlichte und welchen mit Silanschlichte unterschieden.

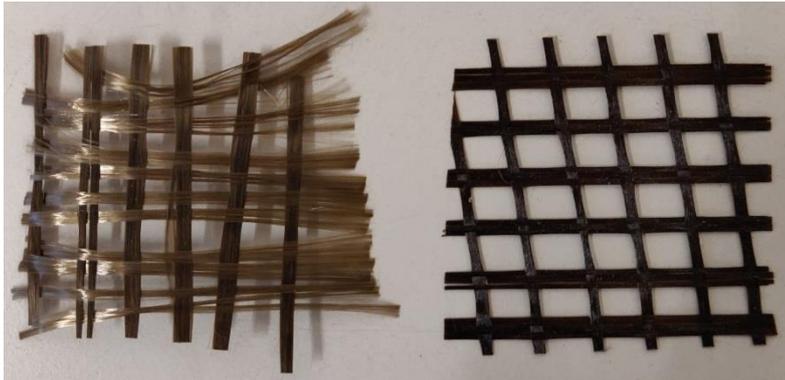


Abbildung 13: Basaltfasergewebe (links) ohne und (rechts) mit Silanschlichte.

Bei den Versuchen zeigte sich, dass die Faserbündel nur einige Millimeter in die Matrix eingegossen werden dürfen, um eine Chance zu haben, sie herausziehen zu können. Andernfalls kam es zum Bruch der Matrix oder zum Reißen des Faserbündels. Bei den Fasern mit Schlichte gelang es, einige Faserbündel herauszuziehen, wodurch eine interlaminare Scherfestigkeit von 12 - 15 N/mm<sup>2</sup> berechnet werden konnte. Die auftretenden Kräfte bei den Faserbündeln ohne Schlichte waren erheblich höher. Außerdem ließen sich keine Faserbündel ohne Schlichte aus der Matrix entfernen. Hieraus kann gefolgert werden, dass, zumindest für diese Schlichte, Basaltfasern ohne Schlichte besser im Epoxidharz haften als Basaltfasern mit Silanschlichte.

#### **Untersuchung der Höchstzugkraft von CF-, GF-, BF-, und NF-Rovings – DIN 2062**

Für die Untersuchung der Höchstzugkraft nach DIN 2062 wurden 12 einzelne Rovings bzw. Garne aus den Textilien herauspräpariert und 48 nach Normalklima (20,0°C und eine relative Luftfeuchte von 65,0%) nach ISO 139 konditioniert. Im Anschluss erfolgte die Prüfung nach DIN 2062.

#### **Untersuchung der Scherfestigkeit– DIN EN ISO 14130**

Zur Untersuchung des Einflusses der Trocknung auf die Grenzfläche im Verbund wurde die DIN EN ISO 14130 als Grundlage gewählt. Durch die Ausrichtung der Fasern quer zur Lastrichtung wird jedoch keine Schubkraft auf die neutrale Faser indiziert. Vielmehr werden die Fasern in der unteren Hälfte der Probe auf Querszug belastet und dadurch direkt die Grenzfläche zwischen Faser und Matrix angesprochen, vgl. dazu Abbildung 14.

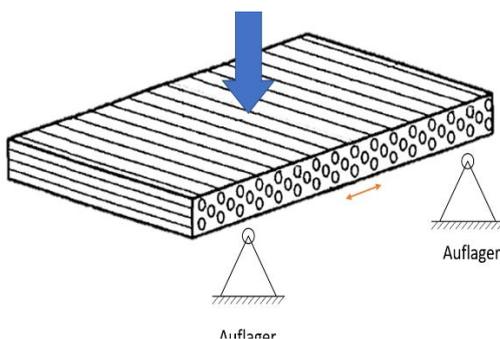


Abbildung 14: Prüfaufbau zur mechanischen Grenzflächenuntersuchung in Anlehnung an DIN EN ISO 14130.

Zur Herstellung unidirektionaler Prüfkörper wurden die Schussfäden der einzelnen Gewebe entfernt und die verbleibenden Kettfäden an ihren Enden per Tacky Tape fixiert, um eine einheitliche Ausrichtung zu garantieren. In diesem Verfahren wurde je Material 10 Lagen übereinandergestapelt und anschließend mittels Vakuuminfusion zu einem FVK verarbeitet. Aufgrund dieses Verfahrens war es nicht möglich, einen definierten Fasermassenanteil des jeweiligen FVK zu realisieren.

Per Kreissäge erfolgte anschließend der Zuschnitt der jeweils 15 Probekörper von 10 mm \* 20 mm quer zur Faserrichtung, welche normkonform klimatisiert und anschließend gemäß DIN EN ISO 14130 geprüft wurden.

Bei der Herstellung von Holz-Hybridwerkstoffen wurden zunächst flache und später auch gebogene Strukturen mithilfe des Vakuuminfusionsverfahrens hergestellt. Dabei wurde zunächst ein Vakuum innerhalb des Plattenaufbaus erzeugt, woraufhin Harz über einen Spiralschlauch an einer Seite des Bauteils angesaugt wurde. Durch kontinuierliches Harzansaugen verteilt sich das Harz so über das gesamte Bauteil. Eine spezielle, für Luft durchlässige und für Harz undurchlässige VAP Membran sowie ein darüber gelagertes Saugvlies sorgten dafür, dass die Bauteilfläche gleichmäßig entlüftet und das Harz verteilt wurde.

Bei den Versuchen zeigte sich, dass die Furniere vor dem Infusionsprozess zwingend gut getrocknet sein müssen (Feuchtigkeit <15 %), da ansonsten klebrige Flächen verbleiben an denen das Harz nicht ausgehärtet ist. Für eine gleichmäßige Bauteiloberfläche empfiehlt es sich außerdem, ein Abreißgewebe zwischen Furnieren und VAP Membran zu platzieren. Die Harzanteile der hergestellten Platten lagen größtenteils zwischen 40 % und 45 %.



Abbildung 15: Flacher Aufbau bei Vakuuminfusion Form

Abbildung 16: Furniere und Fasergewebe auf gebogener Form

Aus den mithilfe der Vakuuminfusion hergestellten Platten wurden Probekörper herausgesägt, mit denen verschiedene mechanische Prüfungen durchgeführt werden sollen. Bei ersten Biegeversuchen zeigte sich beispielsweise, dass Hybridwerkstoffe aus 1 mm dicken Holzfurnieren deutlich bessere Biegefestigkeiten haben als welche mit 2 mm dicken Furnieren. Zwischen Säge- und Schäl-furnieren zeigten sich keine nennenswerten Unterschiede.

### **Untersuchung der Höchstzugkraft von CF-, GF-, BF-, und NF-Rovings – DIN 2062**

Abbildung 17 fasst die Ergebnisse der Untersuchung der Höchstzugkraft als Boxplot zusammen. Dargestellt sind auf der Abszissenachse die verschiedenen Faserarten im Vergleich ohne und mit Vakuumtrocknung mit Holz, wobei für eine einfachere Darstellung die Werte jeweils in prozentualen Bezug zur jeweiligen Referenz gesetzt wurden. Die einzelnen Boxplots setzen sich aus dem Median, dem ersten und dritten Quartil sowie den Minimum- und Maximum-Werten zusammen.

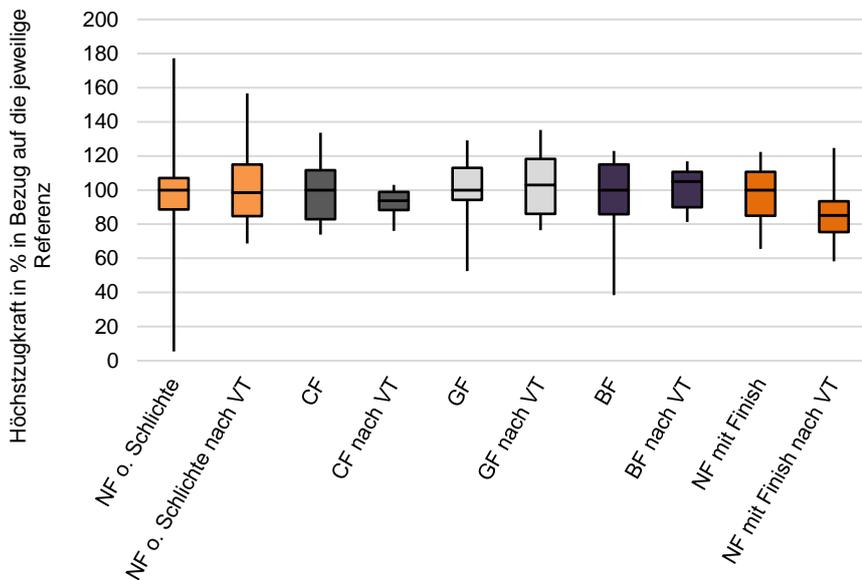


Abbildung 17: Ergebnisse der Untersuchung der Höchstzugkraft nach DIN 2062.

Grundsätzlich lässt sich für keine der untersuchten Fasern eine signifikante Abnahme der Zugkraft durch den Trocknungsprozess feststellen. Lediglich die mit einer Epoxidschlichte versehende Naturfasern zeigen eine abnehmende Tendenz. Grundsätzlich zeigen sich jedoch eine hohe Streuung der Fasern, insbesondere für die Naturfaser ohne Schlichte. Dies ist zum einen auf die Heterogenität der Naturfaser und das Fehlen einer Verspinnung im Falle der Naturfaser ohne Schlichte zurückzuführen. Zum anderen ist das Handling der Rovings erschwert. Es lösen sich sehr schnell einzelne Filamente/Fasern, so dass eine Abweichung der praktisch geprüften Anzahl an Filamenten entsteht. Nach der Vakuumtrocknung ist die Streuung der Ergebnisse teils verringert, was vermuten lässt, dass aufgrund der Feuchte eine leichte Haftung zwischen den einzelnen Filamenten/Fasern entsteht und weniger Verluste auftreten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Höchstzugkraft der untersuchten Faserarten durch die Vakuumtrocknung nicht negativ beeinflusst wird. Im Falle des Einsatzes von Naturfasern ist der Einsatz nicht beschichteter Fasern zunächst zu bevorzugen oder ggf. durch weitere Untersuchungen abzusichern.

### **Untersuchung der Scherfestigkeit von faserverstärktem Epoxidharz – DIN EN ISO 14130**

Abbildung 18 fasst identisch zu Abbildung 17 die Ergebnisse der Grenzflächenuntersuchung als Ausdruck der Quersugfestigkeit zusammen. Wie oben ausgeführt liegt keine interlaminare Scherwirkung in Laminebene vor, sondern eine Druckbelastung oberhalb der neutralen Faser sowie eine Quersugbelastung in der unteren Hälfte des Prüfkörpers aufgrund der einwirkenden Biegelast – und damit eine direkte Belastung der Grenzfläche.

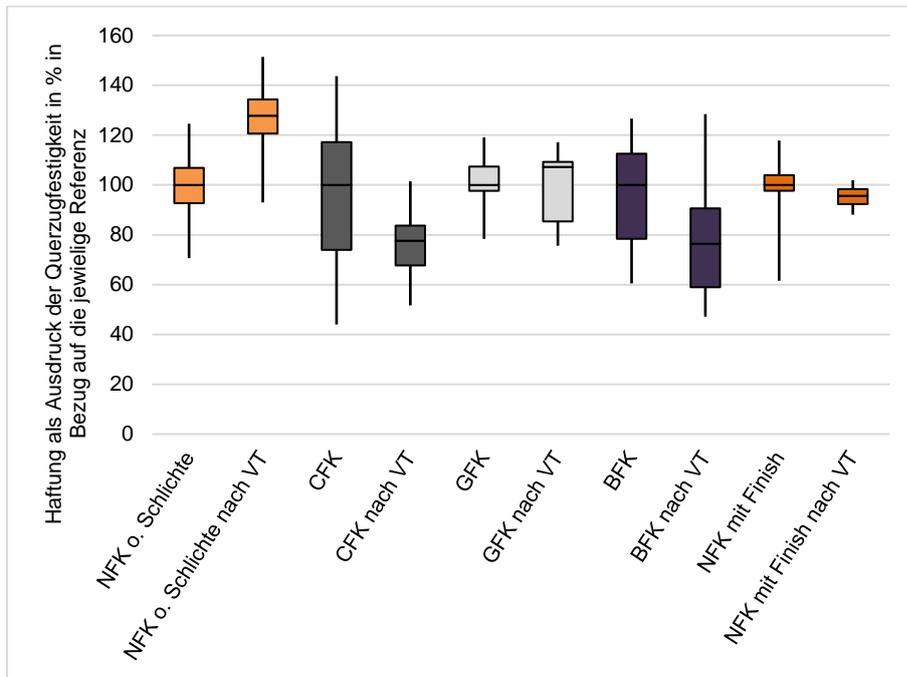


Abbildung 18: Ergebnisse der mechanischen Untersuchung der Grenzfläche in Anlehnung an DIN EN ISO 14130.

Mittels ANOVA (Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 5\%$ ) wurden die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Signifikanz analysiert, mit dem Ergebnis, dass sich der Mittelwert der Scherfestigkeit des NFK ohne Schlichte, des CFK sowie des BFK nach der Vakuumtrocknung signifikant unterscheidet. Während sich die Haftung des NFK um etwa 30 % verbessert, nimmt die Haftung des CFK bzw. des BFK um ca. 20% ab.

Der Prüfaufbau ist dem einer 3 Punkt-Biegeprüfung identisch, wobei sich der Auflagerabstand über  $5 \times h$  (Materialstärke) definiert. Dabei darf  $h \pm 0,2$  mm um den Mittelwert der Materialstärke schwanken. Hieraus resultiert die Problematik, dass Proben derselben Stärke theoretisch mit unterschiedlichen Auflagerabständen geprüft werden können. Bei einer Materialstärke von 2 mm entspricht der Auflagerabstand 10 mm, und es dürfen Proben zwischen 1,8 mm und 2,2 mm geprüft werden. Bei einer mittleren Materialstärke von 1,6 mm dürften somit auch Proben von 1,8 mm bei einem Auflagerabstand von 8 mm getestet werden. Folglich entstehen andere Werte. Um diese Fehlerquelle auszuschließen wurden in Abbildung 19 die Materialstärken mit den rechnerischen Auflagerabständen und den verwendeten Auflagerabständen (Mittel- der Materialstärke von 5 Prüfkörpern) verglichen. Die Abbildung zeigt, dass mit Ausnahme der NFK ohne Schlichte ohne und nach Vakuumtrocknung sowie NFK mit Finish nach Vakuumtrocknung Abweichungen vorliegen. Nach Korrektur der Auflagerabstände ist zu vermuten, dass sich die Werte in Abbildung 18 annähern. Bei Verringerung des Auflagerabstands ist davon auszugehen, dass die messbare Kraft zunimmt und damit die Querkraftfestigkeit steigt. Umgekehrt sollte diese sinken, wenn der Auflagerabstand zunimmt.

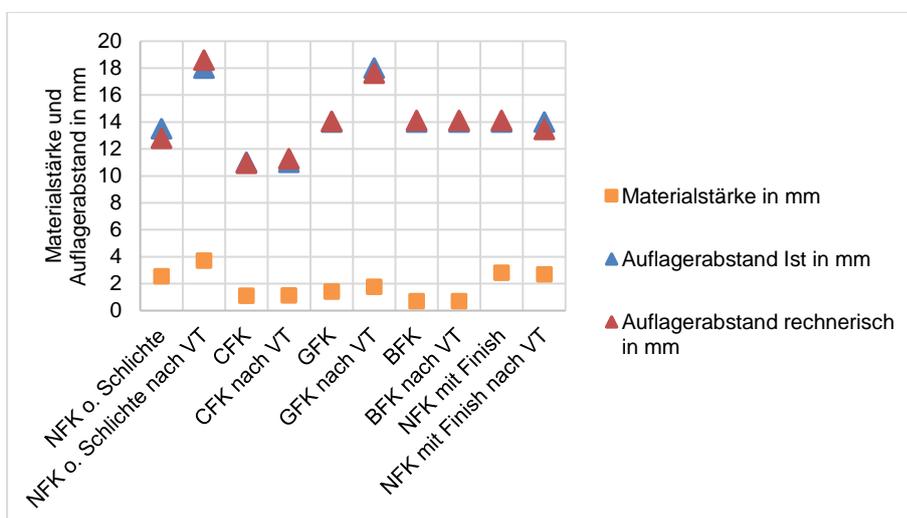


Abbildung 19: Vergleich der ermittelten Auflagerabstände in Abhängigkeit der Materialstärke.

Ein Zusammenhang zwischen Probenstärke und Auflagerabstand im Falle des CFK und des BFK kann jedoch nicht hergestellt werden und somit ist dieser Fehler ausgeschlossen worden.

Weitere potenzielle Gründe für unterschiedliche Werte stellen die Faserorientierung und der Fasermassenanteil dar. Während der Herstellung bzw. des Stapelns des Verbundes wurde auf die 0° Ausrichtung der Fasern geachtet. Diese ist auch auf der Ober- bzw. Unterseite der Probe zu erkennen. Aussagen über die Orientierung der inneren 8 Lagen lassen sich so jedoch nicht treffen und damit lässt sich ein Einfluss nicht ausschließen. Das Massenverhältnis zwischen Faser und Matrix ist maßgeblich für die mechanischen Eigenschaften eines Verbundes. Wie o.g. war eine Bestimmung nicht möglich, weshalb an dieser Stelle ein Einfluss nicht ausgeschlossen werden kann.

Zusammengefasst zeigt sich, dass sich bei Naturfasern ohne Schlichte bzw. Stärkeschlichte eine eher bessere Grenzfläche ausbildet. Bei Carbon- und Basaltfasern hingegen tendenziell eine Verringerung der Grenzflächenqualität durch die Vakuumtrocknung zu erkennen ist.

Zur weiteren Validierung des Einflusses sind zwei weitere Schritte denkbar:

1. Bestimmung des Fasermassenanteils von CFK und BFK mittels Pyrolyse
2. Erneute Vakuumtrocknung und Herstellung der jeweiligen FVK als 0/90 Aufbau und Bestimmung der Ingenieurskonstanten zur Ermittlung des Einflusses auf Steifigkeit bzw. Festigkeit

## Arbeitspaket 2: Herstellung von Hybridwerkstoffen im Vakuuminfusionsverfahren und Tests

### Arbeitspaket 2.1: Herstellung von Hybridwerkstoffen verschiedener Größe und Form

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden größere Mengen ebener Hybridplatten für Prüfzwecke (Abbildung 20) sowie größere gebogene Vorhängeschalen hergestellt (Abbildung 21).

Die ebenen Platten, die für Prüfzwecke hergestellt wurden, hatten den folgenden Aufbau:

	Holzurniere	Belastung	Gewebeart (g/m <sup>3</sup> )	Schichtaufbau (von unten nach oben)
1)	Hainbuche, 2mm dick	Längs zur Holzfaser	---	Holz/Holz/Holz
2)	Hainbuche, 2mm dick	Quer zur Holzfaser	---	Holz/Holz/Holz
3)	Hainbuche, 2mm dick	Längs zur Holzfaser	Glas (300)	Holz/Gewebe/Holz/Gewebe/Holz
4)	Hainbuche, 2mm dick	Quer zur Holzfaser	Glas (300)	Holz/Gewebe/Holz/Gewebe/Holz
5)	Hainbuche, 2mm dick	Längs zur Holzfaser	Flachs (300)	Holz/Gewebe/Holz/Gewebe/Holz
6)	Hainbuche, 2mm dick	Quer zur Holzfaser	Flachs (300)	Holz/Gewebe/Holz/Gewebe/Holz
7)	Hainbuche, 2mm dick	Längs zur Holzfaser	Basalt (300)	Holz/Gewebe/Holz/Gewebe/Holz
8)	Hainbuche, 2mm dick	Quer zur Holzfaser	Basalt (300)	Holz/Gewebe/Holz/Gewebe/Holz
9)	Hainbuche, 1mm dick	Längs zur Holzfaser	---	Holz/Holz/Holz/Holz/Holz/Holz
10)	Hainbuche, 1mm dick	Quer zur Holzfaser	---	Holz/Holz/Holz/Holz/Holz/Holz
11)	Hainbuche, 1mm dick	Längs+Quer (Sperrholz)	---	Holz/Holz/Holz/Holz/Holz/Holz
12)	Hainbuche, 1mm dick	Längs zur Holzfaser	Basalt (300)	Holz/Gewebe/Holz/Holz/Holz/Holz/Holz
13)	Hainbuche, 1mm dick	Quer zur Holzfaser	Basalt (300)	Holz/Gewebe/Holz/Holz/Holz/Holz/Holz
14)	Hainbuche, 1mm dick	Längs zur Holzfaser	Basalt (300)	Holz/Gewebe/Holz/Holz/Holz/Holz/Gewebe/Holz
15)	Hainbuche, 1mm dick	Quer zur Holzfaser	Basalt (300)	Holz/Gewebe/Holz/Holz/Holz/Holz/Gewebe/Holz UD-Gewebe/UD-Gewebe/Holz/UD-Gewebe/Holz/UD-
16)	Hainbuche, 2mm dick	Längs zur Holzfaser	Flachs (UD, 210)	Gewebe/Holz/UD-Gewebe UD-Gewebe/UD-Gewebe/Holz/UD-Gewebe/UD-
17)	Hainbuche, 1mm dick	Längs zur Holzfaser	Flachs (UD, 210)	Gewebe/Holz/Holz/Holz/UD-Gewebe/UD-Gewebe/Holz

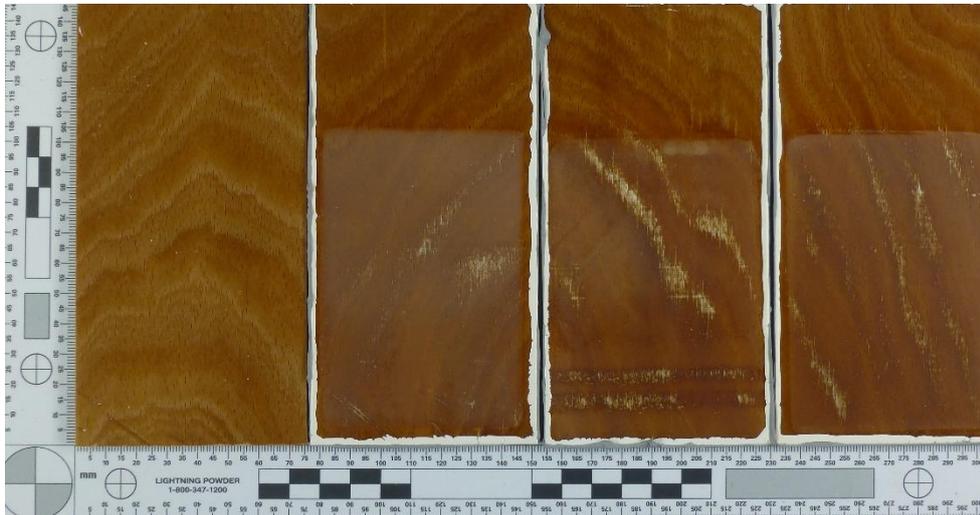


Abbildung 20: Typische ebene Prüfkörper, hier für die Tests der UV Beständigkeit.

Zunächst wurden Vorhängeschalen runder Struktur mit mehr als 20 mm Dicke hergestellt, wodurch auch Lasten von über 80 kg aufgenommen werden können (Abbildung 21).



Abbildung 21: Einige gebogene Vorhängeschalen die als Opferschalen dienen sollen.

Weitere ebene Vorhängeschalen wurden mit Auskragungen versehen (Abbildung 22, links) um sie mechanisch in Strukturen einhängen zu können. In weiteren Versuchen wurden Gewinde in das Sperrholz eingebracht um Befestigungsmöglichkeiten zu erlauben.

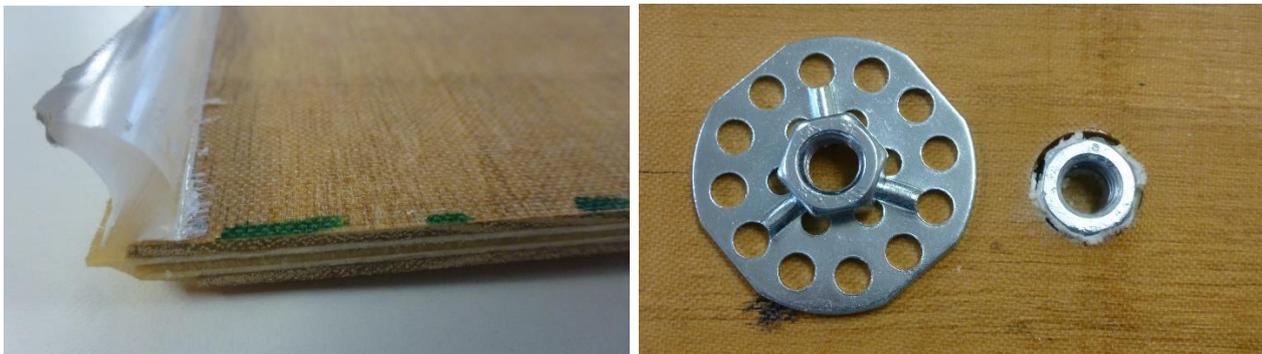


Abbildung 22: Ebene Opferschalen aus 5 Furnieren (Außenlagen aus Robinie und Innenlagen aus 3 Schichten Hainbuche) mit auskragender Epoxidharznase (links) und eingeklebter M8 Mutter (rechts).

Um zu überprüfen welche Art von Gewinde zur Befestigung der einzelnen Bauelemente am besten geeignet ist wurden die folgenden drei verschiedene Gewindearten in Sperrholz eingebracht (Abbildung 23).



Abbildung 23: Fotos der unterschiedlich verklebten Gewinde. Ein für Fasermaterial hergestelltes Gewinde (links), eine Standardmutter die in ein Sackloch mit Epoxidharz eingeklebt wurde (Mitte) und ein metallisches Zweikomponentensystem<sup>1</sup> in das ein Gewinde eingeschnitten wurde (rechts).

Nach der Aushärtung des Harzes wurde die Auszugsfestigkeit der Schrauben in dem folgenden Testaufbau (Abbildung 24, links) überprüft. Dabei stellte sich heraus, dass die für Faserverbundwerkstoffe hergestellte Gewindeart mit 5720 N den höchsten Auszugswert besitzt im Verhältnis zum eingeklebten Gewinde mit 178 N und dem eingeschnittenem Gewinde von 877 N (Abbildung 24, rechts).



Serie	$F_{max}$ N	Zeit( $F_{max}$ ) s
n = 4		
$\bar{x}$	5720	29
s	142	1
v	2,48	4,39



Serie	$F_{max}$ N	Zeit( $F_{max}$ ) s
n = 4		
$\bar{x}$	178	4
s	73,1	0
v	41,10	12,36



Serie	$F_{max}$ N	Zeit( $F_{max}$ ) s
n = 3		
$\bar{x}$	877	7
s	58,4	0
v	6,66	6,89



Abbildung 24: Maschine zum Testen des Schraubenauszugswiderstands (links) und Ergebnisse (rechts).

Außerdem wurden Faserauszugstests an Basaltfasern durchgeführt, um die interlaminare Scherfestigkeit, also die Haftung zwischen Faser und Matrix, zu bestimmen. Dabei werden eine einzelne Faser oder ein

<sup>1</sup> <https://www.belzona.com/viewfile.aspx?id=51332>

Faserbündel mittig in eine Matrix eingebettet, woraufhin eine äußere Last in die Faser eingeleitet wird. Die Faser wird mit konstanter Geschwindigkeit aus der Matrix herausgezogen, wobei der Kraft-Verschiebungs-Verlauf gemessen wird (Abbildung 13). Dabei wurde zwischen Faserbündeln ohne Schlichte und welchen mit Silanschlichte unterschieden.

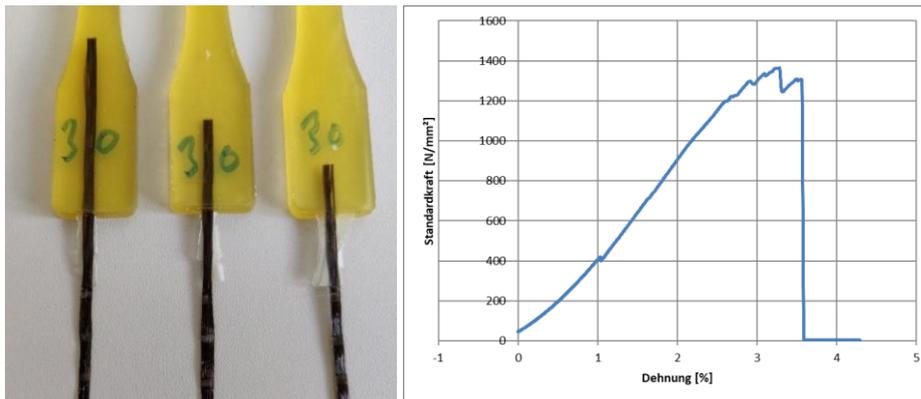


Abbildung 25: Basaltfasergewebe. verschieden tief (4cm, 2cm, 1cm) in Harz eingebettet (links) und entsprechende Kraft – Dehnungskurve (rechts).

Bei den Versuchen zeigte sich, dass die Faserbündel nur maximal 5 mm in die Matrix eingegossen werden dürfen, um sie herausziehen zu können. Andernfalls kam es zum Bruch der Matrix oder zum Reißen des Faserbündels.

Die folgenden Versuche wurden mit dem Epoxidharz Ampreg 30 durchgeführt.

Ampreg 30	Mit Schlichte Faserauszug	Mit Schlichte + getempert Faserauszug	Mit Schlichte Matrix bricht	Ohne Schlichte Matrix bricht	Ohne Schlichte + getempert Matrix bricht	Ohne Schlichte Faser reißt	Ohne Schlichte + getempert Faser reißt
Anzahl (2mm)	5	0	4	8	0	0	0
$\varnothing F_{\max}$ (2mm)	<b>151,6 N</b>	-	<b>224 N</b>	<b>412,88 N</b>	-	-	-
$S_{F_{\max}}$ (2mm)	54,63 N	-	9,06 N	188,16 N	-	-	-
Anzahl (4mm)	5	6	6	5	2	2	4
$\varnothing F_{\max}$ (4mm)	<b>238,8 N</b>	<b>279,2 N</b>	<b>334,8 N</b>	<b>589,2 N</b>	<b>686,5 N</b>	<b>544 N</b>	<b>555 N</b>
$S_{F_{\max}}$ (2mm)	57,73 N	49,69 N	67,92 N	304,51 N	21,00 N	155,56 N	262,77 N

- Fasern ohne Schlichte geben erst bei sehr viel höheren Kräften nach
- Basaltfasern ohne Schlichte halten anscheinend besser im Harz (evtl. weil Harz so besser zwischen die einzelnen Fasern gelangt)
- Tempern erhöht  $F_{\max}$

Weitere Messungen wurden mit Greenpoxy 56 der Firma Time Out durchgeführt

Greenpoxy 56 MIT Schlichte	Faserauszug	Getempert Faserauszug	Faser reißt	Getempert Faser reißt	Getempert Matrix bricht	Gesamt
Anzahl (4mm)	5	5	2	2	1	15
$\varnothing F_{\max}$ (4mm)	<b>315,6 N</b>	<b>314,53 N</b>	<b>210,9 N</b>	<b>316 N</b>	<b>366,2 N</b>	<b>304,7 N</b>
$S_{F_{\max}}$ (2mm)	56,87 N	106,75 N	3,41 N	59,38 N	-	77,82 N
Greenpoxy 56 OHNE Schlichte	Faser reißt	Getempert Faser reißt	Matrix bricht	Getempert Matrix bricht	Gesamt	
Anzahl (4mm)	1	1	4	3	9	
$\varnothing F_{\max}$ (4mm)	<b>378,3 N</b>	<b>1078,1 N</b>	<b>770,6 N</b>	<b>847,8 N</b>	<b>786,9 N</b>	
$S_{F_{\max}}$ (2mm)	-	-	69,12 N	40,15 N	187,59 N	

Bei den Fasern mit Schlichte gelang es, einige Faserbündel herauszuziehen. Die auftretenden Kräfte bei den Faserbündeln ohne Schlichte waren erheblich höher. Außerdem ließen sich keine Faserbündel ohne Schlichte aus der Matrix entfernen. Hieraus kann gefolgert werden, dass, zumindest für diese Schlichte, Basaltfasern ohne Schlichte besser im Epoxidharz haften als Basaltfasern mit Silanschlichte.

Entsprechend wurde mit der Webmaschine des WKI (Abbildung 26, links) aus Basaltfasern ohne Schlichte (Mitte) ein 50 cm breites Band als sog. Drehergewebe mit Garnabständen von 1 cm hergestellt (rechts). Diese Gewebeatart zeichnet sich sowohl durch einen speziellen Webprozess als auch durch spezifische Gebrauchseigenschaften aus: Bei der Herstellung werden in Kettichtung zwei Fäden kombiniert: Der Stehfaden verläuft rechtwinklig zum Schussfaden und der Dreherfaden, welcher sich immer wieder um 180° um den Stehfaden dreht und so den Kettfaden umschließt. Diese Verdrehung entsteht durch spezielle Dreherlitzen, durch die das Kettmaterial durchgeführt wird. Der Stehfaden befindet sich hierbei im Auge der Metallhalblitze, während der Dreherfaden darüber in der Führungseinheit der gesamten Dreherlitze sitzt, welche aus Kunststoff besteht. Durch Auf- und Abbewegung der Litze entsteht ein Hub, welcher den Dreherfaden nach rechts und links bewegt, wodurch die Drehung erzeugt wird. Durch die so realisierte Verdrehung sind Drehergewebe deutlich verschiebefester als andere Bindungsarten wie beispielsweise eine Leinwandbindung. Es können daher größere Abstände zwischen den Garnen realisiert werden, während jedoch gleichzeitig eine ausreichend hohe Verschiebefestigkeit realisiert werden kann. Diese Verschiebefestigkeit ist wichtig für das gesamte Handling der Gewebe. Nur wenn die Fäden ausreichend stark aneinander fixiert sind, kann das Gewebe trotz der großen Garnabstände ohne Beschädigungen bzw. Verschiebungen verarbeitet werden. Diese besondere Gewebeatart wird üblicherweise in flächigen Bauteilen eingesetzt – unter anderem in Betonanwendungen. Eine herausragende Drapierbarkeit ist für diese klassischen Anwendungen nicht nötig. Aufgrund der großen Garnabstände können jedoch insbesondere für größere, insgesamt überwiegend flächige Bauteile auch mit dieser Gewebeatart größere Radien realisiert werden. Da die Drapierbarkeit jedoch enorm abhängig von dem ganz spezifischen Gewebe, aber auch von der anvisierten Form sowie dem zugehörigen Prozess ist, kann die ganz konkrete Eignung der Gewebe hinsichtlich Drapierbarkeit erst nach Finalisierung von Konstruktion, Prozess etc. untersucht werden.



Abbildung 26: Webmaschine (links) für 50 cm breites Basaltfasergewebe (Mitte) das mit Basaltfaser ohne Schlichte als Drehergewebe (rechts) hergestellt wurde.

Im Rahmen der Herstellung großer Teile der Brückenkonstruktion wurden verschiedene Basalt- als auch Naturfasergewebe zur besseren Festigkeit und Fließfähigkeit des Epoxidharzes getestet.

Nachdem sich herausstellte das einfaches Drehergewebe bei mehrfacher Handhabung durch seine glatte Oberfläche sich völlig verschiebt wurde ein weitere Basaltfasergewebe hergestellt (Abbildung 27, links) in dem ein thermoplastischer Faden eingewebt und aufgeschmolzen wurde (Abbildung 27, rechts) um bei der Nutzung des Gewebes eine Verschiebung der Netzstruktur zu verhindern.

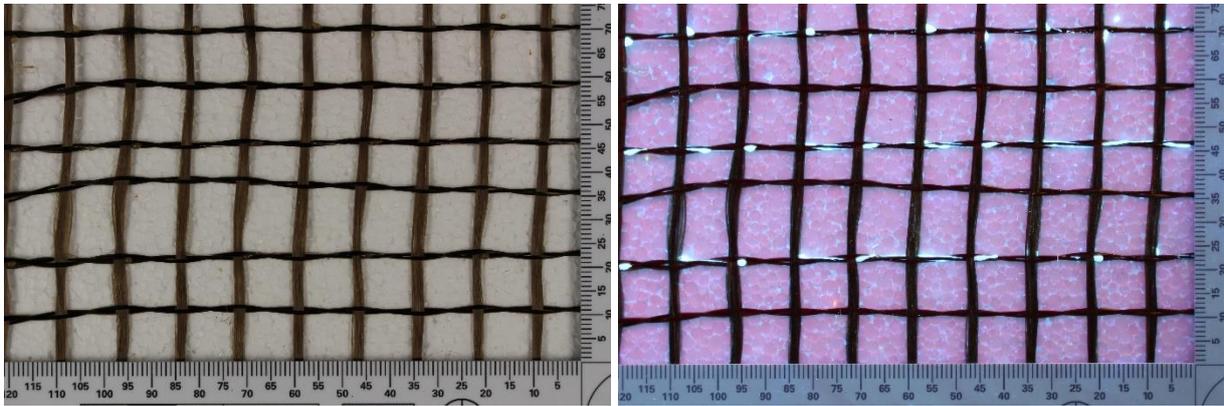


Abbildung 27: Foto des Basaltfasergewebes (links) und unter UV Lichtbeleuchtung (rechts) in dem die eingearbeitete, aufgeschmolzene Faser aufleuchtet.

### Arbeitspaket 2.2: Tränkung des Furnier- Faserverbundes

In diesem Arbeitspaket wurde das Eindringen des Epoxidharzes in verschiedene Holzarten unter dem Einfluss des Vakuums untersucht.

Das in die Lumen, Risse und Sägeschlitz eingedrungene Harz in Balsaholz ist in Abbildung 28 (links) gut zu erkennen.



Abbildung 28: Balsaholz in dessen Lumen, Risse und Sägeschnitte das Harz Greenepoxy eingedrungen ist (links) und Schälurniere eines Hainbuchenfurniers dessen Schälrisse mit Epoxidharz ausgefüllt sind (rechts). Die Fugen zwischen den einzelnen Furnieren sind dagegen nicht vollständig gefüllt (weiße Stellen).

In Abbildung 28 (rechts) ist deutlich das in die Schälrisse eingedrungene Harz zu erkennen. Dagegen sind nicht alle Fugen zwischen den Furnieren vollständig mit Harz getränkt. Auf diese Weise können die Harze bis zu 50% der gesamten Masse des Materials ausmachen.

In diesem Arbeitspaket ist das Eindringen des Epoxidharzes in verschiedene Holzarten und Furniere unter dem Einfluss des Vakuums waren im Technikumsmaßstab gut untersucht worden und erfolgreich. Bei der Herstellung großer Bauteile aus 3,5 mm dicker Buchenholzurniere war dies nicht so einfach wie die trockenen Oberflächen (Abbildung 29, links) und ein Blick zwischen die Furnierbahnen (Abbildung 29, rechts) zeigen.



Abbildung 29: Foto des ersten hergestellten Schotts (links) und der schlechten Verklebung (rechts).

### Arbeitspaket 2.3: Test verschiedener Hybrid Prüfkörper

In diesem Arbeitspaket wurden die Festigkeiten verschiedener Hybrid-Prüfkörper getestet. Bei ersten Biegeversuchen zeigte sich beispielsweise, dass Hybridwerkstoffe die aus 1 mm dicken Holzurnieren deutlich bessere Biege-E-Module haben als die, die mit 2 mm dicken Furnieren hergestellt wurden. Zwischen Säge- und Schälurnieren zeigten sich nur geringe Unterschiede.

Die Biege-E-Module erreichen in Längsrichtung ca. 17.500 N (Abbildung 30) und in Querrichtung ca. 4.500 N (Abbildung 31).

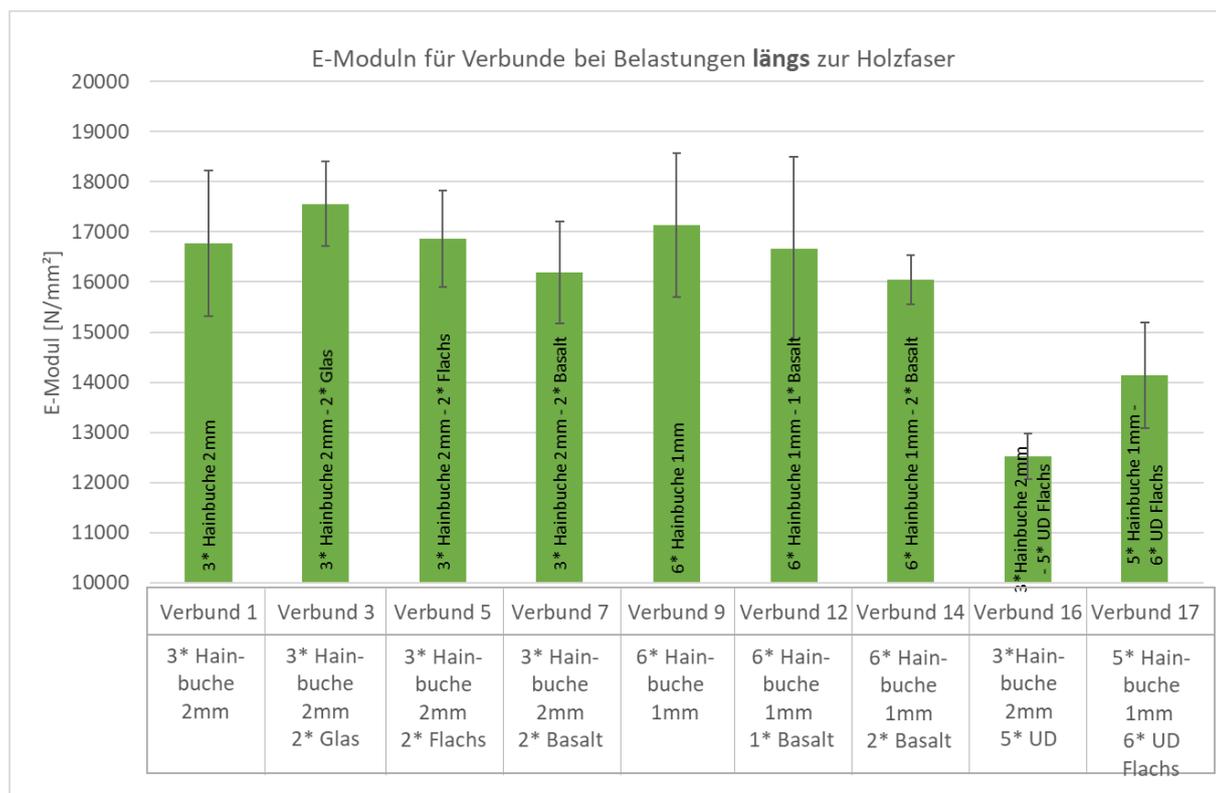


Abbildung 30: E-Modul verschiedener Prüfkörper bei denen die Biegefestigkeit längs der Faserrichtung getestet wurde.

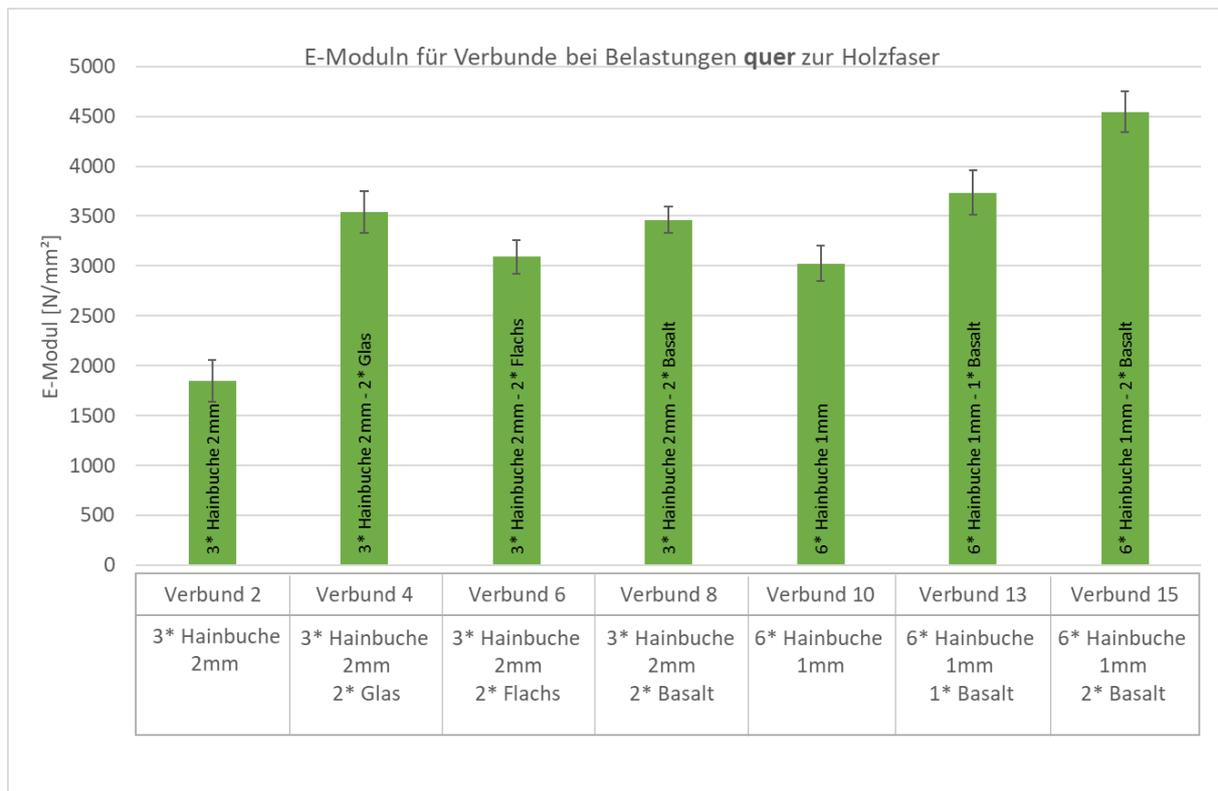


Abbildung 31: E-Modul verschiedener Prüfkörper bei denen die Biegefestigkeit quer zur Faserrichtung durchgeführt wurde.

In weiteren Untersuchungen sollte festgestellt werden ob das relativ dicke Buchenholz der Firma Pollmeier besser mit den Schäftungen zueinander (Abbildung 32, links) oder auch stumpf aneinander gefügt werden kann.



Abbildung 32: Pollmeier Buchenfurniere mit Schäftung in der Mittellage (links) und mit stumpf aneinander gefügten Furnieren in der Mittellage (rechts).

Nach dem Herstellen der Prüfkörper (jeweils 6 Stück) mit Hilfe der Vakuuminfusion wurden diese auf Prüfkörpergröße zugesägt, klimatisiert und anschließend einer Biegeprüfung, wie sie in Abbildung 33 zu sehen ist, unterworfen.



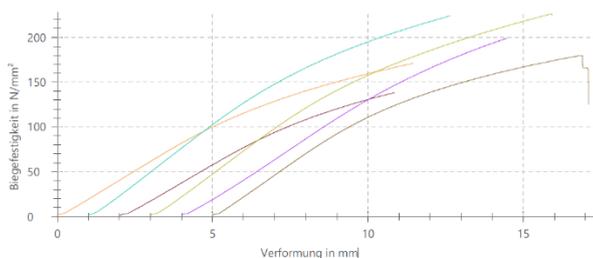
Abbildung 33: Maschine zum Testen der Biegefestigkeit bei geschäfteten bzw. stumpfen Verklebungen in der Mittellage von dreischichtigen Furnieren.

Die Prüfergebnisse (Abbildung 34) zeigen, dass kaum ein Festigkeitsunterschied zu ermitteln war zwischen den geschäfteten Furnieren ( $F_{max}$  3197 N) und den stumpf verklebten Furnieren ( $F_{max}$  3410 N). In diesen Versuchen zeigte sogar der stumpf verklebte Mittelwert eine geringfügig größere Festigkeit.

Serie	Breite	Dicke	Rohdichte	$F_{max}$	Biege- $F_{max}$	E-Modul	Dehnung bei $F_{max}$	Zeit( $F_{max}$ )
n = 6	mm	mm	kg/m <sup>3</sup>	N	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	s
x	45,26	10,58	1051	3197,43	190	14800	11,20	52
s	0,78	0,14	96	541,67	33,8	1730	1,40	6
v [%]	1,72	1,35	9,14	16,94	17,80	11,72	12,49	12,32

Serie	Breite	Dicke	Rohdichte	$F_{max}$	Biege- $F_{max}$	E-Modul	Dehnung bei $F_{max}$	Zeit( $F_{max}$ )
n = 6	mm	mm	kg/m <sup>3</sup>	N	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	mm	s
x	44,89	10,45	1164	3410,06	209	15600	12,83	57
s	0,13	0,21	64	316,08	23,3	948	1,69	9
v [%]	0,29	2,05	5,51	9,27	11,13	6,09	13,19	16,25

Seriengrafik:



Seriengrafik:

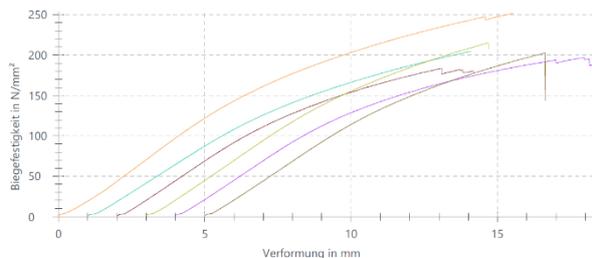


Abbildung 34: Ergebnisse der Biegeprüfungen bei geschäfteter Verklebung (links) und bei stumpfer Verklebung (rechts).

### Arbeitspaket 3: Material- und Grenzflächenuntersuchung mit $\mu$ -CT und Thermographie sowie CFD-Simulation

#### Arbeitspaket 3.1: Grenzflächen- und Materialuntersuchung mittels Thermographie

Um Fehler im Verbund und zwischen den Furnieren zu untersuchen wird die bereits oft benutzte Technik der aktiven Thermographie verwendet (Abbildung 35, links).

Hierzu wird das zu untersuchende Bauteil (Abbildung 35, rechts) kurz unter einem Wärmestrahler hindurchgeführt und anschließend die eindringende Wärmefront mit einer sehr empfindlichen (20mK Temperatureauflösung) Thermographiekamera beobachtet (Abbildung 36, links).

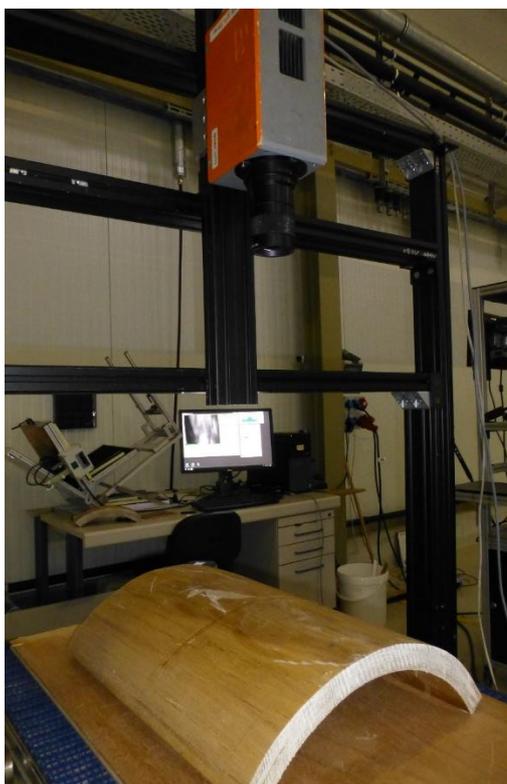


Abbildung 35: Thermographischer Aufbau (links) mit Infrarot Kamera, Rechner und Förderband auf dem das Hainbuchen-Vorhängeschale liegt und Detailaufnahme (rechts) der dünnen mit Epoxidharz verklebten Furniere.

Die Temperaturunterschiede werden entweder farblich codiert oder im Original als Grauwertbilder dargestellt (Abbildung 36). Dabei sind hellere Stellen deutlich wärmer als dunklere Stellen. Damit signalisieren die hellen Stellen Lufträume zwischen den Furnieren. Direkt nach dem Wärmeeintrag erscheinen die nahe unter der Oberfläche liegenden Lufteinschlüsse während tiefer liegende erst nach einigen Sekunden bzw. Minuten erscheinen.

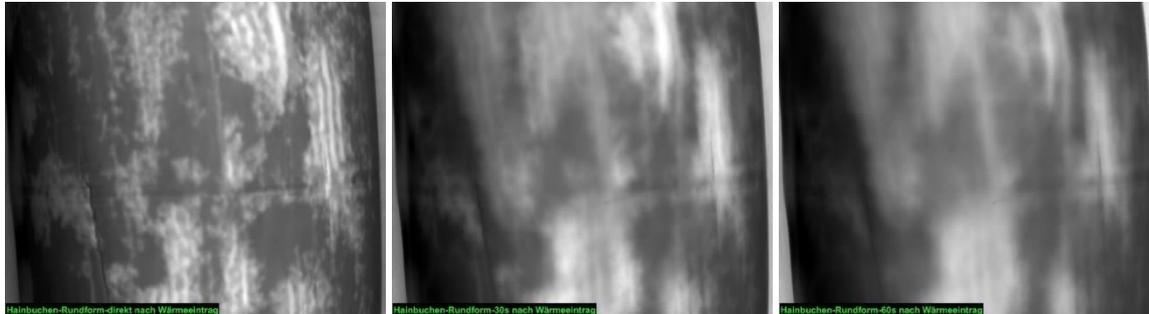


Abbildung 36: Thermogramme die direkt nach dem Wärmeeintrag aufgenommen wurden (links), sowie nachdem der Wärmepuls 30s (Mitte) und 60s (rechts) lange eingedrungen ist.

### 3D-Vermessung der Oberflächen

Die Vermessung der 3D-Flächen erfolgte mit Hilfe der Technik der Streifenprojektion. Hierzu nutzten wir das optische 3D-Koordinatenmessgerät (Modellreihe VL der Firma Keyence (Abbildung 37, links) mit dem Objekte von bis zu 600 mm x 600 mm Pixelgenau vermessen und mit 3D-CAD Daten verglichen werden können (Abbildung 37, rechts).

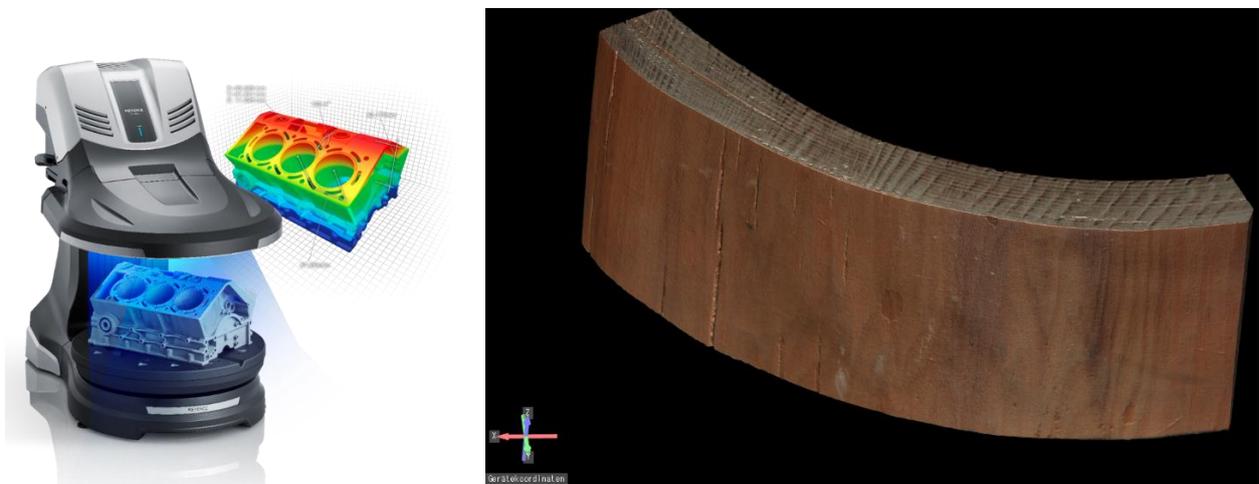


Abbildung 37: Optisches 3D-Koordinatenmessgerät das mit Hilfe der Streifenprojektionstechnik mit +/- 10 µm Messgenauigkeit und 2 µm Wiederholgenauigkeit auch Oberflächen von 670 mm Breite und 200mm Höhe vermessen kann.

Details wie die Vermessung von Rissen (Abbildung 38), Genauigkeit der Außen- und Innenmaße oder der Krümmungsradien ist mit dieser Technik ausgesprochen einfach. Das finale skalierte Model kann später auf diese Weise gescannt und mit der skalierten CAD Zeichnung verglichen werden.

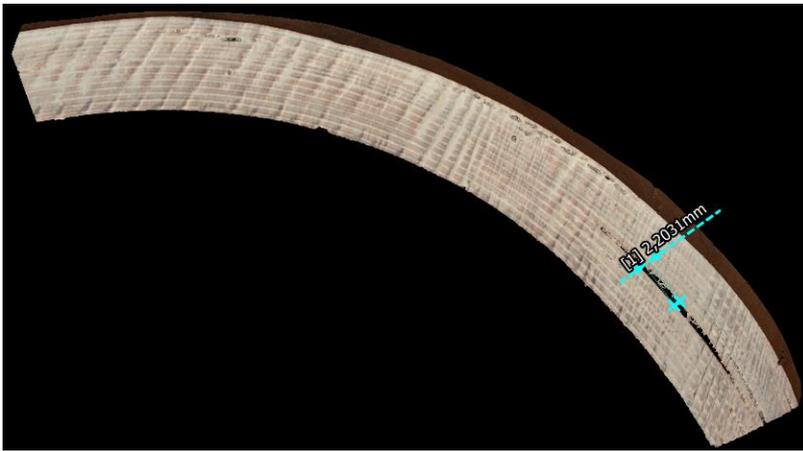


Abbildung 38: Detailreiche, stirnseitige Abbildung der Vorhängeschale aus Abbildung 37 (rechts) mit der Möglichkeit zur Vermessung von Rissweiten, Maßen und Radien.

### Arbeitspaket 3.2: Grenzflächen- und Materialuntersuchung mittels $\mu$ -CT

Bei der in Abbildung 39 (links) gezeigten Röntgenanlage handelt es sich um ein Gerät vom Typ Metronom 1 der Firma Zeiss. Dabei wird während der Röntgenmessung das Objekt um die eigene Achse gedreht und durchstrahlt. Aus den einzelnen Scans wird ein 3D-Röntgenbild errechnet aus dem mit der benutzten Software der Firma GOM automatisch die Lunker (Fehlverklebungen, Luftporenschlüsse) ermittelt und farblich gekennzeichnet (Abbildung 39, rechts).

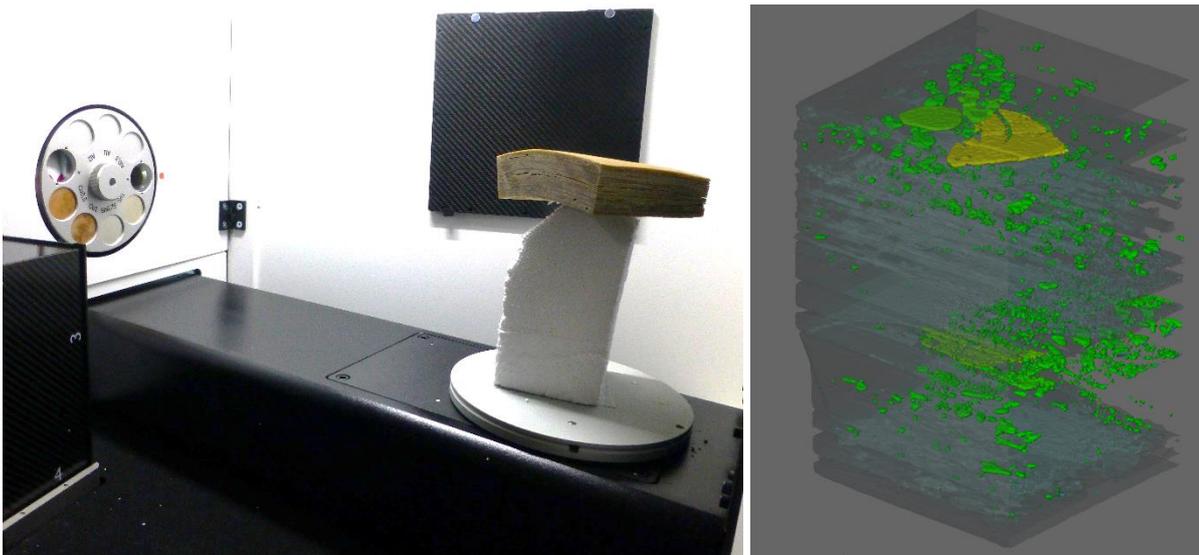


Abbildung 39: Foto aus dem Röntgengerät (links) mit der Strahlungsquelle und dem verklebten, gekrümmten Hainbuchenpaket sowie dem Ergebnis der CT Aufnahme mit den farblich markierten Lunkern (rechts).

### Arbeitspaket 3.3: Materialsimulation

In diesem Arbeitspaket wurden mit der Software GeoDict Materialmodelle entwickelt und die simulierten Tests mit realen Untersuchungen verglichen.

Für die Modulierung der E-Moduln parallel zur Holzfaserrichtung existieren keine großen Abweichungen zwischen den Werten aus dem Materialmodell und den aus den Zugversuchen (Abbildung 40, links). Dies hängt allerdings auch mit den relativ großen Streuungen der experimentell ermittelten Werte zusammen.

Bei Betrachten der Laminate 2 und 3 wird allerdings eine Schwäche des Materialmodells deutlich. Diese beiden Laminate unterschieden sich nicht im Aufbau, aber es wurden einerseits Säge- und andererseits Schäl furniere verwendet. In diesem Fall wurden die realen Verhältnisse nicht adäquat modelliert.

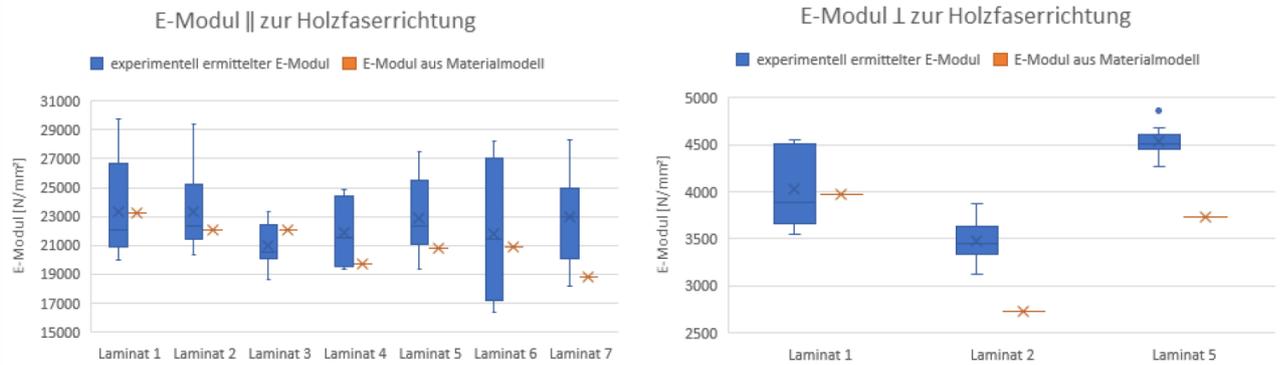


Abbildung 40: Vergleich der aus Zugversuchen parallel (links) und senkrecht (rechts) zur Holzfaser ermittelten E-Moduln, mit denen, die mithilfe des hier aufgestellten Materialmodells berechnet wurden.

Die mithilfe der Simulationen in GeoDict ermittelte Spannungs-Dehnungs-Kurven für dieses Laminat ist als orangefarbene Kurve in den Abbildung 41 zu sehen. Verglichen werden diese Kurven mit den experimentell ermittelten Messwerten, die in den Abbildung 41 blau dargestellt sind.

Es lässt sich feststellen, dass die Kurven aus den Simulationen (orange) sowohl parallel als auch senkrecht zur Holzfaser gut mit den Messwerten (blau) aus den Zugversuchen übereinstimmen. Einzig der Kraftabfall am Ende der Versuche unterscheidet sich deutlich von den Simulationen.

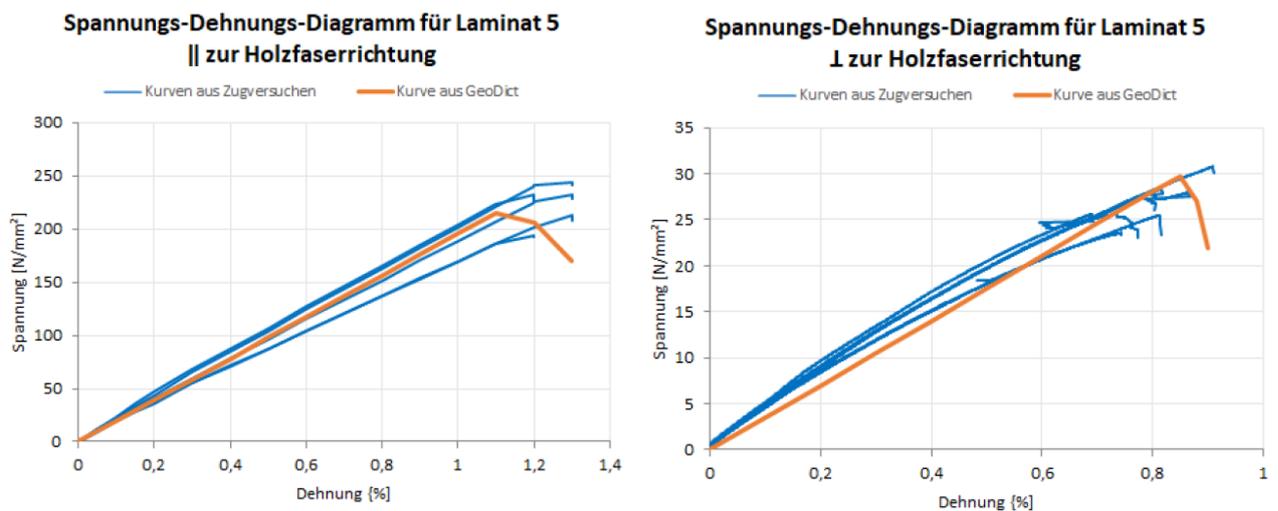


Abbildung 41: Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven für Laminat 5 parallel (links) und senkrecht (rechts) zur Holzfaserrichtung von der durch Simulationen ermittelten Kurve (orange) mit den Messkurven aus Zugversuchen (blau).

Weitere Simulationen wurden mit Furnieren verschiedener Holzarten durchgeführt. Einerseits wurden diese in einer Anlage zur Außenbewitterung angebracht (Abbildung 42 und Abbildung 43) und andererseits in den Boden gesteckt um die Resistenz bzw. das Abbauverhalten gegen Bodenbakterien zu simulieren.

Die Furniere in der Außenbewitterung verbiegen sich durch Aufweitung und Trocknung je nach Holzart zum Teil sehr stark, bleiben aber doch als Holz in gutem Zustand (Abbildung 43). Nur eine starke Vergrauung setzt durch die hohe UV-Strahlung ein.



Abbildung 42: Foto der Furniere in der Außenbewitterung zu Beginn des Tests am 27.7.2020.



Abbildung 43: Foto der Furniere in der Außenbewitterung am 16.2.2022.

Während die Furniere in der Außenbewitterung zwar vergrauen, jedoch kaum einen Abbau des Holzes zeigen verhält sich dasselbe Holz in Erdkontakt komplett anders.

Die in den Boden gesteckten Proben sind geordnet nach Holzart und Behandlungsmethode (Abbildung 44) und wurden in der Zeit vom 3.4.2021 bis zum 19.10.2022 in Bodenkontakt beobachtet. Jede zweite Woche wurde eine Probe dem Boden entnommen und der Schadensfortschritt dokumentiert (Abbildung 45).



Abbildung 44: Fotos der Holzurniere zu Beginn des Tests. Die Furnierstreifen wurden zur Hälfte in einen humusreichen Boden gesteckt und regelmäßig Proben entnommen und ausgewertet.



Abbildung 45: Fotos der in Bodenkontakt befindlichen Furniere nach 6 Monaten (links) und 12 Monaten (rechts). Deutlich sind die Spuren des Holzabbaus zu erkennen.

Die Simulation der Beständigkeit der Holzoberflächen und des Epoxidharzes gegen UV-Strahlung wird sowohl auf dem Bewitterungsstand (Abbildung 46) des WKI durchgeführt als auch mit künstlicher Bewitterung in QUV Geräten (Abbildung 47). Hierfür wurden Platten aus 5-lagigen Sperrholz bestehend aus 2 mm dicken Hainbuchenfurnieren hergestellt, in Prüfkörperform gesägt und die Kanten gegen Wasseraufnahme abdichtet.

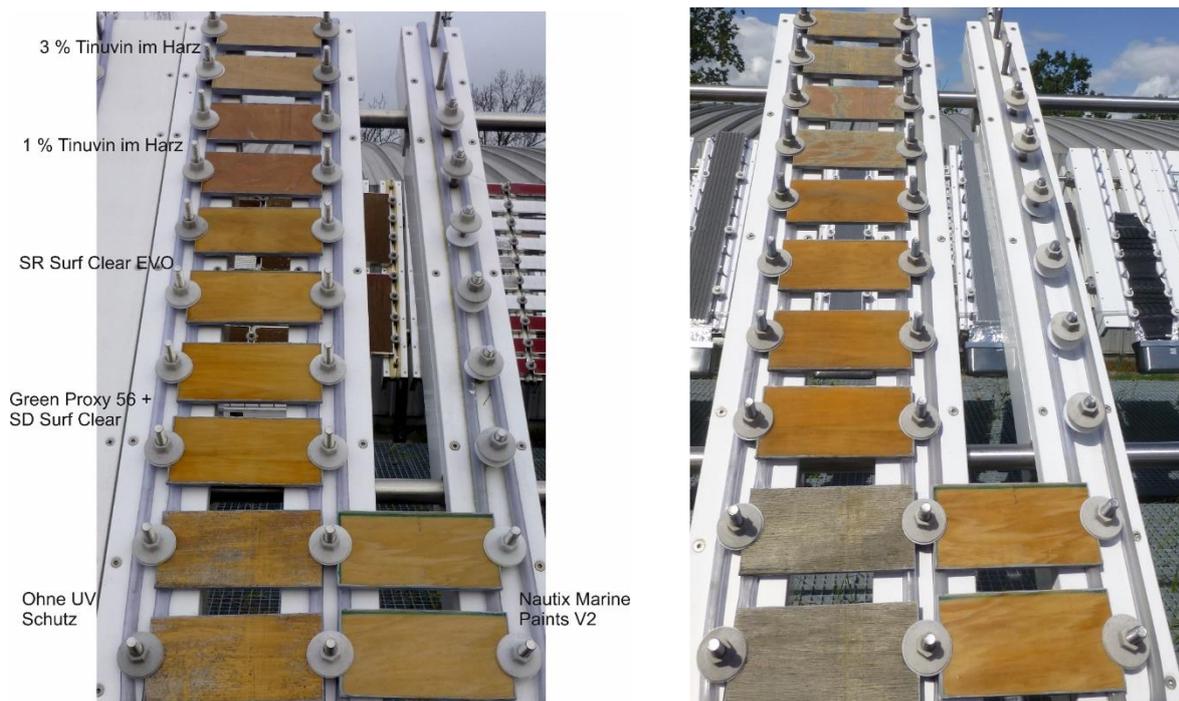


Abbildung 46: Unterschiedlich Oberflächen behandelte Sperrhölzer in der Außenbewitterung im Februar 2022 (links) und im August 2023 (rechts).

Es zeigt sich das die in das Harz eingebrachten UV-Partikel das Material nicht besonders gut schützen und die Furniere stark vergrauen, während die oberflächlich aufgetragenen Mittel zumindest während der Beobachtungszeit von 18 Monaten kaum eine Vergrauung des Holzes zeigen und auch das Harz offensichtlich nicht abgebaut wurde.

Bei der künstlichen Bewitterung wurden Teile des Probenmaterial für die Außenbewitterung auch für die künstliche Bewitterung im Q-Lab Gerät des WKI vorbereitet (Abbildung 47, links) und anschließend dem in Abbildung 47, rechts genannten Bewitterungszyklus ausgesetzt.



Tabelle 1 – Bewitterungszyklen

Stufe	Funktion	Temperatur	Dauer	Bedingung
1	Kondensation	(45 ± 3) °C	24 h	—
2	Unterzyklus Stufen 3 + 4	—	144 h bestehend aus 48 Zyklen von je 3 h der Stufen 3 und 4	—
3	UV	(60 ± 3) °C	2,5 h	eingestellte Bestrahlungsstärke 0,89 W/(m <sup>2</sup> nm) bei 340 nm
4	besprühen	—	0,5 h	(6 bis 7) l/min, keine UV-Strahlung

Abbildung 47: QUV Gerät der Firma Q-Lab zur künstlichen Bewitterung / Alterung von Oberflächen (links) mit UV-A Beleuchtung (Wellenlänge 340 nm) und ein typischer Bewitterungszyklus (rechts) wie er auch für die Projektproben genutzt wurde. Bei dieser künstlichen Bewitterung entspricht eine Zeit von 1008 h (42 Tage) etwa einem Jahr Außenbewitterung.

In der Abbildung 48 sind die Auswirkungen von 42 Tagen UV Alterung sehr deutlich zu erkennen an der Vergrauung des Holzes und des Abbaus der Oberflächen erkennen. Im Gegensatz zu den UV Partikeln die in das Harz eingebracht wurden zeigen die nachträglich aufgetragenen farbigen Oberflächenlacke (Abbildung 49) deutlich besser Schutzeigenschaften um die Vergrauung des Holzes und den Abbau des Harzes an der Oberfläche zu minimieren. Auch transparente, oberflächlich aufgetragene Lacke können einen ausgezeichneten Oberflächenschutz darstellen wie Abbildung 50 zeigt.

-mit 3 Gew.-% Tinuvin1130 im SR InfuGreen Epoxy als UV-Schutz



-mit 1 Gew.-% Tinuvin1130 im SR InfuGreen Epoxy als UV-Schutz



Abbildung 48: Fotos der Sperrholzproben bei denen während der Herstellung in Vakuuminfusion bereits das UV Schutzmittel in das Epoxidharz mit 3% (links) bzw. 1% (rechts) eingerührt worden sind.

-mit SR-SurfClearEVO+SD-EVO-Medium als Oberflächenlack



-mit SR-GreenPoxy-SD-56+SurfClear als Oberflächenlack

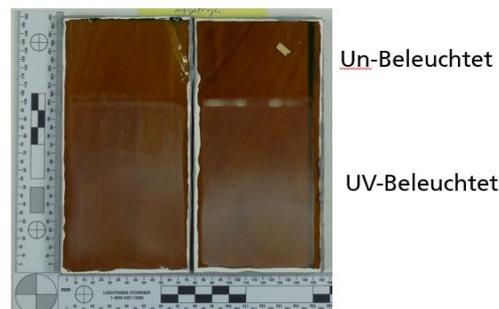


Abbildung 49: Fotos der Sperrholzproben bei denen das UV-Schutzmittel nachträglich als Oberflächenlack aufgebracht worden ist.

-mit Nautix Marine Paints V2 als Oberflächenlack

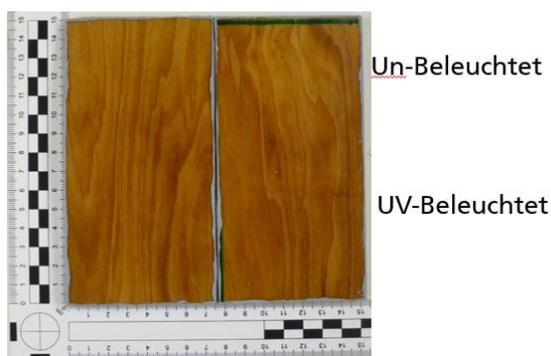


Abbildung 50: Fotos der Sperrholzproben bei denen das UV-Schutzmittel Nautix Marine Paints V2 nachträglich als Oberflächenlack aufgebracht worden ist.

## **Arbeitspaket 4: Lastenheft für Vorhangschalen als baulicher Holzschutz und eine Brückenkonstruktion**

### **AP 4.1 „Erarbeitung Lastenheft“**

#### **Inhalt des AP 4.1**

Die Erarbeitung des Lastenheftes in AP 4.1 erfolgt im Hinblick auf die Anwendung des neuen Hybridmaterials in einer Fußgängerbrücke. Dabei wird neben den schützenden Bauteilen („Vorhangschalen“) auch das zu schützende Primärtragwerk aus dem neu entwickelten Hybridwerkstoff erstellt.

### **Anforderungen an das Hybridmaterial im Kontext des Brückenbaus**

#### **Grundlegendes**

Der Bau einer Fußgänger-/ Fahrradbrücke aus flächigen Haupttragelementen, Freiformflächen, ist im Holzbrückenbau außerordentlich innovativ. Der klassische Holzbrückenbau wird mit Konstruktionsformen aus primär stabförmigen Bauteilen dominiert. Dies resultiert aus der natürlichen Form des Holzes als stabförmiges Bauteil. Die Herstellung flächiger Bauteile im Holzbau gewinnt zunehmend an Bedeutung. Eine Vielzahl verschiedener Einsatzgebiete können somit erschlossen werden. Die Weiterentwicklung der Furnierwerkstoffe ist ein wichtiger Zweig der Entwicklung flächiger Bauteile aus Holz. Durch die Faserverstärkung können Schwächen des Materials durch die anisotropen Eigenschaften und den starken Einfluss von Strukturstörungen auf die Zugfestigkeit begegnet werden. Der Einstieg in diesen Wettbewerb stellt zweifelsohne Anforderungen an das neu zu entwickelnde Material, die nachfolgend zusammengefasst werden.

#### **Tragfähigkeit**

Die Beanspruchung des Materials erfolgt auf Biegung, Druck, ggf. Zug und Querkraft. Die Größe der Beanspruchungen ist dabei abhängig von der gewählten Querschnittsform / Konstruktionsweise und der daraus resultierenden Schnittkraftverteilung. Das Material muss in der Lage sein, wechselnde Beanspruchung resultierend aus der Umkehrung der Schnittkräfte beispielsweise aus Windbelastung oder ungünstige Nutzlastverteilung aufzunehmen und weiterzuleiten.

Furnierwerkstoffe weisen bereits aktuell sehr gute Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften auf. Holz als anisotropes Material verfügt durch die Faserorientierung in einer Richtung über sehr gute Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften, während rechtwinklig zur Faserrichtung zumeist Kennwerte geringer Größenordnung vorhanden sind. Dies ist bei der Herstellung von plattenförmigen Bauteilen mit zweiachsiger Spannrichtung problematisch. Durch die Faserverstärkung kann diesem Problem sehr effektiv entgegengewirkt werden. Die Zugtragfähigkeit in Faserrichtung bei Vollholz- und Brettschichtholzprodukten wird durch makroskopische und mikroskopische Strukturstörungen stark beeinflusst. Auch diesem Aspekt wird mit der Faserverstärkung begegnet. Durch die Herstellung eines tragfähigen Verbundes zwischen Fasern und Holz muss die Kraftübertragung entsprechend sichergestellt werden.

#### **Dauerhaftigkeit**

Der Dauerhaftigkeit kommt als einer der drei Säulen des Eurocodes eine zentrale Bedeutung zu. Generell wird im Holzbau in Deutschland angestrebt, Holzbauteile ohne zusätzlichen chemischen Holzschutz auszuführen, um Anforderungen der Nachhaltigkeit gerecht zu werden. Neben dem konstruktiven Holzschutz ist zum

Verzicht auf chemische Holzschutzmittel auch eine natürliche Dauerhaftigkeit des Materials von Vorteil. Der Einfluss des Klebstoffanteils sowie ggf. der Faserverstärkung sind diesbezüglich im Projekt zu bewerten. Mögliche Anwendungsbereiche des Materials unter Berücksichtigung der verwendeten Holzart sind demnach festzulegen und abzugrenzen.

### **Formbarkeit**

Der große Vorteil verstärkter Furnierholzwerkstoffe liegt in der geringen nötigen Bauteilstärke. Bei geringeren Querschnitten treten jedoch zwangsläufig andere Herausforderungen auf. Dazu zählen lokale Spannungskonzentrationen, Verformungen und Schwingungen. Um Querschnitte mit hohem Widerstands- und statischem Trägheitsmoment zu schaffen, muss der Werkstoff entsprechend gut formbar sein. Dabei gilt es, die möglichen Biegeradien festzustellen und möglicherweise aktuell als technische Grenzen definierte Standards hinauszuschieben. Auch hierbei ist davon auszugehen, dass die Faserverstärkung dazu beiträgt, die Grenzen des aktuell technisch Möglichen zur Formung von Furnierwerkstoffen neu zu definieren.

### **Nachhaltigkeit**

Ein zentraler, ganz bedeutender Vorteil des Werkstoffs Holz ist seine Nachhaltigkeit aufgrund des natürlichen Wachstums des Materials, der positiven Energiebilanz und der CO<sub>2</sub>-Einsparung bei dessen Nutzung über die Lebenszeit. Durch die Ermöglichung dünnwandiger Querschnitte wird dieser Effekt noch verstärkt. Die ökologischen Potentiale des Werkstoffs im Vergleich zu konventionellen Baustoffen werden im Projekt durch eine projektbegleitende Ökobilanzierung bewertet. Vorteile bei seiner Anwendung im Vergleich zu einer konventionellen Konstruktion, sowie mögliche Verbesserungspotentiale, die im Rahmen von Folgeprojekten bearbeitet werden können, werden aufgezeigt.

### **Ökonomische Herstellung**

Ein Baustoff, sei er noch so neu und innovativ, wird es nur in die regelmäßige praktische Anwendung schaffen, wenn er neben vorteilhaften mechanischen Eigenschaften auf ökonomischem Wege hergestellt werden kann. Auch dieser Aspekt muss bei der Entwicklung dieses innovativen Werkstoffs beachtet werden und ist auch bei der Planung und Konzipierung der Anwendung im Brückenbeispiel zu beachten. Aus diesem Grund erfolgt im Projekt schon bei der Konzipierung der Brückenkonstruktion die enge Zusammenarbeit zwischen Planung und Ausführung bzw. die Ausführung koordinierenden Projektpartner.

### **Zulassungskriterien für neue Werkstoffe**

Bauprodukte, die nicht durch harmonisierte Produktnormen erfasst oder durch Technische Baubestimmungen geregelt sind, benötigen eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) bzw. eine allgemeine Bauartgenehmigung (aBG). Diese werden durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) erteilt. Diese regelt die bauaufsichtlich relevanten Eigenschaften, Verwendungsbereiche und wichtige Aspekte bezüglich Verarbeitung, Transport, Lagerung, Kennzeichnung und Übereinstimmungsbestätigungen, siehe (Deutsches Institut für Bautechnik). In der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB, Deutsches Institut für Bautechnik 2020) Teil C 2 sind die Technischen Baubestimmungen „für Bauprodukte, die nicht die CE-Kennzeichnung tragen“ und Technische Regeln gelistet. Abschnitt C 2.3 behandelt Bauprodukte für den Holzbau, Absatz C 2.3.1.1, geklebte Elemente nach DIN 1052-100:2012-05. Verwiesen wird auf die Abschnitte 6.2 bis 6.6 sowie 6.7 der Norm. In diesen sind keine Regelungen zu Furnierwerkstoffen enthalten. Zudem handelt es sich bei faserverstärktem Furnierschichtholz um einen neuartigen Werkstoff, für den keine Technischen Baubestimmungen oder allgemein anerkannte Regeln der Technik vorliegen. Demnach kann beim DIBt eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung beantragt werden. Zur Erlangung der Zulassung müssen entsprechende Versuche zur Feststellung der Leistungseigenschaften durchgeführt werden. Zur Prüfung mechanischer und physikalischer tragfähigkeitsbestimmender Eigenschaften können folgende Eckpunkte für Furnierschichtholz zusammengefasst werden:

- Zur Erlangung einer bauaufsichtlichen Zulassung sollten die grundlegenden Prüfungen für Holzwerkstoffe wie in DIN EN 408:2012-10 und DIN EN 789:2005-01 geregelt durchgeführt werden (Anwendung dieser in DIN EN 14374:2005-02 festgelegt)
- Für Zusatzprüfungen könnten Normen aus dem Bereich GFK und ggf. speziell für Epoxidharze in tragender Funktion herangezogen werden  
GFK: DIN EN ISO 527-4 (DIN EN ISO 527-4:1997-07, 1997)  
Epoxidharze: ggf. in Analogie zu prEN 17418 und prEN 17334

Grundlegend wird in DIN EN 14374:2005-02 zur Bestimmung der Leistungseigenschaften festgelegt:

- Mindestanzahl der Furniere im Querschnitt: 5
- Maximale Dicke der Furniere: 6 mm
- Qualität der Verklebung ist nach Anhang B in Verbindung mit EN 314-1 zu bestimmen

Tabelle 2 fasst Normverweise für zu prüfende Leistungseigenschaften nach DIN EN 14374:2005-02 zusammen.

Tabelle 2: Zu bestimmende Leistungseigenschaften nach DIN EN 14374:2005-02

<b>Leistungseigenschaft</b>	<b>Hinweise und Normverweis in DIN EN 14374</b>
<b>Festigkeiten</b>	
Biegefestigkeit bei Hochkantbiegung	EN 408, 4-Pkt. Biegeversuch, Prüfkörperbreite min. b = 100 mm
Biegefestigkeit bei Flachbiegung	EN 408, 4-Pkt. Biegeversuch, Prüfkörperdicke min. d = 38 mm
Zugfestigkeit in Faserrichtung	EN 408, Prüfkörperlänge zwischen Einspannbacken min. l = 1 000mm, bei l < 3 000mm Anpassungsformel
Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung	EN 408, min QS 45/ 45 mm
Druckfestigkeit in Faserrichtung	EN 408, Prüfkörper QS min. 45/ 45 mm
Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung	EN 408, Prüfkörper QS min. 45/ 45 mm
Scherfestigkeit bei Hochkantbiegung	EN 408
Scherfestigkeit bei Flachbiegung	EN 789, Prüfkörperdicke min. d = 25mm
<b>Steifigkeiten</b>	
Elastizitätsmodul in Faserrichtung	EN 408 für Bestimmung lokales E-Modul, Beanspruchung auf Hochkantbiegung, Prüfkörperbreite min d = 100 mm
Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung	EN 408, Beanspruchung auf Zug, Prüfkörper QS min 45/45 mm
Schubmodul bei Hochkantbiegung	EN 408
Schubmodul bei Flachbiegung	EN 789, Prüfkörperdicke min. d = 25 mm
<b>Weitere Eigenschaften</b>	
Rohdichte	EN 323
Feuchtegehalt	EN 322
Brandverhalten	Brandverhaltensklasse nach EN 13501-1
Formaldehydabgabe	Anhang C EN 14374
Natürliche Beständigkeit gegen biologischen Befall	EN 350-2 → ersetzt durch EN 350:2016
<b>Qualität der Verklebung</b>	Anhang B EN 14374, DIN 314-1/-2

### Anforderungen an Elemente des baulichen Holzschutzes allgemein

Im Holzbau ist dem konstruktiven Holzschutz eine besondere Bedeutung beizumessen. Die grundlegende Normenreihe für den Holzschutz ist die DIN 68800. Diese ergänzt die Regelungen der DIN EN 1995-1-1:2010-12 und DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 hinsichtlich holzschutztechnischer Aspekte für den Holzbau. Holz als natürlich gewachsenes Material verwittert unter wechselnder Feuchtebeanspruchung. Dies geht mit einer Verminderung der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften einher. Zudem fördert ein höherer Feuchtegehalt das Wachstum von holzzerstörenden Pilzen. Dies tritt etwa ab dem Punkt der Fasersättigung auf, siehe DIN 68800-1:2011-10. Demnach ist in den Gebrauchsklassen 1 mit dem Vorkommen holzzerstörender Pilze nicht zu rechnen, in der GK 2 ist dies durch konstruktive Maßnahmen weitestgehend zu verhindern. Für frei bewitterte Bauteile, welche die Funktion des konstruktiven Holzschutzes der tragenden Elemente übernehmen, trifft dies jedoch durchaus zu. Dabei sind jedoch Vollholzprodukte und Holzwerkstoffe zu unterscheiden. Während bei Vollholzprodukte bei erhöhter Feuchte ein Pilzbefall auftreten kann, trifft dies auf die hier zu entwickelnden Holzwerkstoffe weniger zu. Insbesondere durch die Vakuuminfusion werden die Bauteile vollständig mit Harz getränkt, sodass kaum ein feuchter Nährboden für Organismen vorhanden ist. Ein größeres Problem betrifft jedoch die Verformung unter Feuchteinfluss. Durch Aufquellen und Rücktrocknen können Risse im Material entstehen, in die weiteres Wasser eindringen kann. Des Weiteren kann starke UV-Strahlung zu Rissen führen, die wiederum Angriffspunkte für Wasser sind.

DIN 68800-1:2011-10 definiert Gebrauchsklassen (GK) basierend auf der DIN EN 335:2013-06, welche die allgemeinen Gebrauchsbedingungen beschreiben. Basierend auf diesen Klassen werden Schutzmaßnahmen festgelegt. Diese Zuordnung muss in der Planung dokumentiert werden. Geschützte Bauteile im Außenbereich sind in der Regel der GK 2 zuzuordnen. Bei freier Bewitterung, ohne dass eine andauernde Anreicherung mit Wasser zu erwarten ist, sind die Bauteile der der GK 3.1 zuzuordnen. Für Holzwerkstoffe ist zudem Anhang

C zur DIN 68800-1:2011-10 zu beachten. Für die Bemessung in den Gebrauchsklassen gilt danach für die GK 2 die Zuordnung zu „Feuchtbereich“ nach DIN EN 1995-1-1:2010-12 und für die GK 3.1 und GK 3.2 die Zuordnung „Außenbereich“. Im Außenbereich dürfen aus Holzwerkstoffen nur hinterlüftete Fassadenbekleidungen aus Furnierschichtholz, Sperrholz, Massivholz oder Zement gebundene Spanplatten bei Erfüllung der Anforderungen für tragende Bauteile mit bauaufsichtlichem Verwendbarkeitsnachweis angewendet werden (In DIN 68800-1:2011-10 wird festgelegt, dass DIN plattenförmige Holzwerkstoffe, die als Fassadenbekleidungen verwendet werden sollen, ein bauaufsichtlicher Verwendbarkeitsnachweis nötig ist.). Zudem gilt nach DIN 68800-1:2011-10, Absatz 4.1.5:

„Sollen Holzwerkstoffe in Bereichen verwendet werden, in denen sie einer erhöhten Feuchtebelastung außerhalb der in DIN 68800-2 angegebenen erforderlichen Feuchtebeständigkeit von Holzwerkstoffen ausgesetzt sind, ist für tragende Bauteile ein bauaufsichtlicher Verwendbarkeitsnachweis erforderlich. Für nicht tragende Bauteile sollte in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich ein Schutz nach DIN 68800-3 erfolgen.“

DIN 68800-2:2012-02, Tabelle 3, Zeile 2.2 legt die Anforderungen für Holzwerkstoffe in verschiedenen Anwendungsbereichen fest. Demnach müssen „Vorhangschale[n] aus kleinformatischen Bekleidungs-elementen als Wetterschutz, Hohlraum nicht ausreichend belüftet, Wasser ableitende Abdeckung der Beplankung oder Bekleidung“ die Anforderungen an die Anwendung im Feuchtbereich erfüllen. In DIN 68800-2:2012-02, Absatz 5.2.1.1 heißt es: „Niederschlägen ausgesetzte Holzwerkstoffe sind mit einem dauerhaft wirksamen Wetterschutz zu versehen.“ Eine Ausnahme bilden die bereits erwähnten Fassadenbekleidungen mit bauaufsichtlichem Verwendbarkeitsnachweis für den vorgesehenen Verwendungszweck. Nach DIN EN 13986:2015-06 entspricht die Zuordnung zum „Feuchtbereich“ der Zuordnung zur Nutzungsklasse 2 der DIN EN 1995-1-1:2010-12. Diese ist durch eine Umgebungstemperatur von 20°C und eine relative Luftfeuchte von 85% gekennzeichnet, die nur für wenige Wochen im Jahr überschritten wird. Für die Anwendung in den Gebrauchsklassen sind die Festlegungen zu den verwendbaren Hölzern nach DIN EN 350:2016-12 zu beachten.

Für die planerische Umsetzung im Projekt gilt es, die Einflüsse aus Feuchte und Sonneneinstrahlung zu bewerten, sowie konstruktive Schutzmaßnahmen bei der Planung des Beispielobjektes von Beginn an sorgfältig zu beachten. Folgende planerische Maßnahmen werden dazu ergriffen:

- Tragende Bauteile werden als geschützte Bauteile ausgeführt
- Schützende Elemente werden als hinterlüftete Bauteile ausgeführt, um eine schnelle Rücktrocknung zu ermöglichen
- Schützende Elemente werden als austauschbare Bauteile ausgeführt
- Durch entsprechende Oberflächenneigung sowie Ablaufrinnen wird Regenwasser abgeführt und stehendes Wasser vermieden

Zudem werden im Projekt der Einfluss der UV-Strahlung, sowie der Feuchte auf verschiedene Holzarten untersucht. Durch die beschriebenen Maßnahmen, den Einsatz geeigneter Hölzer und den Schutz des Materials durch das Vakuuminfusionsverfahren wird eine Einstufung der tragenden Bauteile in die GK 2, und der schützenden Bauteile in die GK 3.1 angestrebt. In den virtuellen Projekttreffen werden holzschutztechnische Aspekte mit fachlicher Unterstützung des Schadensgutachters Müller diskutiert. So wird schon in den ersten Überlegungen auf eine ganzheitliche Methodik zur Berücksichtigung aller tragfähigkeitsbestimmenden Aspekte, insbesondere aus Sicht des Holzschutzes heraus, betrachtet.

## **Anforderungen an Fußgängerbrücken und im Speziellen an Holzbrücken**

### **Grundlegende Anforderungen**

DIN EN 1990:2010-12 legt grundlegende Prinzipien und Anforderungen an Tragwerke fest. Die sogenannten „drei Säulen“ des Eurocodes sind die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit. Der für die Bemessung von Tragwerken aus Holz maßgebende Teil der Eurocode-Reihe ist der Eurocode 5, im Speziellen für Brücken in Holzbauweise Teil 2, DIN EN 1995-2:2020-12 „Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 2: Brücken“ bzw. der Nationale Anhang DIN EN 1995-2/NA:2010-12. Diese gilt, wenn die Haupttragwerksteile aus Holz, Holzwerkstoffen oder im Verbund mit Beton oder Stahl hergestellt werden. Bei der Bemessung der Bauteile sind nach semi-probabilistischem Sicherheitskonzept der geltenden Eurocodes Lastkombinationen und Sicherheitsfaktoren/ Kombinationsfaktoren für Einwirkungen und Widerstände zu berücksichtigen. Bei der Dimensionierung der Tragwerksteile ist dabei eine wechselnde Beanspruchung aufgrund unterschiedlicher Lastkombinationen zu beachten (z. B. von Druck zu Zug aufgrund unterschiedlicher Wirkungsrichtungen von Windlasten). Gegen horizontal wirkende Windlasten sind Versteifungen der Konstruktion in Längsrichtung vorzusehen, z.B. durch Steifen oder Verbände, bzw. ausreichende Steifigkeit der Fahrbahnplatte.

Durch Berücksichtigung der entsprechenden Bemessungsvorschriften und Lastansätzen nach geltender Normung werden die Anforderungen an Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit eines Tragwerks erfüllt. Die Randbedingungen zum Entwurf von Fußgängerbrücken und die zu berücksichtigen

Lasten sind materialübergreifend zu berücksichtigen. Zu Besonderheiten bei Planung, Bemessung und Ausführung von Holzbrücken sind zudem hilfreiche Informationsschriften des Informationsdienst Holz vorhanden (Informationsdienst Holz 2019).

### **Dauerhaftigkeit**

Laut EC 0, Absatz 2.4 ist „[d]as Tragwerk ist so zu bemessen, dass zeitabhängige Veränderungen der Eigenschaften das Verhalten des Tragwerks während der geplanten Nutzungsdauer nicht unvorhergesehen verändern“. Insbesondere im Holzbrückenbau kommt diesem Aspekt besondere Bedeutung zu. Nach DIN EN 1995-2:2010-12 kann die Berücksichtigung des Einflusses von Niederschlägen, Wind und Sonneneinstrahlung durch drei Möglichkeiten erfolgen:

- Konstruktive Schutzmaßnahmen
- Verwendung von Holz mit hinreichender natürlicher Dauerhaftigkeit
- Verwendung von Holzschutzmitteln gegen biologische Einflüsse

Kann das Haupttragwerk nicht teilweise oder vollständig abgedeckt werden, können nach EC 5-2 geneigte Oberflächen zur Vermeidung von stehendem Wasser ausgeführt werden. Nach EC 5-2 Nationaler Anhang ist dabei darauf zu achten, dass die Neigung auch bei Verformungen unter Langzeitbelastungen erhalten bleibt. Zusätzlich sollten Öffnungen, Schlitze und ähnliches, in denen sich Wasser ansammeln kann, vermieden werden. Da Holz ein kapillarporöser Stoff ist, nimmt es Feuchte aus der Umgebung auf. Neben der sich einstellenden Ausgleichsfeuchte durch Dampfdiffusion wird auch durch kapillare Absorption Wasser aufgenommen. Letzteres kann durch entsprechende Feuchtigkeitssperren vermieden werden. Zudem sollte das Aufreißen von Klebfugen vermieden werden. Schon beim Einbau des Holzes sollte darauf geachtet werden, dass das Holz eine ähnliche Anfangsfeuchte aufweise, wie jene, die sich im Einbauzustand einstellt, um übermäßiges Quellen und Schwinden zu vermeiden. Des Weiteren sollte durch die Tragwerksgeometrie die Luftumspülung der tragenden Elemente sichergestellt werden. So wird stehendes Wasser vermieden und ein Abtrocknen bei Befeuchtung erleichtert. Im Brückenbau beinhalten die bautechnischen Unterlagen auch die Unterlagen zur Dauerhaftigkeit, siehe EC 5-2, Nationaler Anhang (DIN EN 1995-2/NA:2010-12). Bauteile werden in die Kategorien „geschützt“ und „ungeschützt“ unterteilt. Der Nationale Anhang zum EC 5-2, Absatz NA.1.5.2.6] definiert ein geschütztes Bauteil als ein „Bauteil, bei dem eine direkte Bewitterung durch Niederschläge oder durch Eintrag von Feuchte ausgeschlossen ist“. Abbildung 51 wird zur Erläuterung angegeben. Diese zeigt Möglichkeiten zum Schutz tragender Bauteile bei drei Konstruktionsformen.

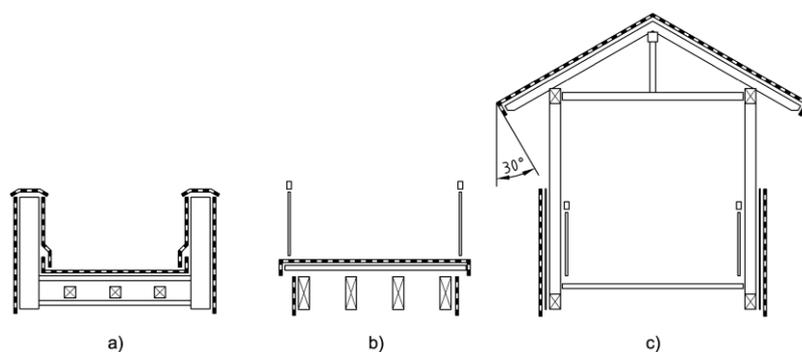


Abbildung 51: Beispiele für geschützte Brückenbauteile. a) Brücke mit unten liegender Verkehrsbahn, b) Brücke mit oben liegender Verkehrsbahn, c) Gedeckte Brücke; Abbildung aus DIN EN 1995-2:2020-12/NA

Tragende Bauteile müssen nach EC 5-2, Nationaler Anhang (DIN EN 1995-2/NA:2010-12) als geschützte Bauteile ausgeführt werden, es sei denn, das Holz kann der Dauerhaftigkeitsklasse 1 nach DIN EN 350:2016-12 (beispielsweise die Eiche) zugeordnet werden oder es handelt sich um chemisch modifiziertes Holz mit dahingehendem bauaufsichtlichem Verwendungsnachweis. Werden Abdeckungen angeordnet, sollten diese hinterlüftet ausgeführt werden, dies gilt auch für bewitterte Kontaktflächen.

Nicht tragende Bauteile und austauschbare Bauteile wie Beläge oder Geländer dürfen als ungeschützte Bauteile ausgeführt werden. Bei der Anordnung der Geländerpfosten ist darauf zu achten, dass die Durchdringung von Abdichtungen und Belägen vermieden wird. Bohlenbeläge sollten mindestens der Gebrauchstauglichkeitsklasse 3.2 nach DIN 68800-1:2011-10 entsprechen. Zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit sind bei Tragbelägen ohne Deckschicht Verschleißschichten anzuordnen, siehe EC 5-2, Nationaler Anhang. Bohlenbeläge sollten aus Hölzern hergestellt werden, die mindestens der Gebrauchstauglichkeitsklasse 3.2 nach DIN 68800-1:2011-10 entsprechen. Des Weiteren ist die Konstruktion so zu planen, dass Schneeablagerungen möglichst vermieden werden, um eine Durchfeuchtung des Materials zu verhindern.

### **Tragfähigkeit**

Die Grenzzustände der Tragfähigkeit betreffen „Zustände, die im Zusammenhang mit Einsturz oder anderen Formen des Tragwerksversagens stehen“ (DIN EN 1990:2010-12, Absatz 1.5.2.13, S. 13). Generell gelten die

Regelungen der DIN EN 1995-1-1:2010-12 (allgemeiner Teil) auch für Brückenkonstruktionen in Holzbauweise. DIN EN 1995-2:2012-12 enthält zudem einige zusätzliche Regelungen.

Ergänzend gibt DIN EN 1995-2:2010-12, 2010 Hinweise zur Berechnung der Systemsteifigkeit bei mehreren beanspruchten Lamellen in der Fahrbahnplatte. Des Weiteren darf nach DIN EN 1995-2:2010-12 zur Bemessung der Holzdeckplatte nach der Theorie für orthotrope Platten erfolgen. Im Zudem wird in DIN EN 1995-2:2010-12 darauf hingewiesen, dass bei sich kreuzenden Lamellen Schubverformungen zu berücksichtigen sind. Bei häufig wechselnder Beanspruchung durch Wind oder Verkehr ist zu prüfen, ob ein Versagen durch Ermüdungsbeanspruchung maßgebend wird. Dies ist insbesondere für schwingungsanfällige Konstruktionen von Bedeutung.

### **Gebrauchstauglichkeit**

Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit betreffen die Sicherherstellung der bestimmungsgemäßen Nutzung des Tragwerks durch Vermeidung von beispielsweise übermäßigen Verformungen oder Schwingungen. Im Holzbrückenbau umfasst die Anforderung an die Gebrauchstauglichkeit die Durchbiegungsbegrenzung und die Begrenzung von fußgänger- und windinduzierten Schwingungen.

Zur Schwingungsbemessung enthält DIN EN 1995-2:2010-12 Anhang B ein Bemessungsverfahren. Der Anhang ist informativ und in Deutschland nicht bauaufsichtlich eingeführt. Im Nationalen Anhang (DIN EN 1995-2/NA:2010-12, 2010) wird festgelegt, dass für Fußgänger- und Fahrradbrücken mit einer Länge von  $\leq 12$  m ein Schwingungsnachweis für durch Fußgänger induzierte Schwingungen in der Regel entfallen kann. Durch Wind induzierte Schwingungen sind nach DIN EN 1991-1-4:2010-12 bzw. DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 zu überprüfen. Die Prüfung der Schwingungsanfälligkeit erfolgt durch Berechnung des Strukturbeiwertes  $c_d$  nach DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12. Die vereinfacht angegebenen Böengeschwindigkeitsdrücke nach Nationalem Anhang dürfen für nicht schwingungsanfällige Konstruktionen angewendet werden.

## **Lasten beim Bau von Fußgängerbrücken**

### **Ständige Lasten**

Ständige Lasten ergeben sich aus dem Tragwerk selbst, sowie entsprechender Aufbauten. Dazu zählen bei Brückenkonstruktionen Fahrbahnaufbauten, Deckschichten, Geländer etc. Die Lasten werden zu einer Gesamtlast zusammengeführt und als ein Lastfall auf die Konstruktion angesetzt. Geringfügige lokale Schwankungen bleiben dabei unberücksichtigt. Ständige Lasten sind immer anzusetzen. Es ist zu unterscheiden, ob diese günstig oder ungünstig wirken. Bei günstiger Wirkung der Last erfolgt eine Reduktion des Sicherheitsbeiwertes, um diese günstige Wirkung auf der sicheren Seite liegend abzumindern.

### **Verkehrslasten**

Verkehrslasten entstehen aus der Nutzung der Brücke durch Fußgänger und Fahrzeuge. Dabei ist planmäßiger Fahrzeugverkehr durch regelmäßige Befahrung (Straßenbrücken) und außergewöhnliche Befahrung durch Dienstfahrzeuge (Fußgängerbrücken) zu unterscheiden. Genormt sind Nutzlasten in DIN EN 1991-1-1:2010-12 bzw. DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12 (Nationaler Anhang).

Zu beachten sind die übliche Flächenlast aus der Nutzung, Einzellasten zur Berücksichtigung lokaler Tragfähigkeitsprobleme und Holmlasten (horizontal und vertikal) durch das Anlehnen von Fußgängern an das Geländer/ die Brüstung. Bei nicht planmäßiger Befahrung ist zudem ein Dienstfahrzeug (außergewöhnlicher Lastfall) zu berücksichtigen. Der Fahrzeuganprall ist als weiterer außergewöhnlicher Lastfall in die Betrachtung einzubeziehen. Im Gegensatz zum Hochbau sind Nutzlasten (Fahrzeug- und Fußgängerlasten) der Klasse der Lasteinwirkungsdauer „kurz“ zuzuordnen.

### **Schneelasten**

Schneelasten unterliegen einer starken Streuung. Die der Normung zugrunde liegenden Werte entstammen langjährigen Wetteraufzeichnungen. Die anzusetzenden Schneelasten richten sich nach dem Standort des Bauwerks sowie der Höhenlage. Das Verfahren zum Ansatz von Schneelasten in der üblichen Bemessung wird in DIN EN 1991-3:2010-12 bzw. DIN EN 1991-3/NA:2010-12 geregelt.

Für überdachte Brücken, bewegliche Brücken und Brücken im Bauzustand ist die Grundschnelast wie bei Dächern anzusetzen. Bei anderen Brückentypen erfolgt kein Ansatz von Schneelasten, wenn der Wert der Verkehrslast größer als der Schneelast ist. Dies trifft in der Regel zu. Schnee- und Verkehrslasten müssen bei Brückenkonstruktionen nicht gleichzeitig wirkend angesetzt werden. Es kann begründet angenommen werden, dass bei hohem Schneeaufkommen die Brücke geräumt wird, um die Nutzung zu ermöglichen. Geschieht dies nicht, ist eine Benutzung der Brücke nicht möglich, sodass sich beide Lastarten gegenseitig ausschließen.

### **Windlasten**

Auch Windlasten unterliegen großen Streuungen. Die anzusetzenden Lasten sind abhängig vom Standort des Gebäudes/ der Brücke, von der Geländekategorie, der Höhe der Konstruktion inklusive Geländer/Brüstung und von der Schwingungsanfälligkeit der Konstruktion.

Das Verfahren zur Berücksichtigung von Windlasten ist in DIN EN 1991-4:2010-12 geregelt. Der umfangreiche Nationale Anhang DIN EN 1991-4/NA:2010-12 für Deutschland enthält ein alternatives Verfahren, das für nicht schwingungsanfällige Konstruktionen und definierte Brückenquerschnitte anzuwenden ist. Im Verfahren nach DIN EN 1991-1-4 erfolgt die Berechnung der anzusetzenden Windlast abhängig von einer Reihe verschiedener Beiwerte (Strukturbeiwert, Völligkeitsbeiwert, dynamischer Beiwert etc.). Für das Verfahren nach Nationalem Anhang wurden Vereinfachungen für die Beiwerte getroffen, da deren detaillierte Ermittlung häufig zu umfangreich für die Praxis ist und der erzielte Nutzen der Lastreduktion in keinem Verhältnis zum Aufwand steht. Die auf die Brücke anzusetzende Windlast kann dann abhängig von geometrischen Randbedingungen festgelegt werden.

Nach Nationalem Anhang ist die Windlast abhängig vom Verhältnis Länge/ Breite. Die Last wird auf Überbauten sowie Stützen und Pfeiler angesetzt und liegt abhängig von den geometrischen Verhältnissen für Windlastzone 1 und 2 zwischen 0,95-1,75 kN/m<sup>2</sup>. Der Standort Braunschweig ist der Windlastzone WLZ 2, Binnenland, zuzuordnen. Zur Ermittlung der Höhe des Überbaus zur Bestimmung der Windangriffsfläche kann bei Fußgängerbrücken das Verkehrsband vernachlässigt werden. Zudem werden keine Lärmschutzwände berücksichtigt, wie es üblicherweise bei Straßenbrücken der Fall wäre. Weiter zu berücksichtigen ist die Winddurchlässigkeit (Völligkeit) des Geländers bei der anzusetzenden Windangriffshöhe.

Vertikale Lasten (z-Richtung) müssen bei Anwendung des vereinfachten Verfahrens nach Nationalem Anhang (DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12) nicht gesondert berücksichtigt werden. Entstehende Vertikalkräfte aus der Wirkung eines Windverbandes bei horizontalem Lastangriff sind jedoch zu beachten und mit anderen vertikalen Lasten zu überarbeiten. Die DIN 1991-1-4:2010-12 enthält einen Ansatz zu Berechnung vertikaler Windlasten, diese sind jedoch nur für Brücken, die große Höhen überspannen, relevant.

Abhebende Wirkungen von Lasten sind für den Nachweis der Lagesicherheit in Kombination mit einem verringerten Eigengewicht, da dieses günstig wirkt, zu berücksichtigen. Insbesondere bei einem geringen Eigengewicht der Konstruktion ist dieser Aspekt nicht zu vernachlässigen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes werden alternative Querschnittsformen betrachtet, die von üblichen Brückenquerschnitten wie in DIN EN 1991-1-4/ NA abweichen. Durch die Formung des faserverstärkten Furniers als organisch anmutende Freiform entstehen geschwungene Formen, die zu einem günstigerem Strömungsverhalten mit geringerer Wirbelablösung führen, als konventionelle, scharfkantige Formen. Der Ansatz aus dem Nationalem Anhang (DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12) kann somit trotz abweichender Querschnittsform angewendet werden. Die Möglichkeit des Ansatzes und der Nutzen einer Reduktion der Windlast basierend auf der Anpassung der entsprechenden Beiwerte nach Hauptteil der DIN EN 1991-1-4 wurde in den Studien untersucht.

### Entwurf der Brückenkonstruktion: Betrachtung konventioneller Brückenkonstruktionen

Tabelle 3 zeigt eine Zusammenfassung der Entwurfsparameter für Fußgänger-/ und Fahrradbrücken, die auf die Entwurfsfindung bestimmend eingewirkt haben.

Tabelle 3: Wesentliche Entwurfsparameter für eine Fußgänger-/ Fahrradbrücke

Kriterium	definiert durch	Inhalt der Anforderung an Fußgänger-/ Fahrradbrücken		Verweis
Spannweite	Projektziel/ -umfang	10-20m Parametrisierung des Entwurfs		
Fahrbahn-/ Laufbreite	normativ	Reiner Fußweg: ≥ 1,80m		(Informationsdienst Holz 2019a)
		Gemeinsamer Geh- und Radweg: ≥ 2,50m		
		Radschnellweg: ≥ 4,00m		
	Projektziel/ -umfang	Erste Annahme: 3,0 m Parametrisierung des Entwurfs		
Steigung für Radwege	normativ	10 %	20 m	(Informationsdienst Holz 2019a)
		6 %	65 m	
		5 %	120 m	
		4 %	250 m	
		3 %	≥ 250 m	
Gewährleistung der Barrierefreiheit	normativ	6 %	100 m	Rampen im öffentl. Bereich: nach DIN 18040-1:2010-10 <b>max. 6%</b> , ohne Quer Gefälle
Durchbiegungsbegrenzung	normativ	l/200 bis l/400 (Fußgängerlast und niedrige Verkehrslast)		DIN EN 1995- 2:2010-12

<b>Schwingungs- begrenzung</b>	normativ	Sicherherstellung des Sicherheitsempfindens bei der Nutzung	(Informationsdienst Holz 2019a)
		Nachweis nach EC1-1-4 wenn Grundeigenfrequenz des Überbaus < 5 Hz (Vertikalschwingungen) < 2,5 Hz für Horizontal- und Torsionsschwingungen	
<b>Geländer/ Handlauf</b>	normativ	Sicherstellung des Sicherheitsempfindens und Vermeidung von Unfällen	(Informationsdienst Holz 2019a)
		Belastung von 1 kN/m Vertikal & 1 kN/m horizontal anzusetzen	
	Projektziel/ -umfang	Möglicherweise Herstellung als Teil der Freiformfläche oder als aufgesetzte Brüstung	
<b>Fahrbahn-/ Laufbelag</b>	normativ	Mindestdicke für Verschleißdicken: Fahrbahnen: 10 mm (Laubholz Geh- und Radwegbrücken: 5mm (Laubholz)	DIN EN 1995-2/NA:2010-12
		Betriebliche Verkehrswege im Außenbereich Gehwege: R 11 oder R 10 Schrägrampen: R 12 oder R 11	ASR A1.5/1,2 (Ausschuss für Arbeitsstätten – ASTA-Geschäftsführung 2013)

Zur Wahl einer Konstruktionsform wurde sich im Rahmen des Projektes zunächst mit herkömmlichen Brückenkonstruktionen beschäftigt und deren zentrale Charakteristika im Hinblick auf das Forschungsprojekt untersucht. Eine Zusammenfassung der Bewertung der Konstruktionsformen auf ihre Umsetzbarkeit mit Freiformflächen aus faserverstärkten Furnierschichtholz im Projekt nach dem Ampelsystem erfolgt in Tabelle 4. Die darin gekürzte Darstellung von Vor- und Nachteilen, sowie die Gesamtbewertung diente als Grundlage für den nachfolgenden Formfindungsprozess in Arbeitspaket 4.2.

Tabelle 4: Bewertung konventioneller Brückenkonstruktionsformen in Holzbauweise bezüglich der Umsetzung der Konstruktionsformen mit dem Hybridmaterial

<b>Konstruktion</b>	<b>Vor-/ Nachteile</b>	<b>Bewertung im Hinblick aufs Projekt</b>
<b>Deckbrücke</b>	+ in einem Stück transportierfähig & montierbar - Tragfähiger Querschnitt massiv → Konstruktion schwer & teuer	
<b>Trogbrücke</b>	+ in einem Stück transportierfähig & montierbar - ggf. Biegeverstärkung notwendig	
<b>Reine Bogenbrücke</b>	+ in einem Stück transportierfähig & montierbar - zul. Steigung für Rad- und Fahrradwege begrenzt	
<b>Bogenbrücke aufgeständert</b>	+ erhöhte Tragfähigkeit (größere Spannweiten möglich) - Transport & Montage aufwendig - aufwendige Gestaltung der Widerlager, örtliche Gegebenheiten eingeschränkt - zusätzliche Primärtragwerke notwendig (Stützen)	
<b>Bogenbrücke abgehängt</b>	+ erhöhte Tragfähigkeit (größere Spannweiten möglich) - Zuganschlüsse in das Material sollen vermieden werden - zusätzliche Primärtragwerke notwendig (Pylon)	
<b>Sprengwerk</b>	+ erhöhte Tragfähigkeit (größere Spannweiten möglich) - Transport & Montage aufwendig - zusätzliche Stützelemente notwendig - aufwendige Gestaltung der Widerlager, örtliche Gegebenheiten eingeschränkt	
<b>Hängewerk</b>	+ erhöhte Tragfähigkeit (größere Spannweiten möglich) - Transport & Montage aufwendig	
<b>Fachwerk</b>	+ erhöhte Tragfähigkeit (größere Spannweiten möglich) - Transport & Montage aufwendig	

## AP 4.2 „Verifizierung, Optimierung“

### Inhalt des APs 4.2

Im AP 4.2 erfolgt die planerische Umsetzung an einem Beispielvorhaben: einer Fußgänger-/Fahrradbrücke. Dabei werden die in AP 4.1 herausgearbeiteten Anforderungen insbesondere an die Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit beachtet und daneben die Anforderungen an ein modernes, aus Freiformflächen bestehendes Erscheinungsbild auf der einen Seite und der spezifischen Anforderungen aus der Fertigung auf der anderen Seite beachtet.

### Entwicklung eines Konstruktionsentwurfes

#### Herausforderungen und Anforderungen an den Entwurf

Eine der wesentlichen Herausforderungen an den Entwurf besteht in der Formfindung zur Generierung einer Querschnittsform, welche dem flächigen, dünnen Werkstoff eine räumliche Steifigkeit verleiht. In AP 4.1 wurden konventionelle Konstruktionen des Holzbrückenbaus betrachtet und somit Ideen zur Formfindung in diesem Projekt gesammelt. Eine Trogform, ggf. mit Biegeverstärkung und/ oder bogenförmiger Unterstützung stellt eine vielversprechende Formkombination dar. Dabei sollte der Hauptträger ursprünglich nicht wie bei der klassischen Trogform aus Primär- und Sekundärtraggliedern, sondern möglichst aus einer geschwungenen Fläche hergestellt werden. Dabei sind grundlegend herstellungstechnische Grenzen vorhanden, sodass eine Aufteilung in gekrümmte Einzelflächen geprüft werden muss. In den Projekttreffen wurde dazu kontinuierlich Rücksprache mit dem Partner all ahead composites geführt, welche im späteren Verlauf mit den Herstellern der Bauteile sowie Demonstratoren betraut sind. Es besteht gleichzeitig die Anforderung an die Wahrung möglichst weniger Einzelflächen, da eine größere Anzahl gekrümmter Flächen den Herstellungsprozess deutlich verkompliziert und die Umsetzung auch aus ökonomischer Sicht erschwert.

#### Formfindung

Wie beschrieben besteht die Hauptherausforderung in der Entwurfsfindung zunächst im Entwurf eines tragförmigen Querschnitts aus einem dünnwandigen Querschnitt mit begrenzten Biegeradien. Dazu wurden im AP 4.2 zunächst einige Ideen zusammengetragen (Abbildung 52)

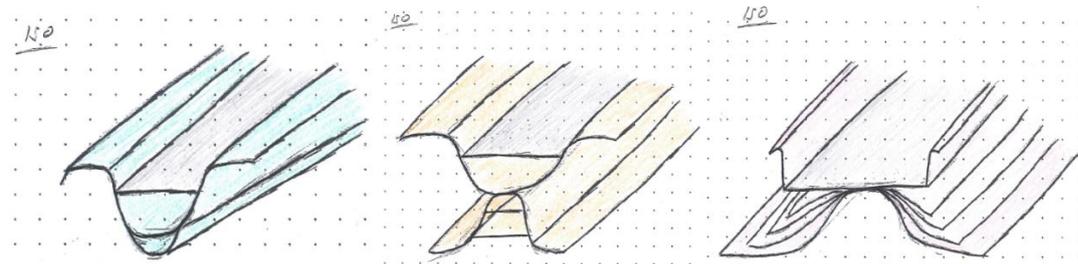


Abbildung 52: Erste Handskizzen

Basierend auf den Skizzen wurden erste Zeichnungen im CAD Programm angefertigt.

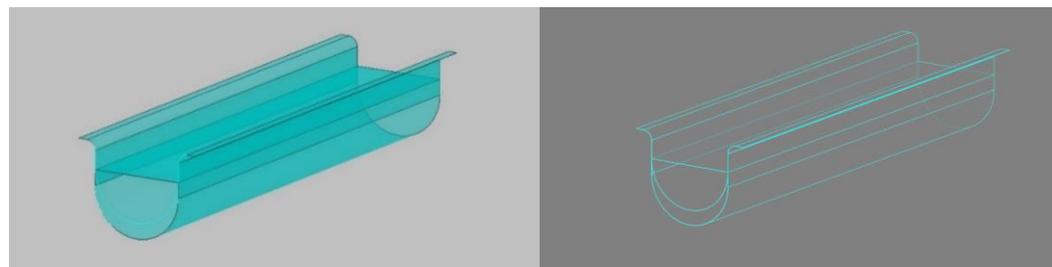


Abbildung 53: Auswahl einer einfachen Grundform zur Weiterentwicklung

Aus diesen ersten Entwürfen entwickelten sich einige Variationen. In Zusammenarbeit mit dem Projektkonsortium wurde eine Grundform zur Weiterentwicklung und Optimierung ausgewählt. Diese wurde in der Bearbeitung des AP 4.2 im Hinblick auf statische und auch in Zusammenarbeit mit dem Unterauftragnehmer Schadensgutachter Müller um holzschutztechnische Aspekte, sowie in Zusammenarbeit mit der Firma all ahead composites um Anforderungen der Herstellung hin erweitert. Die Variante in Abbildung 54 fand Zustimmung im Konsortium. Der dargestellte Entwurf berücksichtigt noch nicht alle gestellten Randbedingungen und diente als Grundlage für die Weiterentwicklung.

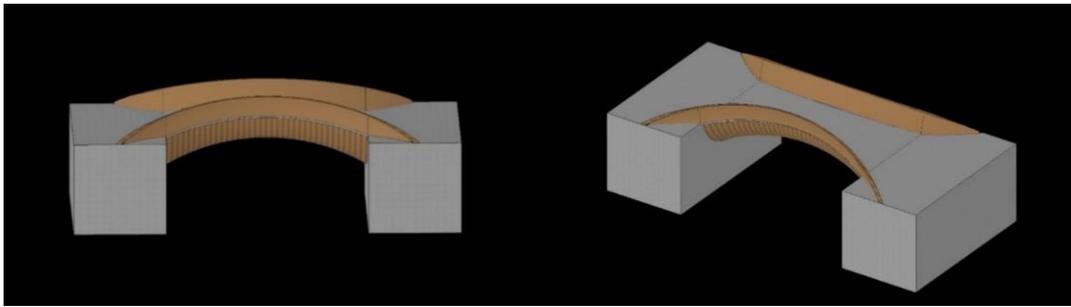


Abbildung 54: Variante mit konkaver Querschnittsform, geschlossenes Gelände – Auswahl zur Parametrisierung

In Zusammenarbeit mit dem Partner all ahead composites wurden Produktionsmöglichkeiten der Einzelbauteile diskutiert, um diese schon in einem frühen Projektstadium zu berücksichtigen. Da die Herstellung geschlossener Formen technisch schwer umsetzbar ist, insbesondere wenn eine mehrachsige Krümmung des Bauteils erfolgt, wurden zwei Möglichkeiten der Aufteilung in Einzelelemente favorisiert (Abbildung 55). In weiterer Zusammenarbeit wird in der laufenden Projektbearbeitung unter Berücksichtigung der sich unterschiedlich ergebenden Beanspruchungen des Materials sowie fertigungstechnischer Grenzen eine Variante ausgewählt. Abbildung 56 zeigt ein erstes 3D-Modell.

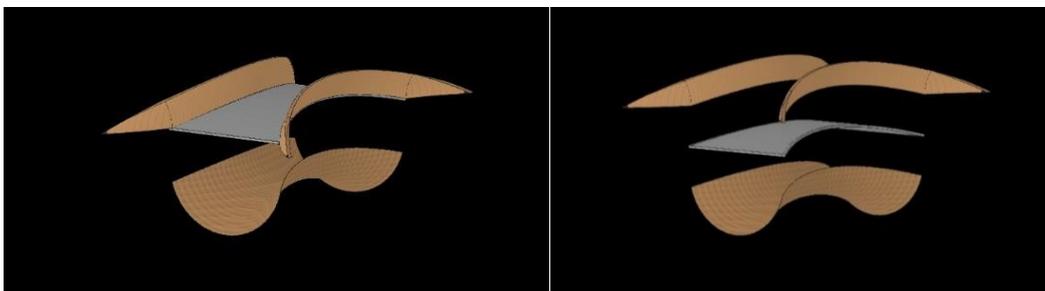


Abbildung 55: Möglichkeiten der Elementaufteilung

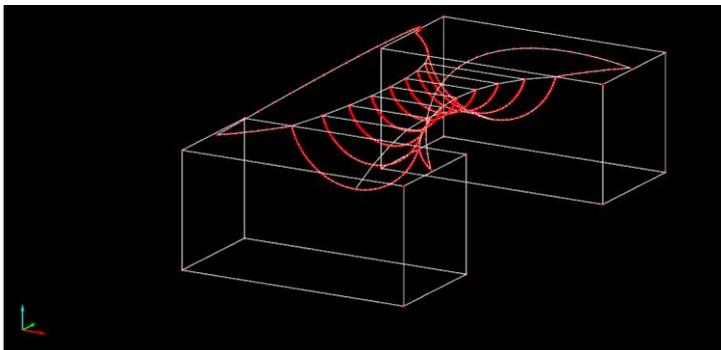


Abbildung 56: Erstes 3D-Modell

### Projektierung der Brückenkonstruktion – schematischer Ablauf

Bei der Projektierung der Brückenkonstruktion als Anwendungsbeispiel für das neuartige Material müssen Erkenntnisse zum Materialverhalten und herstellungsbedingte Einschränkungen beachtet werden. Da hier kontinuierlich Erkenntnisse zusammenfließen, unterliegen auch die Arbeiten einem iterativen Prozess. Ein wichtiger Punkt war, dass der Standard des Objektes und damit die Widerlagersituation lange Zeit nicht final geklärt war. Die Entscheidung, die Brücke als Demonstrator auf vier Blöcken aufzustellen, resultierte in einer zusätzlichen Windbeanspruchung in Brückenlängsrichtung, die zusätzlich berücksichtigt werden musste. Zudem können somit horizontale Auflagerkräfte schwerer angetragen werden. In dem Zuge wurde entschieden, die Konstruktion als Haupt-/Nebenträgersystem angelehnt an eine Trogbrücke aufzubauen. Zudem musste die Spannweite aufgrund herstellungsbedingter Einschränkungen angepasst werden. Aufgrund normativer Randbedingungen musste jedoch die Brückenbreite beibehalten werden.

Abbildung 57 stellt das Vorgehen bei der Projektierung der Brückenkonstruktion unter Beachtung der grundlegenden Anforderungen an Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit schematisch dar.

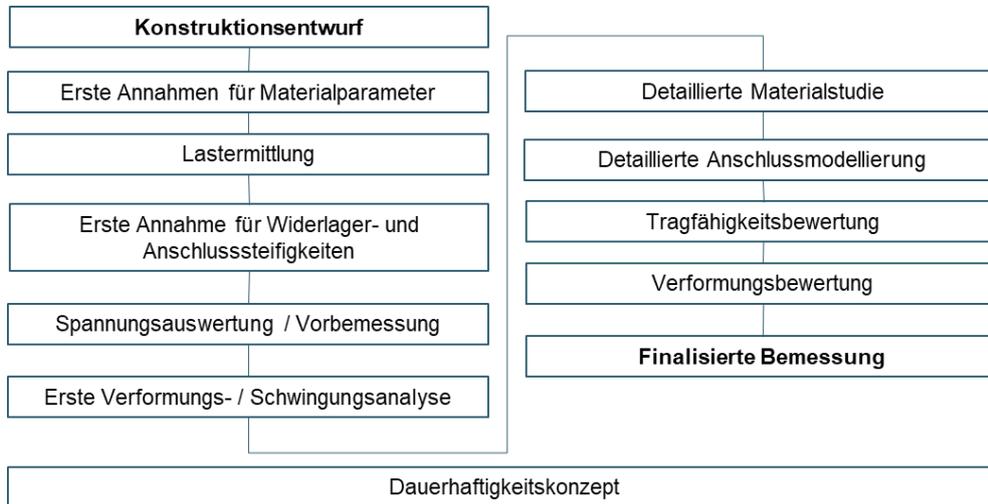


Abbildung 57: Vorgehen bei der Projektierung der Brückenkonstruktion

## Modellierung – Haupt-/ Nebenträgersystem

### Grundlegendes

Die Modellierung der Brücke erfolgt unter Zuhilfenahme des Finite-Elemente-Programms RFEM der Firma dlubal. Für die Bemessung der Bauteile erfolgt die Aufteilung in Einzeltragglieder. Ungewollte Effekte aus einer komplexen, dreidimensionalen Modellierung können so weitestgehend ausgeschlossen werden, wenngleich die Einzelbauteile aufgrund ihrer Einzelkrümmung dennoch als dreidimensionale Bauteile in dlubal RFEM modelliert werden müssen.

Angelehnt an das System einer Trogbücke erfolgt die Aufgliederung in die Systeme:

- Primärtragglieder: Brüstung, beidseitig
- Sekundärtragglieder: Querschotte
- Horizontale Aussteifung: Fahrbahnplatte, Längsschotte

Die Darstellung der Einzelbauteile und der mehrachsrig gekrümmten Wetterschale (ohne Beteiligung am vertikalen Lastabtrag) erfolgt in Abbildung 58, Abbildung 59 und Abbildung 60.

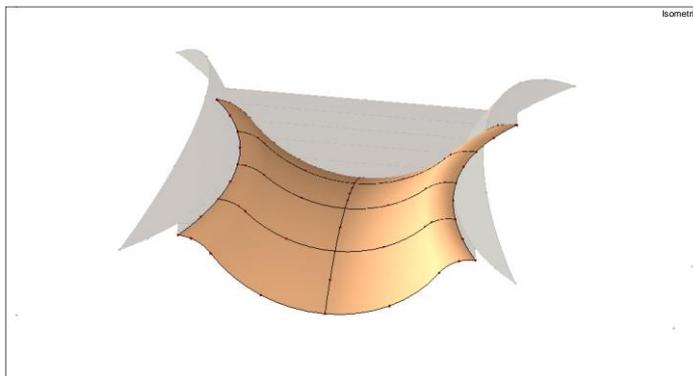


Abbildung 58: Isometrie - untere mehrachsrig gekrümmte Verkleidung

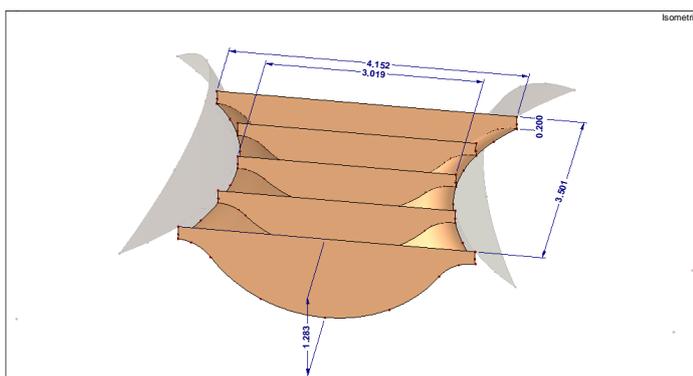


Abbildung 59: Isometrie - untere Verkleidung und Querschotte

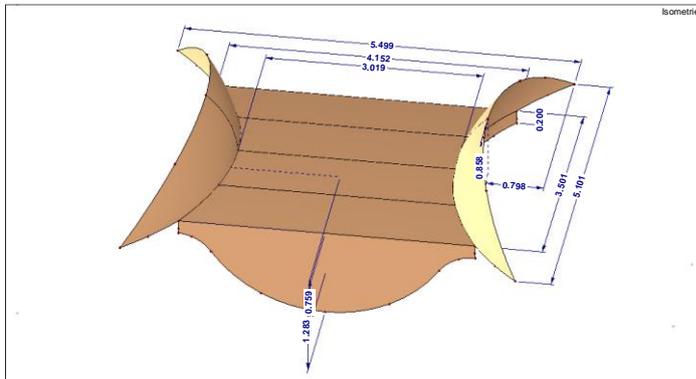


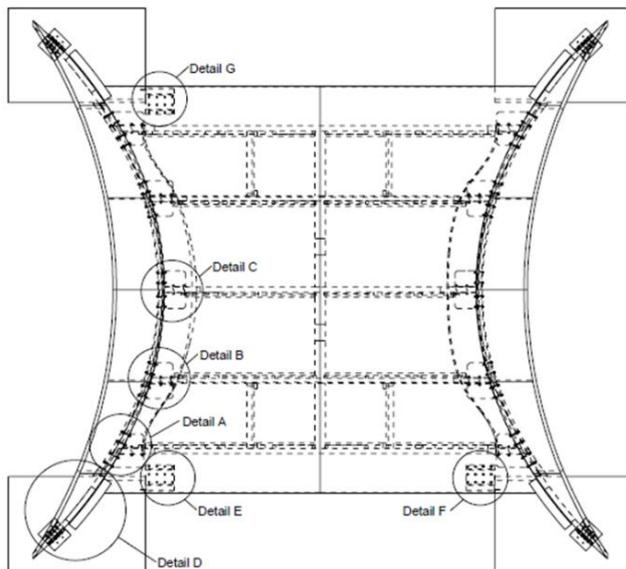
Abbildung 60: Isometrie - vollständiges Modell mit Brüstungen und Fahrbahnplatte

## Anschluss- und Aussteifungsdetails

### Tragfähigkeit – Modellierung von Anschlussdetails

Die entworfene Konstruktion zeigt ein komplexes Tragverhalten. Dieses ist durch eine kombinierte Wirkung des Scheiben- und Plattentragverhaltens gekennzeichnet. Aufgrund der Krümmung der Brüstung (Hauptträger) erfährt diese eine exzentrische Beanspruchung. Die hervorgerufene Verdrehung wird durch die Widerlager und die Anschlusspunkte Querschott / Brüstung aufgenommen. Aus diesem Grund ist es von essentieller Bedeutung, dass die Anschlüsse Querschott / Brüstung verhältnismäßig steif ausgebildet sind. Hierbei musste auf Stahlanschlüsse zurückgegriffen werden, da die Nachgiebigkeit von holzbasierten Lösungen zu groß ausfällt. Geklebte Anschlüsse waren nicht möglich, da aufgrund von Transporteinschränkungen ein Kleben in der Werkstatt nicht möglich ist und für die Herstellung von Klebeverbindungen vor Ort eine spezielle Qualifizierung des ausführenden Betriebes erforderlich ist. Dies betrifft auch die Widerlager der Brüstung, die zur Ausbildung einer Einspannung die Übertragung von abhebenden Kräften gewährleisten mussten. Der dritte Bereich betrifft die horizontale Auflagerung der Fahrbahnplatte. Bei dieser wurde auf eine zwängungsfreie Lagerung geachtet, um die klimabedingten Verformungen des Furnierschichtholzes zu ermöglichen, ohne große Spannungen aus einer Zwängung zu generieren. Im Rahmen der Überarbeitung / Optimierung kam es somit zur Anpassung einiger Anschlussdetails sowie zu einer Erweiterung um weitere Details. Abbildung 61 enthält eine Übersicht der Auflager- und Anschlussdetails.

## Übersicht: Details



### Anmerkungen:

- Detail A, B und C sind spiegelsymmetrisch an der zweiten Hälfte an der markierten Brüstung sowie der zweiten Brüstung auszuführen (somit 4x Detail A, 4x Detail B, 2x Detail C)
- Detail D ist identisch an allen vier Auflagerpunkten auszuführen
- Die unterschiedliche Ausführung der Auflagerpunkte Detail E, F und G ist zu beachten. Am vierten Auflagerpunkt erfolgt keine horizontale Lagerung

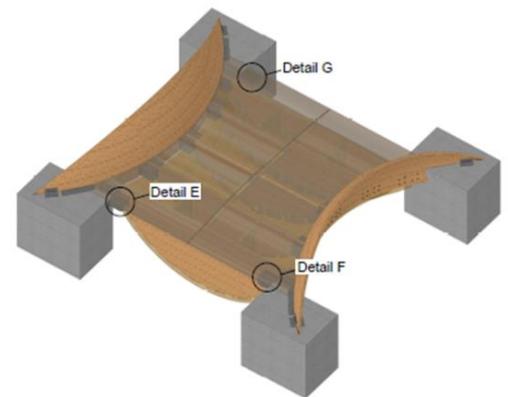
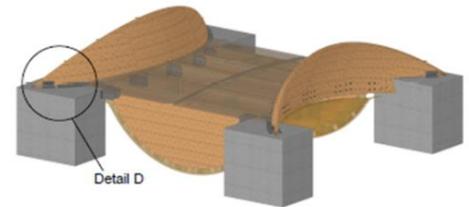
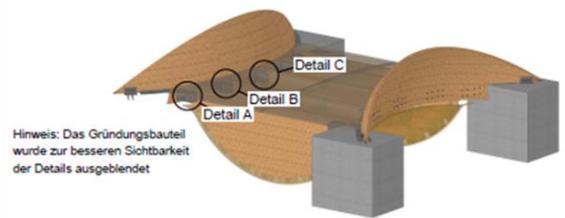


Abbildung 61: Übersicht Auflager- und Anschlussdetails

## Modellierung – Einzelbauteile: Fahrbahn

### Geometrie und Lagerung

Die vertikale Auflagerung der Fahrbahn erfolgt auf den Querschotten, welche die Nebenträger darstellen. Die horizontalen Lasten aus der Aufnahme der aus Fußgängerverkehr entstehenden Schubkräfte werden über eine Anschlusskonstruktion direkt in das Widerlager eingeleitet. Somit entsteht eine statisch bestimmte Lagerung, die eine zwangungsfreie Verformung der Konstruktion (beispielsweise infolge von Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen) ermöglicht. Bei der Ausführung muss auf eine ausreichend große Fuge zwischen Fahrbahn und Brüstung geachtet werden, damit bei Längenänderungen der Konstruktion in Querrichtung keine Zwängungen entstehen. Die Planung dieser Rinne erfolgt im Rahmen des Dauerhaftigkeitskonzepts. Die angegebenen Maße beziehen sich auf eine Passgenauigkeit der Bauteile. Die Fuge ist durch entsprechenden Zuschnitt sicherzustellen.

Eine horizontale Lagerung der Fahrbahn am Mittelschott wäre zwar aus Symmetriegründen günstiger, ist jedoch aufgrund der damit entstehenden zusätzlichen horizontalen Belastung für die Brüstung sehr ungünstig. Da dies die Verformung ungünstig erhöhen würde, wird von dieser Variante abgesehen. Aus diesem Grund erfolgt die horizontale Lagerung an den Lagerblöcken im Antrittsbereich.

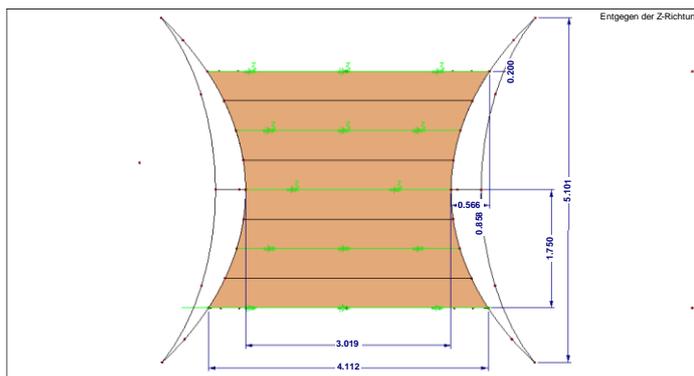


Abbildung 62: Fahrbahn – Geometrie und Lagerung

## **Anschlussdetails**

### *Horizontales Widerlager Fahrbahn, Detail E – G*

Es wurde Horizontallager für die Fahrbahn dimensioniert, welche die Kräfte ohne Umwege direkt in die Widerlager einleiten. Diese werden an drei der vier Ecken der Fahrbahn angeordnet und mit entsprechenden Langlöchern versehen, sodass eine zwängungsfreie Lagerung der Fahrbahn möglich ist. Die Ausführungspläne können im Anhang zum TV 2 eingesehen werden.

## **Belastung**

Die Beanspruchung der Fahrbahnplatte ist in die Belastung in Plattenebene und in Scheibenebene aufzuteilen.

### *Belastung in Plattenebene*

Das Bauteileigengewicht wird programmintern berücksichtigt. Zusätzlich muss ein Fahrbahnbelag berücksichtigt werden. Im Projekt wird die Verwendung des Furnierwerkstoffs als Fahrbahnbelag gewünscht. Auf der sicheren Seite liegend wird an dieser Stelle zunächst mit dem Gewicht einer Asphaltsschicht gerechnet, sodass genügend Tragfähigkeitsreserven für unterschiedliche Fahrbahnaufbauten gegeben sind.

Die gleichmäßig verteilte Flächenlast der Nutzlast beträgt bei dieser Brückenlänge  $q_k = 5kN/m^2$ . In einem gesoderten Lastfall muss eine Enzellast von  $Q_k = 10 kN$  mit einer Aufstandsfläche bei einer Seitenlänge von  $a = 10 cm$  berücksichtigt werden. Die Aufstandsfläche darf auf die Mittelachse der Tragschicht bezogen und damit erhöht werden. Die horizontale Schublast, welche aus der Bewegung der Fußgänger auf der Brücke entsteht, wird in das erste Querschott eingeleitet und beim Nachweis des Anschlusses an das Widerlager berücksichtigt.

### *Belastung in Scheibenebene*

In Spannrichtung (y-Richtung) erfährt die Fahrbahn eine Beanspruchung aus

- a) Antritt der Fußgänger auf der Brücke
- b) Windbeanspruchung auf das Randschott
- c) Windbeanspruchung auf die Brüstung

Die Lasten in x-Richtung (quer zur Spannrichtung) sind insbesondere für die Anschlussbemessung für die horizontale Verankerung der Fahrbahn von Bedeutung. Die Belastung quer zur Spannrichtung (x-Richtung) resultiert

- a) Unsymmetrischen Verkehrslastfalls auf der Fahrbahn
- b) Windlast auf die Brüstung (x-Richtung)

Die vertikale Belastung aus ersterer bewirkt eine Horizontallast im Anschlussbereich an die Brüstung, welche sich nun nicht mehr in der Scheibenebene kurzschließen kann.

## **Modellierung – Einzelbauteile: Querschotte (Nebenträger)**

### **Geometrie und Lagerung**

Die Fahrbahn liegt auf den Nebenträgern, den Querschotten auf, welche wiederum an die beiden Hauptträger (Brüstungen) angeschlossen sind. Aufgrund der Symmetrie der Konstruktion werden drei verschiedene Querschott-Geometrien unterschieden:

- Mittelschott, Spannweite:  $l = 3,0 m$  (1x)
- Zwischenschott, Spannweite:  $l = 3,3 m$  (2x)
- Randschott, Spannweite:  $l = 4,151 m$  (2x)

Im Anschlussbereich Querschott / Brüstung werden die drei Lagerungsrichtungen unterschieden:

1. Vertikalfeder Auflager Querschott im Anschlussbereich Brüstung (z-Richtung global)
  - a. Anschluss Winkel / Querschott
  - b. Anschluss Winkel / Brüstung und Anschluss Winkel / Querschott

2. Horizontalfeder Auflager Querschott im Anschlussbereich Brüstung (x-Richtung)  
Die Feder im Modell wird in x-Richtung mit  $K_{linear,x} = 1 kN/m^2$  angenommen, um im Modell eine Konvergenz zu erzielen.

### 3. Horizontalfeder Auflager Querschott im Anschlussbereich Brüstung (y-Richtung)

Die Querschotte werden beiderseitig seitlich durch Winkel an die Brüstungen (Hauptträger) angeschlossen (siehe Abbildung 63).

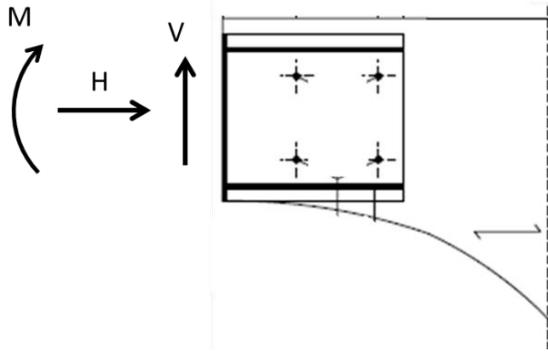


Abbildung 63: Schematischer Lastangriff auf den Anschluss des Querschotts, Ansicht Nebenträger (Querschott)

Die Anschlussfeder besteht aus den drei Anteilen  $C_{\varphi,1}$  (Anschluss Brüstung – Winkel),  $C_{\varphi,2}$  (Anschluss Querschott-Winkel) und  $C_{\varphi,3}$  (Biegesteifigkeit des Querschotts + Translationsfeder Winkel). Die Federn werden in Reihe geschaltet, siehe Abbildung 64.



Abbildung 64: Reihenschaltung der Anschlussfedern im Anschlussbereich Querschott / Brüstung

Bei der Aufteilung der Lastanteile sind die unterschiedlichen Anschlusswinkel (schiefwinklige Anschlüsse) zwischen Haupt- und Nebenträger zu beachten (Abbildung 65).

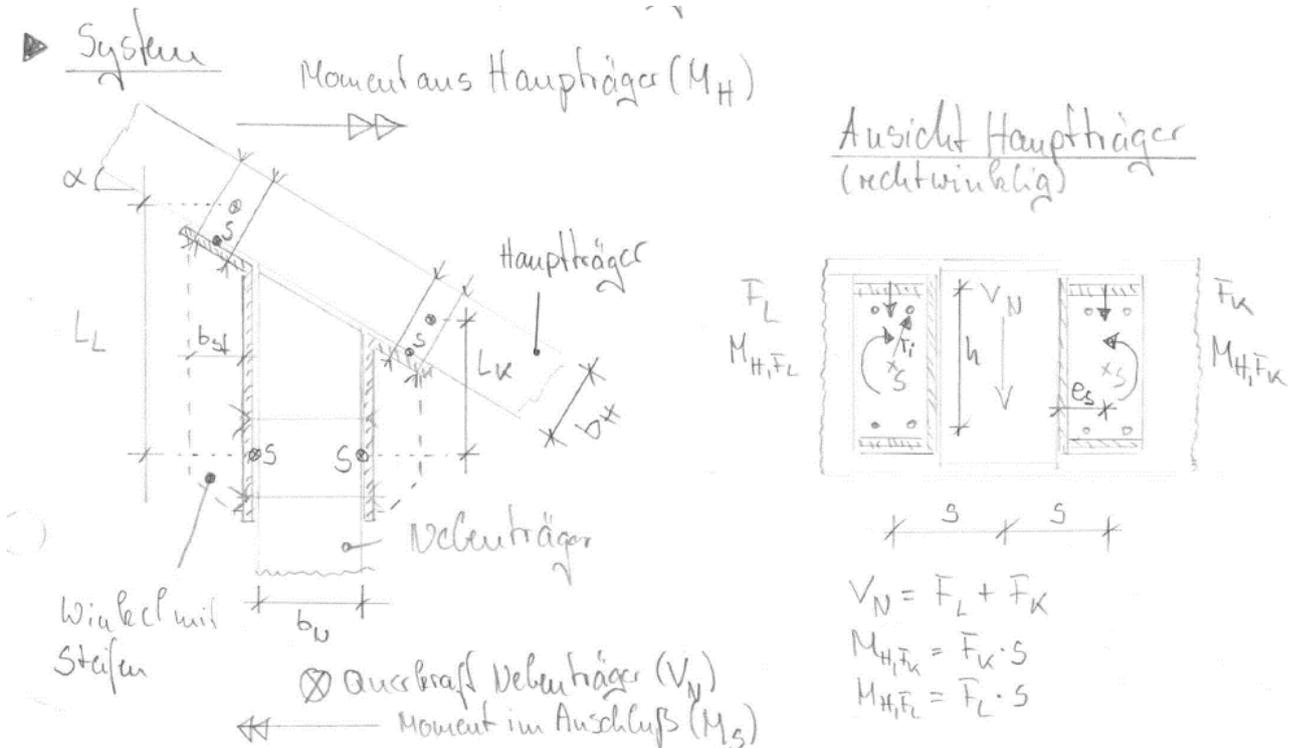


Abbildung 65: Schiefwinkliger Haupt-/Nebenträgeranschluss

Wie Abbildung 65 zeigt, ergeben sich unterschiedliche Hebelarme für den Lastabtrag im kurzen und im langen Schenkel des Anschlusswinkels. Dies findet sich in der statischen Modellbildung (Abbildung 66) wieder.

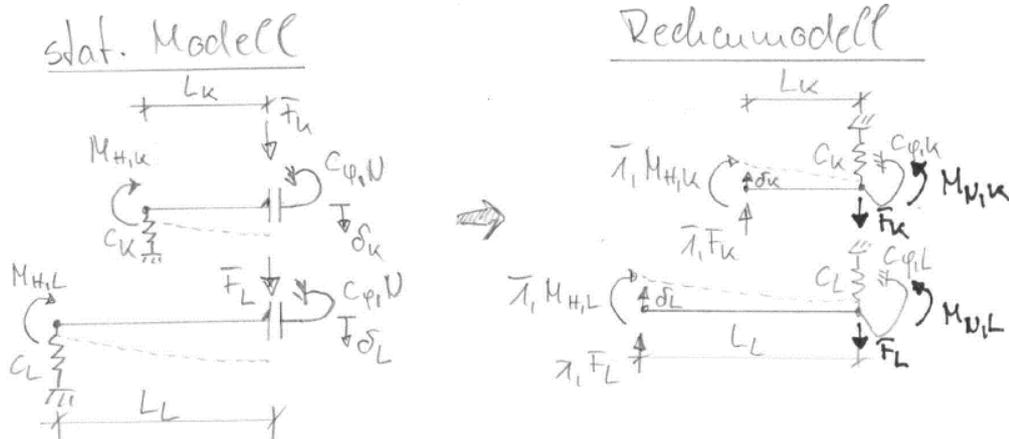


Abbildung 66: Schiefwinkliger Haupt-/ Nebenträgeranschluss, statisches Modell und Rechenmodell

Zur Überlagerung der Federanteile ist die Aufteilung in Biegezug- und Biegedruckbereich nötig (Abbildung 67).

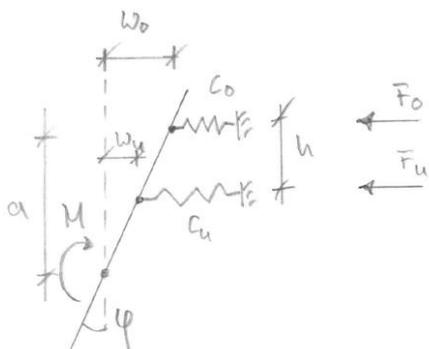


Abbildung 67: Aufteilung der Federanteile in Biegezug- und Biegedruckbereich

Auf eine detaillierte Darstellung der Federberechnungen wird an dieser Stelle verzichtet. Die einzelnen Federanteile sowie die Gesamtfedern werden in Tabelle 5 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Federanteile und der Gesamtfedern je Anschluss

	Randschott	Zwischenschott	Mittelschott
<b>Anschlussteil 1: Anschluss Winkel / Brüstung</b>			
Winkelschenkel an Holz (Biegedruckbereich)	$K_1 = 264.798 \text{ N/mm}$	$K_1 = 264.798 \text{ N/mm}$	$K_1 = 264.798 \text{ N/mm}$
Unterlegscheibe an Holz (Biegezugbereich)	$K_2 = 155.369,6 \text{ N/mm}$	$K_2 = 155.369,6 \text{ N/mm}$	$K_2 = 155.369,6 \text{ N/mm}$
Dehnsteifigkeit der Schraube (Biegezugb.)	$K_3 = 963.428,6 \text{ N/mm}$	$K_3 = 963.428,6 \text{ N/mm}$	$K_3 = 963.428,6 \text{ N/mm}$
Anteil aus Umlenkung durch schiefen Anschluss (Biegezug- & -druckb.)	$K_4 = 84.021,61 \text{ N/mm}$	$K_4 = 84.021,61 \text{ N/mm}$	-
Ersatztranslationsfeder Biegezugbereich	$K_{ers,c,R} = K_{ers,o} = 165.067 \text{ kN/m}$ mit $\alpha = 32^\circ$	$K_{ers,c,Z} = K_{ers,o} = 227.594 \text{ kN/m}$ mit $\alpha = 16^\circ$	$K_{ers,c,M} = K_{ers,o} = 264.798 \text{ kN/m}$ mit $\alpha = 0^\circ$
Ersatzrotationsfeder Biegedruckbereich	$K_{ers,c,R} = K_{ers,u} = 114.711 \text{ kN/m}$ mit $\alpha = 32^\circ$	$K_{ers,c,Z} = K_{ers,u} = 128.032 \text{ kN/m}$ mit $\alpha = 16^\circ$	$K_{ers,c,M} = K_{ers,u} = 133.793 \text{ kN/m}$ mit $\alpha = 0^\circ$
Ersatzrotationsfeder	$K_{\phi,1} = 1.190,9 \text{ kNm}$ /rad	$K_{\phi,1} = 1.438,5 \text{ kNm}$ /rad	$K_{\phi,1} = 1.560,5 \text{ kNm}$ /rad
<b>Anschlussteil 2: Anschluss Winkel Querschott</b>			
Abscherbeanspruchter Anschluss Winkel / Querschott	$K_{ser,trans} = 42.010,8 \text{ N/mm}$	$K_{ser,trans} = 42.010,8 \text{ N/mm}$	$K_{ser,trans} = 42.010,8 \text{ N/mm}$
Rotationsfeder	$K_{\phi,2} = 840,44 \text{ kNm}$ /rad	$K_{\phi,2} = 840,44 \text{ kNm}$ /rad	$K_{\phi,2} = 840,44 \text{ kNm}$ /rad

<b>Steifigkeit aus der Bauteilverdrehung des Querschotts</b>			
	$K_{3,\varphi,R} = 65,18 \text{ kNm} / \text{rad}$	$K_{3,\varphi,Z} = 223,4 \text{ kNm} / \text{rad}$	$K_{3,\varphi,M} = 173,7 \text{ kNm} / \text{rad}$
<b>Gesamtfedern</b>			
Gesamtrotationsfeder	$K_{d,\varphi,ges,R} = 3,34 \cdot 10 \text{ kNm/rad}$	$K_{d,\varphi,ges,Z} = 11,47 \cdot 10 \text{ kNm/rad}$	$K_{d,\varphi,ges,M} = 8,91 \cdot 10 \text{ kNm/rad}$
Federsteifigkeit des Linienlagers	$K_{lin,R,d} = 50.000 \text{ kN/m}^2$	$K_{lin,Z,d} = 170.000 \text{ kN/m}^2$	$K_{lin,M,d} = 135.000 \text{ kN/m}^2$

Die Berechnung der Anschlussfedern basiert auf den Steifigkeitskennwerten der BauBuche®. Diese wurden verwendet, da die Materialuntersuchungen bei dem Projektpartner WKI und die Projektierung der Konstruktion zum Teil parallel erfolgen mussten. Die Werte gelten hier demnach orientierend.

Hinzu kommt die Horizontalfeder am Randschott im Anschlussbereich an die Fahrbahn (Anschluss an ein Schubholz). Das Randschott wird zusätzlich zu den Vertikallasten durch eine horizontale Windlast beansprucht. Windlasten in Brückenlängsrichtung müssen in üblichen Fällen nicht angesetzt werden. Der Demonstrator sollte auf einzelne Auflagerblöcke aufgestellt werden, sodass es durchaus zu maßgebenden Lasten in Brückenlängsrichtung kommen kann. Die auf das Randschott wirkenden Lasten werden über einen Schubverbund in die Fahrbahn eingetragen und über diese als Scheibenbeanspruchung ins Auflager abgetragen. Zusätzlich wird das Randschott durch Längsschotte in horizontaler Richtung gehalten und ausgesteift. Dazu wird in den Drittelpunkten der Spannweite jeweils ein Längsschott über die Bauteilhöhe angeordnet. Der Anschluss wird über ein angeschraubtes Schubholz realisiert.

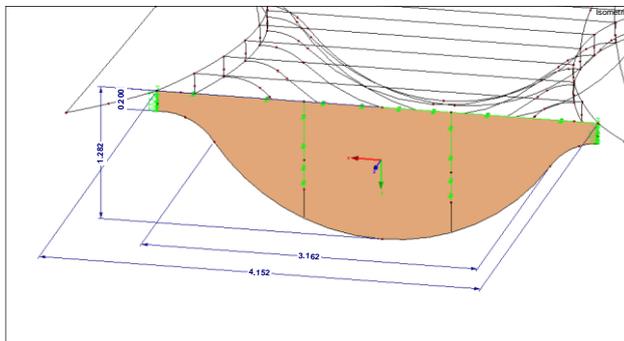


Abbildung 68: Querschott – Geometrie und Lagerung Randschott

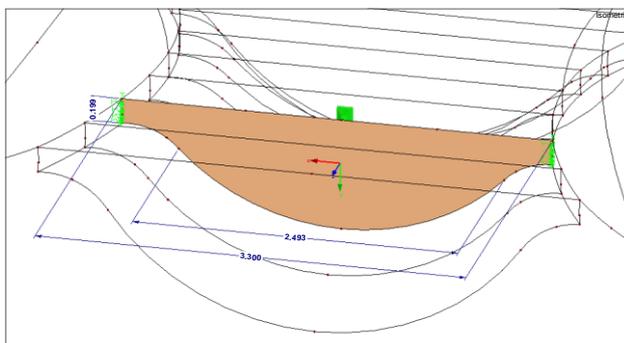


Abbildung 69: Querschott – Geometrie und Lagerung Zwischenschott

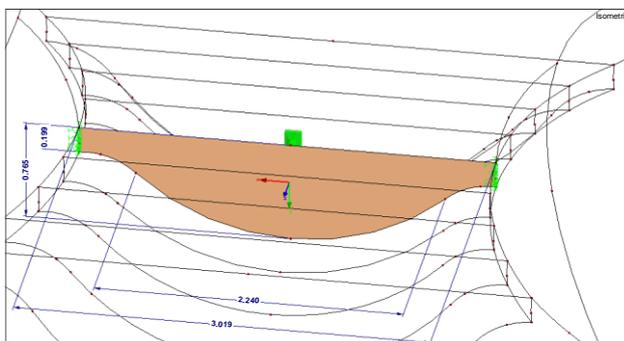


Abbildung 70: Querschott – Geometrie und Lagerung Mittelschott

### **Anschlussdetails**

*Anschlüsse Querschotte – Brüstung, Details A – C*



Zwischenschott	0,94	+/- 141,36
Mittelschott	1,39	+/- 208,11

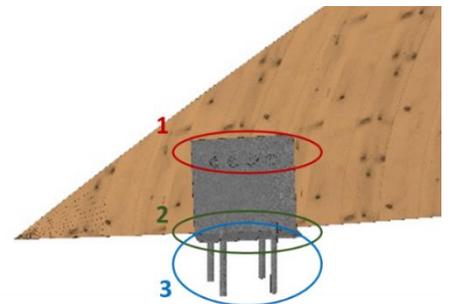
Aufgrund der großen Schlankheit der Querschotte können Imperfektionen einen großen Einfluss auf die Tragfähigkeit haben. Mittels des dIubal Moduls RF-STABIL können die Eigenformen einer Struktur bestimmt werden. Diese kann in das weitere Modul RF-IMP eingelesen werden und mittels diesem dann die Vorverformung bestimmt werden. Diese Vorverformung wird für den ungünstigsten Lastfall als Zusatzlast angesetzt.

### Modellierung – Einzelbauteile: Brüstung (Hauptträger)

#### Geometrie und Lagerung

Die Brüstungen spannen in Brückenlängsrichtung und stellen die Hauptträger des Tragwerks dar. Der Lasteintrag erfolgt aus der Auflagerung der Querschotte (Nebenträger), sowie einer zusätzlichen Windbeanspruchung. Die Auflagerung erfolgt in den äußeren Enden des zweiachsig gekrümmten Trägers. Die Ausbildung als ellipsoid gekrümmtes Element ermöglicht den Lastabtrag unter Aktivierung eines Schalenträgerverhaltens, welches bei den angestrebten dünnen Bauteilstärken vorteilhaft ist.

Die Widerlager müssen sowohl Zug- als auch Druckbeanspruchung aufnehmen, da es in den Endbereichen zu abhebenden Kräften kommt. Durch die Krümmung des Trägers und die daraus resultierende exzentrische Beanspruchung entsteht eine (globale) Momentenbeanspruchung. Da diese nicht allein über die Widerlager an den Trägerenden abgetragen werden kann, wird die aussteifende Wirkung der Querschotte herangezogen, um die Verformung des Trägers zu begrenzen. Zur Berücksichtigung der Bauteilsteifigkeit werden die Widerlager durch Wegfedern abgebildet, auf deren Berechnung an dieser Stelle aus Platzgründen nicht detaillierter eingegangen werden soll.



Die Feder im Zugbereich ergibt sich aus:

- 1) Nachgiebigkeit der Stahlblech-Holz-Verbindung
- 2) Biegenachgiebigkeit der Grundplatte
- 3) Nachgiebigkeit der Ankerstäbe

Die modellierte Feder stellt eine diskrete Feder dar. Im Modell wird diese durch ein Linienlager abgebildet. Aus diesem Grund ist die Verformung des Lagers zu vergleichen. Diese Verformung kann mit einem Federsteifigkeit des Linienlagers von  $K = 200.000 \text{ kN/m}^2$  gut approximiert werden.

Für den Druckbereich wird ebenfalls eine Federsteifigkeit des Linienlagers von  $K = 200.000 \text{ kN/m}^2$  angenommen. Die entsprechende Nachgiebigkeit wird durch ein entsprechendes Elastomerlager zwischen Furnier und Widerlager sichergestellt.

Quer zur Brückenlängsrichtung (x-Richtung) werden die Brüstungen an den Querschotten gehalten und somit das Moment aus der exzentrischen Belastung, bedingt durch die Krümmung, aufgenommen. Die Lagerung erfolgt in globaler x-Richtung und muss aufgrund der Nachgiebigkeit des Materials ebenfalls mit einer Federsteifigkeit versehen werden. Diese besteht aus den folgenden Teilen

- 1) Anlussteil 1: Anschluss Winkel Brüstung
  - a. Winkelschenkel an Holz
  - b. Unterlegscheibe an Holz
  - c. Dehnsteifigkeit der Schraube
- 2) Anlussteil 2: Anschluss Winkel Querschott
  - a. Anschluss Winkel / Querschott (abscherbeanspruchter Anschluss)
- 3) Steifigkeit aus der Bauteilverdrehung des Querschotts  
Die Anlussteifigkeit aus der Verdrehung des Querschotts wird iterativ wie folgt bestimmt.

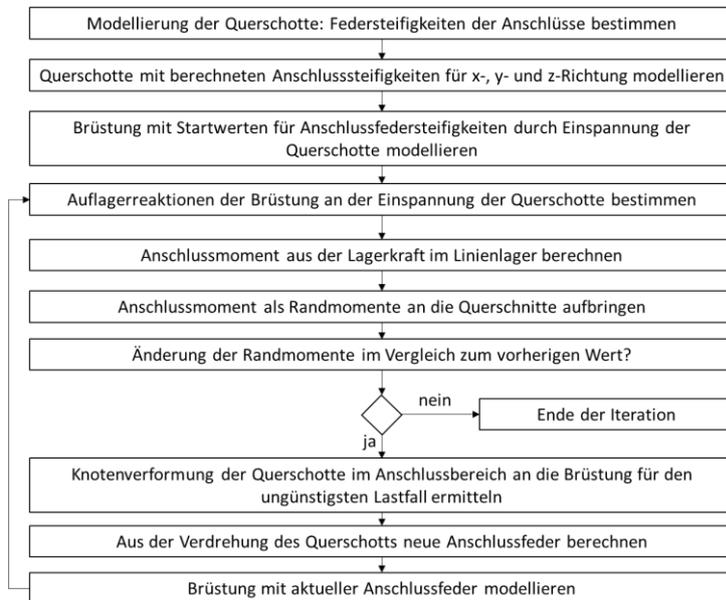


Abbildung 0.73: Iteratives Vorgehen zur Bestimmung der Anschlusssteifigkeit aus der Verdrehung der Querschotte

Abbildung 74 stellt die Lagerung der Brücke aus zwei Perspektiven dar.

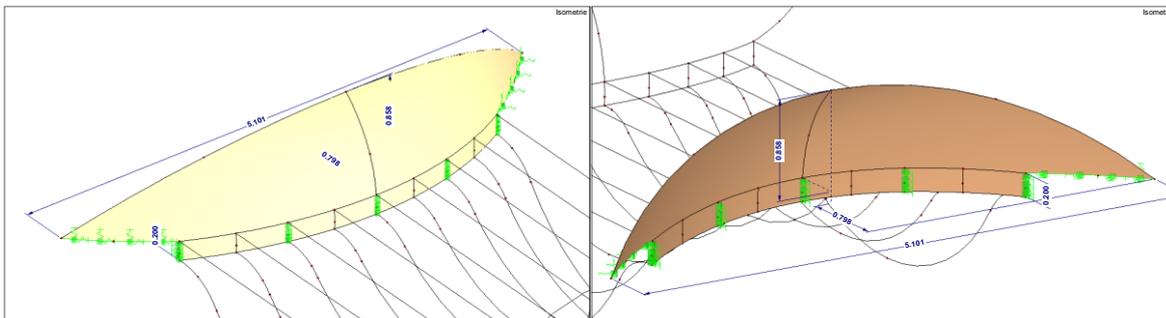


Abbildung 74: Brüstung mit Lagerung

### **Anschlussdetails**

#### *Widerlager Brüstung, Detail D*

Das Widerlager der Brüstung besteht aus einem Bereich zur Aufnahme von Zugkräften und einem zur Aufnahme von Druckkräften, da sich ein Vorzeichenwechsel im Verlauf der linienförmigen Auflagerkraft einstellt. Anschlussdetails können im Anhang zum TV 2 eingesehen werden.

### **Belastung**

Die Belastung des Hauptträgers besteht aus den ständigen Lasten aus Eigenlast, sowie der Wetterschutzverschalung, den Holmlasten aus der Anlehnung von Fußgängern, sowie den Windlasten. Zudem werden Zusatzlasten aus Vorverformungen berücksichtigt. Mittels des dlubal Zusatzmoduls RF-STABIL können die Eigenformen einer Struktur bestimmt werden. Diese kann in das weitere Zusatzmodul RF-IMP eingelesen und mittels diesem dann die Vorverformung bestimmt werden. Diese Vorverformung wird für den ungünstigsten Lastfall als Zusatzlast angesetzt.

### **Grenzzustände der Tragfähigkeit**

#### **Grundlegendes**

Die Modellierung der Konstruktion erfolgte unter Verwendung der Steifigkeitskennwerte der BauBuche® Q der Firma Pollmeier, da zum entsprechenden Zeitpunkt nicht alle benötigten Materialkennwerte zum neuen Hybridmaterial vorlagen. Eine Mischung der Werte in der Steifigkeitsmatrix würde zu unrealistischen Spannungen führen. Zudem hängen die Materialkennwerte auch von der Laminierungsfähigkeit großer, gekrümmter Bauteile ab. Die ausgelesenen Spannungen wurden dann in der Tragfähigkeitsbewertung mit den Werten des üblichen Furnierwerkstoffs (BauBuche® Q) und den ermittelten Festigkeitswerten des vakuuminfundierten Hybridmaterials, welche an kleinformatigen Prüfkörpern gewonnen wurden, verglichen.

Es zeigte sich für alle Bauteile, dass die entsprechenden Lastkombinationen in der kurzen Bemessungssituation, also unter Berücksichtigung veränderlicher Lasten mit geringerem Effekt der Dauerlast, die maßgebenden Lastkombinationen sind. Es handelt sich um eine leichte Konstruktion, bei der der Einfluss der Dauerlast auf die Tragfähigkeit von untergeordneter Bedeutung ist.

Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass mit den high-performance Eigenschaften des neu zu entwickelnden Hybridmaterials Anwendungen in filigranen Freiformen möglich ist, die mit herkömmlichen Baustoffen unerreichbar bleibt. Modernen Gestaltungsanforderungen an zukunftsweisenden Konstruktionen kann so besser nachgekommen werden. Gleichzeitig steigert dies die Wettbewerbsfähigkeit des nachwachsenden Baustoffs Holz im marktwirtschaftlichen Gesamtvergleich.

In Bezug auf das Projektierungsbeispiel zeigt sich dies vor allem in der erhöhten Querkzugtragfähigkeit. Bezogen auf die Fahrbahn zeigen die Ergebnisse eine Überschreitung der Tragfähigkeit für Zug rechtwinklig zur Faserrichtung in Bezug auf die Tragfähigkeit der BauBuche® Q. Diese Zugspannung resultiert aus dem kleinen Kragarm am Rand der Fahrbahn, welche für den Anschluss dieser an die Ankerblöcke notwendig ist, um die Horizontalkräfte aus dem Antritt der Fußgänger in die Widerlager abzuleiten. Auch für die Brüstung (Hauptträger) ergäbe sich eine Überschreitung der Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung, in diesem Fall in den Anschlussbereichen der Querschotte (Nebenträger). Mit der erhöhten Tragfähigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung des neuen Materials wären diese Nachweise für Fahrbahn und Brüstung jedoch eingehalten und begründen so die Sinnhaftigkeit der Forschung. Bezogen auf die Querschotte (Nebenträger) könnte mit den derzeit gängigen Materialien Probleme in der Schubtragfähigkeit auftreten. Auch diesen lässt sich mit der zu erwartenden hohen Schubtragfähigkeit des neuen Materials wirksam entgegentreten.

Die genannten Ergebnisse stellen Spannungen als Resultat der Zugrundelegung der BauBuche® Q der Firma Pollmeier für die Steifigkeitseigenschaften im FE-Modell dar, da keine vollständige neue Steifigkeitsmatrix anhand des neuen Materials aufgebaut werden konnte. Für den komplexen Hauptträger (Brüstung) wurden alternative Untersuchungen mit modifizierten Steifigkeitskennwerten vorgenommen. Diese gelten jedoch nur unter Vorbehalt und wurden vergleichend dargestellt, da nur die Biegesteifigkeit modifiziert werden konnte. Es ist aufgrund von der zu vermutenden Korrelation zwischen Biege- und Schubsteifigkeit, die insbesondere durch die Durchdringung des Materials mit Harz im Vakuuminfusionsprozess noch verstärkt werden sollte, davon auszugehen, dass bei Änderung der Biegesteifigkeit auch eine entsprechende Änderung der Schubsteifigkeit zu verzeichnen ist. Dies kann jedoch an dieser Stelle quantitativ nicht bewertet werden. Eine Anpassung der Biegesteifigkeit auf die Versuchsergebnisse führte zu einer stärkeren Auslastung rechtwinklig zur Faserrichtung, welche jedoch – rechnerisch mit den vorliegenden Daten – über die Faserverstärkung abgetragen werden kann. Wie bereits erwähnt ist zu betonen, dass die geänderten Spannungen bei Anpassungen der Biegesteifigkeit ohne Veränderung der Schubsteifigkeit resultieren, was eine rein theoretische Betrachtung darstellt und die Korrelation zwischen Biege- und Schubsteifigkeit ignoriert.

Unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse konnten alle erforderlichen Querschnittsnachweise erbracht werden. Zur Absicherung für den Bau der Brücke im Projekt sollte jedoch ein Aufbau **mit Querlagen** ausgeführt werden, da die Tragfähigkeit des Hainbuchenfurniers noch nicht durch umfassende Versuchsreihen hinreichend genau bestätigt wurde und auch die Faserverstärkung noch nicht umfassend erprobt wurde.

### **Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit**

Die Verformungsnachweise wurden für Fahrbahn, Haupt- und Nebenträger getrennt geführt. Die Nachweise sind sowohl im Anfangszustand, als auch unter Berücksichtigung des Kriechens (Endzustand) eingehalten. Dabei wird für den Anfangszustand ein Grenzwert von  $l/200$  und für den Endzustand von  $l/150$  angesetzt.

Die Überprüfung der Schwingung erfolgt für das Gesamtmodell. Diese zeigte keine kritische Eigenfrequenz, welche sodass eine Anregung durch Fußgängerverkehr zu Resonanzeffekten führen könnte.

### **Dauerhaftigkeitskonzept**

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes soll das komplette Tragwerk und auch die schützenden Bauteile aus dem neu zu entwickelnden Furnierwerkstoff hergestellt werden. Zur Sicherstellung der benannten Anforderungen an die Dauerhaftigkeit müssen alle tragenden Bauteile durch austauschbare Opferbauteile geschützt werden. Die tragenden Bauteile umfassen: Die Fahrbahn, die Querschotte, die Brüstungen.

#### **Fahrbahn**

Die Fahrbahn wird durch eine austauschbare Verschleißschicht mit einer Dicke von  $d = 20 \text{ mm}$  vor der Witterung geschützt. Diese ist auf einer Abdichtung ohne Durchdringungen anzubringen. Regenwasser ist durch eine geeignete Querneigung der Fahrbahn zu den Seiten hin abzuführen. Des Weiteren muss im Anschlussbereich an die Brüstung eine Wasserabflusssrinne vorgesehen werden, die angefallenes

Regenwasser durch die Brückenlängsneigung abführt. Die Abdichtung auf der Fahrbahnplatte ist unterhalb der Rinne an der Innenseite der Brüstung hochzuführen.

**Hauptträger (Brüstungen)**

Die Brüstungen müssen in den Bereichen, in denen der Winkel zur Senkrechten eine Neigung von  $\alpha \leq 30^\circ$  unterschreitet, durch eine Verkleidung geschützt werden. Im Bereich von  $\alpha > 60^\circ$  muss zudem eine außenseitig angeordnete Verschalung zum Schutz der Brüstung vor der Witterung vorgesehen werden. Diese Verschalung ist hinterlüftet auszuführen und somit auf eine Konterlattung aufzubringen. Nach DIN 68800-2:2022-02, Abs. 5.2.1.2 gelten Wände als ausreichend hinterlüftet, wenn die Bekleidungen mit einem Abstand von min. 20 mm zur Tragkonstruktion angebracht werden. An diesem Maß wird sich hier orientiert und Lattungen und Konterlattungen von  $b/h = 30/50\text{mm}$  vorgesehen.

Der Abstand darf örtlich bis auf 5mm reduziert werden. Es sind Be- und Entlüftungsöffnungen mit Querschnittsflächen von jeweils mindestens  $50\text{cm}^2$  je 1m Wandlänge vorzusehen. Zur Verhinderung der kapillaren Wasseraufnahme im Auflagerbereich der Brüstung ist eine Abdichtung an der Schnittkante vorzusehen, welche seitlich an der Brüstung hochgeführt wird. Die Details werden in Abbildung 76 und Abbildung 75 dargestellt.

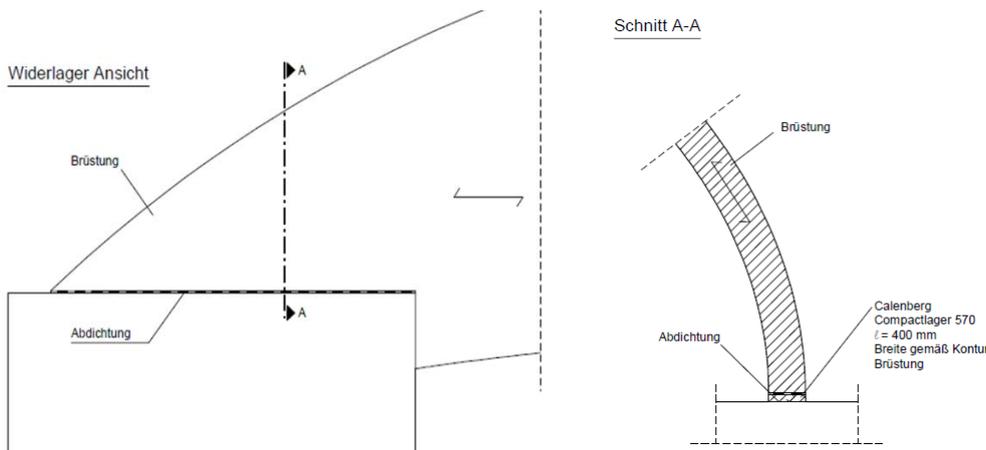


Abbildung 75: Konstruktiver Holzschutz im Bereich des Widerlagers

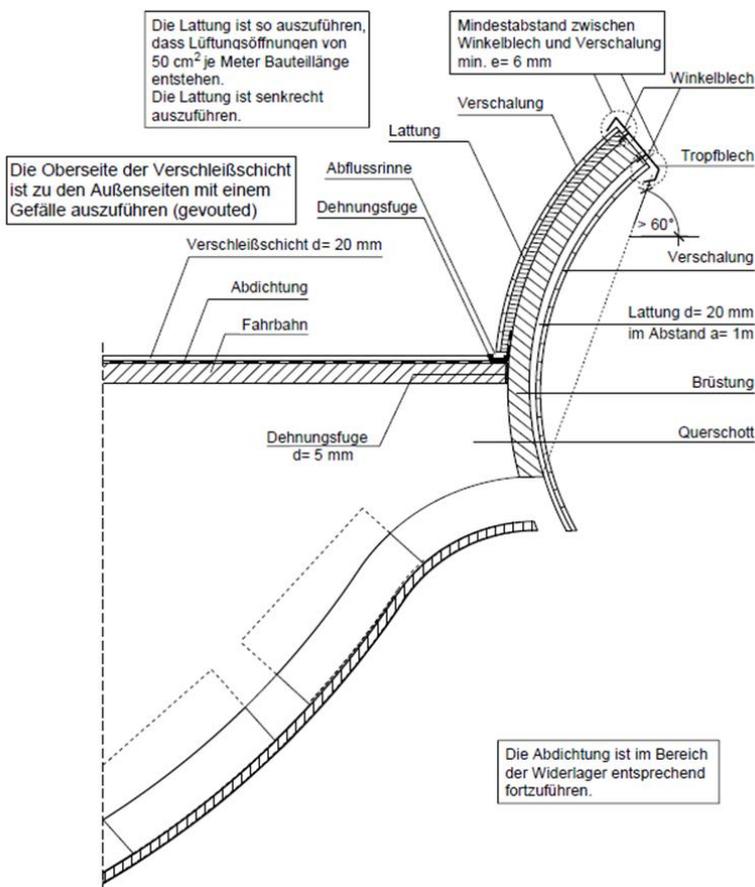


Abbildung 76: Konstruktiver Holzschutz Brüstung

### **Nebenträger (Querschotte)**

Die Querschotte sind oberseitig durch die Fahrbahn und unterseitig durch die mehrschichtig gekrümmte, nicht tragende Verkleidung geschützt. Diese Verkleidung muss im letzten Arbeitsschritt angebracht werden, um die vorherige Zugänglichkeit für den Einbau der Bauteile sicherzustellen. Die Verkleidung ist gegen Windsog zu sichern, die Befestigung erfolgt konstruktiv mit seitlichen Brettern (siehe Abbildung 76).

### **Abdichtung der Randschotte**

Im Regelfall wäre das Randschott durch den Gründungkörper vor Wind- und Witterungseinflüssen geschützt; das oberseitige Eindringen von Wasser ist durch eine entsprechende Abdichtung der Fahrbahnplatte sicherzustellen. Liegt kein durchgehender Gründungkörper vor und erfolgt die Gründung beispielsweise auf vier Einzelfundamenten, ist das Randschott der Witterung frei ausgesetzt. In diesem Falle ist das Randschott durch entsprechende Abdichtungsmaßnahmen gegen die Witterung zu schützen, siehe Abbildung 77.

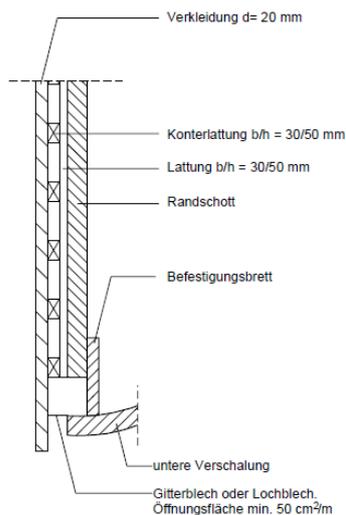


Abbildung 77: Konstruktiver Holzschutz Randschott

### **Grundlegendes zu Anschlüssen**

Zentraler Punkt für Modellierung und Ausführung ist die Umsetzung der Bauteilanschlüsse sowie des Widerlagers. Generell wird bei Konstruktionen im Außenbereich die Verwendung innenliegender Verbindungsmittel empfohlen, um einen Wassereintritt in die Konstruktion zu verhindern. Aufgrund der geringen Materialstärken können für diese Konstruktion jedoch die Mindestabstände für innenliegende Verbindungsmittel nicht eingehalten werden, weshalb auf außenliegende Verbindungsmittel und Anschlussgehölzer zurückgegriffen werden muss. Zudem müssen mechanische Verbindungsmittel verwendet werden, da geklebte Anschlüsse auf der Baustelle nur mit spezieller Qualifikation des ausführenden Unternehmens und unter strengen Auflagen hinsichtlich der Einbaufeuchte und -temperatur ausgeführt werden dürfen. Das Verkleben der Bauteile im Werk ist nicht möglich, da ein Transport der Brücke im Ganzen den Rahmen der im Projekt verfügbaren Mittel sprengen würde. Da die Tragkonstruktion jedoch zur Erzielung der Anforderungen an die Dauerhaftigkeit vollständig verkleidet werden muss, sind damit auch die Anschlüsse vor Feuchteintrag geschützt.

Für Anschlüsse mit Stahlbauteilen sind geeignete nicht rostende Stähle zu verwenden (A4-50). Alternativ dürfen nach DIN EN 1995-2/NA:2021-06 Stahlteile 4mm dicker ausgeführt und mit einer Zinkschichtdicke von mindestens 85 µm versehen werden. Dies kann für die geplanten Bleche angewendet werden. Verbindungsmittel sind aus nicht-rostenden Stählen zu verwenden. Auf ausreichende Maßnahmen zur Vermeidung von Kontaktkorrosion sei an dieser Stelle hingewiesen.

### **Einordnung der Bauteile zum Zwecke der Dauerhaftigkeit**

Durch die Ausführung der vorgesehenen Schutzmaßnahmen entsteht eine Zuordnung der Bauteile in die folgenden Kategorien. Nach Marutzky et al. 2013 können „[...] Latten hinter Vorhangfassaden, Dach- und Konterlatten, Traufbohlen und Dachschalungen der Gebrauchsklasse GK 0 zugeordnet werden.“ Da keine Feuchte oberhalb des Fasersättigungspunktes zu erwarten ist, findet kein Befall durch Holz zerstörende Pilze statt. Zudem kann überschüssige Holzfeuchte schnell an die Umgebung abgegeben werden und aufgrund der kleinen Querschnitte ist eine Durchtrocknung schnell möglich. Durch die hohen Temperaturen im Sommer und die geringen Querschnitte ist ein Insektenbefall zudem unwahrscheinlich.

Basierend auf diesen Erfahrungen kann mittels der geplanten konstruktiven Schutzmaßnahmen ein Pilzbefall der tragenden Holzbauteile ausgeschlossen werden und somit basierend darauf eine Einordnung in die GK 1 möglich ist. Die GK 0 und die GK 1 unterscheiden sich durch die Möglichkeit des Befalls durch holzerstörende

Insekten in der GK 1. Da durch den hohen Harzanteil dies bei dem verwendeten Material ausgeschlossen werden kann, kann eine Zuordnung der tragenden Holzbauteile in die GK 0 erfolgen. Aus diesem Grund wird kein chemischer Holzschutz notwendig. Diese Klassifikation wurde in Absprache mit dem Holzschutzgutachter Herrn Dr. Müller vorgenommen und in Zusammenarbeit der konstruktive Holzschutz geplant. Die Zuordnung der Bauteile zu den Gebrauchsklassen wird in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Zuordnung der Bauteile zu den Gebrauchsklassen nach DIN 68800-1

Bauteil	statische Funktion	Schutzklasse	Gebrauchsklasse
Brüstungen	tragend	geschützt	GK 0
Querschotte	tragend	geschützt	GK 0
Fahrbahn	tragend	geschützt	GK 0
Untere Verkleidung	nicht tragend	ungeschützt	GK 3.1 (bewittert, aber kein stehendes Wasser)
Verschalung der Brüstung	nicht tragend	ungeschützt	GK 3.1 (bewittert, aber kein stehendes Wasser)
Verschleißschicht auf der Fahrbahn	nicht tragend	ungeschützt	GK 3.2 (stehendes Wasser temporär möglich)

## Arbeitspaket 5: Herstellung (skalierter) Demonstratoren und ihre Optimierung

### AP 5.1: Fertigung von skalierten Brücken(elementen)

In diesem Arbeitspaket wurden auf Basis von Berechnungen und Modellierungen Brücken bzw. Brückenteile im Maßstab 1:10 nach den Vorgaben der vorhergehenden APs hergestellt (Abbildung 78 und Abbildung 79).

Dabei wurden die verschiedenen ebenen Elemente (Schotten) die in Abbildung 79, rechts gut zu sehen sind aus dreischichtigem Hainbuchen Furnieren (jeweils 1 mm dick) verklebt und nachträglich die Form entsprechend der von der TU BS modellierten Größe ausgesägt.

Die gebogenen Elemente der rechten und linken Brüstungsseite wie auch der leicht gekrümmten Fahrbahnfläche wurden aus dreischichtigen 3D-Furnieren der Firma Danzer (jeweils 1 mm dick) über das Einbringen auf eine Form (siehe Abbildung 80, rechts) in der Vakuumpresse produziert.

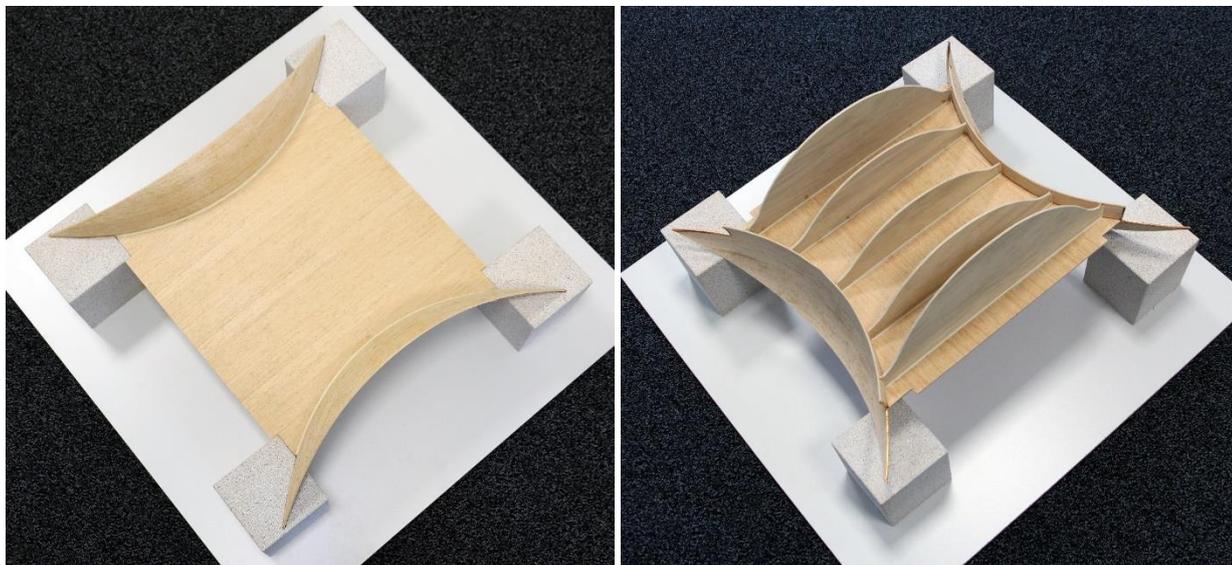


Abbildung 78: Übersicht über das gesamte Brückenmodell im Maßstab 1:10 von Oben (links) und Unten (rechts).

Alle einzeln gefertigten Teile wurden anschließend miteinander verklebt und die Anschlussflächen professionell versiegelt.

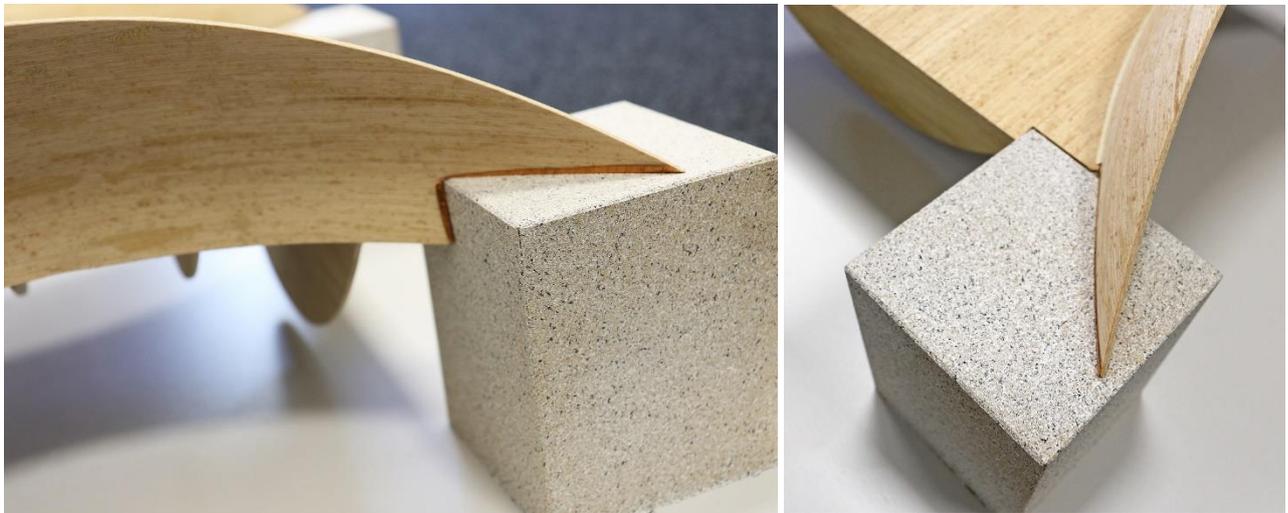


Abbildung 79: Details des Auflagers des Brückenmodells auf modelliertem Betonpfeiler.

### **AP 5.2: „Optimierung mechanischer, dynamischer & ökologischer Eigenschaften“**

Im AP 5.2 sollen unter anderem skalierte Demonstratoren hergestellt werden. Die TU BS unterstützt hierbei im Formenbau. Mithilfe kooperativer Möglichkeiten an der Universität sollen mittels 3D-Druck die Formen für die gebogenen Bauteile des skalierten Demonstrators hergestellt werden. Diese Modelle werden mithilfe des 3D-Modells der Brücke konstruiert und entsprechend zerlegt. Die Einzelteile werden anschließend gefügt, sodass eine Gesamtform entsteht. Als erstes Bauteil wird die Form der Brüstung hergestellt. In Abbildung 80 (links) wird das Teilmodell mit Verbindungsstellen dargestellt, in Abbildung 80 (rechts) die fertig gedruckte Form. Anschließend wurde die gekrümmte Fahrbahnoberfläche aus Sperrholz geformt um sie als Form zu nutzen. Erste Versuche in der Vakuumpresse zeigten das die durch Rippen unterstützte Form zu instabil war. Sie wurde daraufhin aus Holz nach den geplanten Maßen gefräst und konnte so als Form für Herstellung der Fahrbahn dienen.

Da es sich bei den Querschotten um planare Elemente handelt, können diese direkt aus ebenen Furnierschichtplatten ausgesägt werden.

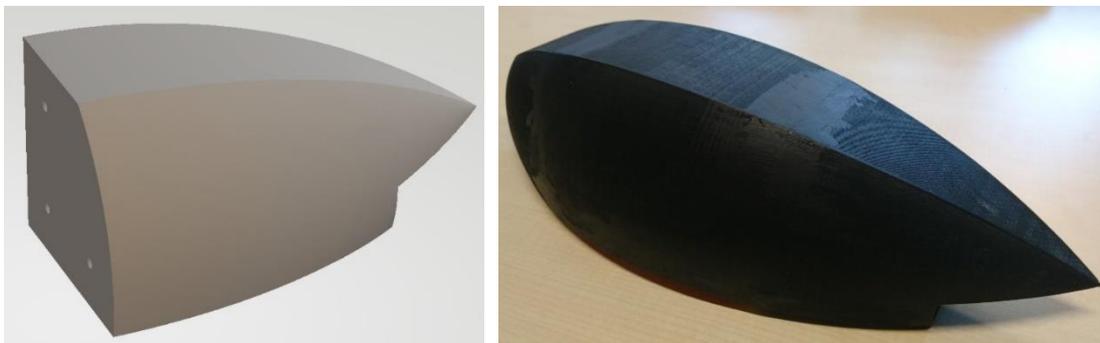


Abbildung 80: Form für den 3D-Druck der Form für das Brüstungselement „Hauptträger“ (links) und fertig gedruckte und zusammengeklebte Form (rechts).



Abbildung 81: Aus massivem Sperrholz hergestellt Positiv-Form für die Herstellung der Fahrbahn aus dünnen Furnierschichten.



Abbildung 82: Skalierte Brüstung (links) und reales Bauteil für die Schotten (rechts) als Ausstellungsstücke auf der LIGNA 2023, Hannover-

### **AP 5.3: Bau eines realen Bauteils für die bauliche Anwendung**

#### **Herstellung der Formen**

Für den Bau von real, großen ebenen und gebogenen Bauteilen werden Produktions-Werkzeuge benötigt. Diese wurden konzipiert, konstruiert und hergestellt und anschließend darauf die verschiedenen Furnier-Schicht-Körper unterschiedlicher Größe gebaut. Für die Herstellung der ebenen Querschotte der Brücke wurde ein einfaches, ebenes Formwerkzeug in Form eines Tisches in der Größe 5,6 m x 2,1 m aufgebaut (Abbildung 83).

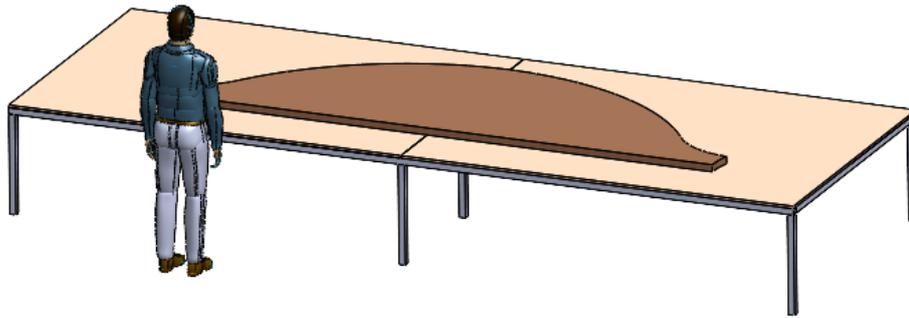


Abbildung 83: CAD-Modell des Formwerkzeuges für ebene Bauteile.

Für das gekrümmte Bauteil der Vorhangschale wurden verschiedene Werkzeugkonzepte erarbeitet (Abbildung 84). Es gab den Ansatz eines gefrästen Aluminiumwerkzeugs, wie es bei all ahead bei anderen Projekten üblicherweise zum Einsatz kommt. Ein weiteres Konzept sah den Einsatz von Hartschaumplatten vor, welche gefräst, verklebt und mit Faserkunststoffverbunden (FKV) überlaminiert werden. Der final realisierte Ansatz war das Formwerkzeug in Spantenbauweise. Andere Werkzeugkonzepte kamen auf Grund des unverhältnismäßig hohen Materialeinsatzes, hohe Stundensätze von Fräsbearbeitungszentren oder logistischen Gründen nicht in Frage. Ein Werkzeug für die Brüstung aus Aluminium hätte bereits für die Rohstoffpreise die im Projekt zur Verfügung stehenden Mittel überschritten. Darüber hinaus wäre der Umgang für solch eine Masse mit den bei all ahead zur Verfügung stehenden Mitteln nicht durchführbar gewesen.

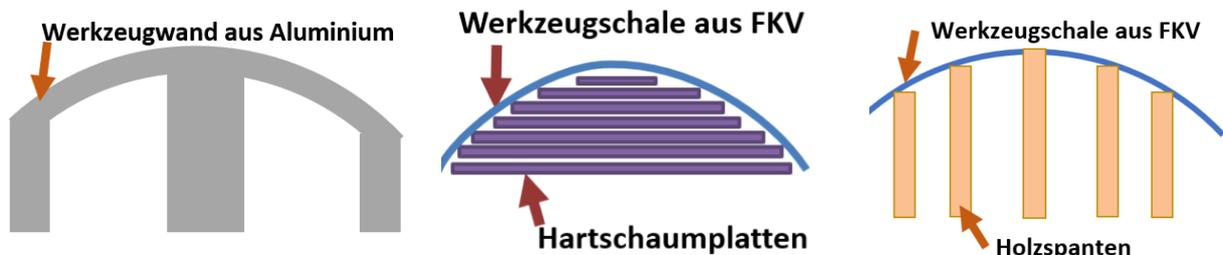


Abbildung 84: Schematische Darstellung erarbeiteter Werkzeugkonzepte aus Aluminium, Hartschaum und Holz (von links nach rechts)

Die letztendlich gewählte Spantenbauweise zeichnet sich durch eine geometrisch einfache tragende Grundstruktur und eine beliebig steif bzw. fest realisierbare Oberfläche aus. Die vertikal stehenden und ineinander gesteckten Schotts aus Holz gewährleisteten eine sehr hohe Traglast. Auf diese wurden wiederum Streifen gebogen, welche die Kontur des Bauteils abbilden. Damit die Fläche luftdicht, glatt und steif ist, wurde sie mit Spachtelmasse und diversen Faserlagen laminiert (Abbildung 85). Da bei vorangegangenen Infusionen Temperaturen von über 120°C im Harz gemessen wurden, musste die Schale noch getempert werden. Die Steifigkeit des Werkzeuges muss deutlich höher sein, als die der in Form zu bringenden Furnierschichten. Anderenfalls könnte es während des Infusions- bzw. Aushärtungsvorgangs zu Schäden am Werkzeug kommen.

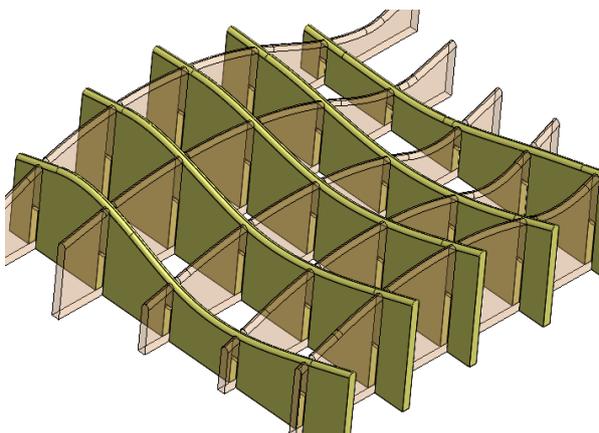




Abbildung 85: Bauliche Umsetzung des Werkzeuges für die Vorhangschale – CAD Modell Spantenanordnung; Konturgebundene Harzfaserstreifen; mit Spachtelmasse versiegelte und geschliffenen Oberfläche; Versteifung der Schale durch Überlaminieren mit Verstärkungsfasern aus Glas und Carbon (von links oben nach rechts unten).

### Herstellung und Optimierung des Fertigungsprozesses

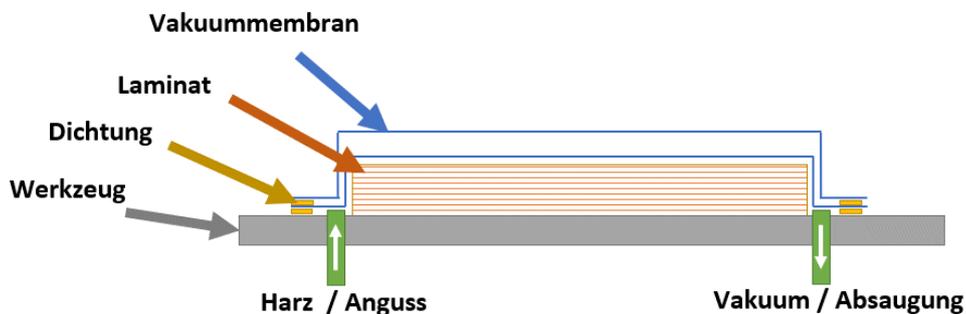


Abbildung 86: Schematischer Aufbau für die Harzinfusion.

Ein wesentlicher Schritt zur Herstellung realer Brückenelemente ist die sichere Harzinfusion des Furnierschichtaufbaus. Im Vergleich zu textilen Laminaten, wie z.B. Glasfasergeweben, lassen sich Holzurniere nicht gut durchtränken, da sie das flüssige Harz in Dickenrichtung nicht durchwandern lassen. Dies machte Anpassungen des klassischen Infusionsprozesses (Abbildung 86) für textile Halbzeuge unerlässlich. Die Brücke besteht aus planen und gekrümmten Bauteilen. Zunächst wurde der Infusionsprozess an kleinen planen Bauteilen optimiert, bis er als stabil genug eingeschätzt wurde. Bei der Übertragung auf große Bauteile in Form eines Brückenschotts von 3,1 m x 1,1 m, wurden jedoch deutliche Probleme sichtbar. Die Fließgeschwindigkeit des Epoxidharzes nahm über die Infusionsdauer von ca. 5 h rapide ab. Dadurch konnten die Bauteile nicht vollständig mit Harz getränkt werden. Es gab auch lokal große Unterschiede in der Fließgeschwindigkeit, die Oberseite wurde deutlich schlechter benetzt als die Unterseite und die Infusion dauerte zu lange. Das Bauteil wies viele Stellen auf, welche nicht mit Harz imprägniert waren (Abbildung 87).



Abbildung 87: Infundierte Platte mit trockenem, hellen Stellen 3,1 m x 1,1 m.

Der Prozess bedurfte einer erneuten Optimierungsschleife. Dabei wurden unterschiedliche Parameter variiert. Die Analyse erfolgte an kleinen Probeplatten mit Maßen von 0,5 m x 0,5 m. Somit konnten größere Mengen Abfall vermieden werden. Die Temperatur des Infusionsharzes wurde im Bereich zwischen 10 °C und 40 °C untersucht. Es ergibt sich ein Konflikt zwischen Viskosität und Infusionsdauer. Kälteres Harz ist zähflüssig und

lässt sich nur sehr langsam zwischen die Holzurniere saugen. Vorgewärmtes Harz fließt deutlich schneller, lässt allerdings nur wenig Zeit, bevor die Aushärtungsreaktion startet. Das Optimum wurde zwischen 20 °C und 30 °C gefunden. Hier fließt das Harz sehr gut zwischen den Furnierschichten und härtet jedoch so langsam aus, dass das Harz noch an die vorhandenen trockenen Stellen gelenkt werden kann.

Für 50 mm dicke Platten wurden 14 Furnierlagen gestapelt. Um eine gleichmäßige Durchtränkung in Dickenrichtung zu gewährleisten wurden diverse Anguss- und Absaugungs-Szenarien getestet. Infusion entlang der Faserrichtung des Holzes erleichtert den Harzfluss geringfügig. Textile Zwischenlagen können einem Aufeinanderpressen der Holzurniere entgegenwirken und damit den Harzfluss begünstigen. Die Gestaltung und Position der Harzzuleitung bzw. der Vakuumabsaugung können ebenfalls das Infusionsergebnis wesentlich verbessern (Abbildung 88). Durch gezieltes Einbringen von Fließhilfen, konnte das Harz besser in die oberen Lagen geleitet werden. Somit entstand ein Setup, welches für kleine, ebene Probeplatten sehr gute Ergebnisse erzielte.



Abbildung 88: Variante eines Infusionsaufbaus mit 4 verschiedenen Vakuumabsaugungen (oben links); Variante eines Angusses mit 3 abgestützten Harzzuleitungen unter Einsatz einer Fließhilfe, welche an der oberen und unteren Kante umgebördelt ist (gelb) (oben rechts); Furniere mit Basaltdrehtergewebe als Verstärkungsfaser und Fließhilfe (unten links); Furnierstapel mit trockenen Flachsfasern zur verbesserung des Harzflusses (unten mitte); infundierte Probeplatte mit Flachsfasern in der Decklage (unten rechts).

### Herstellung großer Brückenbauteile

Die Übertragung der zuvor gewonnen Erkenntnisse von kleinen (ca. 0,5 m<sup>2</sup>) auf große Bauteile (ca. 3 m<sup>2</sup>) war im Rahmen des Projektes nicht möglich. Die aus den größeren Dimensionen resultierenden längeren Fließwege des Harzes führten erneut zu einer drastischen Abnahme der Fließgeschwindigkeit. An den Rändern fließt das Harz schneller als in den äquatorialen Bereichen. Durch Schwankungen in den Furnieren, wie Äste, Anzahl der Risse, Stoßstellen oder Welligkeit ist die Ausbreitung des Infusionsmediums sehr inhomogen. Wenn eine Absaugleitung in Kontakt mit dem Harz kommt, muss sie geschlossen werden. Dies verringert die Fließgeschwindigkeit. Durch Verwendung von Membran-ummantelten Schläuchen konnte dieser Effekt reduziert, jedoch nicht eliminiert werden. Je größer die Bauteile werden, desto größer werden auch diese Einflüsse. Bis zur vollständigen Infusion aller Bereiche vergeht mehr Zeit. Größere Harzmengen führen zu einer beschleunigten Aushärtung. Zum Beispiel wurden bei einem Brückenschott die 12-fache Menge (ca. 100 kg) des Infusionsmediums angemischt, im Verhältnis zu einer Probeplatte. Es wird dementsprechend mehr Wärme frei gesetzt was wiederum die Härtingsreaktion beschleunigt und zum Überhitzen des Systems führen kann. Im Falle des Brückenschotts mit optimiertem Infusionsaufbau, waren es jedoch trockene Stellen auf der Unterseite (Abbildung 89), welche sich nicht eliminieren ließen.



Abbildung 89: Infusionierte Platte mit trockenen Stellen auf der Unterseite.

Bei der Herstellung von gekrümmten Bauteilen besteht neben den Herausforderungen in der Kontrolle des Harzflusses auch noch die Problematik der Verformbarkeit der Holzschichten. Die Firma Pollmeier konnte im Rahmen des Projektes nur trockene Furniere in einer Stärke von ca. 3,5 mm zur Verfügung stellen. Diese waren unmöglich großflächig lediglich mit der Kraft des Unterdrucks zu verformen. Der ursprüngliche Ansatz die Drapierbarkeit zu erhöhen, sah vor mit frisch geschälten Furnieren zu arbeiten. Dieser Ansatz konnte aus logistischen Gründen (begrenzte Haltbarkeit / Lagerfähigkeit), sowie aus technischen Gründen nicht weiterverfolgt werden. Die Verarbeitung von kleinen Furnierproben erfolgte in einer handelsüblichen konvektions-beheizten Vakuumpresse. Für die deutlich größeren Demonstrator-Bauteile stand keine solche Presse zur Verfügung. Es wurden verschiedene Konzepte erarbeitet, wie der Trocknungs- und Infusionsprozess bei den großen Bauteilen erfolgen kann. Kontaktwärme über Heizmatten, Heizdrähte, Wärmestrahler und Konvektionslösungen in einer isolierten Temperkammer wurden ausgearbeitet. Die Bewertung der Lösungen hinsichtlich Energieeffizienz, Anschaffungskosten, Brandschutz, Nachhaltigkeit führte dazu, den Ansatz zu verwerfen und mit trockenen Furnieren zu arbeiten.

In Vorversuchen zeigt sich, dass insbesondere bei Verformungen in zwei Richtungen, groß Spannungen in den Holzschichten auftreten können. Diese wurden teilweise mit einem Reißen der Furniere entlang der Wachstumsrichtung abgebaut. Um diesen Effekt kontrollierter ablaufen zu lassen, wurden die Furniere in 20 cm breite Streifen gesägt. Die Stöße wurden bei jeder zweiten Lage um jeweils 10 cm versetzt. Die Drapierbarkeit konnte somit deutlich verbessert werden. Trotzdem gab es große Schwierigkeiten bei der Evakuierung. Die Vakuumfolie tendierte unter das Laminat zu rutschen und riss somit ständig das Abdichtungsband vom Werkzeug. Dadurch brach schlagartig das Vakuum zusammen und die Furniere verloren ihre Vorspannung. Es war erst mit Hilfe von mehreren Arbeitern möglich, die Furniere zu biegen und somit einen Unterdruck aufzubauen und die Folie ohne Beschädigungen über die Hölzer zu ziehen. Bei dem ziemlich kleinen Bauteil und der geringen Wandstärke von lediglich 20 mm, erschien es schon nicht praktikabel (Abbildung 90). Für größere Bauteile erscheint der Prozess so nicht umsetzbar.



Abbildung 90: In Streifen geschnittenen Furniere werden übereinander gestapelt und in den Zwischenschichten mit Basaltgewebe versehen (links); 6 Arbeiter versuchen die Furniere auf das Formwerkzeug zu drücken um einen Unterdruck zu erzeugen (rechts).

Unter den einzelnen Schichten des Infusionsaufbaus ist es sehr schwierig die Furniere an ihrer vorgesehenen Position zu halten. Durch die Krümmung des Werkzeuges rutschen die Lagen entsprechend dem Gefälle der Form. Die Basallagen sind davon genauso betroffen und weisen daher starke Ondulationen auf.

Die Geometrie des Bauteils konnte zwar sehr gut abgebildet werden, an den Stoßstellen der Hölzer bildeten sich jedoch Falten. Diese sorgen neben der Schwächung durch den Schnitt, zusätzlich zu Änderungen in den Materialeigenschaften. Das Gefälle auf der gebogenen Form beeinflusst den Harzfluss. Die Gravitation sorgt für eine Ansammlung von Epoxidharz an den tiefsten Stellen. Die Anhäufung von reaktivem Material führte im Versuch zu einer Temperaturüberhöhung und einer Schaumbildung des Harzes.



Abbildung 91: Infundierte Vorhangschale mit Wellen auf der Oberseite; Unterseite mit Falten in den Basaltfasern und schaumigen Stellen; Nahaufnahme der schaumigen Stellen (von links nach rechts).

#### **AP 5.4 Bau einer realen Fußgängerbrücke**

Der Bau einer realen Fußgängerbrücke konnte leider aus technischen und zeitlichen Gründen nicht mehr realisiert werden.

#### **Arbeitspaket 6: Life Cycle Assessment / Carbon Footprint**

Die LCA wurde von der Ruhr-Universität Bochum im Unterauftrag in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer WKI durchgeführt. Ursprünglich war im Projektvorhaben eingeplant, dass die beteiligten Projektpartner konkrete Daten und Kennwerte für die LCA bereitstellen. Da jedoch die relevanten Datensätze nur teilweise zur Verfügung gestellt werden konnten, musste zum Teil auf bestehende Datensätze aus den entsprechenden Datenbanken zurückgegriffen werden. In diversen Abstimmungen, unter anderem in Form eines Workshops im Herbst 2022, wurden für diese fehlenden Informationen geeignete Datensätze identifiziert und der jeweils passendste ausgewählt.

Es wurde im Rahmen dieses Arbeitspakets die ökologische Betrachtung von Bioverbundwerkstoffen in zwei Teilen vorgenommen: Im ersten Teil in AP 6.1 wurde eine überschlägige Produktökobilanz mit der GaBi-Berechnungssoftware auf Basis der zur Verfügung gestellten Daten erstellt. Der zweite Teil, AP 6.2, behandelt die Ökobilanz eines Brückenbauwerks.

Die Ökobilanzierung dient zur ganzheitlichen und transparenten Analyse aller Umweltwirkungen von einem System oder einem Produkt. Dabei wird der gesamte Lebenszyklus, gemäß DIN EN ISO 14040 „von der Wiege bis zur Bahre“, von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung, Nutzung, Abfallbehandlung und das Recycling, bis zur endgültigen Entsorgung, betrachtet.

#### **AP 6.1 Erstellung eines Tools für die Erstabschätzung**

In Abbildung 92 ist der Lebenszyklus einer Brücke exemplarisch dargestellt.

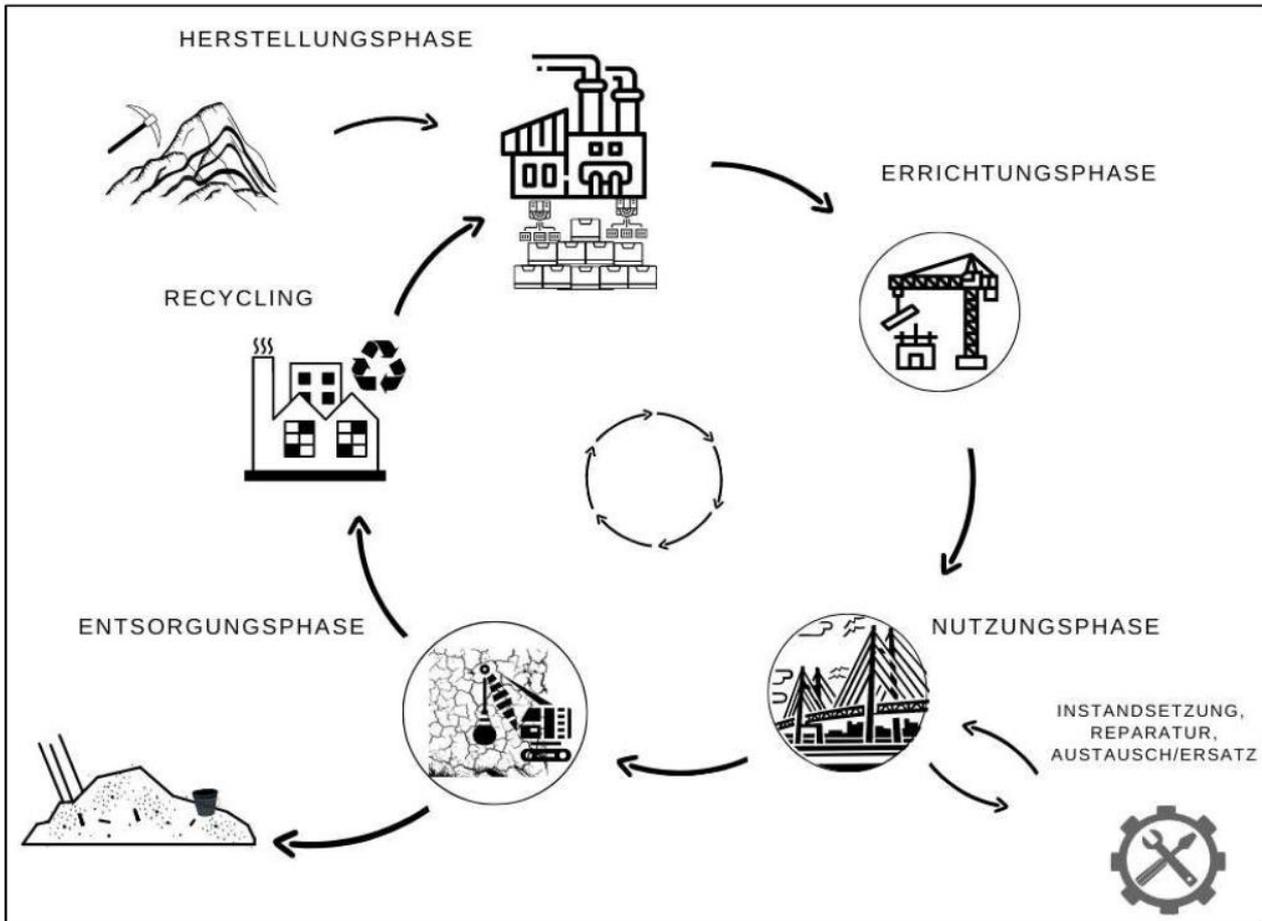


Abbildung 92: Schematische Darstellung der Lebenszyklusphasen einer Brücke (Özdemir 2022)

Das entwickelte Bauprodukt wurde in der Berechnungssoftware GaBi (Version 10.5.0.78) nach DIN 15804 bilanziert. Der Detaillierungsgrad der Untersuchung leitet sich aus der Datengrundlage ab, die zur Verfügung gestellt worden ist. Das heißt, alle bis zu dem Zeitpunkt der Modellierung verfügbaren Informationen, bezogen auf Materialien und Prozesse, wurden in die Bilanzierung einbezogen. Die Verarbeitung der Platte zu einem Formteil, d.h. auch das Sägen und die Energie, die zur Verformung benötigt werden, sind nicht berücksichtigt worden. Zukünftig sollen der gesamte Produktionsprozess bzw. Herstellungsprozess in einer Produktionsstätte oder an einem Standort durchgeführt werden. Daher wurde in Abstimmung mit den Projektbeteiligten beschlossen, die Transportwege nicht zu berücksichtigen.

Die Bilanzierung ist für das Bauprodukt FreiFo-Platte mit einer Fläche von 3,91 m<sup>2</sup> (Stärke: 2 cm) erstellt worden. Aufgrund der bereits angesprochenen zum Teil nicht ausreichenden Datengrundlage für bestimmte Prozesse bzw. Materialströme innerhalb des Lebenszyklus mussten teilweise Datensätze aus den zur Verfügung stehenden Datenbanken ausgewählt werden. Die nach umfangreichen Abstimmungen ausgewählten Datensätze sind im Rahmen der Modellierungs-Übersicht in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

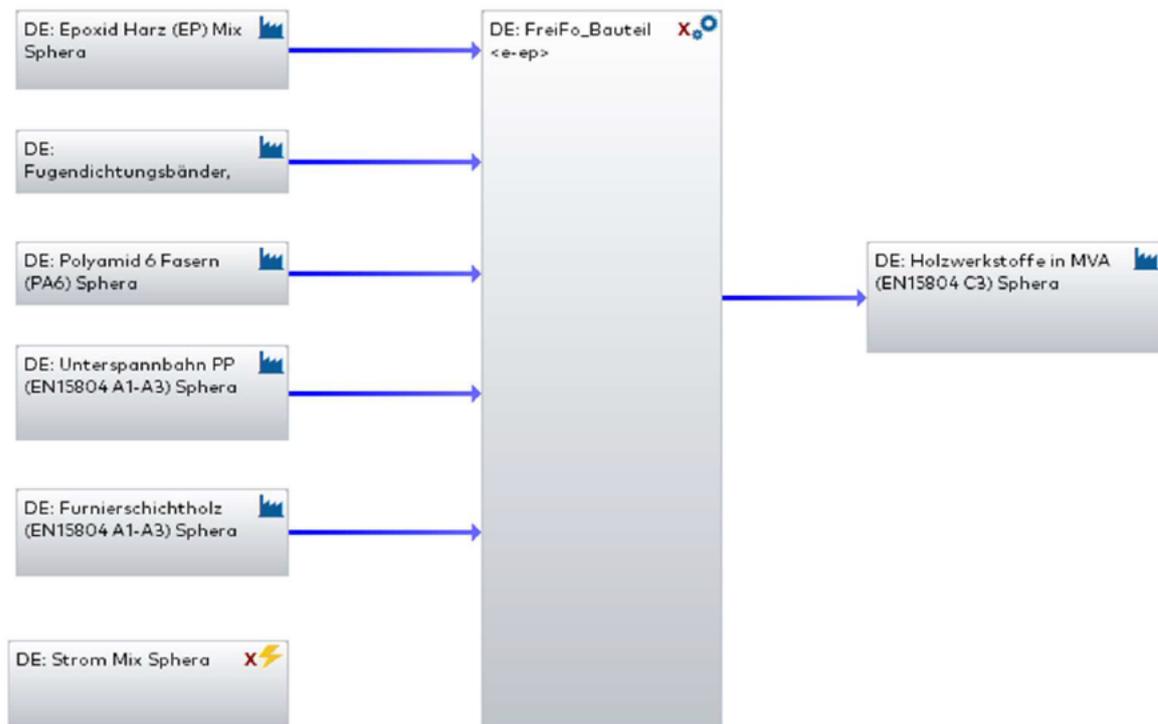


Abbildung 93 Modellierung des Materials in GaBi (Bericht RUB, Özdemir)

Die Auswertung nach DIN EN 15804 + A2 für die Indikatoren GWP und PENRT ist in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

	Modul A1 – A3	Modul C3
<b>1. Umweltwirkungsindikatoren</b>		
THG- Globales Erwärmungspotenzial [kg CO <sub>2</sub> Äq.]	291,41	294,27
<b>2. Ressourcennutzungsindikatoren</b>		
PENRT- Total nicht-erneuerbare Primärenergie [MJ]	8995,04	92,65

#### AP 6.2 Bilanzierung der Werkstoffkombinationen

Das Brückenbauwerk wurde mit dem ReNI-LCA Tool berechnet. Als Hintergrunddatenbank dient die normkonforme Ökobau.dat 2021-I. Das methodische Vorgehen zur Berechnung des Brückenbauwerks wird in Özdemir (2022) näher erläutert, kann dort nachvollzogen werden und wird hier daher nicht weiter ausgeführt.

Im ersten Schritt sind die relevanten Rahmenbedingungen für das Brückenbauwerk und die dazugehörige Bilanz zu definieren. Für die Ökobilanzierung ist folgendes festgelegt:

- Betrachtungszeitraum: 50 Jahre
- Bezugsfläche: Fahrbahnoberfläche
- Betrachtetes Produktsystem: Überbau
- Betrachtete Phasen: Herstellungs-, Nutzungs-, Entsorgungsphase (außerhalb der Systemgrenzen Recyclingphase)
- Indikatoren:
  - THG = Globales Erwärmungspotenzial [kg CO<sub>2</sub> Äq.]
  - PENRT = Total nicht-erneuerbare Primärenergie [MJ]

Die Ergebnisse der Ökobilanzierung für das gesamte Brückenbauwerk ist für den Indikator THG in Abbildung 94 und für den Indikator PENRT in Abbildung 95 dargestellt.

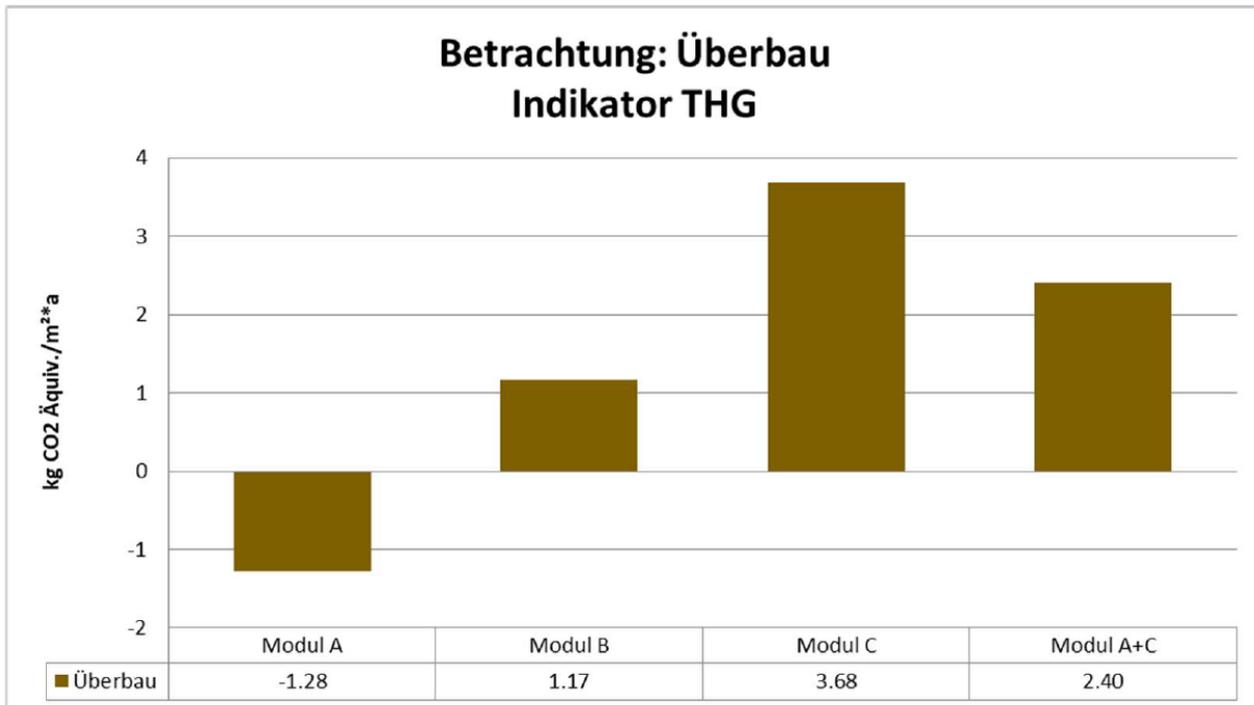


Abbildung 94: Ökobilanzierungsergebnisse für das gesamte Brückenbauwerk (Überbau) und Indikator THG

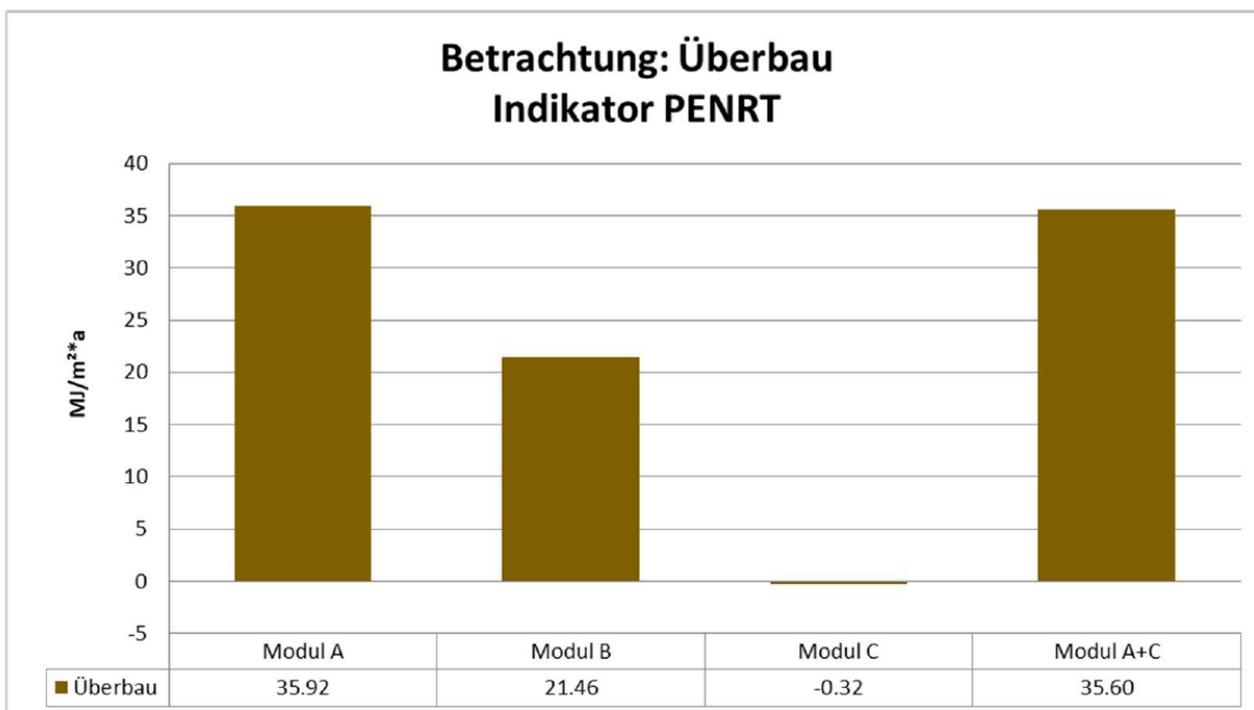


Abbildung 95: Ökobilanzierungsergebnisse für das gesamte Brückenbauwerk (Überbau) und Indikator PENRT

Die Ergebnisse für das gesamte Brückenbauwerk lassen sich in die Datenbasis von Özdemir (2022) einordnen. In der Abbildung 96 sind die Ergebnisse für den Indikator THG und in Abbildung 6 für den Indikator PENRT eingeordnet. Dabei spiegeln die roten Linien den maximalen und minimalen Werten in der Datenbasis für den jeweiligen Indikator wider, während die gelbe Linie dem Ergebnis des FreiFo-Bauwerks entspricht.

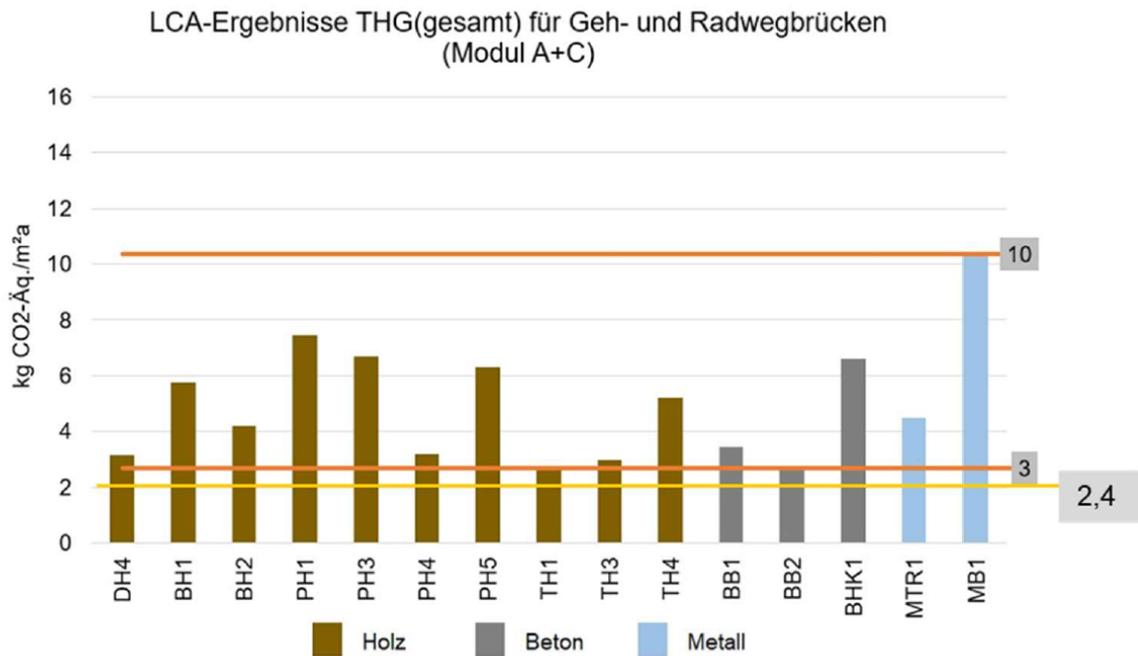


Abbildung 96: Einordnung des Ergebnisses für den Indikator THG für die FreiFo-Brücke in die Datengrundlage Özdemir (2022).

Wie in der Abbildung 96 zu sehen ist, liegt das Ökobilanzergebnis für den Indikator THG unterhalb des minimalen Werts in der Datenbasis. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass das FreiFo-Brückenbauwerk zu den kleinsten Brückenbauwerken innerhalb der Betrachtung gehört.

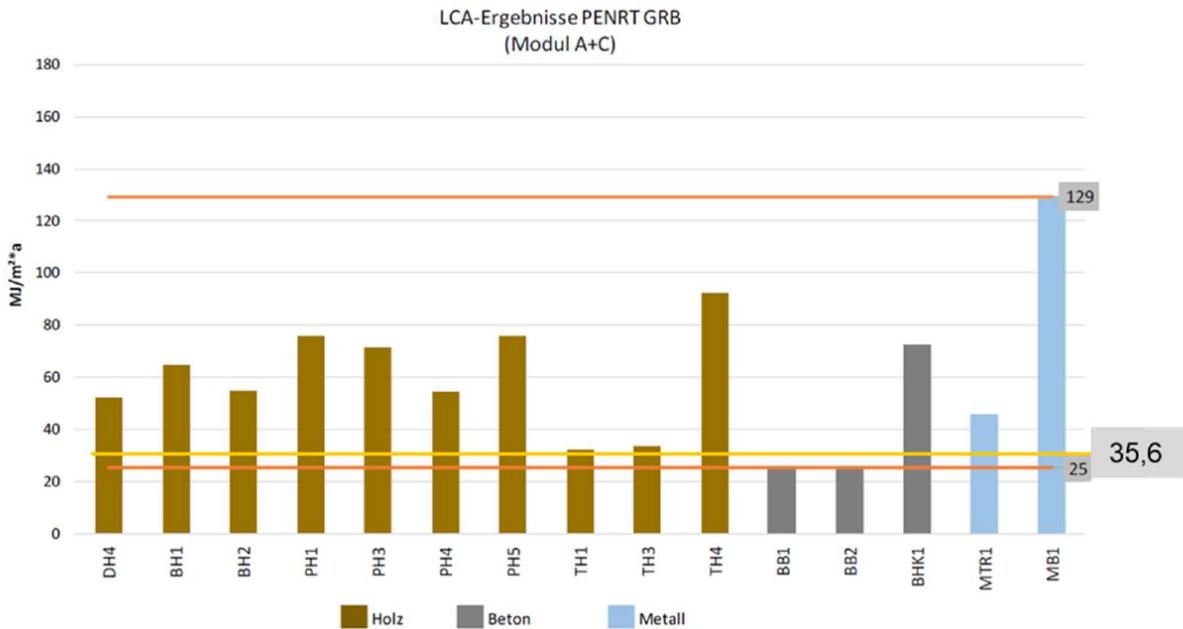


Abbildung 97: Einordnung des Ergebnisses für den Indikator PENRT für die FreiFo-Brücke in die Datengrundlage Özdemir (2022).

Wie in Abbildung 97 zu sehen ist, fügt sich das PENRT-Ergebnis der FreiFo-Brücke in den Wertekorridor der Datenbasis von Özdemir ein. Das Brückenbauwerk besteht zum größten Teil aus dem Werkstoff Furnierschichtholz, welches einen höheren PENRT-Wert auf als beispielsweise Brettschichtholz aufweist. Insgesamt zeigt sich, dass das Ergebnis im unteren Bereich der Datenbasis angesiedelt ist. Dies liegt vor allem auch am geringen Materialeinsatz, da es sich hierbei um ein kleines Brückenbauwerk handelt. Der temporäre Kohlenstoffspeicher für die Nutzungskategorie Geh- und Radwegbrücken liegt in Özdemir (2022) zwischen -4.471 und -198.755 [kg CO<sub>2</sub> Äq.]. Mit einem Wert von -2.244 [kg CO<sub>2</sub> Äq.] liegt der temporäre Kohlenstoffspeicher der FreiFo-Brücke in dem Wertekorridor.

Die Bearbeitung des Projektes hat außerdem gezeigt, dass die Ökobilanzierung von Anfang an und projektbegleitend berücksichtigt werden muss, damit Datensicherheiten und transparente Ergebnisse gewährleistet werden können.

Es konnte dargelegt werden, dass die Einbeziehung der Ökobilanzierung bereits parallel zu Material- und Prozessentwicklungen zielführend ist. Aufgrund der z.T. unvollständigen Datenlage und des noch nicht final abgeschlossenen Herstellprozesses musste teilweise auf Vereinfachungen zurückgegriffen werden, wodurch das Ergebnis nur eine Annäherung darstellt. Die Ökobilanz konnte jedoch aufzeigen, dass die Ergebnisse für das FreiFo-Brückenbauwerk insgesamt im bzw. teilweise sogar unterhalb des relevanten Wertekorridors in Özdemir (2022) liegen.

## **Arbeitspaket 7: Koordination**

### **Es fanden folgende gemeinsame Treffen statt:**

- 27.2.2020 Kick-Off Meeting im WKI Braunschweig
- 29.4.2020 Virtuelles Kick-Off Meeting
- 30.7.2020 Virtuelles Treffen
- 15.10.2020 Virtuelles Treffen
- 6.12.2020 Virtuelles Treffen
- 24.2.2021 Virtuelles Treffen
- 9.4.2021 Präsentation Schalen von Furnieren und Vakuuminfusion
- 20.11.2021 Virtuelles Treffen
- 20.1.2022 Virtuelles Treffen
- 25.1.2022 Virtuelle Besprechung zur LCA
- 09.06.2022 Virtuelles Treffen
- 27.07.2022 Arbeitstreffen bei all ahead
- 05.10.2022 Virtuelles Treffen
- 25.-26.10.2022 Virtueller Workshop mit RUB zu LCA
- 18.11.2022 Virtuelles Treffen mit RUB zu LCA
- 14.12.2022 Virtuelles Treffen
- 10.03.2023 Virtuelles Treffen
- 16. – 17.3.2023 Statusseminar-Münster
- Abschlusstreffen auf der LIGNA Messe am 16.5.2023

Die Kommunikation war Corona-bedingt im Wesentlichen auf virtuelle Treffen beschränkt. Dies machte den Austausch von Informationen nicht einfach. Darüber hinaus waren dadurch auch die beteiligten Firmen entweder im Home-Office (wenig Arbeit) oder völlig ausgelastet (Bauboom). Hierdurch waren Änderungswünsche schwer umzusetzen.

Trotz alledem konnten die Zwischenberichte pünktlich zum 31.1.2021, 31.1.2022 und 30.4.2023 abgeliefert werden.

## **2. Verwertung**

### **a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen**

Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen sind derzeit nicht geplant.

### **b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**

Das Projekt wurde auf dem FNR Statusseminar am 16. Und 17.3.2023 in Münster präsentiert und diskutiert.

Bei der Vorstellung eines Brückenelements auf der LIGNA 2023 in Hannover kamen viele Besucher (auch der Industrie) um sich u.a. die Freifo-Ausstellungsstücke anzuschauen und mglw. diese Idee bzw. das Material wirtschaftlich nach Projektende umzusetzen (siehe auch Abbildung 82).

### **c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende**

Wissenschaftlich und technisch wird die Idee zur Herstellung von 3D-Freiformflächen aus feuchten Furnieren, der Vakuumtrocknung und der Epoxidinfusion weiterverfolgt werden.

### **d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Wissenschaftlich und wirtschaftlich könnten sich einige Anschlussfähigkeiten ergeben wie z.B. die Freiformflügel von Kleinstwindanlagen.

## **3. Erkenntnisse von Dritten**

Erkenntnisse zur Nutzung oder Umsetzung dieser Technik durch Dritte sind den Partnern nicht bekannt.

## **4. Veröffentlichungen**

Meinlschmidt P.; Hansen O., Haxter C. (2021): Selbsttragende Freiformflächen aus Laubholz furnier-Hybridwerkstoffen für den Einsatz in Fußgänger- und Fahrradbrücken, iVTH Kurzbericht 09/21 (Deutsch und Englisch)

Özdemir Ö. (2022): Erstellung einer Datenbasis zur Einschätzung der Umweltauswirkungen von Geh- und Radwegbrücken und Entwicklung eines LCA-Tools für Infrastrukturbauwerke. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2022.

Özdemir, Ö.; Hafner A. (2023): Abschlussbericht Teilprojekt Ökologische Betrachtung von Bioverbundwerkstoffen im Rahmen des Projektes FreiFo.

Schnellen M. (Masterarbeit): Herstellung, Test und Simulation von Hybridmaterialien aus Holz furnieren und Faserverbundwerkstoffen der TU-Braunschweig vom 21.9.2020

## ANHANG

### Teilvorhaben 1: Herstellung von Hybridwerkstoffen (2220HV039A Fraunhofer WKI)

#### 1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens 1 „Herstellung von Hybridwerkstoffen“ ist es, Hybridwerkstoffe aus einer Kombination von frisch geschälten, feuchten und damit noch flexiblen Laubholz Furnieren (vorzugsweise Hainbuche und Rotbuche) in Verbindung mit Glas-, Kohle- Natur- und insbesondere Basaltfasern in einem speziellen Vakuumtrocknungs- und Infusionsverfahren für die Herstellung selbsttragender 3D-Freifformflächen herzustellen. Der Fokus zielt unter anderem auf die Einsatzmöglichkeiten im Holzbrückenbau, sowohl als statisch integrierter Bestandteil der Primärkonstruktion, wie auch für Belag- und Deckschichten oder Vorhangschalen als Sekundärbauteile.

#### 2. Bearbeitete Arbeitspakete

##### Arbeitspaket 1.1: Vorbehandlung und Schälen verschiedener Furniere

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden vom WKI diverse Hainbuchenstämme beschafft.

Durch die Erfahrungen aus früheren Untersuchungen mit anderen Holzarten waren bereits Erfahrungen zu verschiedenen Vorbehandlungsparametern wie notwendige Kochtemperatur, Dauer des Kochens aber auch Messergeometrie und der Anstell- bzw. Freiwinkel ermittelt worden. Aus jeweils einem gekochten und noch heißen, einem abgekühlten und einem ungekochten Hainbuchenstamm wurden 1 mm und 2 mm dicke Furniere geschält (Abbildung 98). Die Materialfeuchte der Stämme beträgt dabei mehr als 50%.



Abbildung 98: Eingespannter Hainbuchenstamm vor dem Schälen (links) und verbliebener Rest des Hainbuchenstamms (rechts) nach dem Schälen.

Da sowohl die 1 mm als auch die 2 mm dicken Furniere kaum unter Vakuum in eine stark gebogene Form zu bringen sind und noch weniger die 3,5 mm dicken Buchenholz furniere der Firma Pollmeier war die Notwendigkeit deutlich dünnere und damit flexible Furniere zu produzieren eine zunehmend wichtigere Anforderung.

Hierzu mussten weitere Untersuchungen an Hainbuchen- und Buchenholzstämmen durchgeführt werden um hieraus Furniere von weniger als 1 mm herzustellen.

Nach einer Modifikation der Messergeometrie und Härtung des Metalls konnten am Ende des Projekts deutlich bessere Messerstandzeiten erreicht werden. Dadurch wurden weniger Scharten im Holz erzeugt und es war möglich auch Furniere mit Dicken von Sub-Millimetern (~0,5 mm) herzustellen.

##### Arbeitspaket 1.2: Optimierung des Trocknungsprozesses frischer Furniere

In diesem Arbeitspaket sollte der Versuchsaufbau zur Vakuumtrocknung optimiert werden, der anschließend auch zur Vakuuminfusion dient (Abbildung 99). Mehrere Aufbauten, Heiztemperaturen und Heizzeiten wurden hierfür überprüft. Dabei wurden sowohl einzelne Furniere, reine Stapel aus Holz furnieren, aber auch welche mit Zwischenlagen aus verschiedenen Gelegen und Geweben getestet (Basaltfasern, Naturfasern, GFK, CFK etc.).

Problematisch stellen sich höhere Temperaturen (>70°C) heraus, wenn dabei z.B. die Schlichte oder Fasern aufschmelzen. Frisch geschälte Furniere lassen sich prinzipiell gut in Faserrichtung biegen, jedoch quer dazu relativ schlecht. Zur Optimierung wurden hier Versuche zu Unterschieden in Holzart, Furnierdicke, Ligningehalt, Laserperforierung oder auch Schlitzung (3D-Danzer oder NUO – Holztextur) durchgeführt.



Abbildung 99: Aufbau zum Trocknen der Furnierpakete im Vakuum und anschließender Vakuuminfusion im selben Aufbau.

### Arbeitspaket 1.3: Evaluation der Trocknung von verschiedenen textilen Halbzeugen

Die Evaluation der Trocknung erfolgte an fünf unterschiedlichen Fasertypen mit unterschiedlicher Beschichtung. Es wurden hierzu die fünf verschiedenen Fasertypen in Form von Geweben/Gelegen zunächst mit Furnieren geschichtet und getrocknet. Die Abführung der Feuchtigkeit erfolgte durch Spiralschläuche, die auf der obersten Furnierlage platziert wurden (Abbildung 99/Abbildung 8). Damit nimmt Kontaktzeit der Halbzeuge mit dem Extrakt von der untersten zur obersten Lage zu.

Die anschließende Infusion der Halbzeuge zur Herstellung der FVK erfolgte mit dem teil-biobasierten Epoxidharzsystem SICOMIN SR Greenpoxy 56 und dem petrobasierten Härter SC 8822. Im Anschluss wurden hieraus Prüfkörper herausgesägt, klimatisiert und unterschiedlichen Normprüfungen unterworfen.

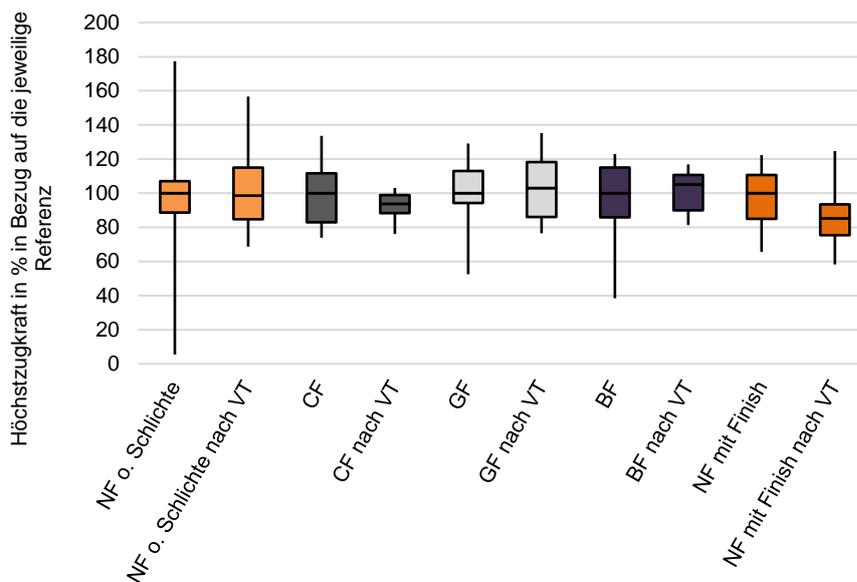


Abbildung 100: Ergebnisse der Untersuchung der Höchstzugkraft nach DIN 2062.

Grundsätzlich lässt sich für keine der untersuchten Fasern eine signifikante Abnahme der Zugkraft durch den Trocknungsprozess feststellen (Abbildung 100). Lediglich die mit einer Epoxidschichte versehene Naturfasern zeigen eine abnehmende Tendenz.

### Arbeitspaket 2.1: Herstellung von Hybridwerkstoffen verschiedener Größe und Form

Im Rahmen der Herstellung großer Teile der Brückenkonstruktion wurden verschiedene Basalt- als auch Naturfasergewebe zur besseren Fließfähigkeit des Epoxidharzes getestet.

Hierzu wurde ein weitere Basaltfasergewebe hergestellt (Abbildung 101, links) in dem ein thermoplastischer Faden eingewebt und aufgeschmolzen wurde (Abbildung 101, rechts) um bei der Nutzung des Gewebes eine Verschiebung der Netzstruktur zu verhindern.

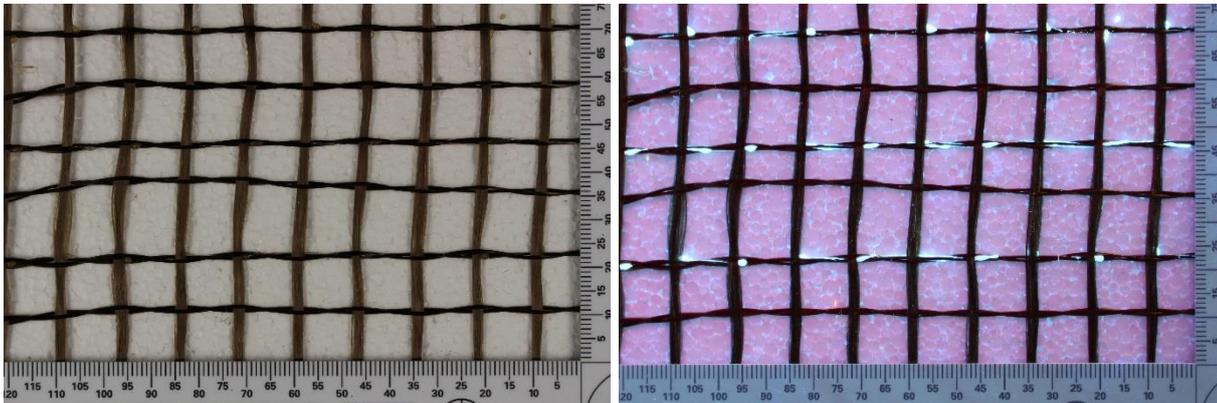


Abbildung 101: Foto des Basaltfasergewebes (links) und unter UV Lichtbeleuchtung (rechts) in dem die eingearbeitete, aufgeschmolzene Faser aufleuchtet.

### Arbeitspaket 2.2: Tränkung des Furnier - Faserverbundes

Die Arbeiten des **AP 2.2** d.h. das Eindringen des Epoxidharzes in verschiedene Holzarten und Furniere unter dem Einfluss des Vakuums waren im Technikumsmaßstab gut untersucht worden und erfolgreich. Bei der Herstellung großer Bauteile aus 3,5mm dicker Buchenholz furniere war dies nicht so einfach wie die trockenen Oberflächen (Abbildung 102, links) und ein Blick zwischen die Furnierbahnen (Abbildung 102, rechts) zeigen.



Abbildung 102: Foto des ersten hergestellten Schotts (links) und der schlechten Verklebung (rechts).

### Arbeitspaket 2.3: Test verschiedener Hybrid Prüfkörper

Die in AP 2.3 untersuchten Festigkeiten verschiedener Hybrid-Prüfkörper sind abgeschlossen. Die Biege-E-Module erreichen in Längsrichtung ca. 17.500 N und in Querrichtung ca. 4.500 N.

### Arbeitspaket 3.1: Grenzflächen- und Materialuntersuchung mittels Thermographie

Um Fehler im Verbund und zwischen den Furnieren zu untersuchen wird die bereits oft benutzte Technik der aktiven Thermographie verwendet.

Hierzu wird das zu untersuchende Bauteil (Abbildung 103, rechts) kurz unter einem Wärmestrahler hindurchgeführt und anschließend die eindringende Wärmefront mit einer sehr empfindlichen (20mK Temperaturauflösung) Thermographiekamera beobachtet (Abbildung 103, links).

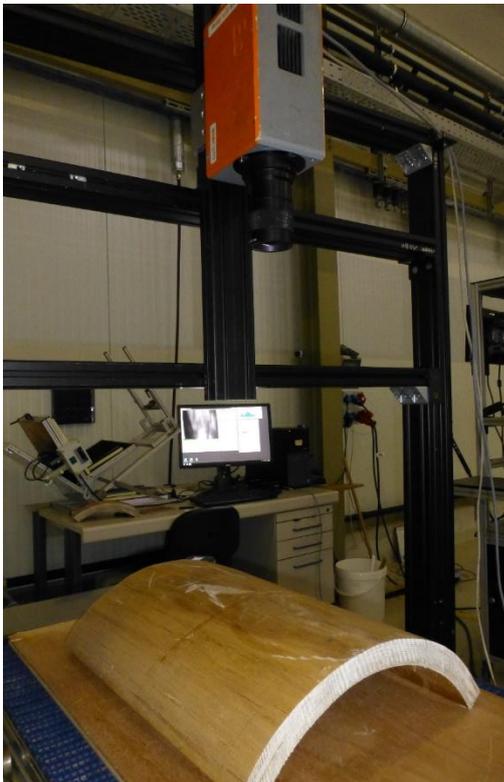


Abbildung 103: Thermographischer Aufbau (links) mit Infrarot Kamera, Rechner und Förderband auf dem das Hainbuchen-Vorhängeschale liegt und Detailaufnahme (rechts) der dünnen mit Epoxidharz verklebten Furniere.

Die Temperaturunterschiede werden entweder farblich codiert oder im Original als Grauwertbilder dargestellt (Abbildung 104). Dabei sind hellere Stellen deutlich wärmer als dunklere Stellen. Damit signalisieren die hellen Stellen Lufträume zwischen den Furnieren. Direkt nach dem Wärmeeintrag erscheinen die nahe unter der Oberfläche liegenden Lufteinschlüsse während tiefer liegende erst nach einigen Sekunden bzw. Minuten erscheinen.

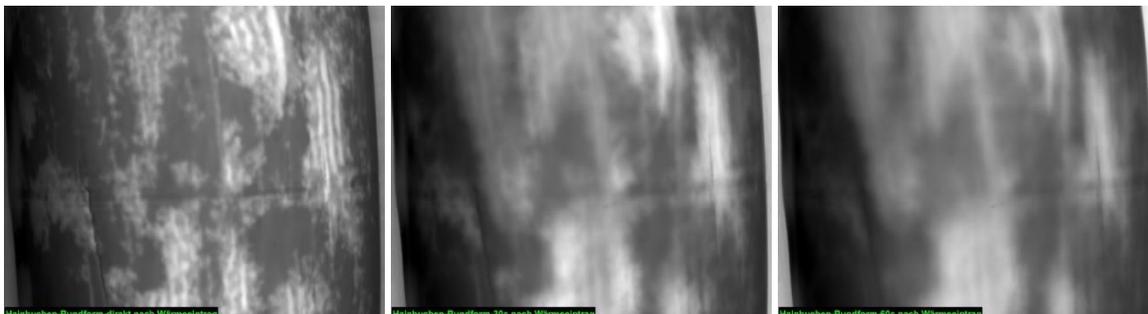


Abbildung 104: Thermogramme die direkt nach dem Wärmeeintrag aufgenommen wurden (links), sowie nachdem der Wärmepuls 30s (Mitte) und 60s (rechts) lange eingedrungen ist.

### 3D-Vermessung der Oberflächen

Die Vermessung der 3D-Flächen erfolgte mit Hilfe der Technik der Streifenprojektion. Hierzu nutzten wir das optische 3D-Koordinatenmessgerät (Modellreihe VL der Firma Keyence (Abbildung 105, links) mit dem Objekte von bis zu 600 mm x 600 mm Pixelgenau vermessen und mit 3D-CAD Daten verglichen werden können (Abbildung 105, rechts).

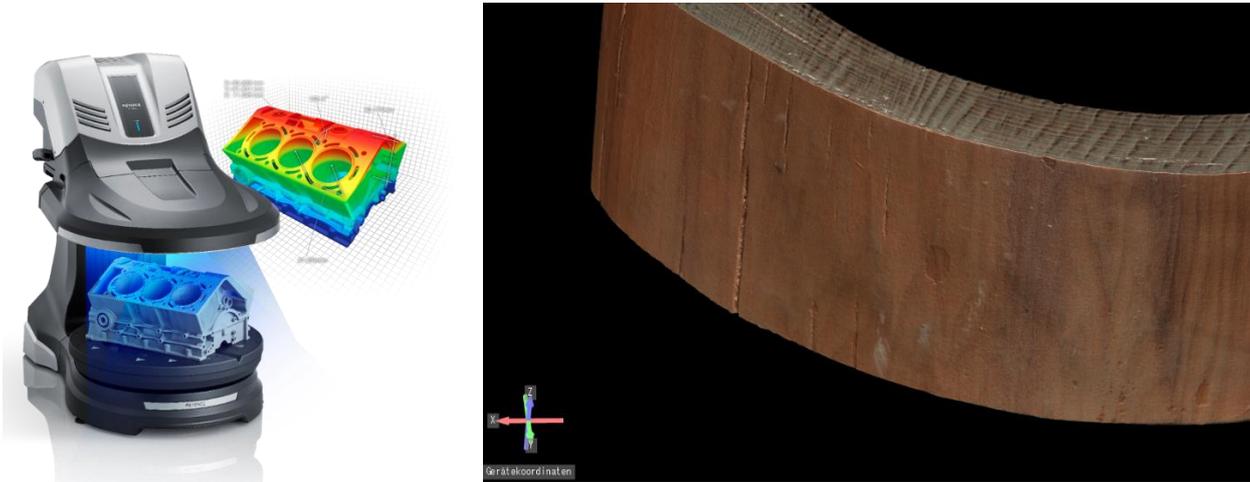


Abbildung 105: Optisches 3D-Koordinatenmessgerät das mit Hilfe der Streifenprojektionstechnik mit +/- 10 µm Messgenauigkeit und 2 µm Wiederholgenauigkeit auch Oberflächen von 670 mm Breite und 200mm Höhe vermessen kann.

Details wie die Vermessung von Rissen (Abbildung 106), Genauigkeit der Außen- und Innenmaße oder der Krümmungsradien ist mit dieser Technik ausgesprochen einfach. Das finale skalierte Model kann später auf diese Weise gescannt und mit der skalierten CAD Zeichnung verglichen werden.

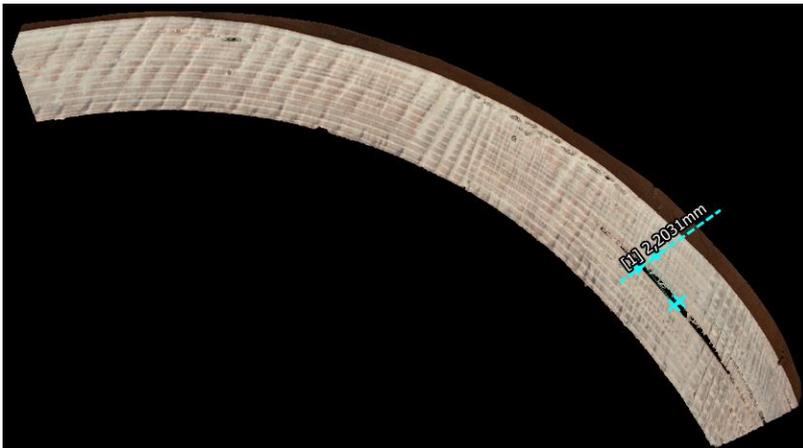


Abbildung 106: Detailreiche, stirnseitige Abbildung der Vorhängeschale aus Abbildung 105 (rechts) mit der Möglichkeit zur Vermessung von Rissen, Maßen und Radien.

### Arbeitspaket 3.2: Grenzflächen- und Materialuntersuchung mittels µ-CT

Bei der in Abbildung 107 (links) gezeigten Röntgenanlage handelt es sich um ein Gerät vom Typ Metronom 1 der Firma Zeiss. Dabei wird während der Röntgenmessung das Objekt um die eigene Achse gedreht und durchstrahlt. Aus den einzelnen Scans wird ein 3D-Röntgenbild errechnet aus dem mit der benutzten Software der Firma GOM automatisch die Lunker (Fehlverklebungen, Lufteinschlüsse) ermittelt und farblich gekennzeichnet werden (Abbildung 107, rechts).

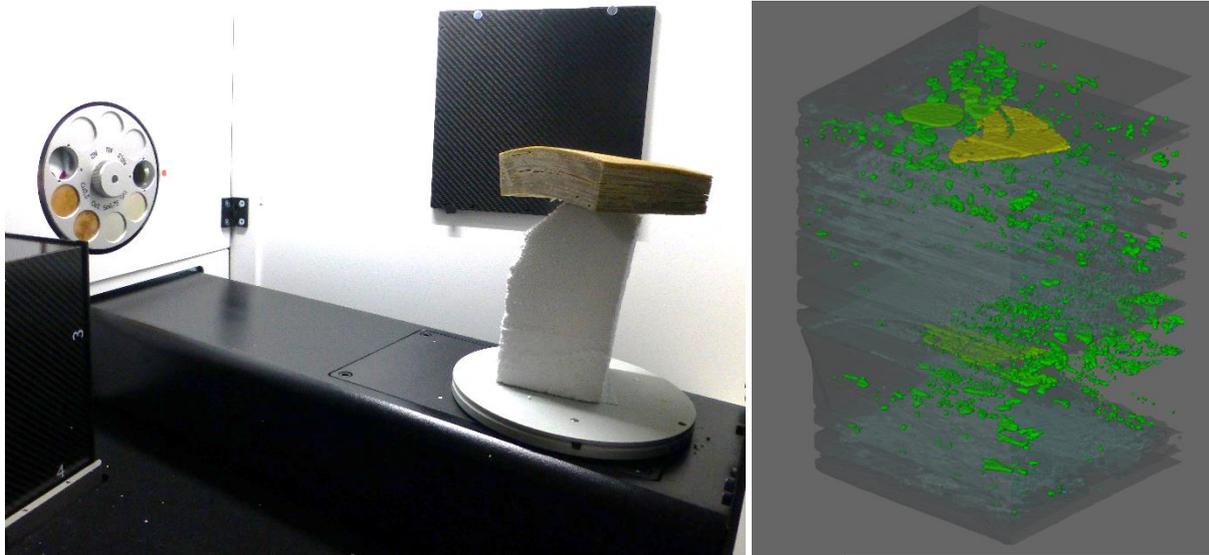


Abbildung 107: Foto aus dem Röntgengerät (links) mit der Strahlungsquelle und dem verklebten, gekrümmten Hainbuchenpaket sowie dem Ergebnis der CT Aufnahme mit den farbig markierten Lunkern (rechts).

### Arbeitspaket 3.3: Materialsimulation

Die in diesem **AP 3.3** durchgeführten Materialsimulationen wurden mit der Software GeoDict Materialmodelle entwickelt und die simulierten Tests mit realen Untersuchungen verglichen.

Für die Modulierung der E-Moduln parallel zur Holzfaserrichtung existieren keine großen Abweichungen zwischen den Werten aus dem Materialmodell und den aus den Zugversuchen.

Die Simulation der Beständigkeit der Holzoberflächen und des Epoxidharzes gegen UV-Strahlung wird weiter auf dem Bewitterungsstand (Abbildung 108) des WKI durchgeführt.

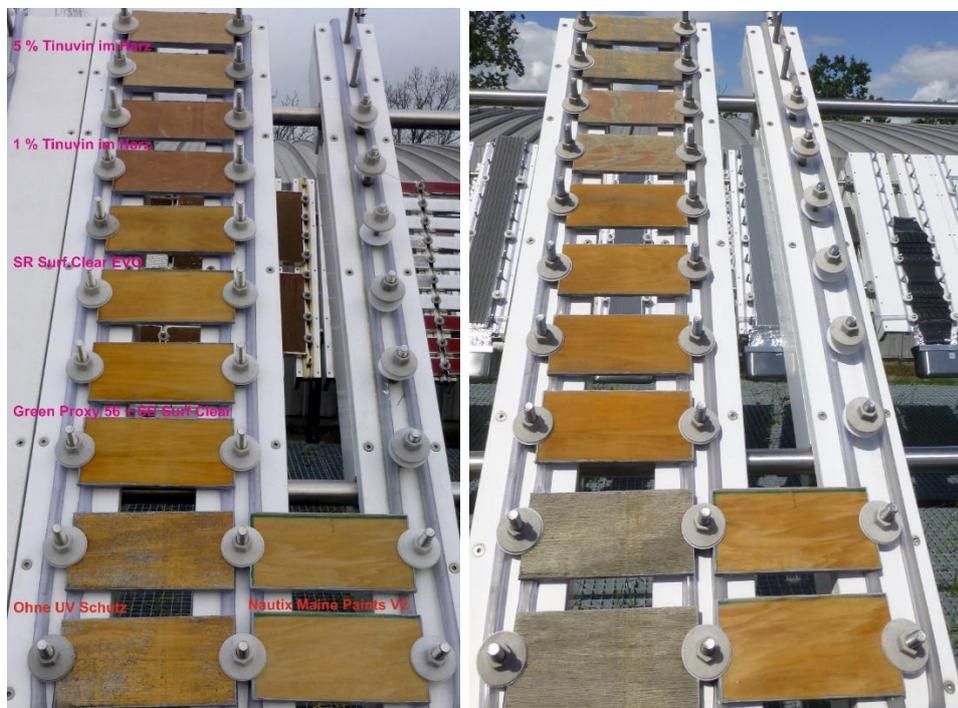


Abbildung 108: Unterschiedlich Oberflächen behandelte Sperrhölzer in der Außenbewitterung im Februar 2022 (links) und im August 2023 (rechts).

### Arbeitspaket 5.1: Fertigung von skalierten Brücken(elementen)

In diesem Arbeitspaket wurde in Zusammenarbeit zwischen der TU-BS und dem WKI, Teile einer skalierbaren Form für ein 3D Model hergestellt. Die Form hierfür wurde von der TU-BS im Laserdruckverfahren (Abbildung

80) hergestellt. Am WKI wurde diese Form (Mould) dazu verwendet aus Hainbuchen und 3D-Furnieren ein 1:10 Modell der geplanten Brückenkonstruktion herzustellen (Abbildung 109).

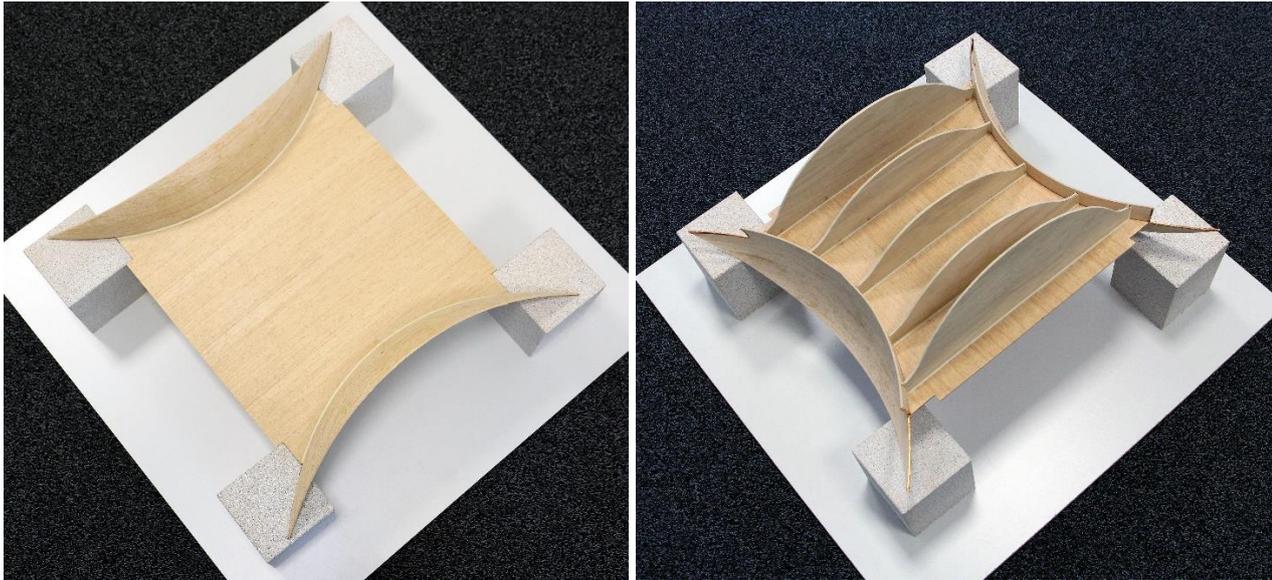


Abbildung 109: 1:10 Model der geplanten Brückenkonstruktion von Oben (links) und von Unten (rechts).

Bereits der Zusammenbau der einzelnen Teile aus Fahrbahn, den beide Brüstungen und den fünf Schotten gab einige Aufschlüsse über die zu erwartenden montagebedingten Herausforderungen beim Bau von realen Konstruktionen aus gekrümmten Freiformflächen.

#### **Arbeitspaket 5.2: Optimierung mechanischer, dynamischer & ökologischer Eigenschaften**

In diesem Arbeitspaket wurde das hergestellte Model einer zunehmenden Belastung durch Stahlkugeln ausgesetzt (Abbildung 110). Um die Durchbiegung der Brücke zu messen wurde unter dem mittleren Schott eine Messvorrichtung angebracht.



Abbildung 110: Foto der skalierten Brückenkonstruktion mit Messfühler unter dem mittleren Schott (links) und nach abgeschlossener Belastung (rechts).

Während des Befüllens des Becherglases mit Stahlkugeln wurde die Durchbiegung digital aufgezeichnet (Abbildung: 112). Dabei wurden aber weder Risse noch andere Schäden beobachtet. Nur das Abheben der Brüstung von den Auflagern konnte beobachtet werden (Abbildung: 111). Dies war aber bereits in den rechnergestützten Simulationen beobachtet worden. Um dies zu verhindern war in der Original-Brückenkonstruktion bereits eine spezielle Halterung vorgesehen über die das Model nicht verfügte.

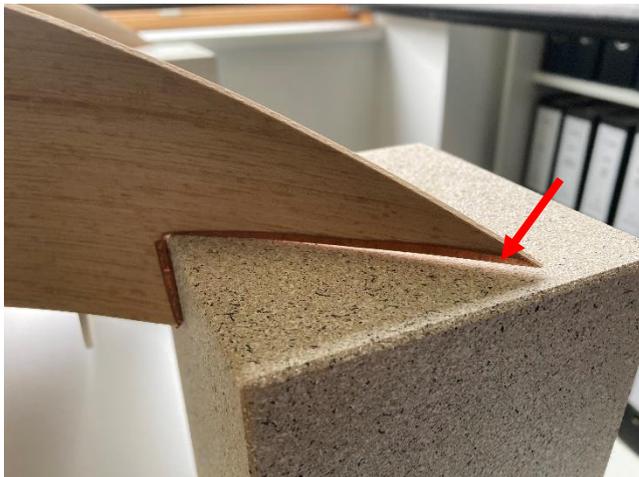


Abbildung: 111: Die Belastung der Brücke führt zu einem Abheben Brüstung von den Auflagern (roter Pfeil). Dieses Problem ist auch bereits in der rechnerbasierten Simulation aufgetreten und wurde durch eine entsprechende Halterung kompensiert.

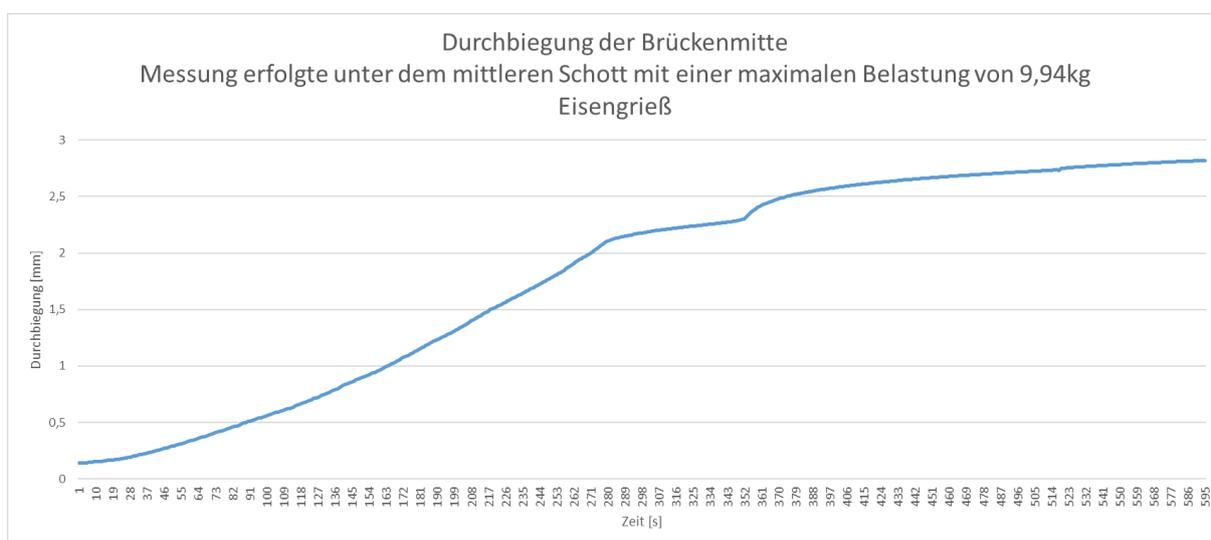


Abbildung: 112: Durchbiegung des mittleren Schotts bei einer steigenden Belastung durch Stahlkugeln auf der Oberfläche der Brücke (siehe Abbildung 110, rechts).

### Arbeitspaket 5.3: Bau eines realen Bauteils für die bauliche Anwendung

Der Bau erster realer Bauteile wurde von und bei der Firma all ahead durchgeführt (siehe Anhang 4). Bei einem der Herstellungsprozesse (Abbildung 113) war auch ein größerer Teil der Projektpartner anwesend.

Nach dieser Arbeit wurden mit allen Partnern die Ergebnisse diskutiert und mögliche Verbesserungsvorschläge für die weiteren Arbeiten zusammengetragen.



Abbildung 113: Fotos von dem Treffen zur Herstellung des kleinen Schotts bei der Firma all ahead.

### Arbeitspaket 6.2: Bilanzierung der Werkstoffkombinationen

Die LCA wurde von der Ruhr-Universität Bochum im Unterauftrag durchgeführt. Ursprünglich war im Projektvorhaben eingeplant, dass die beteiligten Projektpartner konkrete Daten und Kennwerte für die LCA bereitstellen. Da jedoch die relevanten Datensätze nur teilweise zur Verfügung gestellt werden konnten, musste zum Teil auf bestehende Datensätze aus den entsprechenden Datenbanken zurückgegriffen werden.

Es wurde im Rahmen dieses Arbeitspakets die ökologische Betrachtung von Bioverbundwerkstoffen in zwei Teilen vorgenommen: Im ersten Teil wurde eine überschlägige Produktökobilanz mit der GaBi-Berechnungssoftware auf Basis der zur Verfügung gestellten Daten erstellt. Der zweite Teil behandelt die Ökobilanz eines Brückenbauwerks.

Die Ökobilanzierung dient zur ganzheitlichen und transparenten Analyse aller Umweltwirkungen von einem System oder einem Produkt. Dabei wird der gesamte Lebenszyklus, gemäß DIN EN ISO 14040 „von der Wiege bis zur Bahre“, von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung, Nutzung, Abfallbehandlung und das Recycling, bis zur endgültigen Entsorgung, betrachtet.

Die Ergebnisse für das gesamte Brückenbauwerk lassen sich in die Datenbasis von Özdemir (2022) einordnen. Das Ökobilanzergebnis für den Indikator Treibhausgas-Emissionen (THG) für die FreiFo-Brücke (gelbe Linie) liegt unterhalb des minimalen Wertes in der Datenbasis, was darauf zurückgeführt werden kann, dass diese Brücke zu den kleinsten Brückenbauwerken in der Betrachtung gehört (Abbildung 114).

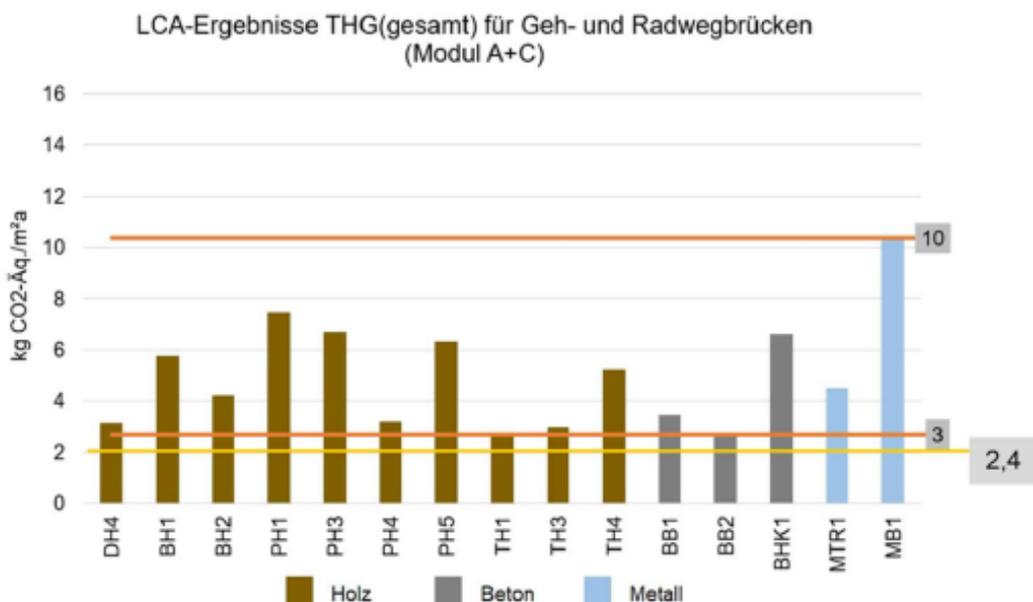


Abbildung 114:: Einordnung des Ergebnisses für den Indikator THG für die FreiFo-Brücke in die Datengrundlage Özdemir (2022), Quelle: Bericht Unterauftrag RUB, Ö. Özdemir

Das Ergebnis für den Indikator totaler nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf (PENRT) für das FreiFo-Bauwerk (gelbe Linie) ist im unteren Bereich der Datenbasis angesiedelt, was vor allem auch an der geringen Größe des Brückenbauwerks liegt (Abbildung 115). Auch der temporäre Kohlenstoffspeicher liegt im Wertekorridor für die Nutzungskategorie Geh- und Radwegbrücken in Özdemir (2022).

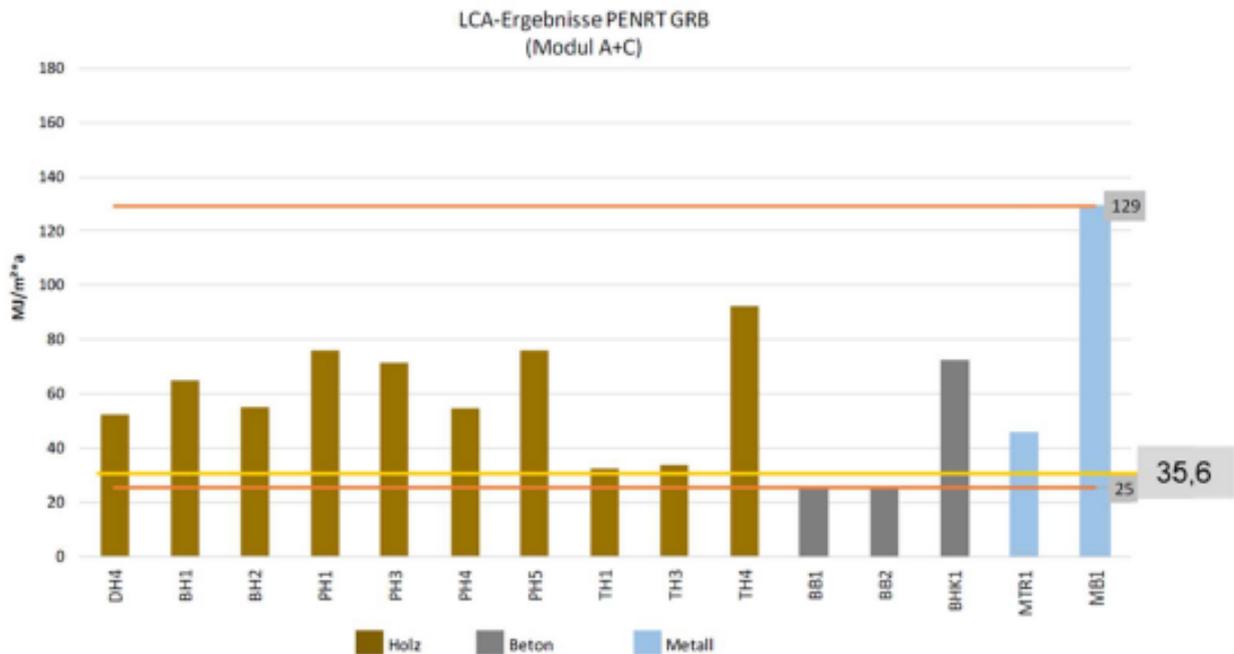


Abbildung 115: Einordnung des Ergebnisses für den Indikator PENRT für die FreiFo-Brücke in die Datengrundlage Özdemir (2022), Quelle: Bericht Unterauftrag RUB, Ö. Özdemir

Es konnte dargelegt werden, dass die Einbeziehung der Ökobilanzierung bereits parallel zu Material- und Prozessentwicklungen zielführend ist. Aufgrund der z.T. unvollständigen Datenlage und des noch nicht final abgeschlossenen Herstellprozesses musste teilweise auf Vereinfachungen zurückgegriffen werden, wodurch das Ergebnis nur eine Annäherung darstellt. Die Ökobilanz konnte jedoch aufzeigen, dass die Ergebnisse für das FreiFo-Brückenbauwerk insgesamt im bzw. teilweise sogar unterhalb des relevanten Wertekorridors in Özdemir (2022) liegen.

### 3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Die Untersuchungen im Projekt zeigen hohe Festigkeitswerte und gute Biegeeigenschaften des entwickelten Hybridmaterials, bestehend aus dünnen Holzurnieren und Natur- bzw. Basaltfasern die in einer Vakuuminfusionstechnik miteinander verklebt werden.

In einer entsprechenden Form (Mould) lassen sich sowohl ebene als auch frei geformte Flächen herstellen die dann anschließend den verschiedenen hygri-schen und mechanischen Prüfungen unterworfen werden können. Darüber hinaus wurden Alterungsuntersuchungen durchgeführt, die entweder durch UV Licht sich auf das Epoxidharz oder durch Bodenbakterien die sich auf unterschiedliche Holzarten sehr verschieden auswirken.

Das Natur- und Basaltfasergewebe das zwischen den Holzurnieren eingebracht wurde, sollte sowohl dem besseren Harzfluss bei der Vakuuminfusion als auch der mechanischen Festigkeit quer zur Holzfaserrichtung dienen. Hierbei stellten sich jedoch die meisten auf den Fasern befindlichen Schichten eher als Verschlechterung der Haftfestigkeiten heraus als dass sie zur Verbesserung beitragen. Eigens am WKI hergestellte Gewebe ohne jegliche Schlichte zeigten ein deutlich besseres Verhalten im Harzverbund.

Schwierigkeiten ergaben sich bei der Infusion großer Furnierflächen. Hierbei stellten insbesondere die dicken gewellten Furniere die größte Schwierigkeit da, weil unter einem Vakuum die 3,5mm dicken, gewellten Furniere nicht in eine Form pressbar sind und sich in den verbleibenden Taschen größere Harzmengen sammeln können oder auch Trockenlamine bilden.

Mit verschiedenen modernen Messtechniken konnten im Projekt sowohl Trockenlamine als auch Harzansammlungen als potentielle Problemstellen detektiert werden

Die zusammen mit der Ruhr Universität Bochum (RUB) durchgeführte LCA Analyse zeigte die positiven Effekte der Nutzung dieser Holz-Faser-Hybridmaterialien gegenüber konventionellen Betonbrücken.

Die folgenden Untersuchungen wurden im Detail durchgeführt:

- Herstellung verschiedenster ebener und gebogener Holz-Hybrid-Prüfkörper
- Mechanische Prüfung der Materialien
- Alterungsuntersuchungen verschiedener Hölzer in der Außenwitterung (UV Beständigkeit) und in Bodenkontakt (Beständigkeit gegen Bodenorganismen)
- Künstliche und natürliche Bewitterung zur UV-Alterung von Epoxidharzen
- Einfluss verschiedener Schichten auf Natur- und Basaltfasern auf ihre Anbindung an die umgebende Harzmatrix
- Herstellung verschiedener Natur- und optimierter Basaltfasergewebe für den Bau einzelner Demonstratorelemente
- Vermessung der finalen Holz-Hybrid-Körper, Detektion von Fehlstellen und mechanische Vermessung der Materialien
- Durchführung der Life Cycle Analysis (LCA)

## Teilvorhaben 2: Projektierung einer Brückenkonstruktion (2220HV039B TU Braunschweig)

### 1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens 2 ist die Zusammenstellung von Anforderungen an Fahrrad- und Fußgängerbrücken im konstruktiven Ingenieurbau, sowie die konkrete Lastermittlung, Planung und konstruktive Durchbildung einer Fahrrad-/ Fußgängerbrücke aus faserverstärktem Laubholzurnier am konkreten Beispiel unter Beachtung von Aspekten des Entwurfs mit einem neuartigen, formbaren Holzwerkstoff zur Gewährleistung normativ gestellter Anforderungen an Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit.

### 1. Bearbeitete Arbeitspakete

Hauptsächlich bearbeitet wurden die Arbeitspakete:

- AP 4.1 „Erarbeitung Lastenheft“ (Projektmonate 4-9)
- AP 4.2 „Verifizierung, Optimierung“ (Projektmonate 10-18)
- AP 5.2 „Optimierung mechanischer, dynamischer & ökologischer Eigenschaften“ (Projektmonate 25-32)
- AP 6.2 „Bilanzierung der Werkstoffkombinationen“ (Projektmonate 33-36)

### 2. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Nachfolgend werden in Ergänzung zum Hauptteil die Anschlussdetails der Bauteilanschlüsse detailliert in Form von Ausführungsplänen dargestellt.

#### Modellierung – Einzelbauteile: Fahrbahn

##### Anschlussdetails

*Horizontales Widerlager Fahrbahn, Detail E – G*

Abbildung 117 und Abbildung 116 2 stellen die Ausbildung als zweiwertiges Auflager dar, Abbildung 118 und Abbildung 119 beispielhaft für ein einwertiges Auflager. Das hier betrachtete Lager wird durch rote Umrandung gekennzeichnet.

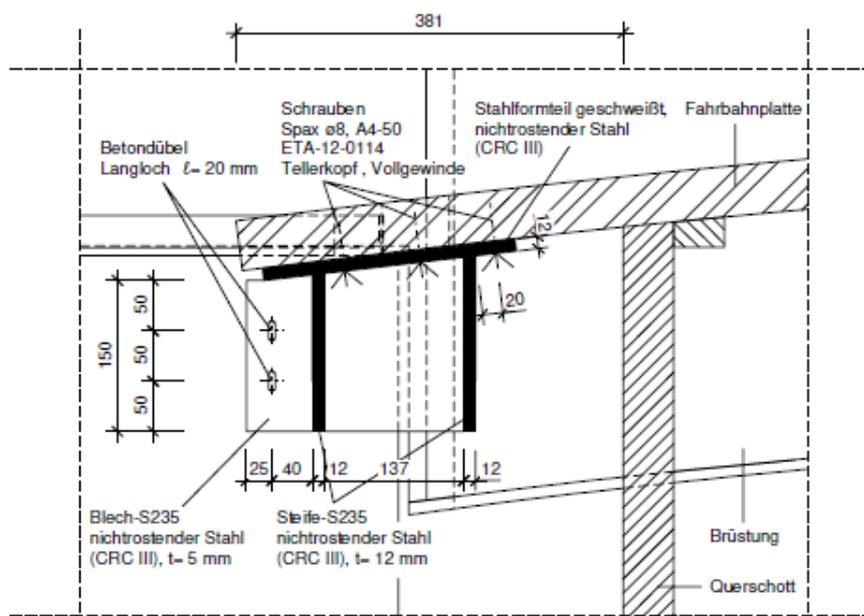


Abbildung 116: Horizontales Widerlager Fahrbahn, zweiwertiges Auflager (Detail E), Vertikalschnitt

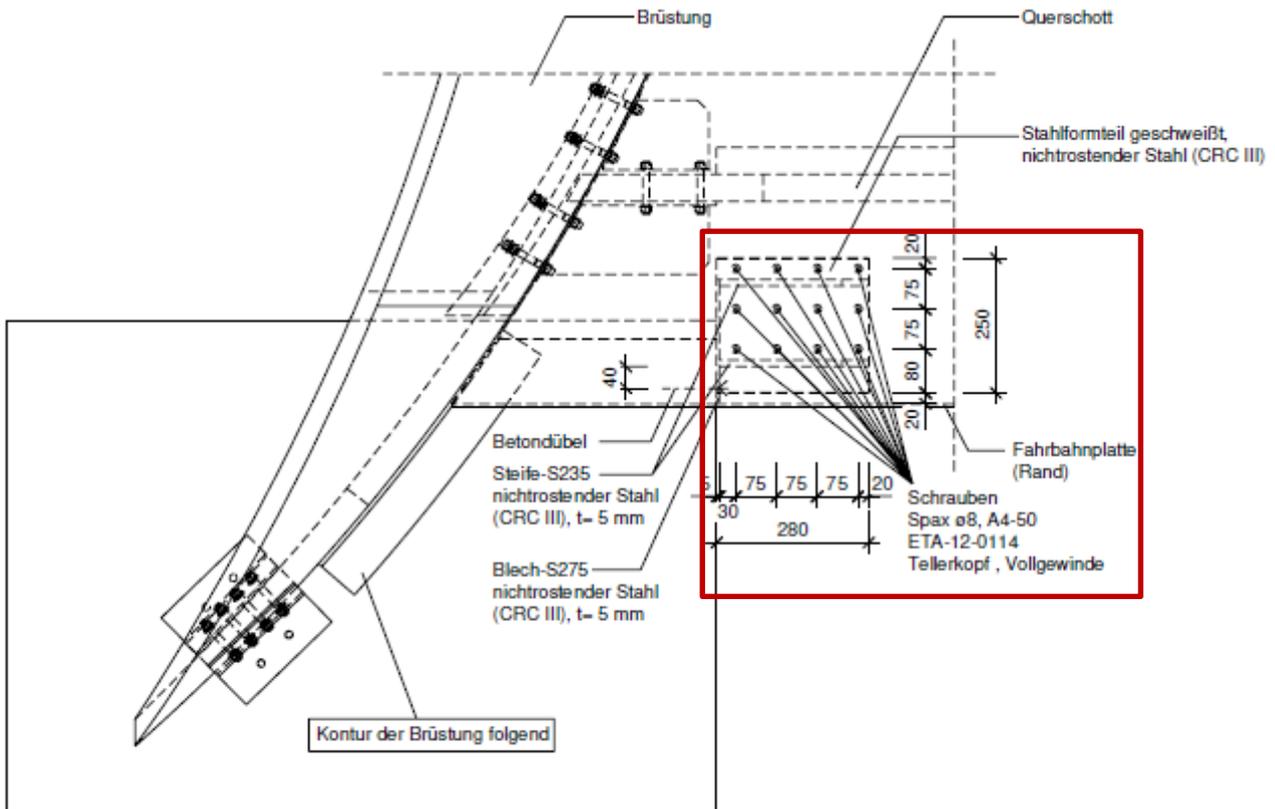


Abbildung 117: Horizontales Widerlager Fahrbahn, zweiwertiges Auflager (Detail E), Draufsicht

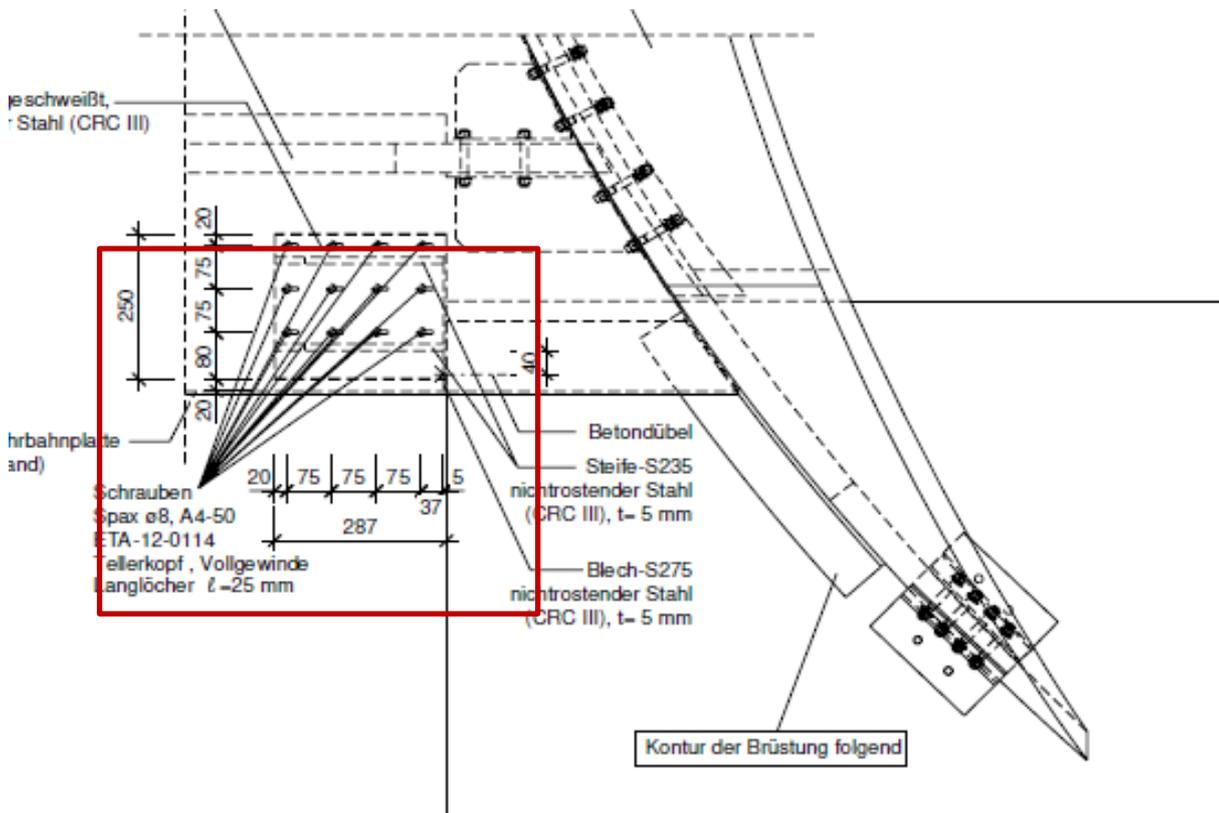


Abbildung 118: Horizontales Widerlager Fahrbahn, einwertiges Auflager (Detail F), Draufsicht

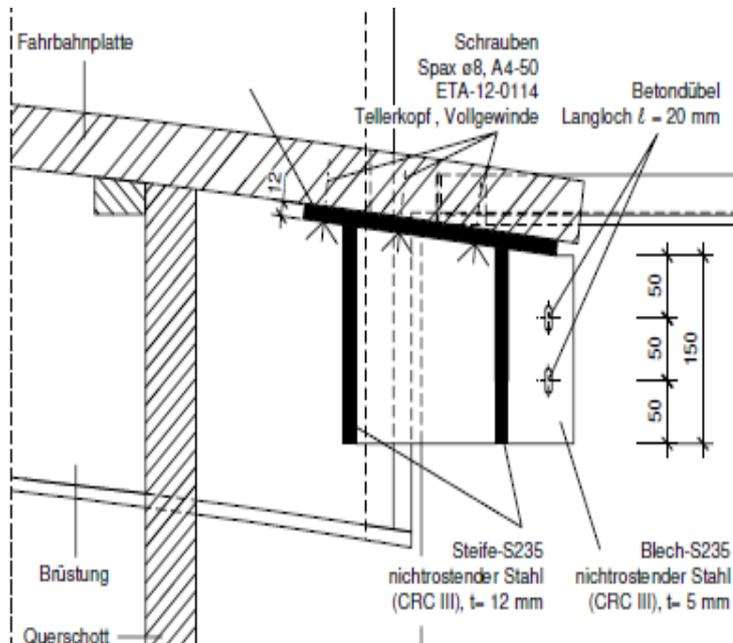


Abbildung 119: Horizontales Widerlager Fahrbahn, einwertiges Auflager (Detail F), Vertikalschnitt

## Modellierung – Einzelbauteile: Querschotte (Nebenträger)

### Anschlussdetails

#### Vertikales Widerlager Querschotte, Detail A – C

Beispielhaft wird nachfolgend der Anschluss Randschott / Brüstung (Detail A) abgebildet. Abbildung 120 und Abbildung 121 zeigen die Detailpläne beispielhaft für den Anschluss des Randschotts.

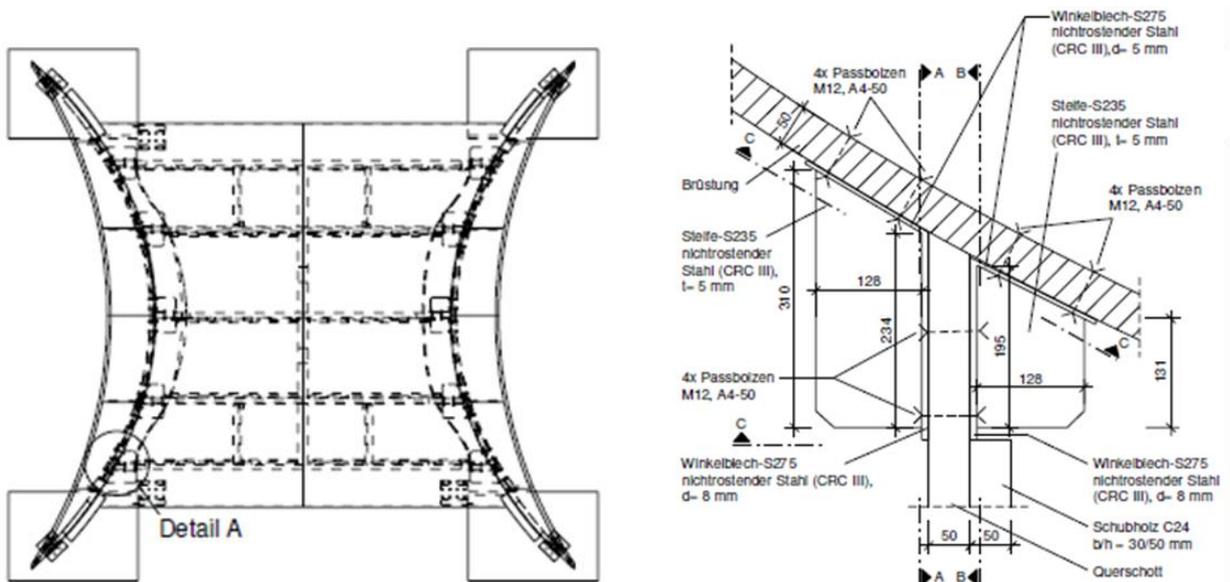


Abbildung 120: links: Lage des Anschlusses im Grundriss, rechts: Draufsicht und Schnitt

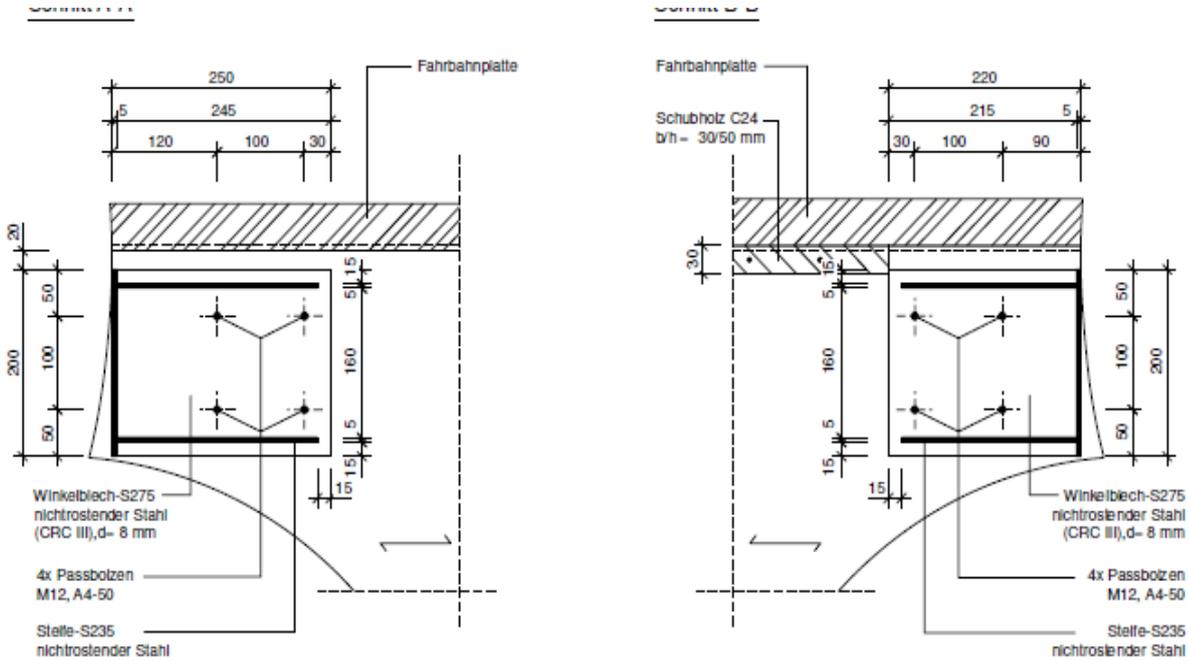


Abbildung 121: Schnitt A-A und Schnitt B-B

## Modellierung – Einzelbauteile: Fahrbahn

### Anschlussdetails

#### Vertikales Widerlager Brüstung, Detail D

Die Detailzeichnungen werden in Abbildung 122 bis Abbildung 124 dargestellt.

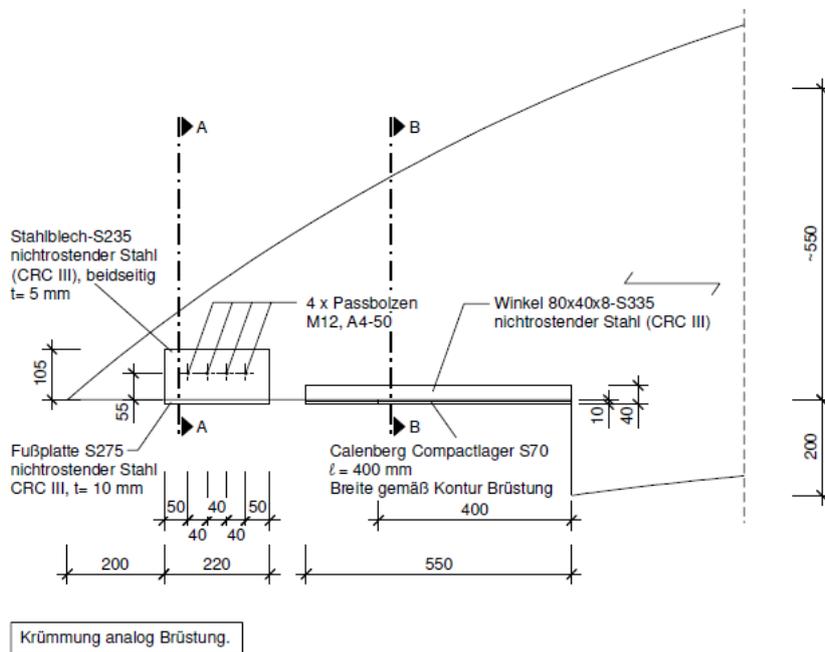
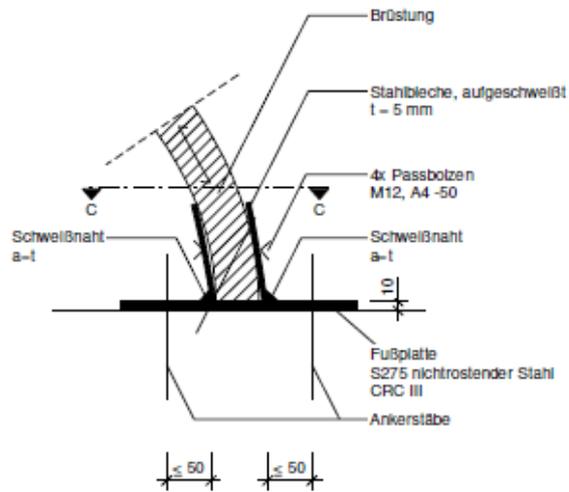


Abbildung 122: Widerlager Brüstung, Detail x-Richtung

Schnitt A-A



Schnitt B-B

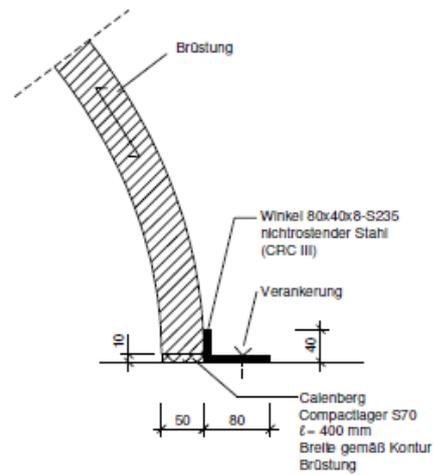


Abbildung 123: Widerlager Brüstung, Schnitt A-A und Schnitt B-B

Schnitt C-C

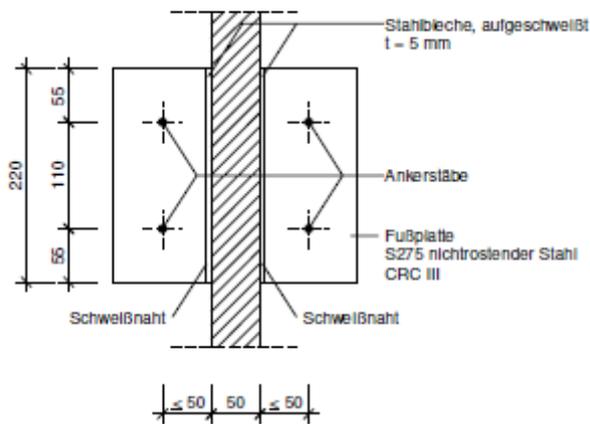


Abbildung 124: Widerlager Brüstung, Schnitt C-C

## **Teilvorhaben 3: Herstellung / Optimierung von Laubholzfurnieren**

**(FKZ: 2220HV039C Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH)**

### **1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Das Teilvorhaben hat das Ziel die in Fußgänger- und Fahrradbrücken zum Einsatz kommenden Hybridwerkstoffe zu optimieren. Der Fokus liegt hierbei auf den Laubholzfurnieren. Die feuchten und somit noch flexiblen Buchenfurniere sollen in Verbindung mit Glas-, Kohle-, Natur- und insbesondere Basaltfasern mittels eines speziellen Vakuumtrocknungs- und Infusionsverfahrens zu selbsttragenden 3D-Freifformflächen verarbeitet werden. Pollmeier hat die Aufgabe die Laubholzfurniere herzustellen und diese für das weitere Verfahren optimierend zu bearbeiten.

### **2. Bearbeitete Arbeitspakete**

Die Bearbeitung des Arbeitspaketes 1 wurde infolge der SARS-CoV-2 bedingten Kurzarbeit im Unternehmen vollständig auf 2021 verschoben, um eine stringente Projektdurchführung gewährleisten zu können.

#### **Arbeitspaket 1.1 - Vorbehandlung und Schälen verschiedener Furniere**

Für 2022 war die Herstellung von 2 mm Buchenfurnieren geplant, dazu müssen die Prozessparameter sowie die Sortierparameter an der Schälmaschine entsprechend angepasst werden. Durch das dünnere Schälmaß im Vergleich zum Standard von 3,55 mm werden weniger tiefe Schälrisse, sowie eine bessere Oberfläche der Furniere, sowie eine höhere Verformbarkeit erwartet.

Stand 2023: Das dünnere Schälmaß ist aufgrund mehrerer technischer Hindernisse und einer noch nicht in Betrieb genommenen Stärkenmessung zur genauen Kontrolle der Schälstärke, aktuell nicht mit geeigneten Toleranzen herstellbar.

#### **Arbeitspaket 1.1 - Vorbehandlung und Schälen verschiedener Furniere**

**Kochparameter und deren Auswirkung auf die Qualität der Buchenfurniere wurde grob analysiert.**

Tiefere Betrachtung der Zusammenhänge zwischen der Rundholzqualität; den Kochparametern und den Einstellungen an der Schälmaschine folgten in 2022.

Erste Ergebnisse für die Optimierung des Schälprozesses bei 3,55 mm Furnieren liegen vor.

Wenn die Kochtemperatur von 65°C erreicht wird muss eine minimale Kochzeit 60h erfolgen.

Gruben nur mit 150 m<sup>3</sup> beladen, um einen gleichmäßigen Wasserfluss zu ermöglichen

Kerntemperatur der zu schälenden Stämme sollte über 60°C liegen.

Sind diese Parameter gegeben kann davon ausgegangen werden, dass zumindest 3,55 mm Buchenfurniere mit einer guten Oberfläche und Schälrisstiefen von unter 50% der Furnierstärke hergestellt werden.

Stand 2023 mehrere Versuchsgruben wurden betrachtet um den Zusammenhang zwischen Kochzeit; Kochtemperatur und Ausbeute im Hinblick auf die erreichte Temperatur der Blöcke an der Schälmaschine (SMA) darzustellen bzw. greifbar zu machen (vgl. Matrix unten)

Tabelle 8: Zusammenhang zwischen Kochzeit; Kochtemperatur und Ausbeute im Hinblick auf die erreichte Temperatur

<b>Einflussmatrix: Kochprozess - Schälprozess</b>																
KW	Gruben-Nr.	Kochgruben					Schälmaschine									
		Dauer in Kochgrube [h]	Dauer: Kochen > 60 °C [h]	Dauer bis erreichen der Kochzeit [h]	Beladung [m³]	T_Ablauf [°C] bei Entleerung	Ø Radius [mm]	Ø RR-Temp [°C]	Abweichung zu idealer RR [Vol.-%]	RR-Radius: Anteil [%]		Feuchte-Anteil [%]			Anzahl Schälstämme	Abrundverlust [%]
										50 mm	> 50 mm	10 - 30 %	31-60 %	> 60 %		
3	2	84	54	30	165	63	176	54	1	99	1	2	8	90	581	18
3	7	159	146	13	145	67	180	60	3	95	5	3	12	85	467	18
3	4	98	62	36	150	67	189	61	5	95	5	2	17	81	490	19
3	5	98	74	23	160	65	171	58	5	96	4	2	18	80	641	16
3	9	150	126	24	145	64	191	59	6	95	5	3	15	83	438	18
3	8	104	78	26	140	66	191	54	9	96	4	2	9	89	477	18
6	7	226	210	16	150	69	177	57	20	90	10	2	15	83	541	20
6	9	103	76	27	155	69	190	55	24	90	10	2	15	83	515	19
6	6	112	86	26	160	66	164	58	27	85	15	3	29	68	620	21
6	3	110	70	40	165	64	163	53	27	86	14	3	25	73	644	18
6	5	105	88	17	180	69	166	54	43	81	19	3	23	74	721	21
6	4	250	0	250	160	57	185	51	62	74	26	2	18	79	539	15
			Bester Wert			schlechtester Wert										

## **Arbeitspaket 1.2 – Optimierung des Trocknungsprozesses frischer Furniere**

Am 28.06.2021 ist die Kühlzone des Grenzebach Band-Furniertrockners aufgrund eines Motordefektes komplett ausgebrannt, bei Temperaturen von über 900°C (ab hier ist der Thermosensor in dem Bereich ausgestiegen) verzog sich der gesamte hintere Stahlbau des Trockners, die Brandsanierungsmaßnahmen haben alleine schon knapp ein Jahr gedauert. Der erneute Aufbau des Trockners und in dem Zuge einer neuen Stapelung speziell für Buche ist mittlerweile abgeschlossen, die Inbetriebnahme allerdings noch nicht zu 100%.

Der Grenzebach Trockner ist, anders als unser zweiter Furniertrockner der Firma Raute, ein einspuriger Bandtrockner. Bei dem Raute Trockner handelt es sich um einen Rollentrockner.

Der Bandtrockner ist für die Trocknung von Buchenfurnieren unerlässlich, da sich die 3,6 mm Buchenfurnier deutlich stärker werfen als unsere Fichtenfurniere. Sollten Buchenfurnier im Fichtentrockner getrocknet werden kommt es häufig zu Störungen durch Klemmer innerhalb des Trockners, wenn sich eine geworfenes oder gerissenes Buchenfurnier in den Rollen und Düsenkästen verkeilt.

Furniere, die im Rollentrockner getrocknet werden, kommen deutlich stärker geworfen, gewellt und gerissen aus der Anlage. Dieser Effekt führte dann zu größeren Problemen bei der Vakuumverklebung bei der Firma all ahead, weil sich die stärker gewellten Furniere durch das Vakuum nicht verpressen ließen und Einschlüsse mit großen Harzmengen hervorriefen.

## **Arbeitspaket 5.3 - Bau eines realen Bauteils für die bauliche Anwendung**

Es wurden diverse, trockene 3,5 mm dicke Buchenholzurniere in geringer Menge an das WKI aber ein großer Teil an Furnieren an die Firma all ahead gesendet. Bei diesen Furnieren handelte es sich um ausgesuchte Furniere mit möglichst fehlerfreien Oberflächen und geringen Wellen, aus der Pollmeier Internen Decklagen Sortierung.

## **Arbeitspaket 5.4 - Bau einer realen Fußgängerbrücke**

Der Bau der gesamten Brücke hat aus technischen und zeitlichen Gründen nicht stattgefunden. Deshalb war es nicht notwendig mehr Buchenholzurniere an all ahead zu senden.

## **Arbeitspaket 6 - Life Cycle Assessment / Carbon Footprint**

Die EPD ist weiterhin nicht fertig. Die Rohdaten sind aktuell alles was die Firma Pollmeier zur Verfügung stellen konnte und auch für die LCA zur Verfügung gestellt hat.

## **3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Viele Arbeiten mussten wegen Covid und dem Brand im Trockner verschoben werden.

Ein gezieltes und konstantes dünneres Schälen der Furniere auf z.B. 2 mm ist aktuell an der Schälmaschine aufgrund von technischen Problemen und einer noch nicht ausreichend genauen Stärkenmessung nicht möglich.

Da sich der Grenzebachrockner immer noch in der Inbetriebnahme Phase befindet lassen sich dünnere Buchenfurniere hier auch nicht in befriedigender Qualität trockenen. Der Grenzebachrockner ist für das Trocknen dünnerer Buchenfurniere unerlässlich ist, da er den einzigen Bandtrockner im Werk darstellt und die dünnen Furniere, im Gegensatz zu unserem Rollentrockner, kaum beschädigt.

## **Teilvorhaben 4: Herstellung der Brückendemonstratoren**

**(FKZ: 2220HV039D all ahead composites GmbH)**

### **1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Das Ziel dieses Teilvorhabens ist die Herstellung eines Brückendemonstrators in einem verkleinerten Maßstab. Zum einen wird an diesem Demonstrator die Produktionsweise erforscht und angepasst, zum anderen dient das fertige Demonstratorbauteil für Belastungstests und somit der Überprüfung der theoretischen Auslegung der Brücke.

### **2. Bearbeitete Arbeitspakete**

#### **Arbeitspaket 2: Herstellung von Hybridwerkstoffen im Vakuuminfusionsverfahren und Tests**

Mit dem favorisierten biobasierten Harzsystem wurden Probelamine im Vakuuminfusionsprozess hergestellt. Dies erfolgte zu Beginn an einfachen flächigen Plattenbauteilen. Nach erfolgreichen Versuchen auch an komplexeren 3D-geformten Geometrien. Hierfür wurden bereits vorhandene Laminierformen verwendet. Dabei wurde das Harzsystem hinsichtlich seiner Handhabung und Tauglichkeit für die Fertigung des späteren Demonstrators bewertet. Es konnten durchwegs positive Ergebnisse erzielt werden.

#### **Arbeitspaket 4: Lastenheft für Vorhangschalen als baulicher Holzschutz und eine Brückenkonstruktion**

Bei der Erarbeitung des Lastenheftes wurde den Projektpartnern Zuarbeit in Bezug auf die Herstellbarkeit geleistet. Ideen, welche innerhalb der Projektteilnehmer gesammelt wurden, hat all ahead insbesondere im Hinblick auf die spätere Laminierform und Grenzen bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen im Vakuuminfusionsverfahren überprüft.

#### **Arbeitspaket 5: Herstellung (skalierter) Demonstratoren und ihre Optimierung**

Nach Fertigstellung der Brückenkonstruktion konnten verschiedene Konzepte für gekrümmte Formenwerkzeuge erarbeitet und auf deren Machbarkeit hin untersucht werden. Ansätze die Werkzeuge aus Aluminium oder Kunststoffen fräsen zu lassen, wurden auf Grund der Größe und den damit verbundenen Maschinenzeiten verworfen. Ein Ansatz die Schalen auf einem flexibel krümmbaren Formwerkzeug in den Niederlanden herzustellen scheiterte an den logistischen Herausforderungen.

#### **Arbeitspaket 6: Life Cycle Assessment / Carbon Footprint**

Nach der Etablierung eines geeigneten Infusionsaufbaus und der Herstellung erster großer Lamine, wurden den Projektpartnern relevante Informationen zur Erstellung einer LCA zur Verfügung gestellt. Diese bezogen sich vor allem auf die Menge der verwendeten Verbrauchsmaterialien, der Werkstoffe, sowie der eingebrachten Energie.

### 3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

#### 3.1. Konzipierung und Herstellung der Werkzeuge

Im Teilvorhaben 4 wurden Holzfurnier-Schichtverbund-Bauteile unterschiedlicher Größe und Form hergestellt. Die dafür benötigten Produktions-Werkzeuge wurden konzipiert, konstruiert und realisiert. Mit diesen erfolgte die Herstellung diverser Furnier-Schicht-Körper unterschiedlicher Größe. Für die Herstellung der Querschotte der Brücke wurde ein ebenes Formwerkzeug in Form eines Tisches in der Größe 5,6 x 2,1 Meter aufgebaut.

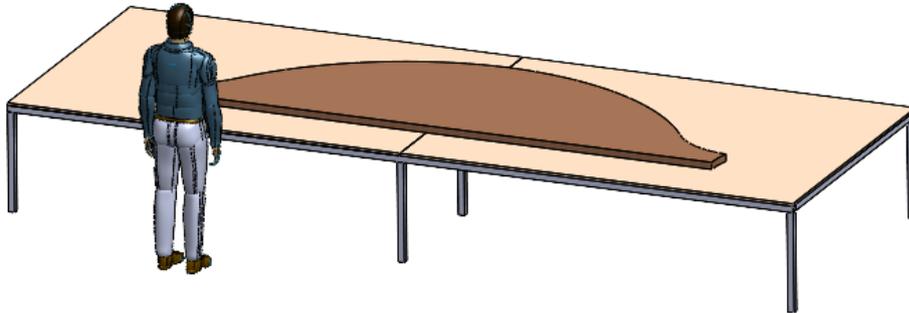


Abbildung 125: CAD-Modell des Formwerkzeuges für ebene Bauteile

Für das Demonstratorbauteil gekrümmte Vorhangschale wurden verschiedene Werkzeugkonzepte erarbeitet. Es gab den Ansatz eines gefrästen Aluminiumwerkzeugs, wie es bei all ahead bei anderen Projekten üblicherweise zum Einsatz kommt. Ein weiteres Konzept sah den Einsatz von Hartschaumplatten vor, welche gefräst, verklebt und mit Faserkunststoffverbunden (FKV) überlaminiert werden. Der final realisierte Ansatz war das Formwerkzeug in Spantenbauweise. Andere Werkzeugkonzepte kamen auf Grund von unverhältnismäßigem Materialeinsatz, hohen Stundensätzen von Fräsbearbeitungszentren oder logistischen Gründen nicht in Frage. Ein Werkzeug für die Brüstung aus Aluminium hätte bereits für die Rohstoffpreise die im Projekt zur Verfügung stehenden Mittel überschritten. Darüber hinaus wäre das Handling für solch eine Masse mit den bei all ahead zur Verfügung stehenden Mittel nicht machbar gewesen. Ein besonders nachhaltiger Ansatz unter Zuhilfenahme eines flexiblen Werkzeugs scheiterte an logistischen Hürden, da der Dienstleister in den Niederlanden ansässig ist. Der Transport von Werkstoffen, Personal und Bauteilen wäre zu aufwändig geworden.

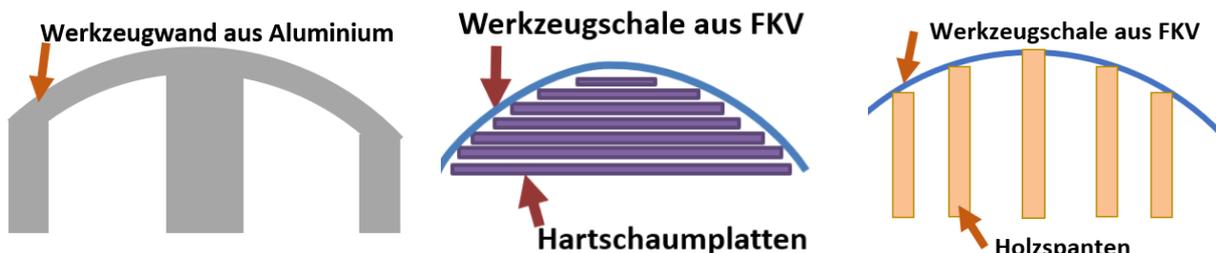


Abbildung 126: Schematische Darstellung erarbeiteter Werkzeugkonzepte aus Aluminium, Hartschaum und Holz (von links nach rechts)

Die gewählte Spantenbauweise zeichnet sich durch eine geometrisch recht einfache tragende Grundstruktur und eine beliebig steif bzw. fest realisierbare Schale aus. Die vertikal stehenden und ineinander gesteckten Schotts aus Holz gewährleisteten eine sehr hohe Traglast. Auf diese wurden wiederum Streifen gebogen, welche die Kontur des Bauteils abbilden. Damit die Fläche luftdicht, glatt und steif ist, wurde sie mit Spachtelmasse und diversen Faserlagen überlaminiert. Da bei vorangegangenen Infusionen Temperaturen von über 120°C im Harz gemessen wurden, musste die Schale noch getempert werden. Anderen Falls hätte es durch ein erneutes Erweichen der Harzmatrix zu einem Abfall der Steifigkeit der Schale kommen können. Die Steifigkeit des Werkzeuges muss deutlich höher sein, als die der in Form zu bringenden Furnierschichten. Anderenfalls könnte es während des Infusions- bzw. Aushärtungsvorgangs zu Schäden am Werkzeug kommen.

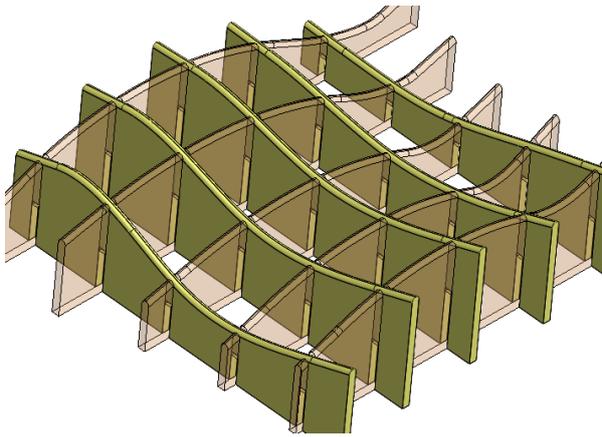


Abbildung 127: bauliche Umsetzung des Werkzeuges für die Vorhangschale – CAD Modell Spantenanordnung; Konturgebundene Harzfaserstreifen; mit Spachtelmasse versiegelte und geschliffene Oberfläche; Versteifung der Schale durch Überlaminieren mit Verstärkungsfasern aus Glas und Carbon (von links oben nach rechts unten)

### 3.2. Erarbeitung und Optimierung des Fertigungsprozesses

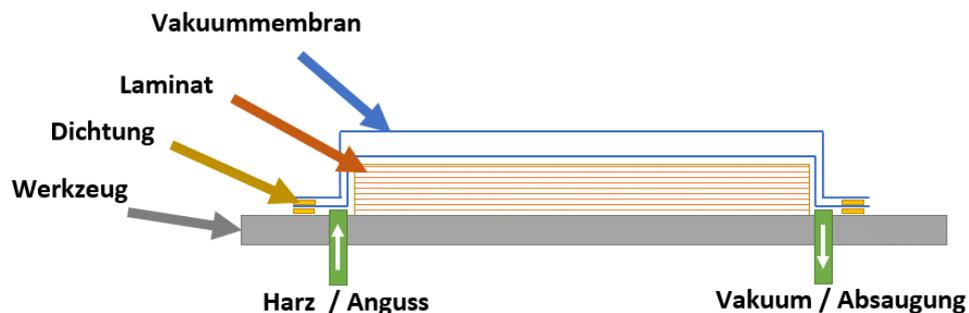


Abbildung 128: schematischer Aufbau für die Harzinfusion

Ein wesentlicher Schritt zur Herstellung des Brückendemonstrators war die sichere Harzinfusion des Furnier-Schichtaufbaus. Im Vergleich zu textilen Laminaten, wie z.B. Glasfasergeweben, lassen sich Holzfurniere nicht gut durchtränken, da sie das flüssige Harz in Dickenrichtung nicht durchwandern lassen. Dies machte Anpassungen des klassischen Infusionsprozesses für textile Halbzeuge unerlässlich. Die Brücke besteht aus planen und gekrümmten Bauteilen. Zunächst wurde der Infusionsprozess an kleinen planen Bauteilen optimiert, bis er als stabil genug eingeschätzt wurde. Bei der Übertragung auf große Bauteile in Form eines Brückenschotts von 3,1 x 1,1 Meter, wurden jedoch deutliche Probleme sichtbar. Die Fließgeschwindigkeit des Epoxidharzes nahm über die Infusionsdauer von ca. 5h rapide ab, dadurch konnten die Bauteile nicht vollständig mit Harz getränkt werden. Es gab auch lokal große Unterschiede in der Fließgeschwindigkeit, die Oberseite wurde deutlich schlechter benetzt als die Unterseite und die Infusion dauerte zu lange. Das Bauteil wies viele Stellen auf, welche nicht mit Harz imprägniert waren.



Abbildung 129: infundierte Platte mit trockenen Stellen 3,1 x 1,1 Meter (unten)

Der Prozess bedurfte einer erneuten Optimierungsschleife. Dabei wurden unterschiedliche Parameter variiert. Die Analyse erfolgte an kleinen Probeplatten im Maß 50 x 50 cm. Somit konnten größere Mengen Müll vermieden werden. Die Temperatur des Infusionsharzes wurde im Bereich zwischen 10 und 40 °C untersucht. Es ergibt sich ein Konflikt zwischen Viskosität und Infusionsdauer. Kälteres Harz ist zähflüssig und lässt sich nur sehr langsam zwischen die Holzschichten saugen. Vorgewärmtes Harz fließt sehr gut, lässt allerdings nur wenig Zeit, bevor die Aushärtungsreaktion startet. Das Optimum wurde zwischen 20 und 30 °C gefunden. Hier fließt das Harz sehr gut zwischen den Furnierschichten und härtet jedoch so langsam aus, dass das Harz noch an die vorhandenen trockenen Stellen gelenkt werden kann.

Für 50 mm starke Platten wurden 14 Furnierlagen gestapelt. Um eine gleichmäßige Durchtränkung in Dickenrichtung zu gewährleisten wurden diverse Anguss- und Absaugungs-Szenarien getestet. Infusion entlang der Wachstumsrichtung des Holzes erleichtert den Harzfluss geringfügig. Textile Zwischenlagen können einem Aufeinanderpressen der Holzurniere entgegenwirken und damit den Harzfluss begünstigen. Die Gestaltung und Position der Harzzuleitung bzw. der Vakuumsaugung können ebenfalls das Infusionsergebnis wesentlich verbessern. Durch gezieltes Einbringen von Fließhilfen, konnte das Harz besser in die oberen Lagen geleitet werden. Somit entstand ein Setup, welches für kleine plane Probeplatten sehr gute Ergebnisse liefert.



Abbildung 130: Variante eines Infusionsaufbaus mit 4 verschiedenen Vakuumsaugungen (oben links); Variante eines Angusses mit 3 abgestützten Harzzuleitungen unter Einsatz einer Fließhilfe, welche an der oberen und unteren Kante umgebördelt ist (gelb) (oben rechts); Furniere mit Basaltdreheregewebe als Verstärkungsfaser und Fließhilfe (unten links); Furnierstapel mit trockenen Flachsfasern zur Verbesserung des Harzflusses (unten mitte); infundierte Probeplatte mit Flachsfasern in der Decklage (unten rechts)

### 3.3. Herstellung der Demonstratorbauteile

Die Übertragung der Erkenntnisse von kleinen (ca. 0,5 m<sup>2</sup>) auf große Bauteile (ca. 3 m<sup>2</sup>) war im Rahmen des Projektes nicht möglich. Die aus den größeren Dimensionen resultierenden längeren Fließwege des Harzes führten erneut zu einer drastischen Abnahme der Fließgeschwindigkeit. An den Rändern fließt das Harz schneller als in den äquatorialen Bereichen. Durch Schwankungen in den Furnieren, wie Äste, Anzahl der Risse, Stoßstellen oder Welligkeit ist die Ausbreitung des Infusionsmediums sehr inhomogen. Wenn eine Absaugleitung in Kontakt mit dem Harz kommt, muss sie geschlossen werden. Dies verringert die Fließgeschwindigkeit. Durch Verwendung von Membran-ummantelten Schläuchen konnte dieser Effekt reduziert, jedoch nicht eliminiert werden. Je größer die Bauteile werden, desto größer werden auch all diese Einflüsse. Bis zur vollständigen Infusion aller Bereiche vergeht mehr Zeit. Größere Harzmengen führen indes zu einer beschleunigten Aushärtung. Zum Beispiel wurden bei einem Brückenschott die 12-fache Menge (ca 100 kg) des Infusionsmediums angemischt, als wie bei einer Probeplatte. Es wird dementsprechend mehr Wärme frei gesetzt was wiederum die Härtingsreaktion beschleunigt und zum Überhitzen des Systems führen kann. Im Falle des Brückenschotts mit optimiertem Infusionsaufbau, waren es jedoch trockene Stellen auf der Unterseite, welche sich nicht eliminieren ließen.



Abbildung 131: infundierte Platte mit trockenen Stellen auf der Unterseite

Bei der Herstellung von gekrümmten Bauteilen besteht neben den Herausforderungen in der Kontrolle des Harzflusses auch noch die Problematik der Verformbarkeit der Holzschichten. Die Firma Pollmeier konnte im Rahmen des Projektes nur trockene Furniere in einer Stärke von ca. 3,5 mm zur Verfügung stellen. Diese waren unmöglich großflächig lediglich mit der Kraft des Unterdrucks zu verformen. Der ursprüngliche Ansatz die Drapierbarkeit zu erhöhen, sah vor mit frisch geschälten Furnieren zu arbeiten. Dieser Ansatz konnte aus logistischen Gründen (begrenzte Haltbarkeit / Lagerfähigkeit), sowie aus technischen Gründen nicht weiterverfolgt werden. Die Verarbeitung von kleinen Furnierproben erfolgte in einer handelsüblichen konvektions-beheizten Vakuumpresse. Für die deutlich größeren Demonstrator-Bauteile stand keine solche Presse zur Verfügung. Es wurden verschiedene Konzepte erarbeitet, wie der Trocknungs- und Infusionsprozess bei den großen Bauteilen erfolgen kann. Kontaktwärme über Heizmatten, Heizdrähte, Wärmestrahler und Konvektionslösungen in einer isolierten Temperkammer wurden ausgearbeitet. Die Bewertung der Lösungen hinsichtlich Energieeffizienz, Anschaffungskosten, Brandschutz, Nachhaltigkeit führte dazu, den Ansatz zu verwerfen und mit trockenen Furnieren zu arbeiten.

In Vorversuchen zeigt sich, dass insbesondere bei Verformungen in zwei Richtungen, groß Spannungen in den Holzschichten entstehen können. Diese wurden teilweise mit einem Reißen der Furniere entlang der Wachstumsrichtung abgebaut. Um diesen Effekt kontrollierter ablaufen zu lassen, wurden die Furniere in 20 cm breite Steifen gesägt. Die Stöße wurden bei jeder zweiten Lage um jeweils 10 cm versetzt. Die Drapierbarkeit konnte somit deutlich verbessert werden. Trotzdem gab es große Schwierigkeiten bei der Evakuierung. Die Vakuumfolie tendierte unter das Laminat zu rutschen und riss somit ständig das Abdichtungsband vom Werkzeug. Dadurch brach schlagartig das Vakuum zusammen und die Furniere verloren ihre Vorspannung. Es war erst mit Hilfe von mehreren Arbeitern möglich, die Furniere zu biegen und somit einen Unterdruck aufzubauen und die Folie ohne Beschädigungen über die Hölzer zu ziehen. Bei dem recht kleinen Bauteil und der geringen Wandstärke von lediglich 20 mm, erschien es schon nicht praktikabel. Für größere Bauteile erscheint der Prozess so nicht umsetzbar.



Abbildung 132: in Streifen geschnittenen Furniere werden übereinander gestapelt und in den Zwischenschichten mit Basaltgewebe versehen (links); 6 Arbeiter versuchen die Furniere auf das Formwerkzeug zu drücken um einen Unterdruck zu erzeugen (rechts)

Unter den einzelnen Schichten des Infusionsaufbaus ist es sehr schwierig die Furniere an ihrer vorgesehenen Position zu halten. Durch die Krümmung des Werkzeuges rutschen die Lagen entsprechend dem Gefälle der Form. Die Basaltlagen sind davon genauso betroffen und weisen daher starke Ondulationen auf.

Die Geometrie des Bauteils konnte sehr gut abgebildet werden. An den Stoßstellen der Hölzer bilden sich jedoch Falten. Diese sorgen neben der Schwächung durch den Schnitt, zusätzlich zu Änderungen in den Materialeigenschaften. Das Gefälle auf der gebogenen Form beeinflusst den Harzfluss. Die Gravitation sorgt für eine Ansammlung von Epoxidharz an den tiefsten Stellen. Die Anhäufung von reaktivem Material führte im Versuch zu einer Temperaturüberhöhung und einer Schaumbildung des Kunststoffes.



Abbildung 133: infundierte Vorhangschale mit Wellen auf der Oberseite; Unterseite mit Falten in den Basaltfasern und schaumigen Stellen; Nahaufnahme der schaumigen Stellen (von links nach rechts)

## Literaturverzeichnis

- Ausschuss für Arbeitsstätten – ASTA-Geschäftsführung (2013) Technische Regeln für Arbeitsstätten. Fußböden. ASR A1.5/1,2
- Deutsches Institut für Bautechnik Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung. <https://www.dibt.de/de/wir-bieten/zulassungen-etas-und-mehr/allgemeine-bauaufsichtliche-zulassung-abz>. Accessed 07 Jan 2021
- Deutsches Institut für Bautechnik (2020) Veröffentlichung der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen. [www.dibt.de](http://www.dibt.de). Accessed 07 Jan 2020
- DIN EN 1991-1-3:2010-12 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten. DIN, Berlin
- DIN EN 789:2005-01 Holzbauwerke – Prüfverfahren Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen. DIN, Berlin
- DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau. DIN, Berlin
- DIN EN ISO 527-4:1997-07 (1997) Kunststoffe. Bestimmung der Zugeigenschaften. Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe. DIN, Berlin
- DIN EN 14374:2005-02 (2005) Holzbauwerke - Furnierschichtholz für tragende Zwecke - Anforderungen. DIN, Berlin
- DIN 18040-1:2010-10 (2010) Barrierefreies Bauen – Planungsgrundlagen – Teil 1: Öffentlich zugängliche Gebäude. DIN, Berlin
- DIN EN 1991-1-1:2010-12 (2010) Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau. DIN, Berlin
- DIN EN 1991-1-4:2010-12 (2010) Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten. DIN, Berlin
- DIN EN 1995-1-1:2010-12 (2010) Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. DIN, Berlin
- DIN EN 1995-2:2010-12 (2010) Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 2: Brücken. DIN, Berlin
- DIN EN 1990:2010-12 (2010) Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. DIN, Berlin
- DIN EN 1991-1-3/NA:2010-12 (2010) Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten. DIN, Berlin
- DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 (2010) Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten. DIN, Berlin
- DIN EN 1995-2/NA:2010-12 (2010) Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 2: Brücken. DIN, Berlin
- DIN EN 1995-1-1:2010-12 (2010) Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. DIN, Berlin
- DIN 68800-1:2011-10 (2011) Holzschutz – Teil 1: Allgemeines. DIN, Berlin
- DIN 1052-100:2012-05 (2012) Herstellung und Ausführung von Holzbauwerken – Teil 10: Ergänzende Bestimmungen. DIN, Berlin
- DIN EN 408:2012-10 (2012) Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften. DIN, Berlin
- DIN 68800-2:2012-02 (2012) Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. DIN, Berlin
- DIN EN 335:2013-06 (2013) Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Gebrauchsklassen: Definitionen, Anwendung bei Vollholz und Holzprodukten. DIN, Berlin
- DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 (2013) Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. DIN, Berlin
- DIN EN 13986:2015-06 (2015) Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen –Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung. DIN, Berlin

- DIN EN 350:2016-12 (2016) Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Prüfung und Klassifizierung der Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten gegen biologischen Angriff. DIN, Berlin
- Informationsdienst Holz (2019a) Tragwerksplanung von Holzbrücken. Reihe 1
- Informationsdienst Holz (2019b) Tragwerksplanung von Holzbrücken. Reihe 1 Teil 9, Folge 2
- Marutzky R, Willeitner H, Radovic B, Hertel H, Grosser D (eds) (2013) Holzschutz. Praxiskommentar zu DIN 68800, Teile 1 bis 4, 2., vollständig überarbeitete Auflage. Bauwesen Kommentar. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich
- Özdemir Ö. (2022): Erstellung einer Datenbasis zur Einschätzung der Umweltauswirkungen von Geh- und Radwegbrücken und Entwicklung eines LCA-Tools für Infrastrukturbauwerke. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2022.
- Özdemir, Ö, Hafner A. (2023): Abschlussbericht Teilprojekt Ökologische Betrachtung von Bioverbundwerkstoffen im Rahmen des Projektes FreiFo.
- Schnellen M. (Masterarbeit): „Herstellung, Test und Simulation von Hybridmaterialien aus Holzfurnieren und Faserverbundwerkstoffen“ der TU-Braunschweig vom 21.9.2020