

Schlussbericht Teil I

zum Vorhaben



SUMATHRA

SUBSTITUTION KONVENTIONELLER
MATERIALIEN FÜR DEN LEICHTBAU
DURCH HOLZ-HYBRIDE MIT ALBASIA

Verbundprojekt:

Substitution konventioneller Materialien für den Leichtbau durch Holz-Hybride auf Basis von Albasiaholz

Laufzeit: 01.09.2021 – 31.03.2025

Autoren:

Feser, Thomas¹; Heyner, David¹; Schulze, Maik¹; Strel, Dennis¹; Beeh, Elmar¹; Mamber, Marie², Schneider, Matthias², Kuhn, Christian², Happ, Felix²; Kruger, Berthold³; Kohl, Daniel⁴; Stojic, Slobodan⁵;

¹Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Fahrzeugkonzepte

²Alfred Kiess GmbH

³Broszeit GmbH

⁴Volkswagen AG

⁵Fairventrues Worldwide gGmbH

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 03LB2033 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ptj
Projekträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

Inhaltsverzeichnis

I.	Abbildungsverzeichnis.....	III
1	Schlussbericht Teil I.....	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens	2
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	2
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens.....	3
1.4.1	Verwendung von Holz in Fahrzeugstrukturen	4
1.4.2	Bauweisen und Werkstoffe heutiger Fahrzeugstrukturen und Nutzfahrzeugaufbauten	9
1.4.3	Potentiale von Albasiaholz	17
1.4.4	Fazit Stand der Technik.....	22
1.5	Zusammenarbeit der Partner	23
2	Literaturverzeichnis	24

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: GANTT-Chart in der finalen Version	3
Abbildung 2: Holzrahmen des Morgan Plus Four (Ein echter Sportler - Morgan Plus Four: Ganz schön neu, trotz Holzrahmen krone.at https://www.krone.at/2111477)	4
Abbildung 3: Erster Demonstrator Projekt HAMMER: Seitenverstärkungsstrebe eines Serien-PKW [1].....	6
Abbildung 4: Ergebnis der bauteilvergleichenden Prüfung des HAMMER-Demonstrators mit dem äquivalenten Serienbauteils aus pressformgehärtetem Stahl.....	6
Abbildung 5: Vergleich der Ergebnisse Projekt „Wood C.A.R.“ [4]	7
Abbildung 6: Baugruppen für Schienen- und Straßenfahrzeuge im Projekt For(s)tschritt	8
Abbildung 7: Holzbasierte Türinnenstruktur mit Türaufprallträger im Projekt For(s)tschritt	9
Abbildung 8: Lokal mit FVK verstärkte B-Säule [9]	11
Abbildung 9: Prototypische B-Säulenverstärkung eines Golf V [10].....	11
Abbildung 10: Einbausituation der B-Säulenverstärkung [10]	12
Abbildung 11: U-Shift Fahrzeugkonzept [10].....	14
Abbildung 12: Querschnitt eines Nutzfahrzeugaufbaus in Sandwichbauweise	14
Abbildung 13: Konzept der U-Shift Güterkapsel in innovativer Holzbauweise	15
Abbildung 14: Horizontalschnitt durch Aufzugskabine	17
Abbildung 15: Vertikalschnitt durch Aufzugskabine.....	17
Abbildung 16: Beispiele für den Einsatz von Balsaholz.....	18
Abbildung 17: Beispiele für Formholzteile.....	21
Abbildung 18: Furnierverbund aus Albasiaholz	21

1 Schlussbericht Teil I

1.1 Aufgabenstellung

In vielen Anwendungen, in denen Güter oder Personen transportiert werden, spielt der Leichtbau eine entscheidende Rolle, um die Effizienz zu steigern. Allerdings stehen die derzeit eingesetzten Leichtbau- und Hybridwerkstoffe oft im Widerspruch mit den Prinzipien der Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung. Gesetzliche Bestimmungen und gesellschaftliche Erwartungen zur Reduktion von CO₂-Emissionen, sowohl im Betrieb als auch in der Produktion, werden kontinuierlich verschärft. Ähnliche Anforderungen gelten für das Recycling und die End-of-Life-Szenarien der verwendeten Werkstoffe und Bauteile.

Eine Schlüsseltechnologie, um diesen Konflikt zu lösen, ist der Einsatz von Werkstoffen, die CO₂ binden. Holz, insbesondere das Holz des Sengon-Baumes (Albasia), hat aufgrund seiner hervorragenden spezifischen mechanischen Eigenschaften und seines hohen Leichtbaupotenzials zunehmendes Interesse in der Forschung und Entwicklung geweckt. Besonders in Hybrid- und Sandwichwerkstoffen bietet Albasia ein großes Potenzial für nachhaltigen Leichtbau.

Das Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung, Charakterisierung und umfassende Prüfung innovativer Materialsysteme auf Basis von Albasiaholz. Diese sollen in Fahrzeugstrukturen sowie im Aufzugbau angewendet werden, um CO₂-intensive Materialien zu ersetzen. Drei konkrete Anwendungen sind vorgesehen: die Anwendung in einer crashbelasteten Automobilstruktur, die maßgeblich zur Steifigkeit und Lastverteilung in der Karosserie beiträgt, das Batteriegehäuse vor einem Seitenauftprall gegen Pfahl schützt und derzeit aus Aluminium gefertigt wird; der Kofferaufbau eines kleinen Nutzfahrzeugs, wo hohe mechanische Belastungen bei Be- und Entladung vorliegen und bislang hauptsächlich Sandwichmaterialien aus Aluminium und petrochemische Schäume für den Leichtbau verwendet werden; sowie die Verwendung als Plattenware für Aufzüge, wo typischerweise 1,5 bis 2 mm dicke Edelstahlplatten eingesetzt werden.

Neben den hervorragenden mechanischen Eigenschaften bietet Albasiaholz auch gute akustische und thermische Dämmeigenschaften, wodurch eine zusätzliche Dämmung erzielt und Gewicht durch sekundären Leichtbau sowie weitere CO₂-intensive Materialien und Kosten eingespart werden können. Albasiaholz erfüllt die Brennprüfung nach ISO 3795 sowie ECE R118 und ist somit für die Nutzung im Fahrzeuginnenraum sowie für den Innenausbau in Gebäuden geeignet.

Das Projekt zielt darauf ab, neue Alleinstellungsmerkmale für die beteiligten Projektpartner zu schaffen und einen bedeutenden Beitrag zur Erreichung der Nachhaltigkeits- und Klimaziele zu leisten. Durch die Integration von Albasiaholz in den Mobilitätssektor und branchenübergreifend wird ein wichtiger Schritt in Richtung nachhaltiger und ressourcenschonender Technologien gemacht.

1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Das Vorhaben war nur durch die Zusammenführung unterschiedlicher Kompetenzen der beteiligten Partner erfolgreich zu bearbeiten.

Die geförderten Partner in dem Projekt sind:

- Alfred Kiess GmbH, Stuttgart
- Broszeit GmbH, Baindt-Schachen
- Volkswagen AG – Group Innovation, Wolfsburg
- Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e. V. - Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart
- Fairventures Worldwide gGmbH, Stuttgart

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde ursprünglich mit einer Laufzeit von 3 Jahren, beginnend ab dem 01.09.2021 geplant. Aufgrund der Corona-Pandemie fanden die ersten Projekttreffen Online statt und führten bereits im ersten Projekthalbjahr zu Verzögerungen bei den Projektpartnern. Trotzdem arbeiteten die Projektbeteiligten partnerschaftlich und erfolgreich zusammen. Dennoch kam es zu Verzögerungen bei der Finalisierung der Bauteilkonstruktion, wodurch Teilefertigung der Prototypen und Versuch mehr Zeit in Anspruch nahm, als ursprünglich geplant. Daher entschieden die Partner die Beantragung einer kostenneutralen Verlängerung des Projektes um 7 Monate bis zum 31.03.2025, was seitens des Projekträgers genehmigt wurde. Der ursprünglich geplante Ablauf des Vorhabens ist im folgenden GANTT-Chart arbeitspaketsspezifisch dargestellt.

	Projektorganisation (Laufzeit 01.09.2021 - 31.08.2024)	R-A-S-I				Förderjahr 1	Förderjahr 2	Förderjahr 3	
		Alfred Kress GmbH	Broseit Group	DLR	FairVentures Worldwide				
AP0	Projektorganisation und Projektkoordination	S	S	R	S	S			
AP0.1	Teilnahme an Projekttreffen, erstellen von Projektberichten, Öffentlichkeitsarbeit	S	S	R	S	S			
AP0.2	Rechtsfragen und Patente	I	I	R	I	I			
AP1 Anforderungsanalyse und Auswahl geeigneter Referenzstrukturen		S	I	S	R	S			
AP1.1	Technologietransfer (Erfahrungen mit Albasia aus anderen Branchen insb. Baubranche)	I	I	I	R	I			
AP1.2	Erstellen eines Anforderungsprofils und Auswahl einer geeigneten Referenzstruktur "Aufzug" (z.B. Brandschutz)	R	I	I	I	I			
AP1.3	Erstellen Anforderungsprofil für den Anwendungsfall "Fahrzeugaufbau" (Nutzfahrzeuge, Wohnmobile) (z.B. Witterungsbeständigkeit)	I	I	R	I	I			
AP1.4	Erstellen Anforderungsprofil und Auswahl einer geeigneten Referenzstruktur "PKW" (z.B. mechanische Lasten)	I	I	S	I	R			
AP2 Konzeption, Konstruktion und Auslegung von Baugruppen		S	S	S	I	R		M1	
AP3 Entwicklung eines geeigneten hybriden Materialsystems		S	S	R	S	S			
AP3.1	Entwicklung unterschiedlicher Materialaufbauten - Fokus "Sandwich", "Holz" und "Albasia"	S	S	R	I	S			
AP3.2	Auswahl von geeigneten Decklagenmaterialien (z.B. Buche)	S	S	R	S	S			
AP3.3	Auswahl von geeigneten Kernmaterialien insb. Albasia	S	S	R	S	S			
AP4 Auslegung (Berechnung und Simulation)		S	S	R	I	S			M2
AP4.1	Bewertung durch Berechnung und Vergleich zum Stand der Technik	S	S	R	I	I			
AP4.2	Simulation Baugruppe "PKW" für quasistatische- und Crashlastfälle	I	I	R	I	S			
AP5 Auswahl geeigneter Prozesse und Fertigung		S	R	S	I	S			M3
AP6 Auswahl geeigneter Fügeverfahren		S	S	R	I	S			
AP6.1	Auswahl und Prüfung geeigneter Klebstoffe	S	R	S	I	S			
AP6.2	Auswahl und Prüfung geeigneter punktförmiger Fügeelemente	S	S	R	I	S			
AP7 Charakterisierung des Materialsystems		S	S	R	I	S			M4
AP7.1	Mechanische Charakterisierung (Ermittlung von Material- und Verbundegenschaften)	I	S	R	I	I			
AP7.2	Alterung des Verbundes (Klimawechselfest, Korrosionsbeständigkeit)	S	S	R	I	S			
AP7.3	Untersuchungen zum Brandschutz für den Use-Case "Aufzug"	R	I	S	I	I			
AP7.4	Erstellen einer Materialkarte für die Simulation (Untersuchungen auf Couponebene)	I	I	R	I	S			
AP7.5	Prüfung von prototypähnlichen Fahrzeugstrukturen unter quasi-statischer und dynamischer Belastung	I	I	R	I	S			
AP8 Aufbau von Demonstratoren		R	I	I	I	S			
AP9 Technologiebewertung		S	S	S	R	S			M5
M1 Anforderungsanalyse durchgeführt, Baugruppen konzipiert und konstruiert									
M2 Rechnerische Auslegung und Simulation abgeschlossen									
M3 Hybride Materialsysteme entwickelt, Fertigungsprozesse definiert und Platten, Bauteile und Probekörper hergestellt									
M4 Materialsystem charakterisiert, Materialkarte erstellt, Probenkörper und prototypähnliche Fahrzeugstrukturen geprüft									
M5 Demonstratoren aufgebaut und Nachweis des ökonomischen und ökologischen Potentials erbracht									

Abbildung 1: GANTT-Chart in der finalen Version

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Im folgenden Kapitel wird der Stand der Technik dargelegt. Hierbei soll der aktuelle Forschungsstand von der Anwendung von Holz in Fahrzeugstrukturen dargelegt werden. Es wird vor allem auf Forschungsprojekte eingegangen, die die Anwendung von Holz in Strukturen der Mobilität zum Thema hatten. Im Detail handelt es sich dabei um die Projekte „HAMMER“ [1], „Wood C.A.R“ [2] und For(s)tschritt [3]. Des Weiteren werden Bauweisen und Strukturen von Fahrzeugstrukturen, insbesondere Nutzfahrzeugaufbauten sowie Aufzugstrukturen thematisiert. Abschließend wird das Potenzial von Albasiahholz aufgezeigt. Teile des Stands von Wissenschaft und Technik sind dem Abschlussbericht des Projekts For(s)tschritt [3] bzw. der Vorhabensbeschreibung des Projekts For(s)tschritt entnommen.

Ein erster grundlegender Ansatz, das Potenzial des Werkstoffs Holz für den strukturellen Einsatz für die automobile Serienfertigung zu untersuchen, ist das BMBF-Verbundprojekt „Holzformteile als Multi-Materialsysteme für den Einsatz im Fahrzeug-Rohbau – HAMMER“, welches im April 2016 abgeschlossen wurde. Ziel des Forschungsprojektes war der Einsatz von Holzformteilen als alternatives, innovatives und nachhaltiges Multimaterialsystem (MMS) für strukturelle, ressourceneffiziente und nachhaltige Komponenten von Fahrzeugstrukturen.

1.4.1 Verwendung von Holz in Fahrzeugstrukturen

In Serienanwendungen in der Mobilität werden aktuell zwar an verschiedenen Stellen Holz und Holzwerkstoffe eingesetzt. Einzelnen, nicht-strukturellen Anwendungen von Holzwerkstoffen, stehen hierbei eine Vielzahl von Holzfaseranwendungen und Anwendungen von Holzpulver in z.B. Kaschierungen und als Füllstoffe für polymere gegenüber. Die Einsatzgebiete beschränken sich auf einfache wenige Anwendungen wie z.B. Ladeböden in Kraft- und Nutzfahrzeugen.

Einzelne aktuelle Beispiele und frühere Fahrzeugkonzepte zeigen, dass der grundsätzliche Einsatz von Holz in mobilen Anwendungen auch in struktureller Form möglich ist. Ein Beispiel hierfür ist der Morgan Plus Four (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Holzrahmen des Morgan Plus Four (Ein echter Sportler - Morgan Plus Four: Ganz schön neu, trotz Holz-rahmen | krone.at <https://www.krone.at/2111477>)

Diese Anwendungen beschränken sich jedoch auf sehr spezielle Technologieträger und lassen ihre Ansätze nicht auf Großserien, welche für ressourcen- und klimaorientierte Skaleneffekte notwendig sind, übertragen.

Auch im Bereich der Wissenschaft gab es verschiedene Ansätze Holz im Zuge von Design-Studien oder Concept-Cars zu verwenden. Derzeit gibt es drei größere Forschungsprojekte die sich mit dem Einsatz von Holz in Fahrzeugstrukturen befassen. Dazu zählt das Projekt Wood C.A.R. in Österreich [4], das bereits abgeschlossene Projekt HAMMER [1] und das Projekt For(s)tschritt [3] in Deutschland an dem das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und die Volkswagen Aktiengesellschaft beteiligt war. In allen drei Projekten wird aufgrund der regionalen Verfügbarkeit der Fokus auf den Einsatz von Buchenholz gelegt.

Ein erster grundlegender Ansatz, das Potenzial des Werkstoffs Holz für den strukturellen Einsatz für die automobile Serienfertigung zu untersuchen, ist das BMBF-Verbundprojekt „Holzformteile als Multi-Materialsysteme für den Einsatz im Fahrzeug-Rohbau – HAMMER“, welches im April 2016 abgeschlossen wurde. Ziel des Forschungsprojektes war der Einsatz von Holzformteilen als alternatives, innovatives und nachhaltiges Multimaterialsystem (MMS) für strukturelle, ressourceneffiziente und nachhaltige Komponenten von Fahrzeugstrukturen.

Durch das Projekt HAMMER wurde ein erster systematischer Ansatz verfolgt, um Holz in struktureller Bauweise in zukünftigen Fahrzeugprojekten einzusetzen. Über die angesprochenen Designstudien oder Concept-Cars hinausgehend, wurde die Integration des Werkstoffs im ganzheitlichen Sinne und mit Blick auf die industriellen Prozessketten verfolgt. Durch die Erarbeitung eines einsatztauglichen Demonstrators (siehe Abbildung 3) wurden neben der Darstellung der prinzipiellen Machbarkeit auch wesentliche Kenntnisse hinsichtlich Werkstoffkennwerten, Werkstoffverhalten sowie Einsatzpotenzial des Werkstoffs bereitgestellt [5] [6] [7].

Grundlegend basiert die Herstellung von Formholz auf der Verklebung und gleichzeitigen Verformung von dünnen Holzfurnierschichten. Bei holzbasierten Materialsystemen mit nicht-Holz-Materialien (Metall, Textilien) müssen spezielle Klebstoffsysteme verwendet werden. Die mit Klebstoff benetzten Verbundlagen werden individuell ausgerichtet, in einem Heißpressprozess verbunden und dabei in dreidimensionale Form gebracht. Dabei entsteht, wie bei der Herstellung anderer Sandwichstrukturen, ein stabiles Verbundbauteil. Wichtiges Kriterium für die Funktion einer derartigen Bauweise ist die Formtreue der Holzstruktur. Diese wird über eine automatisierte Klassifizierung der Holzfurniergüte und durch genaue Einhaltung der Fertigungsparameter möglich. Bei wenig gekrümmten Bauteilen ist auch das Einlegen dünner metallischer Bleche als Zwischenschicht zwischen Holzlagen möglich. Dadurch kann beispielsweise eine zweite, innenliegende und durch eine Furnierschicht verdeckte Metallschicht in ein Bauteil eingebracht werden. Alternativ können hier aber auch weitere funktionale Schichten, wie z. B. eine dünne Lage aus technischen Fasern, eingebaut werden, um z. B. eine Splitterbildung im Crashfall zu verhindern.

Eines der wichtigsten Ergebnisse des Projekts HAMMER war die bauteilvergleichende Prüfung des finalen Demonstrators auf Basis eines holzbasierten Multimaterial-Verbunds. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Leistungsfähigkeiten des Demonstrators (Abbildung 3) im Vergleich zum äquivalenten Serienbauteil aus Stahl unter quasi-statischer Belastung (Originaltest VW). Hieraus ergibt sich eine Festigkeit des Holzteils, welche in gleicher, tendenziell höherer, Größenordnung (bei in dem Fall nur leicht erhöhtem Gewicht) im Vergleich zum Stahlbauteil liegt. Hierdurch konnte gezeigt werden, dass selbst eine – für den Werkstoff Holz nicht optimale – Substitutionsbauweise aus holzbasierten Multimaterialsystemen sehr gute Ergebnisse liefern kann. Vor diesem Hintergrund wird umso deutlicher, dass eine werkstoffgerechte Bauteilauslegung in Verbindung mit einer bauteilübergreifenden Integration des Werkstoffs, die Vorteile des Werkstoffs Holz in technischen Anwendungen nutzbar machen kann.

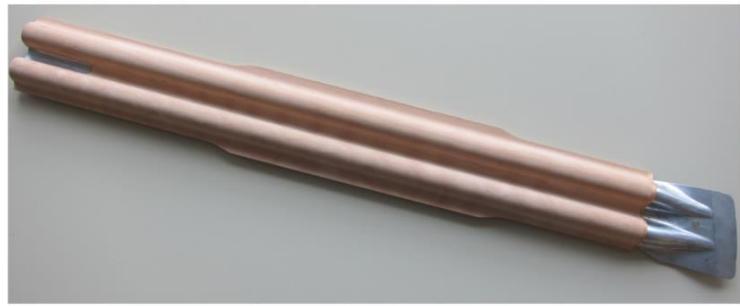
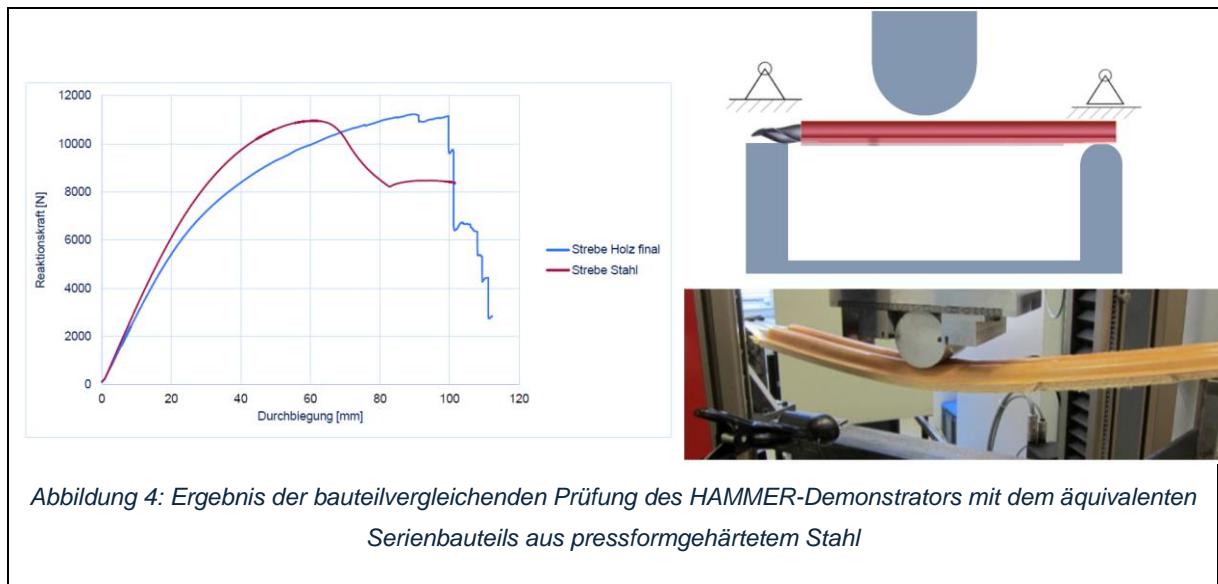


Abbildung 3: Erster Demonstrator Projekt HAMMER: Seitenverstärkungsstrebe eines Serien-PKW [1]



Neben dem Projekt HAMMER [1] gibt es das Projekt „WoodC.A.R“ [4], das sich ebenfalls mit dem Einsatz von Buchenholz in Fahrzeugstrukturen beschäftigt. Der Fokus liegt in diesem Projekt auf Straßenfahrzeugen und holzintensiven Fahrzeugkonzepten. Innerhalb des Projektes wurde auch ein Türaufprallträger betrachtet. Ergebnisse der Prüfung können Abbildung 5 entnommen werden.

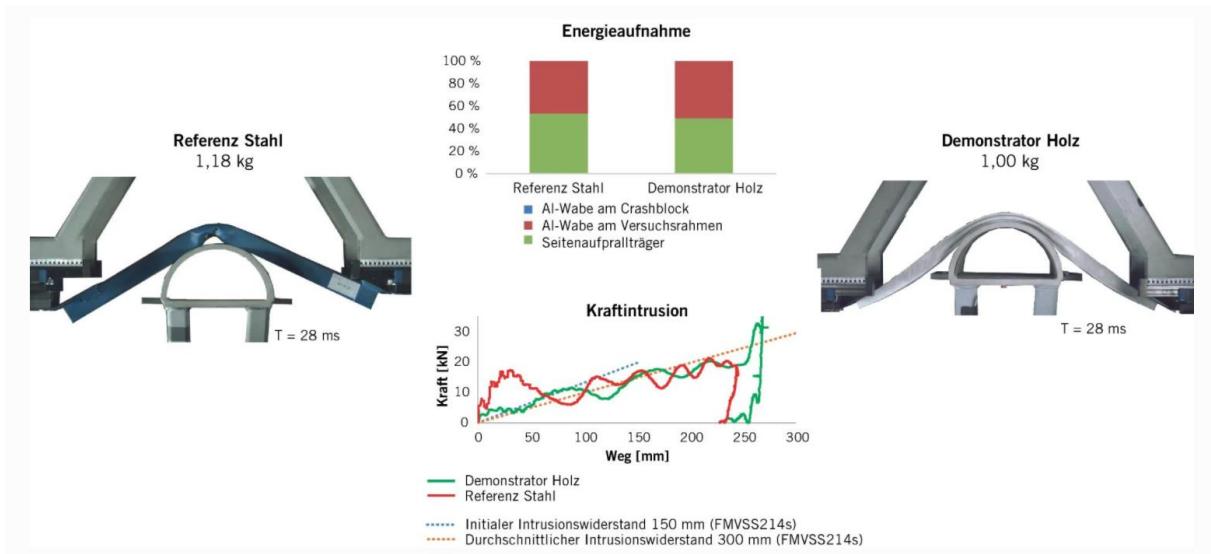


Abbildung 5: Vergleich der Ergebnisse Projekt „Wood C.A.R.“ [4]

Im Projekt Wood C.A.R. wurden Hybridwerkstoffe auf Basis von Holz, Viskosegewebe und einem Papierwabenkern untersucht. Das Viskosegewebe soll dabei die niedrige Bruchdehnung des Holzes kompensieren und eine große Deformation ermöglichen.

In Abbildung 5 sind vergleichend die Ergebnisse der dynamischen Prüfungen von der Referenz in Stahl und dem Demonstrator in Holz dargestellt (in Abbildung 5 links bzw. rechts). In der Mitte sind die Ergebnisse der quasistatischen Versuche mit den Kraft-Weg-Verläufen dargestellt. Die Versuche wurden mit Rückhaltekräften an beiden Seiten zur Darstellung der späteren Einbaulage des Trägers durchgeführt. Insbesondere im Deformationsbereich bis 50 mm liegt das Kraftniveau deutlich unterhalb der Referenz. In Summe zeigt sich jedoch, dass die insgesamt absorbierten Energien zwischen Referenz und Demonstrator vergleichbar sind. Als problematisch ist die anfangs zu niedrige Steifigkeit der Träger und das zu niedrige Kraftniveaus zu nennen.

Ein weiteres großes Forschungsprojekt das sich mit dem Einsatz von Holz in Fahrzeugstrukturen befasst ist das Projekt For(s)tschritt.

Im Projekt For(s)tschritt, welches durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über eine Laufzeit von drei Jahren gefördert wurde, um das Leichtbaupotenzial von Holz im Materialverbund mit metallischen Werkstoffen zu erhöhen. Hierfür wurden neben der Charakterisierung holzbasierter Multimaterialsysteme zur Erstellung von Simulationsmodellen auch strukturelle Baugruppen für Schienen- und Straßenfahrzeuge als Demonstratoren gefertigt und geprüft (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Baugruppen für Schienen- und Straßenfahrzeuge im Projekt For(s)tschritt

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde der Einsatz von Buchen-Holzfurnieren näher untersucht. Dazu wurden verschiedene Konzepte erarbeitet, die von einem Einsatz des Materials zur Verstärkung dünner Bleche bis hin zu vollständig aus Holz gefertigten Strukturbaukomponenten, die nur lokal mit Blech verstärkt wurden, reichten. Insgesamt wurden drei unterschiedliche Referenzbaugruppen betrachtet – die Seitenwand eines Schienenfahrzeugs, eine Schienenfahrzeugtür und ein Türaufprallträger.

Der Einsatz von Holz ist mit vielfältigen Herausforderungen verbunden. Dazu zählen beispielsweise die streuenden Materialkennwerte von Holz, die Abhängigkeit der Materialeigenschaften von der Umgebung feuchte und das Korrosionsverhalten. Diesen Problemstellungen wurde durch konstruktive Maßnahmen und wissenschaftliche Untersuchungen von Wechselwirkungen und möglichen Lösungsansätzen begegnet.

Für das Referenzbauteil „Tür-Straßenfahrzeug“ wurde beim Projektpartner Volkswagen eine vollständige Tür mit holzbasierter funktionsintegrierter Türinnenstruktur aufgebaut und am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt einem Crashtest mit Pfahl unterzogen.

Die funktionsintegriert Holzinnenstruktur (siehe Abbildung 7) ersetzt eine Vielzahl von Stahlkomponenten wie dem Türaufprallträger und den Scharnierverstärkungen durch ein furnierholzbasiertes Bauteil. Durch eine gezielte Hybridisierung mit einem dünnen Stahlband wird die Crashperformance des Bauteils optimiert. Das Gewicht der prototypisch gefertigten Tür lag noch oberhalb der Referenz-Tür. Ein Grund hierfür ist die zum Teil händischen Fertigung. Auf Basis bestehender Erfahrungen aus den anderen Referenzbaugruppen kann allerdings davon ausgegangen werden, dass sich die errechnete Gewichtsneutralität zur Referenztür erreichen lässt.

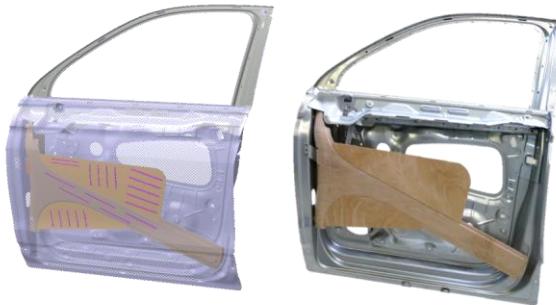


Abbildung 7: Holzbasierte Türinnenstruktur mit Türaufprallträger im Projekt For(s)tschritt

Durch ein spezielles Prüfstandkonzept konnten die Deformationen an den Scharnieranbindungen, das Abgleiten der Tür an der B-Säule und die Anbindung am Türschloss vergleichbar zum Gesamtfahrzeugcrash abgebildet werden. Im Versuch schlägt der Schlitten mit Pfahlaufbau (Masse ca. 841 kg) bei einer Geschwindigkeit von 8,31 m/s in die Tür ein. Es konnte gezeigt werden, dass die Intrusion des Pfahls nur knapp oberhalb der Referenztür lag. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Holz-Hybridtür mehr Energie absorbierte als die Referenz.

Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens war die Qualifizierung von buchenholzbasierten Multimaterialsystemen für den Einsatz in Fahrzeugstrukturen der Zukunft. So sollten ökonomisch und ökologisch attraktive Alternativen zu bestehenden Materiallösungen geschaffen werden. Die entwickelte Holzbasierte Türinnenstruktur besteht zu knapp 90% aus Furnierschichtholz und zeigt eindrucksvoll das Potential von Holz auch in sicherheitsrelevanten Baugruppen die extrem hohen mechanischen Lasten ausgesetzt sind. Sowohl im Projekt Wood C.A.R als auch in For(s)tschritt wird aufgrund der regionalen Verfügbarkeit und des Nachhaltigkeitsanspruches der Fokus auf den Einsatz von Buchenholz gelegt. Durch die Aktivitäten der Fairventures Worldwide gGmbH kann mit Albasia eine nachhaltige Alternative aus dem Bereich der „Leichthölzer“ geschaffen werden. Daraus ergeben sich völlig neu Anwendungsfelder, die insbesondere den Einsatz als Kernwerkstoff für leichte Verbundplatten ermöglichen.

1.4.2 Bauweisen und Werkstoffe heutiger Fahrzeugstrukturen und Nutzfahrzeugaufbauten

1.4.2.1 Bauweisen von flächigen PKW-Strukturen

Flächige Strukturen von serienmäßigen Pkw werden nach dem Stand der Technik üblicherweise einschalig, durch Tiefziehen eines Aluminium- oder Stahlbleches hergestellt. In Einzelfällen werden auch einschalige, flächige CFK-Bauteile verwendet. Da ein solches großflächiges, einschaliges Bauteil eine geringe Steifigkeit aufweist, werden derartige Strukturen mit lokalen Trägern oder Verstärkungen verklebt oder verschweißt. Wegen der

Neigung zur Geräuschentwicklung durch Vibration bei dünnwandigen Blechstrukturen und die gute Wärmeleitung des Metalls, werden außerdem zusätzliche Dämmmatten für die Schall- und Wärmeisolation verwendet. Im Innenraumbereich, z.B. im Boden- oder Dachbereich, werden die Blechstrukturen in der Regel durch Verkleidungsteile verdeckt [8].

Die Einzelteile einer Karosserie werden fast ausschließlich im Karosseriebau gefügt. Im Anschluss durchläuft die Rohkarosserie die Lackiererei mit allen vorbehandelnden und farbgebenden Prozessschritten sowie die Wärmetrockner mit bis zu 205°C. Im Bereich Montage erfolgt danach die Komplettierung des Ex- und Interieurs sowie das Verbinden mit Fahrwerk und Antriebsstrang. Nur in Einzelfällen ist es möglich, im Bereich Montage Karosserieteile zu verbauen.

Stand der Fügetechnik an metallischen Karosserien sind sowohl thermische Fügeverfahren wie Widerstandspunktschweißen, MIG und Laserschweißen als auch mechanische Fügeverfahren wie FDS, Nieten, Schrauben und Durchsetzfügen. Diese Verfahren werden sehr oft mit Kleben kombiniert. Für den Bereich Karosseriebau kommen dafür heißhärtende 1-komponentige Klebstoffe auf der Basis von Epoxidharz oder Kautschuk zum Einsatz. In der Montage werden einkomponentige feuchtigkeitsvernetzende oder 2-komponentige Polyurethane oder MS-Polymere verwendet.

1.4.2.2 Bauweisen von lokalen Verstärkungsteilen in PKW

Heutige Karosseriesstrukturen werden auf vielfältige Weise lokal verstärkt. Im Einsatz sind Verstärkungen durch lokale Blechdickenanpassungen, wie z.B. sog. Tailored Blanks oder lokale Zusatzteile, wie z.B. Querstreben. Dabei unterscheiden sich die eingesetzten Technologien stark durch die lokal unterschiedlichen Lastfälle.

In diesem Projekt wurden insbesondere Verstärkungsteile im Schweller in Betracht gezogen. Kritische Lastfälle für diese Teile sind die bei einem Unfall quer zur Fahrtrichtung eingeleiteten Kräfte, welche zu einer Durchbiegung/Eindrückung und zum Kollabieren der genannten Strukturen führen können. Neben der Verwendung immer höherfesterer Materialien, können leichte, lokal angebrachte flächige Verstärkungselemente helfen, die spezifische Beulsteifigkeit eines Bauteils gezielt zu erhöhen. Hierzu wurde in vergangenen Projekten u.a. mit Verstärkungspatches aus Faserverbund experimentiert. Diese werden auf den metallischen, vorgeformten Grundträger laminiert, meist unter Nutzung von Epoxidharzen (siehe Abbildung 8).



Abbildung 8: Lokal mit FVK verstärkte B-Säule [9]

Diese Bauweisen sind in der Lage, die Masse des Gesamthauteils durch bessere lokale Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften zu senken, allerdings sind diese Materialien teuer und die Herstellung ist energieintensiv. [9]

Ein Beispiel für die lokale Einbringung von faserverstärkten Kunststoffbauteilen in der Karosserie wurde in einem Kooperationsprojekt zwischen Volkswagen, BASF sowie KraussMaffei Technologies erarbeitet und ist in Abbildung 9 dargestellt. Es handelt sich dabei um eine prototypische B-Säulenverstärkung, welche der Energieaufnahme im sogenannten Pfahl-Crashtest für den Nordamerikanischen Markt dient. Durch die Verwendung von glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) anstatt Stahl konnte das Gewicht dieses Bauteils um 36 % reduziert werden.



Abbildung 9: Prototypische B-Säulenverstärkung eines Golf V [10]

Das Bauteil wurde im RTM-Verfahren mit einer thermoplastischen Matrix gefertigt und an die bestehende Stahlstruktur der B-Säule innen geklebt (siehe Abbildung 10).

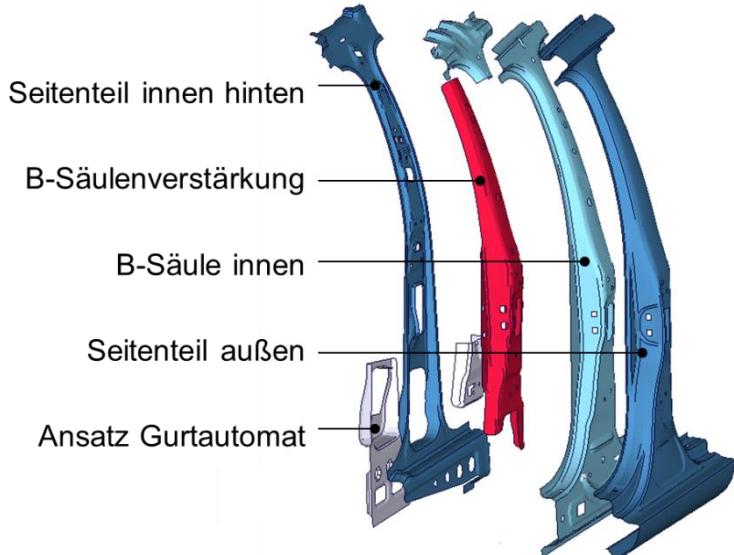


Abbildung 10: Einbausituation der B-Säulenverstärkung [10]

Derartige Komponenten können bei der Einzelteilherstellung eingebracht werden. Ein nachträgliches Einbringen an bereits gefügte Strukturen wäre nur sehr eingeschränkt möglich. Die so vorgefertigten lokal verstärkten Blechstrukturen müssten im Karosseriebau in die Fahrzeugstruktur integriert werden und anschließend die Lackiererei durchlaufen. Nur in Ausnahmefällen könnten derartige Strukturen im Montagebereich eingebracht werden.

Im Zuge der Elektrifizierung des Antriebsstranges ergeben sich neue Herausforderungen in der Auslegung crashbeanspruchter Strukturen. Insbesondere beim Seitenauftprall muss eine zu große Verformung des Batteriegehäuses vermieden werden, um eine Schädigung der Batterie die zu einem Batteriebrand führen kann zu verhindern. Hierfür werden im Stand der Technik Verstärkungen in den seitlichen Schwelleren und besonders widerstandsfähige Batteriegehäuse eingesetzt. Eine weitere Herausforderung, die durch die Elektrifizierung entsteht, ist das hohe Batteriegewicht und das damit verbundene hohe Fahrzeuggewicht. Dies bedeutet im Crashfall ebenfalls höhere Energien und damit gegebenenfalls höhere Intrusionen.

1.4.2.3 Bauweisen von Unterstrukturen und Kofferaufbauten von Nutzfahrzeugen

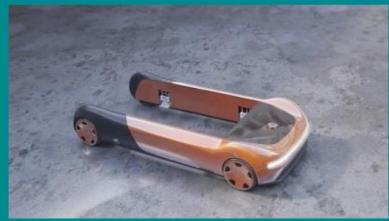
Bei dem innovativen DLR Fahrzeugkonzept „U-Shift“ handelt es sich um ein modulares Fahrzeugkonzept, bei dem das Fahrmodul, das sogenannte Driveboard, sowie die Kapseln für unterschiedliche Anwendungen voneinander getrennt sind. Die Idee hinter der Trennung ist, dass der Elektromotor und die Batterie im Driveboard untergebracht werden und dieses dauerhaft im Betrieb sein soll. Abhängig von Tragezeit und Verkehrsaufkommen soll das Driveboard verschiedene Kapselarten aufnehmen um zum Zielort transportieren. Kapseln können dabei je nach Verwendungszweck gestaltet werden. Das Konzept U-Shift ist in Abbildung 11 dargestellt. Neben den Personenkapselfen sollen damit auch Gütertransporte

realisiert werden. Güterkapseln können je nach Anwendung unterschiedlich ausgelegt werden. So sollen Kühlkapseln eine extra Batterie für den Kühltransport mitführen oder Kurier-Express-Paket (KEP) Dienste optimierte Postkapseln für den Pakettransport nutzen.

Zusätzlich soll im Fahrzeugkonzept U-Shift auf die Umweltbilanz in der Produktion eingegangen werden, indem der Einsatz nachwachsender und „grüner“ Werkstoffe in den Kapseln betrachtet werden soll.

Im Bereich der Kofferaufbauten für Nutzfahrzeuge werden im aktuellen Stand der Technik vorwiegend Aluminiumunterkonstruktionen eingesetzt, auf die ein Koffer in Sandwichbauweise gesetzt wird. Dabei werden besonders leichte und steife Platten genutzt die sich durch einen Polymerschaumkern mit Aluminium oder GFK Decklagen auszeichnen. Als Polymerkern kommen beispielsweise Polyethylen oder Polyurethan zum Einsatz. In Abbildung 12 ist beispielhaft ein vereinfachter Querschnitt dargestellt. Für diese Art der Kofferaufbauten bietet eine innovative Holzbauweise großes Potential. Wie in Abbildung 13 dargestellt, sehen Konzepte eine Holzbauweise für die U-Shift Güterkapsel vor. Der Polymerschaum in der Sandwichbauweise wird dabei durch großflächige Formholzplatten ersetzt, die mit Deckschichten aus Sperrholzplatten verstärkt werden. Besondere Anforderungen an diese Holzbauweise sind die Implementierung von Lasteinleitungspunkten für die Ladungssicherung.

Für die Unterstruktur der U-Shift Güterkapsel gibt es ebenfalls erste Konzepte für einen Aufbau in Holzbauweise. Hierfür werden Hut-Profile aus Formholz untersucht, die zu Querträgern zusammengesetzt werden. Im Konzept der Unterstruktur werden die Querträger mit Sperrholzplatten beplankt. Die Bodenkonstruktion in Holzbauweise wird am Rahmen der Güterkapsel befestigt, die mit dem Driveboard verbunden wird. Besondere Anforderungen an die Bodenstruktur sind die auftretenden mechanischen Lasten, Ladungssicherung, Miss-Use sowie Umwelteinflüsse.



„On-the-Road“ Modularisierung



City-Logistik:
KEP, Last-Mile,
Handel, Handwerk,
Stückgut, ...

ÖV:
People mover,
Quartiersbus,
Großraumtaxi, ...

MIV:
privat
individ. Kapseln
Taxi, Flotte, ...

Abbildung 11: U-Shift Fahrzeugkonzept [11]



Abbildung 12: Querschnitt eines Nutzfahrzeugaufbaus in Sandwichbauweise



Abbildung 13: Konzept der U-Shift Güterkapsel in innovativer Holzbauweise

1.4.2.4 Bauweisen und Werkstoffe von Aufzugstrukturen

Prinzipiell muss bei der Aufzugskabine in eine Rohkabine und die Auskleidung unterschieden werden.

Der Rohkabine fallen dabei eher funktionelle Themen wie Statik, Tragfähigkeit, Aussteifung, Verbindung zum Schacht, bzw. der Schienen und Steuerung zu. Bei der Auskleidung bzw. dem Ausbau der Kabine stehen eher Design und Beleuchtung im Fokus.

Die Rohkabine besteht aus einem Boden, einer Decke, sowie Stützen (Fangrahmen). Diese bestehen aus massiven Metallkonstruktionen. Weitere Komponenten können Wandverkleidungen, Kabinen- und Schachttüren, sowie Außen- und Innenportale sein. Diese Bestandteile müssen etwas gesondert betrachtet werden, da sie sowohl in einer Rohversion aus Blech ausgeführt werden, welches dann später verkleidet wird, als auch als fertige Sichtkabine. In letzterem Fall werden die Lamellen direkt aus dem sichtbaren Material (meistens Edelstahl oder andere Strukturmetalle) gefertigt.

Die Auskleidung der Kabine besteht aus einem Bodenbelag, einer abgehängten Decke mit Beleuchtung, einer Wandverkleidung, sowie Verkleidungen der Kabinen- und Schachttüren, sowie der Außen- und Innenportale.

Bodenbelag kann aus den verschiedensten Materialien bestehen, oft auch aus denselben wie außerhalb des Aufzugs (Stein, Parkett, Laminat, Linoleum, ...). Der Bodenbelag wird mit dem Boden der Rohkabine verklebt. Bei schweren Materialien wird häufig eine Verbundplatte verbaut, bestehend aus einer dünnen Schicht des schweren Sichtmaterials (z.B. Granit) und einer leichteren Trägerplatte (Aluwaben- oder Aluverbundplatte mit mineralischem Kern).

Die abgehängte Zwischendecke besteht überwiegend aus einer Metallblechdecke mit integrierter Beleuchtung (Spots oder häufig auch Flächenlichter). In manchen Fällen werden auch beschichtete oder lackierte Aluverbundplatten mit Kunststoff Kern benutzt. Bei manchen Aufzügen gibt es noch die Anforderung an einen Notausstieg. In diesem Fall muss die Zwischendecke abklappbar konzipiert sein. In wenigen Fällen gibt es keine Zwischendecke, hierbei handelt sich es dann um eine gestrichene Rohdecke mit integrierten Spots.

Portalverkleidungen bestehen überwiegend aus gekantetem Metallblech. Häufig werden noch Bedien- oder Anzeigeelemente integriert.

Türverkleidungen bestehen meistens aus gekantetem Metallblech, das um eine Metallunterkonstruktion befestigt wird. Hin und wieder wird die Tür auch mit Füllungen aus Glas ausgeführt.

Wandverkleidungen bieten vermutlich die größte Varianz in Ausführung und Material. Wie zu Beginn beschrieben, kann die Wandverkleidung direkt mit der Rohkabine verbunden, bzw. Teil der Rohkabine sein, als auch aufgedoppelt werden. Im ersten Fall handelt es sich meistens um vertikale Metallblech-Lamellen aus dem später sichtbaren Material (häufig Edelstahl, Strukturlbleche oder andere veredelte Metall-Oberflächen). Diese sind meistens ca. 2-3 mm dick, nach hinten gekantet und miteinander verschraubt (Siehe Skizze 1). In anderen Fällen wird die Wandverkleidung aus Glas oder Holzwerkstoffplatte direkt mit den Stützen verbunden. Wichtig ist in diesem Fall, dass eine ausreichende Biegefestigkeit und Stabilität erreicht wird und die Kabine vollständig geschlossen ist. Bei der aufgedoppelten Variante handelt es sich um eine vorgesetzte Wandverkleidung. Hierbei wird die gewünschte Sichtoberfläche meistens auf ein Trägermaterial geklebt und dann anschließend mit der Rohkabine verbunden. Die Verbindung zur Rohkabine erfolgt magnetisch, verschraubt oder geklebt (Siehe Skizze 2). Der Vorteil ist, dass sie so relativ unkompliziert auszutauschen sind. Als Trägermaterialien werden überwiegend Bleche (1mm oder 0,5mm), leichte Platten aus Alu-Waben (5mm) oder Aluverbundplatten mit Kunststoff Kern (3 bis 5mm) benutzt. Die Deckschicht kann nahezu aus jedem Material erfolgen. Typisch sind Metall-Bleche, Lack, Folie, Glas und Spiegel, aber auch Furnier, Stein oder Digitaldruck.

Bei der Auskleidung der Aufzugskabine sind einige Punkte zu beachten. Hierbei handelt es sich um unumgängliche Vorschriften wie zum Beispiel für Brandschutz, Biegefestigkeit und Statik aber auch nicht fest definierte Themen die zur Dauerhaftigkeit, Funktion und Wirtschaftlichkeit beitragen. Hierbei sind unter anderem die Punkte Gewicht- und Platzersparnis, Beständigkeit gegen klimatische Einflüsse, Austauschbarkeit, Reinigungsfähigkeit, Kratzfestigkeit, Design und die Montagemöglichkeiten zu nennen. Sicherheitsregeln für die Konstruktion und den Einbau von Aufzügen, Besondere

Anwendungen für Personen- und Lastenaufzüge und weitere Punkte werden in der DIN EN 81-70 festgelegt.

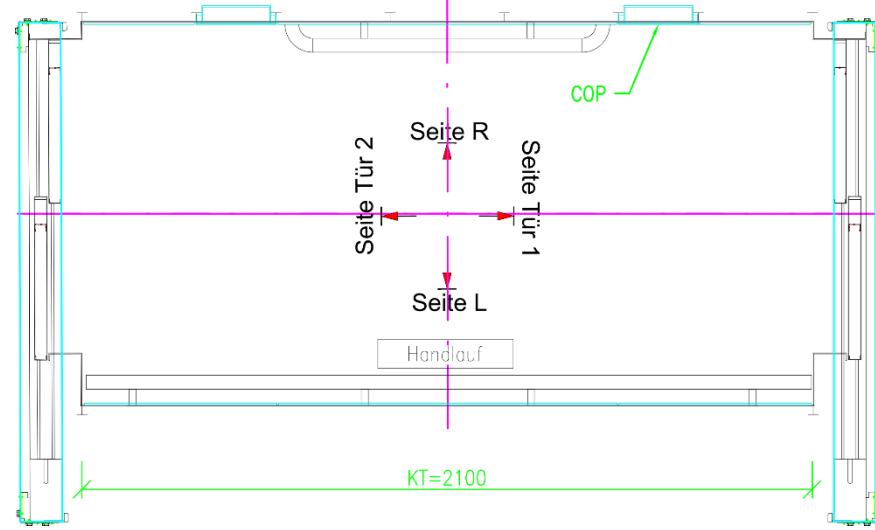


Abbildung 14: Horizontalschnitt durch Aufzugskabine

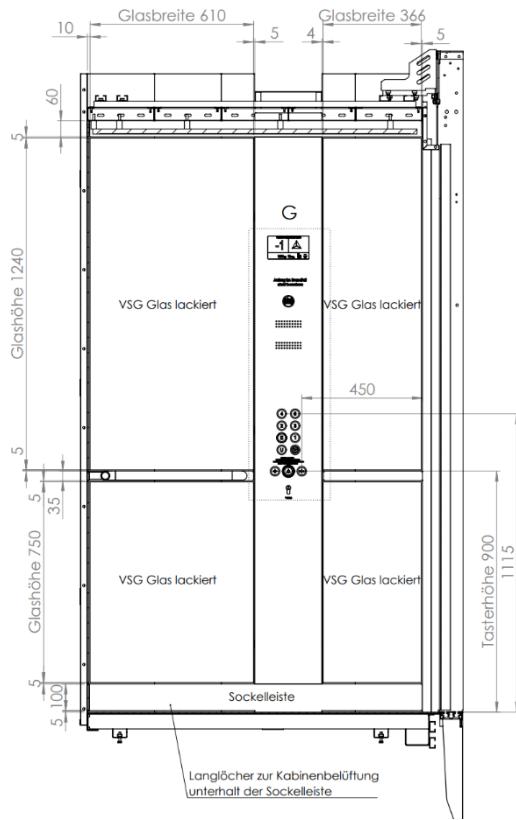


Abbildung 15: Vertikalschnitt durch Aufzugskabine

1.4.3 Potentiale von Albasiahholz

Bisher werden in Hybrid- oder Sandwichwerkstoffen überwiegend Polymerschäume als Kernmaterial und Metalle oder faserverstärkte Kunststoffe als Decklagen eingesetzt. Typische

Polymertypen sind beispielsweise Polyurethan (PU) oder Polyethylen (PET). Die Polymere werden in Petrochemischen Prozessen gewonnen. Durch die Substitution petrochemischer Schäume durch Holz können nachhaltige und ressourcenschonende Alternativen geschaffen werden. Hinzu kommt, dass Holz deutlich bessere Materialeigenschaften besitzt. Dadurch können die Materialverbünde häufig dünner ausgeführt werden und beispielsweise das Ladevolumen erhöht werden und die Nutzlast erhöht werden.

Im bisherigen Stand der Technik wird häufig Balsaholz aufgrund seiner geringen Dichte eingesetzt. Balsaholz weist jedoch eine sehr geringere Druckfestigkeit quer zur Faser auf, was ein Nachteil in der Anwendung in Strukturen darstellt. Daher wird Balsa vorwiegend als sogenanntes Hirnholz in Sandwichaufbauten eingesetzt, wobei die Holzfaser senkrecht zur Plattenebene ausgerichtet ist. Dadurch lassen sich zwar hohe Druckkräfte übertragen, die Eigenschaften quer zur Faser sind jedoch vernachlässigbar gering. Zudem ist durch die Herstellung von Hirnholz ein zusätzlicher Prozessschritt erforderlich. Zudem ist die Umformung von Sandwichplatten mit Balsaholzkern nur sehr eingeschränkt möglich. Dazu wird das Balsaholz in Streifen geschnitten (siehe Abbildung 16 links) und auf ein Flies geklebt (siehe z.B. Produktreihe Baltek der Firma 3A) [12]. Dieser Arbeitsschritt ist mit zusätzlichen Kosten verbunden und gewährleistet nur eine sehr eingeschränkte Umformung.



Abbildung 16: Beispiele für den Einsatz von Balsaholz

Eine Alternative zu Balsaholz als Leichtholz stellt Albasia dar. Albasia ist das Holz des Sengon-Baums (botanisch: Paraserianthes falcataria). Albasiaholz ist in Südostasien verbreitet und bietet sowohl ökologische, soziale als auch technische Aspekte, auf die im Folgenden eingegangen werden soll.

Mit einem jährlichen Wachstum von 40-60 m³/ha ist der Zuwachs an Biomasse für diese Holzsorte außerordentlich hoch [13]. In Zehn Jahren können über 50m³ Biomasse pro Baum erreicht werden [13]. Bei optimalen Wachstumsbedingungen können im ersten Jahr bereits Höhen von 7 m und 16 m nach weiteren zwei Jahren erreicht werden. Im Durchschnitt werden zwischen fünf und zehn Jahren Wachstum Brusthöhendurchmesser (BHD) von 30 cm erreicht. Nach 15 Jahren Wachstum werden bis zu 70 cm BHD und Höhen der Bäume von bis zu 36 m erreicht [13]. Dies zeigt, dass der Zuwachs an Durchmesser und Höhe in der frühen Wachstumsphase am höchsten ist und mit der Zeit abnimmt. Durch den außerordentlich hohen

Biomassenzuwachs werden eine große Menge CO₂ gespeichert. Ein weiterer ökologischer Aspekt ist die Funktion als Pionierbaum, der vor allem degradierte Flächen und Straßenränder besiedelt. Das natürliche Vorkommen ist in Indonesien, vor allem auf Borneo, wo Sengon auf verschiedenen Bodenarten, ausgenommen der sumpfigen Inselgebiete, zu finden ist. Eine spezielle Eigenschaft des Sengon-Baums ist die Stickstofffixierung im Boden. Aus der Luft wird Stickstoff aufgenommen und im Boden gespeichert. Die Fixierung erfolgt dabei auf zwei verschiedene Arten. Mit Hilfe einer Symbiose des Baums mit einem Pilz wird der Stickstoff über das Wurzelsystem über mehrere Quadratmeter Fläche verteilt. Zum anderen wird Stickstoff in den Blättern des Segonbaumes gespeichert, die ganzjährig abgeworfen werden, verrotten und den Stickstoff an die oberste Humusschicht abgeben [13]. Dadurch werden die degradierten Flächen, auf denen Sengon wächst, das ganze Jahr über auf natürliche Art gedüngt.

Aufgrund dieser Eigenschaften bietet Sengon optimale Möglichkeiten degradierte Flächen, meist durch Brandrodung, für eine Bewirtschaftung wieder aufzubauen. Dies bietet vor allem für Kleinbauern oft die einzige Möglichkeit, den ausgewaschenen Boden effektiv zu bewirtschaften. Für die lokalen Bauern besteht zum einen die Möglichkeit einen Agrarforstbetrieb aufzubauen, der ganzjährig ertragreich ist. Zum anderen lassen sich zwischen den Bäumen verschiedene Lebensmittel anbauen, die das Überleben der Bauern garantieren. Erste Erträge lassen sich bereits nach 3-5 Jahren erzielen. Aus dem Stamm eines gefällten Baumes wächst wieder ein neuer Trieb nach, wodurch keine neue Anpflanzung erforderlich ist. Die Nutzung von Sengon als Plantagenbaum zusammen mit Pflanzen für den Export bieten Wertschöpfungsketten für die lokale Bevölkerung. Eine nachgeschlossene Holzverarbeitung kann zusätzlich zur Wertschöpfung in der Region beitragen.

Albasiahholz bietet eine vorteilhafte Kombination der Werkstoffeigenschaften Dichte, Steifigkeit und Druckfestigkeit. Durch gezielte Hybridisierung mit technischen Werkstoffen lassen sich völlig neuartige Werkstoffsysteme entwickeln. In Tabelle 1 sind die mechanischen Eigenschaften von Albasia (in Faserrichtung) im Vergleich mit anderen Hölzern und technischen Werkstoffen verglichen. Darauf aufbauend wurden die Materialindizes nach Ashby bestimmt. Diese sind, abhängig vom jeweiligen Lastfall, ein aussagekräftiger Kennwert, um das Leichtbaupotential eines Werkstoffes zu bewerten. Das Leichtbaupotential ist für den Lastfall „Balkenbiegung“ hinsichtlich der Steifigkeit höher als das von Kohlefasern – ähnlich verhält es sich bei der „Plattenbiegung“. Durch die geringe Dichte kann der im Vergleich zu Kohlefasern sehr viel niedrigere E-Modul kompensiert werden.

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften unterschiedlicher Materialien

	Dichte [kg/dm ³]	Zugfestigkeit [MPa]	E-Modul [Nmm ²]	Spez. Steifigkeit Plattenbiegung
Pappel	0,46	72,5	8,85	4,50
Buche	0,745	117,5	14,35	3,26
Albasia	0,32	49	7,4	6,09
Aluminium	2,7	350	70	1,53
Stahl	7,2	1000	210	0,83
CFK (uniaxial)	1,31	3530	230	4,68

Albasiaholz könnte bezüglich der Materialeigenschaften die Lücke zwischen Balsaholz für Anwendungen als reiner Sandwichkern und strukturell nutzbaren klassischen Laub- und Nadelhölzern schließen.

Da das Holz des Albasia-Baumes hohe Druckfestigkeiten aufweist, ist der Einsatz als Sperrholz möglich. Das bedeutet, das Plattenmaterial kann im Vergleich zu Balsaholz in sehr viel effizienteren Prozessen hergestellt und verarbeitet werden. Im sogenannten Schälprozess wird der Baumstamm in dünne Lagen (sog. Furniere) geschält. Anschließend können die Furniere beleimt und zu Platten verpresst werden. In diesem Prozessschritt kann auch die Hybridisierung erfolgen. Zudem gehen die guten mechanischen Eigenschaften quer zu Plattenebene nicht verloren. Neben der Verarbeitung als Plattenmaterial ergeben sich völlig neuartige Anwendungsfelder als sogenanntes Formholz. Durch die Verarbeitung als Furnierwerkstoff können die dünnen Holzlagen des Albasia-Holzes übereinandergelegt werden und beispielsweise im Vakumsackverfahren zu Bauteilen umgeformt werden. Beispiele für Formholzteile können Abbildung 17 entnommen werden. Eine Hybridisierung mit technischen Werkstoffen kann auch bei Formholz durchgeführt werden. Entweder erfolgt die Hybridisierung beim Aufbau des Holzlaminats oder das Formholz ist Bestandteil einer hybriden Struktur wie es beispielhaft in Abbildung 18 b) abgebildet ist.

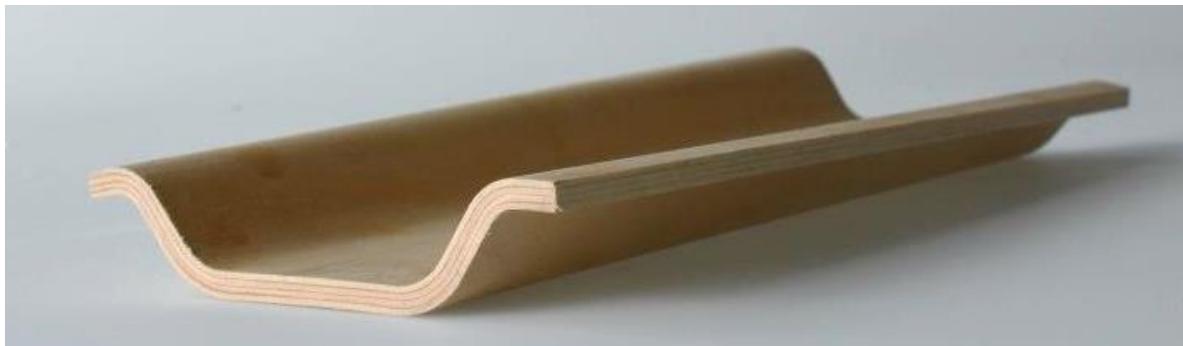
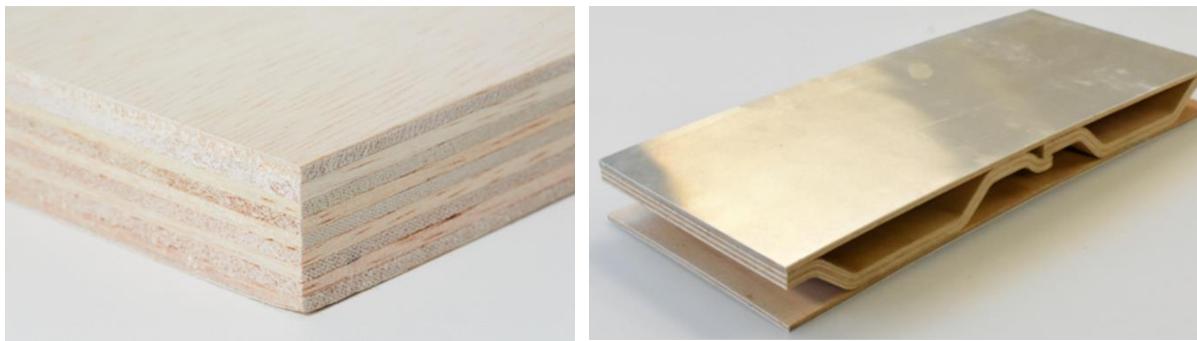


Abbildung 17: Beispiele für Formholzteile



a) Furnierverbund aus Albasiahholz

b) Beispiele für generisches Hybrid-Formholzteil aus dem Projekt For(s)tschritt

Abbildung 18: Furnierverbund aus Albasiahholz

Eine weitere Eigenschaft von Albasiahholz ist vorteilhaft für den Brandschutz, was insbesondere für den Aufzugbau relevant ist. Albasiahholz besitzt einen hohen Aschegehalt. Aufgrund dessen bildet sich bei der Verbrennung des Holzes ein dichte Ascheschicht. Dadurch wird das darunter liegende Holz vor der weiteren Verbrennung geschützt. Diese Eigenschaft lässt sich technisch nutzen, so wurden bereits Brandschutztüren mit Kernen aus Albasiahholz hergestellt. Allerdings fehlen hier noch fundierte wissenschaftliche Untersuchungen die die Brandschutzeigenschaften belegen [13].

Die verwendeten Leimsysteme in Indonesien sind sehr auf Masse und Preis ausgerichtet. Die neue deutsche Regulierung für Formaldehyd ab 2020 kann mit den meisten Leimsystemen aus Indonesien nicht eingehalten werden. Auch hier spricht es für eine europäische bzw. deutsche Produktion. Durch die neue Verordnung ist es ebenso fraglich, ob die Holzart Pappel, welche die leichteste europäische Holzart darstellt, noch einsetzbar ist. Grund hierfür sind der natürlich vorkommende Formaldehydgehalt in Pappel. Tests zeigen, dass der natürliche Formaldehyd Gehalt die neue deutsche Regulierung überschreitet.

Bisher wird Albasiahholz als Werkstoff für den Bereich Möbel- und Messebau eingesetzt. Auch im Innenausbau als Sperrholz gibt es Lösungen. Die Anforderungen an Werkstoffe im

Möbelbau sind jedoch nicht mit denen für Strukturanwendungen im Bereich Mobilität und Aufzugbau zu vergleichen. Die Belastungen in diesen Anwendungen sind hoch dynamisch (Schwingungen und stoßartige Belastungen) hinzukommen witterungsbedingte Umwelteinflüsse und Salzlauge im Winter. Das Verhalten von Holz-Hybridsystemen auf Basis von Albasiaholz unter fahrzeugtypischen Belastungsprofilen und Umweltbedingungen ist noch völlig unerforscht. Zusätzlich eröffnet die Kombination mit anderen technischen Werkstoffen zu hybriden Materialien ein weites Feld von neuen, bisher unbekannten Eigenschaftsprofilen und damit neuartigen Anwendungsgebieten.

1.4.4 Fazit Stand der Technik

Bislang gibt es in mobilen Anwendungen keinen breiten serienmäßigen Einsatz von Holz in Strukturauteilen. Konzepte die einen Einsatz von Holz in strukturellen Bauteilen vorsehen bestehen im Rahmen von Fahrzeugen in Kleinserie oder Studien. In bisherigen Serienapplikationen werden lediglich Holzfasern oder Holzpulver beispielsweise als Füllstoff für polymere genutzt.

Im Rahmen der Vorgängerprojekte „HAMMER“ und For(s)tschritt konnten erste Machbarkeitsanalysen durchgeführt werden. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Applikation von Holzfurnier-Metall Sandwichverbunden über ein hohes Leistungspotential verfügt. Im Zuge der bisherigen Entwicklungsarbeit konnte für die Sandwichstruktur und den Fertigungsprozess TRL 4 erreicht werden.

Der aktuelle Stand der Technik verdeutlicht anhand der gewünschten Eigenschaftsprofile der beschriebenen Nutzfahrzeug- und Straßenfahrzeuganwendungen sowie Nutzung im Aufzugbau, dass Holz-Hybride hier erhebliches Potential zur Gewichtsreduktion und Funktionsintegration bieten. Für den Einsatz flächiger Strukturen sind heute zusätzlich Versteifungselemente erforderlich. Diese können gegebenenfalls eingespart werden. Hinzu kommen Dämmmatte zur thermischen Isolation und Geräuschminderung, auch diese könnten bei Einsatz eines Holz-Sandwichverbundes eingespart werden. Mit ähnlichen Effekten kann bei der Fertigung von Aufzugstrukturen aus Hybriden-Holzstrukturen gerechnet werden.

Der Einsatz teurer und energetisch ungünstiger CFK-Patches im Bereich der B-Säulen-Verstärkung zeigt den Handlungsbedarf im Bereich der Aussteifung von Trägerstrukturen im Fahrzeug. Ein Sandwichverbund aus Holz kann die an dieser Stelle geforderten Steifigkeitsanforderungen aufgrund des Sandwicheffektes sehr gut erfüllen und stellt eine ökonomisch und ökologisch sinnvolle Alternative dar.

Albasiaholz bietet aufgrund vieler Vorteile sowohl im technischen Bereich, als auch in der Nachhaltigkeit ein hohes Potential für eine Untersuchung in den ausgewählten Anwendungsfällen. Albasiaholz bietet eine vorteilhafte Kombination der Werkstoffeigenschaften Dichte, Steifigkeit und Druckfestigkeit was sowohl für den Leichtbau allgemein als auch den Einsatz in flächigen Strukturen großes Potential bietet. So bietet Albasiaholz eine sehr hohe spezifische Steifigkeit bei Plattenbiegung. Albasiaholz lässt sich zu Furnieren verarbeiten, woraus sich weitreichende Möglichkeiten für innovative Herstellprozesse ergeben. Die Furniere, die in Faserrichtung des Holzes geschnitten werden, entsprechen unidirektionalen Faserverbundwerkstoffen und ermöglichen so einen Laminataufbau, der in Anlehnung an CFK oder GFK Laminate entsprechend der gewünschten Eigenschaften des Bauteils ausgelegt werden kann. Zusätzlich ist durch die Furnierbauweise die Herstellung von Formholzteilen möglich.

Durch die Zusammenarbeit mit Fairventures Worldwide FVW wird zudem eine nachhaltige Wertschöpfungskette entwickelt. Albasia bietet sowohl ökologische als auch soziale Vorteile. Durch die Aufforstung degraderter Flächen, die der Brandordnung zum Opfer gefallen sind, können diese Flächen von Kleinbauern in der Region wieder für die Agrar- und Forstwirtschaft nutzbar gemacht werden. Durch den sehr hohen jährlichen Biomassezuwachs und die damit verbundene hohe CO₂-Aufnahme trägt die Nutzung von Albasiaholz erheblich zur CO₂-Reduktion und zum Klimaschutz bei. Durch die Substitution von technischen Werkstoffen in Fahrzeugstrukturen kann zusätzlich CO₂ eingespart werden.

1.5 Zusammenarbeit der Partner

Das Projektkonsortium setzt sich aus den Verbundpartnern Alfred Kiess GmbH, Broszeit GmbH, der Volkswagen AG, dem DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte und Fairventures Worldwide gGmbH zusammen. Eine Beschreibung der Verantwortlichkeiten ist im detaillierten Arbeitsplan in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** hinterlegt. Aus dieser Übersicht geht hervor, welcher Projektpartner die Arbeiten eines Arbeitspakets hauptverantwortlich koordiniert (Responsible) und wer im jeweiligen Arbeitspakt mitarbeitet (Support). Aus dieser Darstellung ergeben sich auch die Beiträge der einzelnen Partner im inhaltlichen Bericht zum Projekt (siehe Kapitel 2.1). Die Hauptverantwortung für das Projektmanagement lag beim DLR als Projektkoordinator.

Eine Zusammenarbeit mit anderen erfolgte durch Unterbeauftragung der Neugersdorfer Holzwerke GmbH als Tochterunternehmen der Broszeit GmbH.

2 Literaturverzeichnis

- [1] „HAMMER“ Projekthomepage,“ [Online]. Available: <http://www.projekt-hammer.de/>. [Zugriff am 28 Oktober 2020].
- [2] „WOODC.A.R - Computer Aided Research,“ [Online]. [Zugriff am 12 06 2025].
- [3] T. Große, F. Fischer, D. Kohl, T. Albert, B. Boese, J. Enge, A. Pellegrini, G. Bachmann, M. Schmid, C. Baush und B. Poller, „Verbundprojekt: Strukturbaugruppen auf Basis nachhaltiger holzbasierter Materialsysteme zur Reduzierung von Masse und Umweltauswirkungen im Straßen- und Schienenfahrzeugbau - Synonym: For(s)tschritt : vorläufiger Schlussbericht zum Vorhaben For(s)tschritt,“ Volkswagen AG, Wolfsburg, 2020.
- [4] „Wood C.A.R. Projekthomepage,“ [Online]. Available: http://www.woodcar.eu/index_de.html. [Zugriff am 28 September 2020].
- [5] D. Kohl, T. Wicke, M. Alsmann und S. Böhm, „Holz in der modernen automobilen Karosserie,“ *Holztechnologie*, Bd. 55, Nr. 6, pp. 44-49, 2014.
- [6] D. Kohl, M. Million und S. Böhm, „adhesive bonded wood-textile-compounds as potentially new eco-friendly and sustainable high-tech materials,“ in *Adhesion Society, 36th Annual Meeting of the Adhesion Society*, Red Hook, USA, 2013.
- [7] D. Kohl, T. Flohr und S. Böhm, „Adhesively Bonded Wood-Based Multi-Material Systems as a Sustainable Material for Technical Applications,“ in *The Adhesion Society, 37th Meeting of the Adhesion Society*, Red Hook, USA, 2014.
- [8] H. Braess und U. Seifert, *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, Wiesbaden, 2013.
- [9] „<http://www.plastics.gi/processing-misc/moving-heavy-weights-fast-2/>,“ [Online].
- [10] M. Bitterlich, M. Ehleben, A. Wollny, P. Desbois, J. Renkl und J. Schmidhuber, „Maßgeschneidert auf reaktives Polyamid 6,“ *Kunststoffe*, Nr. 3, pp. 80-84, 2014.
- [11] J. Weimer, „<https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/u-shift/>,“ [Online]. Available: https://verkehrsforschung.dlr.de/public/documents/2019/Presentation_U-Shift_EN.pdf. [Zugriff am 23 06 2021].

[12] „3A-Composites,“ [Online]. Available: <https://www.3accorematerials.com/en/products>. [Zugriff am 28 September 2020].

[13] „Holzbau mit Sengon - Das Potential eines Leichtholzes im Bausektor,“ November 2015. [Online]. Available: <https://fairventures.org/wp-content/uploads/2015/11/Holzbau-mit-Sengon.pdf>. [Zugriff am 28 September 2020].

Schlussbericht Teil II

zum Vorhaben



SUMATHRA

SUBSTITUTION KONVENTIONELLER
MATERIALIEN FÜR DEN LEICHTBAU
DURCH HOLZ-HYBRIDE MIT ALBASIA

Verbundprojekt:

Substitution konventioneller Materialien für den Leichtbau durch Holz-Hybride auf Basis von Albasiaholz

Laufzeit: 01.09.2021 – 31.03.2025

Autoren:

Feser, Thomas¹; Heyner, David¹; Schulze, Maik¹; Strel, Dennis¹; Beeh, Elmar¹; Mamber, Marie², Schneider, Matthias², Kuhn, Christian², Happ, Felix²; Kruger, Berthold³; Kohl, Daniel⁴; Stojic, Slobodan⁵;

¹Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Fahrzeugkonzepte

²Alfred Kiess GmbH

³Broszeit GmbH

⁴Volkswagen AG

⁵Fairventrues Worldwide gGmbH

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 03LB2033 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ptJ
Projekträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

Eine Übersicht über die einzelnen Teilvorhaben des Verbundprojekts zeigt die nachfolgende Tabelle:

Tabelle 1: Übersicht der Teilvorhaben

<i>Förderkennzeichen</i>	<i>Zuwendungsempfänger</i>	<i>Teilvorhaben</i>
03LB2033A	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.	Projektkoordination, Entwicklung hybrider Materialsysteme, Simulation und Charakterisierung
03LB2033B	Fairventures Worldwide gGmbH	Auswahl geeigneter Materialien sowie Technologietransfer und Lebenszyklusanalyse von Albasia Materialien für die Anwendung im Leichtbau
03LB2033C	Volkswagen AG	Entwicklung von nachhaltigen Leichtbaulösungen für den automobilen Einsatz aus Albasiaholz
03LB2033D	Alfred Kiess GmbH	Entwicklung innovativer Materialsysteme auf Basis des Albasiaholzes und Überführung des Leichtbau-Materialsystems als Technologietransfer im Aufzugbau
03LB2033E	Fa. Broszeit GmbH	Entwicklung von hybriden Holzwerkstoffen und Herstellprozessen und Untersuchung geeigneter Klebstoffe sowie Herstellung von Hybridmaterialien

Inhaltsverzeichnis

1.	Verwendung der Zuwendung und Darstellung des erzielten Ergebnisses	1
1.1	Anforderungsprofile an Demonstratoren/Anwendungsfälle	1
1.1.1	Aufzugkabine	1
1.1.2	Nutzfahrzeugaufbauten.....	13
1.1.3	Anwendungsfall PKW - Schwellereinleger	18
1.2	Produktionstechnologien	19
1.2.1	Klebstoffe.....	19
1.2.2	Formholzherstellung	20
1.2.3	Herstellung von Plattenwerkstoffen.....	28
1.2.4	Herstellung Schwellerböcke	42
1.3	Materialcharakterisierung	43
1.3.1	Quasistatische und dynamische Charakterisierung von Albasia	43
1.3.2	Verdichtung von Couponproben	48
1.3.3	Charakterisierung von Fügeelementen	50
1.3.4	Stauchtests an Plattenwerkstoffen.....	56
1.3.5	Plattenbiegung.....	65
1.3.6	Bruch und Splitterverhalten von hybriden Plattenwerkstoffen.....	68
1.3.7	Branduntersuchungen von hybriden Proben	70
1.3.8	Klimawechseltests	72
1.3.9	Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizient für Formholzteile	75
1.4	Simulation.....	79
1.4.1	Materialcharakterisierung von Leichtholz für die numerische Simulation.....	82
1.4.2	Entwicklung von Simulationsmethoden.....	107
1.4.3	Simulation unter Zugbelastung	108
1.4.4	Simulation unter Druckbelastung	116
1.4.5	Simulation von Pfahltests an Platten.....	122
1.4.6	Simulation der Schwellereinleger	125
1.5	Demonstratoren.....	130

1.5.1	Schwellereinleger	130
1.5.2	Aufzugkabine	141
1.5.3	Nutzfahrzeugaufbauten.....	144
1.6	Life Cycle Analysis of Albasia in the SuMatHrA project.....	146
1.6.1	Phase 1: Comparative LCA of Indonesian vs. German Production	146
1.6.2	Phase 2: Substitution Potential of Albasia Plywood for Aluminum.....	178
1.6.3	Life Cycle Inventory (LCI)	185
1.6.4	Life Cycle Impact Assessment (LCIA).....	189
1.6.5	Interpretation of Substitution Results	190
1.7	Zusammenfassung	197
1.7.1	Aufzugkabine	197
1.7.2	PKW	199
1.7.3	Nutzfahrzeuge	200
1.8	Ausblick	202
2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	204
3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	204
4.	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses	204
5.	Fortschritte im Stand der Technik während der Projektlaufzeit.....	205
6.	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen.....	206
7.	Abbildungsverzeichnis	207
8.	Tabellenverzeichnis	213
9.	Literaturverzeichnis.....	215

1. Verwendung der Zuwendung und Darstellung des erzielten Ergebnisses

1.1 Anforderungsprofile an Demonstratoren/Anwendungsfälle

1.1.1 Aufzugskabine

1.1.1.1 Anforderungsanalyse

Die Anforderungsanalyse wurde durchgeführt, um eine Auswahl geeigneter Referenzstrukturen herauskristallisieren zu können.

Im Zuge dessen wurden drei Referenzstrukturen definiert.

Im ersten Anwendungsfall sollen die bisher genutzten Trägermaterialien aus Metall und Kunststoff durch neu entwickelte Sperrholzplatten aus Albasiahölzersetzt werden und mit dem Stand der Technik verglichen werden. Auf die Trägerplatten werden die üblichen Deckschichten wie Spiegelglas, Glas, Bleche, HPL, Folie, Furnier oder Lack aufgebracht.

Im zweiten Fall sollen die bisherigen Wandpaneele, welche aus Spanplatten mit Melaminoberfläche bestehen, durch Albasiahölzplatten ersetzt werden. Diese werden mit der Kabinenstruktur des Aufzugs verschraubt und fungieren zudem als statisches Wandelement in der Aufzugskabine. Als dritte Referenzstruktur war es angedacht, spezielle Bleche im Kabinenbereich durch Formholzteile zu ersetzen. Da diese Bauteile allerdings im Kabinenbau und weniger im Innenausbau verwendet werden, wurde diese Referenzstruktur nicht bis in den Prototypenstatus weiterverfolgt.

Basierend auf den ermittelten Referenzstrukturen wurde das Anforderungsprofil erarbeitet. Da die betreffenden Normen im Aufzugsausbau kaum Informationen über Materialanforderungen liefern, wurden die Eigenschaften der aktuell verwendeten Materialien herangezogen und als Mindestanforderung angenommen.

Ein weiterer, zukunftsweisender Anwendungsfall, hat sich erst gegen Ende des Forschungsprojekts ergeben. Hier soll das Albasiamaterial als Kern für eine spezielle Handlaufform angewendet werden.

AP1.2: Die Anforderungsanalyse ist abgeschlossen und weitestgehend in einem Lastenheft dokumentiert. Im Folgenden werden die drei Fälle unterteilt dargestellt.

Aufbauend auf den Erkenntnissen und Vorarbeiten aus AP 1.2, wurden die Referenzstrukturen, bei denen das Albasiahölz als Trägermaterial fungiert, in konkrete Anwendungsfälle übernommen.

Die Konstruktion und Konzeption für die 3 Anwendungsfälle basieren weitestgehend auf den bestehenden Konstruktionen. Die Herausforderung dabei besteht darin, den Anforderungen gerecht zu werden, was durch eine 1:1 Ersetzung der Materialien durch Albasia nicht automatisch erreicht wird, bzw. zunächst untersucht werden muss.

Die Schwierigkeit liegt darin, dass Albasia in der technischen Anwendung abseits des Möbelbaus noch unbekannt ist und es nicht genügend Werte zu den technisch-mechanischen Eigenschaften oder Erfahrungen gib, wie sich das Holz oder auch die Halbzeuge (wie Plattenwerkstoffe) in der verarbeiteten Variante verhalten.

Es wurde versucht die Konstruktion weitestgehend beizubehalten und die Vorteile von Albasiaholz dabei dennoch bestmöglich zu nutzen.

1.1.1.2 Technische Eigenschaften - Fall 1

In *Anwendungsfall 1* sollen die bisherigen Trägermaterialien aus Metall und Kunststoff durch neu entwickelte Holzplatten aus Albasiaholz ersetzt werden. Auf diese Trägerplatten werden Deckschichten wie Spiegel, Glas, Bleche, HPL, Folie, Furnier oder Lack aufgebracht.

Prinzip des Trägermaterials der Wandelemente

Bei der beschriebenen Konstruktion handelt es sich um dekorative Wandelemente, die auf eine bestehende, geschlossene Kabinenstruktur aufgebracht werden. Die Elemente werden sowohl bei Neuanlagen als auch bei Sanierungen von Fahrkörben zum Einsatz gebracht. Sie haben einen rein dekorativen Zweck und müssen keine "Aufgaben" der Rohkabine erfüllen.

bisherige Trägermaterialien:

- Aluwabenplatte (Metawell)
- 0,5mm verzinktes Trägerblech
- Aluverbundplatte mit mineralischem Kern
- MDF-Platte

Gewünschte Deckschichten:

- Verschiedene Metallbleche
- Glas
- Spiegel
- HPL-Schichtstoff
- Folie
- Lack
- Furnier

Befestigung

Die Befestigung der beschichteten Paneele an der Rohkabine erfolgt über:

- Klebeverbindungen
- Magnetische Verbindungen
- Formschlüssige Halterung über Zierleiste oder Sockel

Prinzip der Befestigung

Das Paneel wird in eine gefälzte Sockel- oder Zierleiste gestellt. Durch den Falz wird ein Herausrutschen oder Absenken der Paneele verhindert. Die Paneele werden magnetisch oder durch Kleben an der Rohkabine fixiert. Eine Zierleiste oder auch eine abgehängte Decke sichern ein "Herauskippen" ab (siehe Abbildung 1).

Der entscheidende Vorteil einer magnetischen Verbindung beinhaltet, dass alte oder beschädigte Paneele relativ einfach und unkompliziert ausgetauscht werden können.

Ausarbeitung Lastenheft

Dem Lastenheft liegen die Anforderungen nach DIN EN 81-20, DIN EN 81-50, DIN EN 81-72 sowie Werte, die wir aus vergangenen Projekten und Produkten als internen Mindestanforderungen definiert haben, zu Grunde.

Diese gliedern sich wie folgt auf:

- Gesamtdicke sollte 7mm nicht überschreiten
- Gewicht so niedrig als möglich
- Akzeptable Oberfläche
- Geringer Verzug/Verwerfung
- Cfl-s2, d1 according to EN 13501-1.
- Bewältigung der Umwelteinflüsse (min/type/max)
 - Lufttemperatur (°C)
 - +5
 - +22
 - +40
 - Relative Luftfeuchtigkeit (%)
 - 5 - 95
 - Absolute Feuchtigkeit (g/m³)
 - 1 - 29
 - Sonneneinstrahlung (W/m²)
 - 0 - 700

- Temperaturwandlungsrate ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)
 - 0.5 - 120
- Kondensation
- Vorübergehende Kondensation
- windbeeinflusster Niederschlag (Regen, Schnee, Hagel)
 - nein
- Eisbildung
 - nein
- Luftdruck (kPa)
 - 78 – 106

1.1.1.3 Konzeption, Konstruktion und Auslegung von Baugruppen – Fall 1

Wandaufbau Fall 1

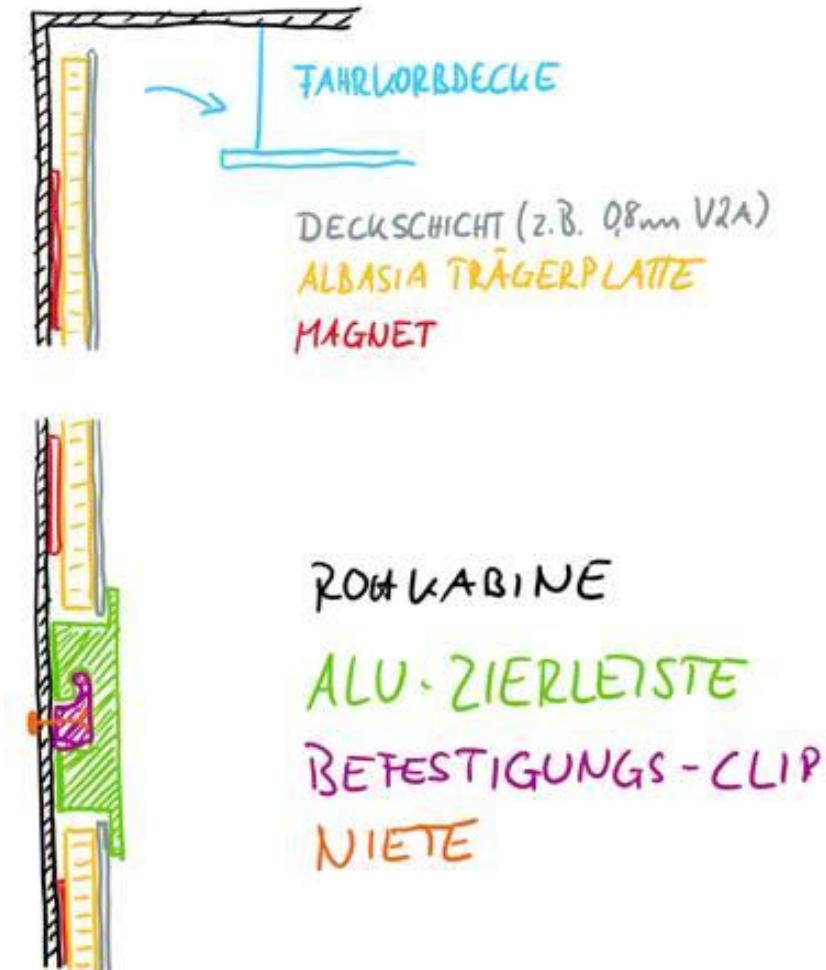


Abbildung 1: Skizze Wandaufbau Fall 1

Legende:

1. Rohkabine - i.d.R. Blech (2mm) → schwarz
2. Magnet- oder Klebefestigung (1mm) → rot
3. Klebeverbindung zwischen Magnet und Albasia-Trägerplatte
4. Gegenzug (hier nicht abgebildet, da nicht immer zwingend notwendig) z.B. HPL (0,8mm)
5. Albasia-Trägerplatte (3mm bei vorhandenem Gegenzug oder 4mm) → gelb
6. Klebeverbindung zwischen Albasia-Trägerplatte und Deckschicht
7. Deckschicht z.B. Bleche (0,8mm), Füllstoff (0,6mm), Lack? (0,2mm) oder HPL B1 (0,8mm) → grau
8. Aluzierleiste → grün
9. Befestigungs-Clip → lila
10. Niete → orange
11. Fahrkorbdecke → blau

Im *Anwendungsfall 1* handelt es sich um dekorative Wandelemente, die auf eine bestehende, geschlossene Kabinenstruktur aufgebracht werden. Die Elemente werden sowohl bei Neuanlagen als auch bei Sanierungen von Fahrkörben zum Einsatz gebracht. Sie haben einen rein dekorativen Zweck und müssen keine "Aufgaben" der Rohkabine übernehmen.

Herangehensweise

In diesem Fall sollen die aktuell eingesetzten Trägermaterialien Aluwabenplatte (Metawell), 0,5mm verzinktes Trägerblech, sowie die Aluverbundplatte mit mineralischem Kern durch eine Albasia Trägerplatte ersetzt werden.

Die Trägerplatte soll mit verschiedenen Dekoren belegt werden können:

- Verschiedene Metallbleche
- Glas
- Spiegel
- HPL-Schichtstoff
- Lack
- Füllstoff

Konstruktionsprinzip

Das Wandelement besteht aus einer möglichst dünnen Trägerplatte mit einer aufgeklebten Deckschicht. Je nach Deckschicht kann es nötig sein, einen Gegenzug auf die Rückseite der Trägerplatte zu kleben. Auf die Rückseite des Paneels werden je m² 20 flache Magnete (100x50x1mm) geklebt.

Ab diesem Punkt beginnt dann die Montage im Fahrkorb. Das Wandelement wird in eine gefälzte Sockel- oder Zierleiste gestellt. Diese wird durch einen angenieteten Kunststoff-Clip an der Rohkabine befestigt. Durch den Falz wird ein Herausrutschen oder Absenken der Paneele verhindert. Die Paneele werden über die Fläche magnetisch oder durch Kleben an der Rohkabine fixiert. Die Zierleiste oder auch eine abgehängte Decke sichern ein "Herauskippen" zusätzlich formschlüssig ab.

Der Vorteil einer magnetischen Verbindung beinhaltet, dass alte oder beschädigte Paneele relativ einfach und unkompliziert ausgetauscht werden können, weshalb dies bevorzugt wird.

Im weitesten Sinne ist der Wandaufbau bzw. die Konstruktion abgeschlossen. Allerdings gibt es noch offene Punkte, die im Anschluss des Forschungsprojekt in einem Langzeitversuch noch zu prüfen sind und die Konstruktion leicht verändern können:

- Lackoberfläche ohne Sperrgrund bzw. Schichtstoff möglich (Test geplant)
- Verzug/Formstabilität bei einseitiger Beplankung (Klimatest)
- Verzug/Formstabilität bei beidseitiger Beplankung (Klimatest)
- Verfügbare Trägermaterialdicke
- Anpassung der Befestigung Zierleiste nötig (Je nach Dicke der Paneele ist hier evtl. ein anderes Profil notwendig)
- Klebeverbindung zwischen Magnet und Trägermaterial (Klimatest)

Klebeverbindung zwischen Trägermaterial und Deckschicht - Weißleim (für Furnier und HPL) und Sprühkleber (Bleche) (siehe Kapitel 1.3.8 Klimawechseltests)

1.1.1.4 Technische Eigenschaften – Fall 2

Im *Anwendungsfall 2* soll der bisherige Aufbau von strukturell relevanten Wandpaneelen, durch beschichtete Albasiaholzplatten ersetzt werden. Diese werden mit der Kabinenstruktur des Aufzugs verschraubt und fungieren zudem als dekoratives Wandelement in der Aufzugskabine.

Prinzip

Bei dem ausgewählten Typ Aufzug besteht die Kabinenstruktur aus einem Boden, einem Dach und einer Stützenstruktur zwischen den beiden "Flächen". Die Stützenstruktur wird mit Wandpaneelen verbunden. Die Wandpaneele sind sowohl als Element der Kabinenstruktur anzusehen, da sie z.B. statische Aufgaben übernehmen oder die Abschottung zum Aufzugsschacht darstellen. Des Weiteren erfüllen sie im gleichen Zuge dekorative Zwecke, weshalb hier als Plattenmaterial melaminharzbeschichtete Spanplatten oder OSB Platten beschichtet mit HPL, Metallblechen oder Spiegel herangenommen wurden.

Anforderungen an den Wandaufbau

Da kaum definierte Anforderungen verfügbar sind, werden die Eigenschaften der bisher verwendeten Platten/Hybriden als Mindestanforderung definiert.

Weitere, allgemeine Anforderungen gelten lt. DIN EN 81-20, DIN EN 81-50, DIN EN 81-72

Im Verlauf des Projektes hat sich jedoch gezeigt, dass ein ähnlicher Anwendungsfall für uns interessanter ist und mehr Perspektive für die Zukunft bietet, da der oben genannte Aufzugstyp immer weniger zum Einsatz kommt. In Gesprächen mit einem mittelständischen Aufzugsunternehmen haben wir einen weiteren Ansatz entwickelt, der einige Vorteile mit sich bringt.

Prinzip des weiterentwickelten Aufbaus

Die Kabinenstruktur besteht aus einem Boden, einem Dach und einer Wandstruktur aus Lamellen die sowohl untereinander als auch mit Wand und Boden verbunden sind. In der aktuellen Variante sind die Lamellen aus 1,5 - 2 mm dickem Stahl- oder Edelstahlblech ausgeführt.

Der Ansatz war nun, dass das bisherige "Dicke" Stahlblech durch ein hybridisiertes Element aus Albasia und einem dünneren Blech ersetzt wird.

Der Vorteil ist, dass dieses Prinzip bei vielen verschiedenen Aufzugsbauern in leicht abgewandelten Varianten angewandt wird und so ein größerer Markt bedient, werden kann.

Anforderungen an den Aufbau

lt. DIN EN 81-20, DIN EN 81-50, DIN EN 81-72

Schnittstellen zu angrenzenden Bauteilen wie Boden und Decke sollen möglichst gleichbleiben.

1.1.1.5 Konzeption, Konstruktion und Auslegung von Baugruppen – Fall 2

Durch den abgewandelten, weiterentwickelten Aufbau besteht die Kabinenstruktur in diesem Fall aus:

- Kabinenboden
- Kabinendach
- Stützen
- Eingangsportal

Die Wandpaneelle aus dem ursprünglichen Aufbau können prinzipiell in die Kategorien "unten" und "oben" unterteilt werden.

Für die Rückwand und beide Seiten gibt es jeweils ein unteres und ein oberes Paneel welche in der Mitte durch eine Zierleiste getrennt sind.

Die Paneele sind jeweils seitlich, unten und oben mit der Kabinenstruktur verschraubt. Sie dienen gleichzeitig als aussteifende Elemente.

Um die bestehende Kabinenstruktur nutzen zu können, soll die Gesamtdicke der Wandpaneelle 12mm möglichst nicht übersteigen. Bei dickeren Materialstärken wurde bisher der Ansatz verfolgt, das Paneel zu falzen. Durch den Gewichtsvorteil von Albasia kann aber ebenso ein Unterlegmaterial (Ziffer 3 in Abbildung 2) hinzugefügt werden.

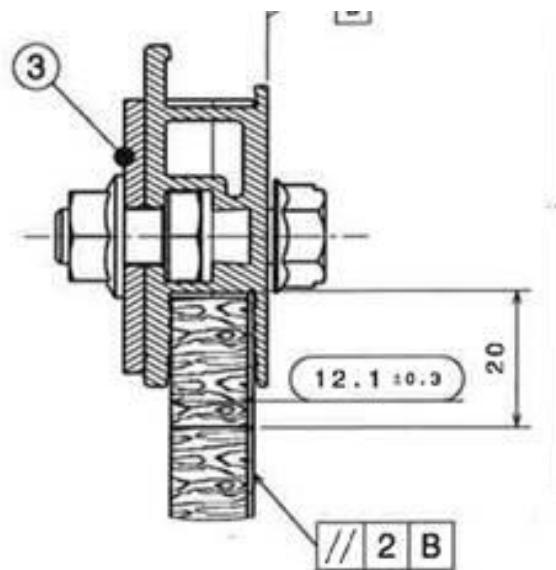


Abbildung 2: Detail Wandpaneel unten im Bereich der Zierleiste

Ebenso wie bei Fall 1 ist die Konstruktion im weitesten Sinne abgeschlossen. Auch hier gibt es noch ein paar Punkte zu prüfen / zu verifizieren die im Anschluss des Forschungsprojekt in einem Langzeitversuch zu beobachten sind und die Konstruktion leicht verändern können.

Für den Langzeitversuch und die serienreife Weiterentwicklung des Ergebnisses im Rahmen des Anwendungsfalls 2 (Wandelemente aus Blech) wurde die Konstruktion der Blechlamelle eines mittelständischen Aufzugsunternehmens als Referenz herangezogen. In Abstimmung mit dem Unternehmen wurden Wandlamellen nachproduziert. Während die ursprüngliche Lamelle aus 1,5 mm dickem, u-förmig abgekantetem Stahlblech besteht und je nach Anforderung mit Ausschnitten versehen sowie an den abgekanteten Kanten verschraubt wird, erfolgte die Nachproduktion mit einem 0,5 mm starken Blech. Zur Stabilisierung wurde rückseitig eine 8 mm starke Albasia-Sperrholzplatte aufgebracht.

Das Hauptziel dieser Anpassung ist neben der Gewichtsreduktion, durch das verwendete, dünneren Blech, die Verbesserung der Steifigkeit durch eine zusätzlich aufgebrachte Albasia Sperrholzplatte. Ein weiterer positiver Effekt ist die Verwendung eines CO₂-sparenderen, ökologischeren Materials. Die Berechnung und Darstellung dazu wurde von Fare Ventures durchgeführt (siehe Kapitel 1.6.5.2)

Abschließend wurde eine Testphase zur Ermittlung der Steifigkeit des neuen Blech-Albasia-Verbundes durchgeführt und basierend auf den Testergebnissen ein Prototyp der Kabine hergestellt.

Hierbei wurde die Lamelle in einen Rahmen montiert, um den eingebauten Zustand zu simulieren. Anschließend erfolgt eine Belastungsprüfung mit Gewichten, um das Verformungsverhalten zu analysieren. Die Tests orientierten sich an den Kriterien der DIN EN 81-20.

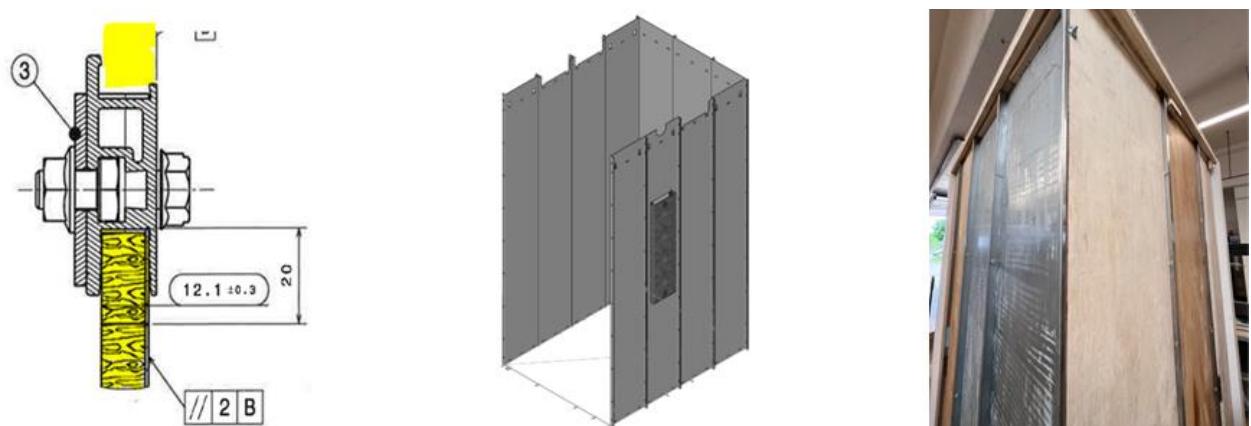


Abbildung 3: Kabinenstruktur aus gekanteten Blechlamellen - 0,5mm Stärke belegt mit Albasia

Aufgrund der angepassten Bauweise konnten die Kriterien in Anlehnung an DIN EN 81-20 erfüllt und eine Gewichtersparnis von 68% (59,63kg) erzielt werden.

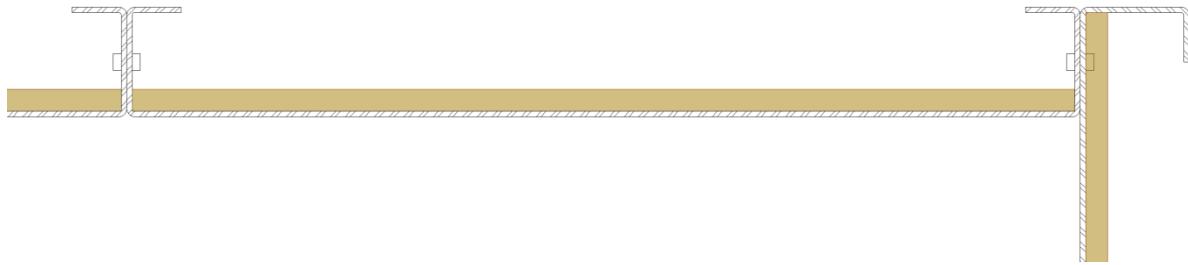


Abbildung 4: Querschnitt Schichtaufbau Wandlamellen

1.1.1.6 Technische Eigenschaften – Fall 3

Im *Anwendungsfall 3* ist das Albasiamaterial als Kern für eine spezielle Handlaufform vorgesehen.

Prinzip

Der Kern des Handlaufs soll aus Albasiamaterial hergestellt werden. Dabei sollen die Vorteile von Albasia bezüglich des Gewichts, zerspanender Bearbeitungen und Form-Verleimungen genutzt werden, um den spezielleren Anforderungen gerecht zu werden.

Anforderungen

- Soll über zwei Seiten (L-Form) oder drei Seiten (U-Form) gehen können
- Der Handlauf soll ästhetisch sein und durch eine Möglichkeit zum Anlehnen eine bequeme Fahrt ermöglichen
- Ich kann aus mehreren Teilen bestehen
- Soll möglichst wenig Gewicht haben
- DIN EN 81-70

1.1.1.7 Konzeption, Konstruktion und Auslegung von Baugruppen – Fall 3

In Anwendungsfall 3 soll laut Lastenheft Albasiamaterial als Kern für eine spezielle Handlaufform genutzt werden.

Die Form und Geometrie des Handlaufs sind so gewählt, dass der HL sowohl alle Anforderungen der Norm erfüllt, eine moderne und ästhetisches Element im Fahrkorb darstellt und auch gleichzeitig eine Möglichkeit bietet sich stehend am Handlauf bequem anzulehnen.

Vom Prinzip besteht der Handlauf aus 3 Segmenten:

1. zur Wand gerundetes Abschlusssegment mit Innenradius ca. 40mm (lackiert)

2. Mittelteil (mit Leder bezogen)

- Seite
- Übergang mit Radius ca. 300mm
- Rückwand

3. zur Wand gerundetes Abschlusssegment mit Innenradius ca. 40mm (lackiert)

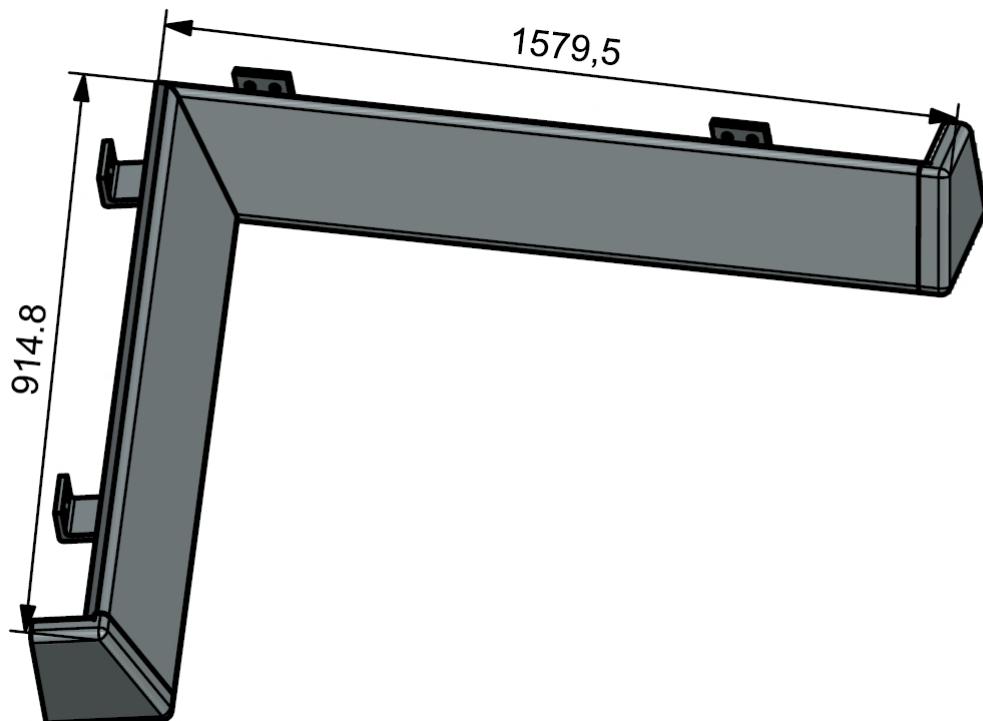


Abbildung 5: Isometrie des gesamten Handlaufs

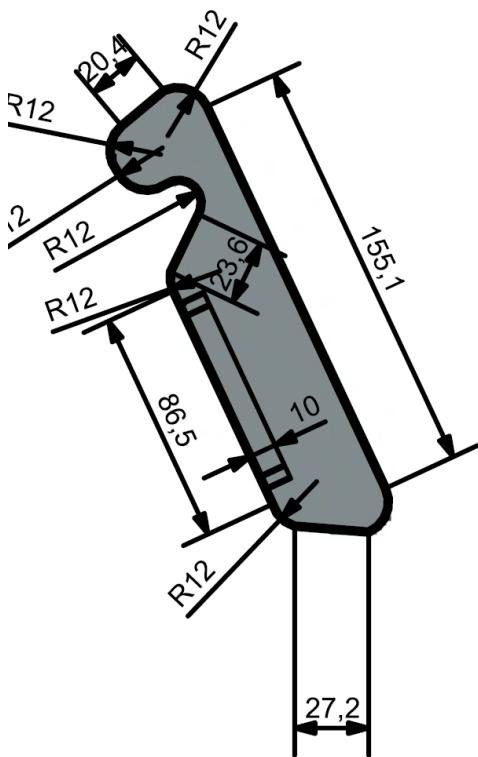


Abbildung 6: Querschnitt Handlauf

Der Querschnitt des Handlaufs ist mit einer Gesamthöhe von 170mm und einer Gesamtdicke von 40mm so gewählt, dass sowohl die nötige Stabilität und Biegesteifigkeit erreicht wird als auch der Funktion zum Anlehnen gerecht wird. Die Befestigung an der Rohkabine erfolgt an den Endstücken direkt sowie am Mittelteil mit Beschlägen.

Die Verbindungsbeschläge werden sowohl an der Rohkabine als auch am Mittelteil des Handlaufs über eine Verschraubung befestigt.

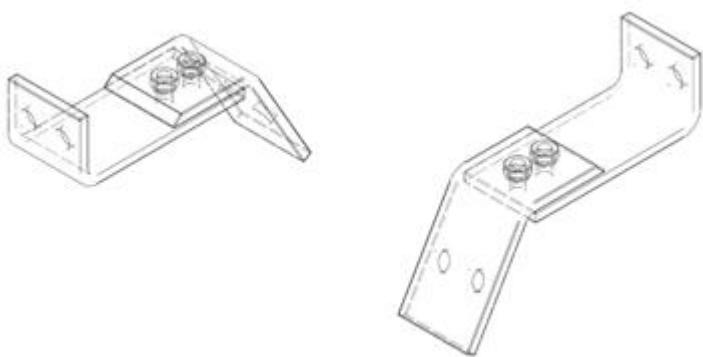


Abbildung 7: Darstellung Handlaufhalter

Im weitesten Sinne ist der Wandaufbau bzw. die Konstruktion auch hier abgeschlossen und bereits im Prototyp der Rohkabine verbaut. Folgende Punkte können je nach Einsatzbereich

und Wunsch / Lastenheft des Kunden für die serielle Fertigung noch näher betrachtet werden und die Konstruktion leicht verändern:

- Kleine Radien möglich (Ergebnisse aus Versuchen Formverleimung (siehe Kapitel 1.2.2.1))
- Lackoberfläche an den Abschlussstücken ohne Sperrgrund bzw. Schichtstoff möglich

Verbindung der Beschläge im Trägermaterial (Schraubenauszugsversuch (siehe Kapitel 1.3.3))



Abbildung 8: Darstellung Handlauf - Umsetzung in Demonstrator

1.1.2 Nutzfahrzeugaufbauten

1.1.2.1 Anforderungsprofil U-Shift Güterkapsel und Frischekapsel

Das Ziel der Forschungsarbeiten ist die Weiterentwicklung und Bewertung einer Güterkapsel in holzintensiver Bauweise für das Fahrzeugkonzept U-Shift. Im Rahmen einer studentischen Masterarbeit [1] am DLR wurde das vorhandene modulare Kapselkonzept weiterentwickelt. Dabei wurden neben einer klassischen Transportkapsel auch Varianten mit unterschiedlich ausgeprägter Isolationswirkung konzipiert. Dabei wird Holz als Basiswerkstoff verwendet. Um alle notwendigen Anforderungen zu erfüllen und die betrachteten Transportaufgaben zu bewältigen, ist die Kapsel modular aufgebaut. Dafür müssen verschiedene Füge- und Verbindmöglichkeiten der einzelnen Bauteile und Baugruppen genauer untersucht werden. Des Weiteren ist die Anbindung an das Bodenmodul, sowie an elektrische Komponenten, wie beispielsweise dem Kühlaggregat und den Batterien, eine Anforderung. Abbildung 9 zeigt die Konzepte für die Güterkapsel sowie die Frischekapsel.



a) Konzept der holzbasierten Güterkapsel b) Konzept der Kühlkapsel c) Konzept der Seitenwand mit Formholzteilen

Abbildung 9: Konzepte einer holzbasierten Güterkapsel für das Konzeptfahrzeug U-Shift.

Folgende Anwendungsfälle werden dabei betrachtet:

- 1) Transport von Gütern, die nicht gekühlt werden müssen
- 2) Güter, die zwischen 5 °C und 10 °C gekühlt werden müssen,
- 3) Güter, die zwischen 0 °C und 4 °C gekühlt werden müssen

Insbesondere bei der Frischekapseln muss eine ausreichende Dämmung für die geforderten Temperaturbereiche realisiert werden. Dabei soll der Wärmedurchgangskoeffizient mindestens gleich gut wie bei der, mit PUR-Schaum gedämmten Referenzkapsel sein. Wichtig hierbei ist, das Spannungsfeld zwischen der begrenzten Wandstärke der Seitenwände und der notwendigen Wärmedämmung zu entschärfen. Die weiteren Anforderungen werden im Detail beschrieben.

1.1.2.2 Anforderungsprofil

Geometrische Anforderungen

Um die Güterkapsel so dimensionieren zu können, dass diese mit dem Driveboard kompatibel ist, sind die Anforderungen an die Abmessungen von zentraler Bedeutung. Des Weiteren muss gewährleistet sein, dass das benötigte Ladevolumen der Transporteinheit realisiert werden kann. Für eine sichere Fixierung der Kapsel im Driveboard ist die Gesamtbreite vorgegeben. Die Gesamthöhe sowie die Gesamtlänge sind hingegen flexible Richtwerte, die je nach erforderlicher Boden- und Dachstruktur angepasst werden können. Die Innenabmessungen der Güterkapsel müssen den Transport von drei Standard EPAL-Europaletten zulassen, die quer hintereinander positioniert werden. Für weitere Details wird auf [1] verwiesen.

Isolation und Kühlkonzept

In allen drei oben genannten Anwendungsfällen kann die natürliche Isolationswirkung von Holz ausgenutzt werden. Für den zweiten Fall ist eine leichte Isolation und Kühlung nötig. Dafür sollen Hohlräume in den Strukturen aus dem ersten Anwendungsfall mit Isolationsmaterial gefüllt werden. Um die für den dritten Fall erforderliche Isolation gewährleisten zu können, muss die Ausführung für den zweiten Anwendungsfall noch zusätzlich um die Komponente „Thermohaube“ erweitert werden. Dabei soll ein Wärmedurchgangskoeffizient von $0,49 \text{ W/m}^2\text{K}$ nach Stand der Technik erreicht werden.

Ladungssicherung

Mit der zu entwickelnden Güterkapsel muss es möglich sein, verschiedene Ladungsträger, wie EPAL-Europaletten oder in der Lebensmittelindustrie bekannte Rollwagen aus Metall, zu transportieren.

Als Konzepte für die Ladungssicherung wird der Stand der Technik betrachtet. Verwendet werden ausschließlich auf dem Markt erhältliche, standardisierte und genormte Anbindungssysteme zum Sichern der zu transportierenden Güter.

Mechanische Anforderungen

Die Schnittstelle zwischen den Wänden und dem Boden muss hinsichtlich der Lasteinleitung konzeptioniert werden. Dabei müssen vor allem die Auswirkungen der Kräfte und Momente auf die Seitenwände, die Stirnwand und das Dach betrachtet werden. Dabei soll die globale Biegesteifigkeit der Kapsel auf den Extremfall ausgelegt werden. Dieser ist mit einer maximalen Durchbiegung des Bodens, quer in der Mitte der Kapsel, von 25 mm festgelegt.

Das Gesamtsystem Güterkapsel lässt sich in 12 Teilsysteme unterteilen. Im Rahmen dieses Projektes wird dabei nur das Teilsystem „Wände“ für ein Einsatz von Albasia genauer betrachtet.

Das Teilsystem „Wände“ unterteilt sich in die Stirnwand sowie die Seitenwände. Deren Aufgaben sind:

Stirnwand

An der Stirnwand wird später das Modul befestigt, welches das Kühlaggregat, die Batterien und sonstige Elektrik enthält. Zusätzlich wird an der Stirnwand die Aufbewahrungsbox für das Zubehör der Ladungssicherung sowie die elektrische Kopplung montiert. Schließlich wird noch die elektrische Kopplung aufgenommen. Um das Gewicht dieser Komponenten und die damit verbundenen, in die Struktur eingeleiteten Kräfte aufnehmen zu können, muss die

Stirnwand eine bestimmte Steifigkeit und Festigkeit aufweisen. Daher soll die Stirnwand im prinzipiellen Aufbau den Seitenwänden ähneln, jedoch mit größerer Wandstärke. Um die erforderliche Dämmung für den dritten Anwendungsfall zu gewährleisten, muss die Stirnwand eine Wandstärke von mindestens 80 mm erhalten.

Seitenwände

Die Seitenwände sind die größten Komponenten der Güterkapsel. An den Innenseiten sollen Bauteile für die Ladungssicherung angebracht werden. Zum einen kann es sich hier um Anbindungskomponenten für Stützen und zum anderen um Komponenten für das Verzurren von hohen Transportgütern handeln. Entsprechend müssen die Seitenwände ausreichende mechanische Eigenschaften aufweisen, um die eingeleiteten Kräfte aufnehmen zu können. Aus der Anforderung der Stapelbarkeit mehrerer Güterkapseln aufeinander müssen die Seitenwände zudem so ausgelegt werden, dass diese den auftretenden Druckbelastungen standhalten können. Es muss berücksichtigt werden, dass der verfügbare Bauraum begrenzt ist. Dieser ergibt sich aus dem Abstand der Schenkel des Driveboards zueinander und der benötigten Mindestbreite des Laderaums innerhalb der Kapsel. Aus den Anforderungen geht somit hervor, dass die Seitenwände eine maximale Wandstärke von 50 mm haben dürfen. Um später die erforderliche Isolation zu gewährleisten, wird die Wandstärke entsprechend auf 50 mm definiert. Damit wird der maximal mögliche Bauraum für das Dämmmaterial ausgenutzt. Um die Wände während des Be- und Entladens sowie der Fahrt vor Beschädigungen zu schützen, soll im unteren Bereich ebenfalls ein Schramm- und Kratzschutz an der Innenseite der Seitenwände sowie der Stirnwand befestigt werden.

1.1.2.3 Konzeptentwicklung

Generell sollen die Stirnwand und die Seitenwände aus einem oder mehreren Holzprofilen bestehen, welche nach außen durch lackierte Aluminiumbleche verstärkt und so gegen Umwelteinflüsse geschützt werden.

In Abbildung 10 sind verschiedene Konzepte für den Querschnitt der Wände dargestellt.

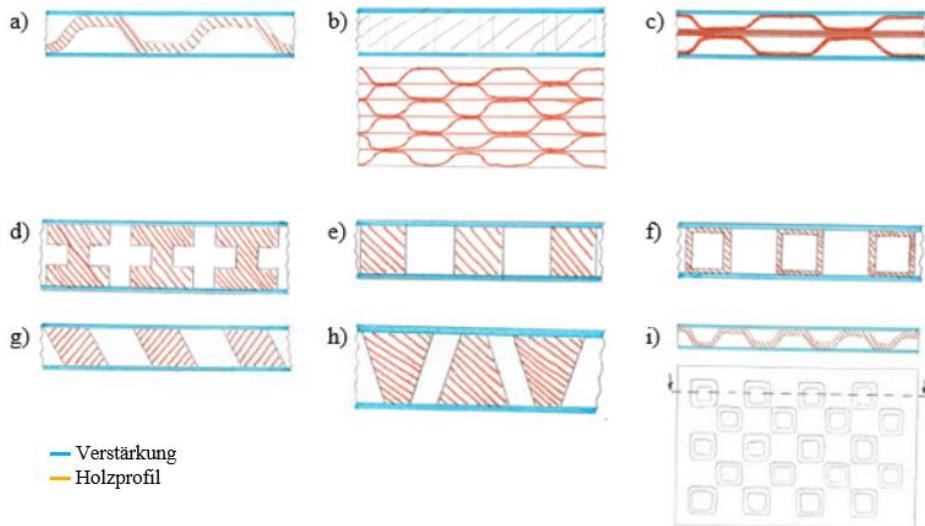


Abbildung 10: Konzepte für den Querschnitt der Wände, aus [1]

Das Wellen- bzw. Hutprofil in Konzept a) besteht aus mehreren Lagen Furnier, welche bei der Herstellung gebogen und verleimt werden. Hier wird die Wandstärke des Profils nicht durch den Klebstoff vergrößert, da dieser in das Holz einzieht und die Furnierlagen adhäsiv miteinander verbindet. Im Rahmen dieses Projektes wird nur das Wellen- bzw. Hutprofil näher betrachtet.

Konzepte für Eckverbindungen

Für eine Verbindung der Seitenwände mit der Stirnwand wurden Konzepte für Eckverbinder entwickelt. Diese sind in Abbildung 11 dargestellt. Die Holzprofile der Wände in a) treffen in der Ecke aufeinander und sind mit einer Gehrung von 45° versehen. Die Konzepte b) und c) sind ähnlich aufgebaut wie a). Allerdings gehen hier die Holzprofile nicht bis zur Ecke durch, sondern enden an dem Holzbalken, an dem dafür jeweils ein Absatz vorgesehen ist. Bei Konzept c) werden die inneren Verstärkungen wie bei a), durch Nuten mit dem Holzbalken verbunden. In Konzept b) ist anstelle der Nuten ein Absatz an dem Holzbalken angebracht, in dessen Ecke die Verstärkungsbleche aufeinandertreffen.

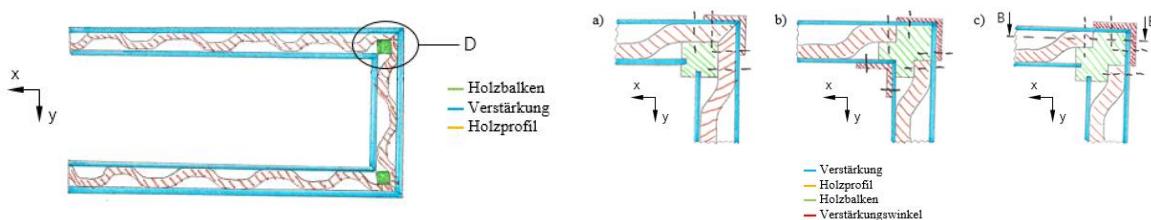


Abbildung 11: Konzepte für die Verbindungselemente der Seiten- und Stirnwand, aus [1]

1.1.3 Anwendungsfall PKW - Schwellereinleger

Im Rahmen des Projekts wurde im Arbeitsbereich „PKW“ als Demonstrator das Bauteil „Schwellereinleger“ eines elektrifizierten Mittelklasse-PKW als zentrales Referenzbauteil für die Entwicklung und Erprobung nachhaltiger, hybrider Materialsysteme ausgewählt. Die Wahl fiel auf dieses Bauteil aufgrund seiner strukturellen Relevanz, seiner hohen sicherheitstechnischen Anforderungen sowie seiner potenziellen Eignung für Materialsubstitutionen im Sinne ökologischer Nachhaltigkeit. In all diesen Aspekten kann Albasia-Holz mit seinen spezifischen Eigenschaften Vorteile generieren.

Die Anforderungen an einen Schwellereinleger sind vielschichtig und ergeben sich aus verschiedenen technischen, funktionalen und prozessualen Rahmenbedingungen. Zunächst steht die mechanische Leistungsfähigkeit im Vordergrund: Der Schwellereinleger muss im Falle eines Seitenaufpralls eine hohe Crashenergie absorbieren, das Intrusionsverhalten kontrollieren und die Struktursicherheit des Fahrzeugs, insbesondere den Schutz der Batterie, gewährleisten. Dies erfordert eine präzise Auslegung hinsichtlich Geometrie, Materialverhalten und Lastpfaden innerhalb der Fahrzeugstruktur.

Ein weiterer zentraler Aspekt ist die Kompatibilität mit bestehenden Fertigungsprozessen. So ergeben sich spezifische Anforderungen an die Fügetechniken, die Anbindungspunkte sowie die thermischen und chemischen Belastungen während der Produktion, etwa durch Lacktrocknung oder Klebstoffhärtung. Die Auswahl geeigneter Fügeverfahren – insbesondere für die Kombination von Holzwerkstoffen mit Metallen – ist daher ein integraler Bestandteil der Bauteilentwicklung.

Im Zuge der angestrebten Materialsubstitution wurden neue Anforderungen formuliert, die sich aus der Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen wie Holz ergeben. Diese Materialien bringen spezifische Eigenschaften mit sich, etwa hinsichtlich Feuchtigkeitsaufnahme, Quell- und Schwindverhalten, Verdichtbarkeit und Klimabeständigkeit. Die Integration dieser Werkstoffe in die Fahrzeugstruktur erfordert eine genaue Kenntnis ihrer mechanischen Eigenschaften unter verschiedenen Belastungs- und Umweltbedingungen. Hierzu wurden umfangreiche Materialcharakterisierungen durchgeführt, darunter Scherzugversuche, Biegeprüfungen und Klimatests nach automobilen Standards.

Insgesamt zeigt sich, dass die Anforderungen an entsprechende hybride Schwellereinleger im Projekt weit über klassische technische Spezifikationen hinausgehen. Sie umfassen eine ganzheitliche Betrachtung von Funktion, Fertigung, Nachhaltigkeit und Werkstoffverhalten und bilden damit die Grundlage für innovative Ansätze im automobilen Leichtbau mit nachwachsenden Rohstoffen

1.2 Produktionstechnologien

1.2.1 Klebstoffe

Der Einsatz geeigneter Klebstoffsysteme spielt eine zentrale Rolle für die Umsetzung hybrider Materialkonzepte, insbesondere bei der Verbindung von Holzwerkstoffen mit Metallen oder anderen Strukturmaterialien. Die Anforderungen an Klebstoffe sind dabei vielfältig und eng mit den spezifischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien sowie den Bedingungen der automobilen Serienfertigung verknüpft.

Ein wesentliches Ziel des Projekts ist die Integration von nachwachsenden Rohstoffen, wie Albasiahholz und/oder Buchenholz, in tragende und nicht-tragende Fahrzeugbauteile. Diese Werkstoffe bringen besondere Herausforderungen mit sich, etwa hinsichtlich Feuchtigkeitsaufnahme, Quell- und Schwindverhalten, sowie Oberflächenstruktur, die sich direkt auf die Klebfähigkeit und die Langzeitstabilität der Klebeverbindung auswirken. Daher wurden im Projektverlauf verschiedene Klebstoffe getestet, darunter insbesondere 1K PUR-Systeme, die bereits in früheren Projekten für heimische Hölzer qualifiziert wurden.

Die Auswahl geeigneter Klebstoffe erfolgt unter Berücksichtigung von prozessspezifischen Anforderungen wie Aushärtezeiten, Temperaturbeständigkeit, Kompatibilität mit automatisierten Applikationssystemen sowie der Eignung für den automobilen Serieneinsatz. Dabei ist die Adaptierbarkeit bestehender Klebstoffsysteme ein entscheidender Faktor, um die Integration neuer Werkstoffe in bestehende Fertigungslinien zu ermöglichen, ohne umfangreiche Prozessumstellungen vornehmen zu müssen.

Im Rahmen der Fertigungsuntersuchungen wurden Klebstoffe nicht nur hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften (z. B. Scherfestigkeit, Alterungsbeständigkeit), sondern auch im Hinblick auf ihre Verarbeitbarkeit bei unterschiedlichen Verdichtungsgraden der Holzwerkstoffe getestet. Besonders relevant ist dies bei der Herstellung von Sandwichstrukturen.

Darüber hinaus wurden erste Untersuchungen zu mechanischen Fügetechniken vorbereitet, die als Ergänzung oder Alternative zur Klebung dienen können – insbesondere dort, wo Klebstoffe an ihre Grenzen stoßen oder zusätzliche Sicherungselemente erforderlich sind. Ziel war es, Strategien für robuste und prozesssichere Fügetechnologie zu entwickeln, die den Anforderungen der automobilen Serienproduktion gerecht werden und gleichzeitig die Vorteile nachhaltiger Werkstoffe voll ausschöpfen.

Insgesamt zeigt sich, dass Klebstoffe im Projekt SuMatHrA nicht nur als Verbindungsmittel, sondern als Schlüsseltechnologie für die erfolgreiche Umsetzung hybrider und nachhaltiger Materialkonzepte betrachtet werden müssen. Ihre Auswahl, Anpassung und Integration in die

Produktionsprozesse sind entscheidend für die Funktionalität, Zuverlässigkeit und Serientauglichkeit der entwickelten Bauteile.

1.2.2 Formholzherstellung

1.2.2.1 Vorversuche

Nach Erhalt der Materiallieferungen von Broszeit, bestehend aus Albasiafurnieren und -sperrholzplatten in verschiedenen Dicken –, wurden drei verschieden Versuchsaufbauten ausgearbeitet.

Es wurden folgende Versuchsaufbauten für die Prüfkörper festgelegt und umgesetzt:

Versuch 1:

Zweilagig in Längsrichtung – Herstellung von 10 Prüfkörpern

Versuch 2:

Zweilagig, einmal längs und einmal quer (kreuzweise) – Herstellung von 5 Prüfkörpern

Versuch 3:

Dreilagig, längs-quer-längs – Herstellung von 5 Prüfkörpern

In diesem Zusammenhang wurde besonders darauf geachtet, welche Furnierlagen in welcher spezifischen Anordnung miteinander verleimt werden sollten, um eine vielseitige Auswahl an Prüfkörpern für experimentelle Tests zu generieren. Die Durchführung der Versuche erfolgte mithilfe der Trapezform-Pressvorrichtung des DLR sowie der Alfred Kiess GmbH hauseigenen Furnierpresse. Im Zuge dieser Weiterentwicklung wurden ebenfalls umfassende Stücklisten erstellt, um eine akkurate Reproduktion der Prüfkörper sicherzustellen.

Aus den ersten Pressversuchen ergaben sich direkt einige Optimierungsmaßnahmen, die es für die kommenden Vorgänge galt, fortlaufend umzusetzen.

Während der Versuchsdurchführung im ersten Prüfzyklus wurden Längsrisse im Furnier festgestellt. Zur Verbesserung dieser Ergebnisse wurden folgende Optimierungsmaßnahmen eingeleitet:

1. Vorspannung der Furniere vor dem Pressvorgang: Durch das abwechselnde Vorspannen der einzelnen Furnierlagen zwischen Leisten wurde eine vorläufige Formgebung, die die Entstehung von Rissen reduzierte erzielt.
2. Zusätzliche Feuchtigkeit in den Furnierschichten: Das Hinzufügen von Feuchtigkeit (wässern) ermöglichte eine beschleunigte Anpassung der Furniere an die Pressform.

3. Untersuchung alternativer Klebstoffe: Versuchsdurchführung mit dem Klebstoff von Forschungspartner VW, um potenzielle Verbesserungen in den Verbindungseigenschaften zu evaluieren.

Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden als Grundlage für den zweiten Prüfzyklen herangezogen, um v.a. ein optimiertes Pressverfahren festzulegen. Parallel dazu wurde die Durchführung eines projektteamübergreifenden Workshops zum Thema Klebstoffe geplant und umgesetzt.

Die gewonnenen Erkenntnisse flossen zudem in die Prototypenherstellung für den Anwendungsfall 3 "Albasiamaterial als Kern für eine spezielle Handlaufform" ein. Hier bestand die Herausforderung vor allem in der Umsetzung der kleinen Innenradien (ca. 40mm). Hierbei ist nicht nur wichtig den Radius zu biegen, sondern dass die sichtbare Oberfläche noch geeignet für eine Beschichtung ist. Die ersten Ergebnisse aus den oben Beschriebenen Versuchen lassen hier vermuten, dass ggf. eine Hybridisierung mit einem anderen Furnier als Decklage nötig ist.



Abbildung 12: Presswerkzeuge in verschiedenen Radien

Da die Qualität der gepressten, trapezförmigen, Prüfkörper nicht dafür geeignet war, diese bezüglich ihrer mechanischen Kennwerte zu untersuchen, wurde der Entschluss getroffen,

die Prüfkörper hinsichtlich ihres Aufbaus (Furnierschichten) qualitativ und quantitativ nach den Kriterien **Stabilität**, **Ausrisse**, und **Formstabilität** zu bewerten. Die Bewertung wurde mit Zahlen von eins bis fünf vorgenommen. 1=mangelhaft, 2=ausreichend, 3=befriedigend, 4=gut und 5=sehr gut.

Das Ergebnis zeigte, dass je mehr Furnierlagen miteinander verpresst werden, desto besser die Qualität hinsichtlich der oben beschriebenen Kriterien ist.

Der dreilagige, versperzte Aufbau der Furnierlagen, war dementsprechend am besten bewertet (längs + quer + längs = 11 Punkte, längs + quer = 7 Punkte, längs + längs = 6 Punkte).

Die Erkenntnis aus der Versuchsdurchführung mit dem sich aufschäumenden PU-Leim, bereitgestellt durch Volkswagen, war, dass dieser besser als der im Versuch 01 verwendete Weißleim (Polyvinylacetat-Leim) in die Risse und Poren der Albasia-Furniere eindringt und so für einen stärkeren Verbund der einzelnen Furnierlagen untereinander sorgt.

Aus den genannten Gründen sollten die oben genannten Erkenntnisse im zweiten Prüfzyklus Anwendung finden.

Dazu wurden Furnierlagen für die Herstellung von dreischichtigen Prüfkörpern (längs + quer + längs) zugeschnitten. Für die Verleimung wurde ausschließlich PU-Leim verwendet und die oben beschriebenen Erkenntnisse zur Optimierung des Pressvorganges wurden angewendet.

Ausgewertet wurde der Versuch nach dem oben beschriebenen Bewertungsschema. Die verpressten Prüfkörper wiesen eine sichtlich gesteigerte Qualität auf und haben mit 13 Punkten am besten abgeschlossen.

Tabelle 2: Versuchsauswertung Pressversuche Formsperrholz

Versuchsauswertung Pressversuche Formsperrholz										
	Pressversuch Formsperrholz V01				Bemerkung	Pressversuch Formsperrholz 01				
	Furnierrichtung					Furnierrichtung				
	L+L	L+Q	L+Q+L	L+Q+L (PU-Leim)		L+L	L+Q	L+Q+L	L+Q+L (PU-Leim)	
Stabilität	1	3	4	5		Schüsselt, verzogen, wenig Ausrisse, Form verfließt	Ein bisschen geschüsselft und verzogen, mehr Ausrisse, Form verfließt kaum verzogen, Form verließen kaum, mittelmäßig Ausrisse	kaum geschüsselft, kaum verzogen, Form verließen kaum, kaum Ausrisse. Hohlräume mit Klebstoff ausgefüllt.	kaum geschüsselft, kaum verzogen, Form verließen kaum, kaum Ausrisse. Hohlräume mit Klebstoff ausgefüllt.	
Ausrisse	4	2	3	4						
Formstabilität	1	2	4	4						
Summe	6	7	11	13						

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse wurden weitere Versuche zur Steigerung der Qualität vorgenommen. Beim Prüfzyklus Formholzversuch V3 wurden neben dem Einsatz einer neu konstruierten Trapezpressform mit größeren Radien (>12mm), die das Brechen der Faser minimieren soll, bei Zyklus V4 ein Albasiafurnier in der Stärke von 0,6mm eingesetzt, welches später auch für die passende Auswahl im Anwendungsfall Aufzug dient, um dessen Einfluss auf die Qualität zu prüfen.

Unter Verwendung der angepassten Trapezpressform wurden 10 Formholzteile im 3-lagig, versperrten Furnieraufbau unter Verwendung von PU-Leim, hergestellt und qualitativ, wie auch schon im "Formholzversuch 01-03" ausgewertet.

Es stellte sich heraus, dass sich die Anpassung der Pressgeometrie positiv auf die Oberflächenqualität sowie auf die Bruchbildung und somit auch auf die Formstabilität auswirkt.

Ein weiterer Ansatz zur Qualitätsoptimierung hinsichtlich Oberfläche und Formstabilität war die Verwendung von handelsüblichem Furnier als Decklagen, Mittellagen bzw. eine Kombination aus beidem. Aufgrund der Homogenität und Flexibilität von Birkenholz wurde ebensolches für den "Formholzversuch 04" in einer Stärke von 0,6 mm verwendet.

Die Versuchsauswertung hat gezeigt, dass sich durch die Kombination von Birken- und Albasiafurnier im Vergleich zu einem Sperrholzaufbau rein aus Albasiafurnieren, die oben genannten Eigenschaften noch weiter verbessern lassen.

Daraus lässt sich Folgendes feststellen:

1. je größer der Radius der Pressform, desto besser die Qualität des Formholzteils.
2. durch den Einsatz von 0,6mm dickem Furnier hatte der kleinere Radius keinen negativen Einfluss mehr auf die Qualität des Formholzteils
3. Durch die dünnen Furniere sind andere Pressgeometrien (kleinere Radien) möglich

Aus den Schlussfolgerungen der ersten vier Versuchszyklen ergibt sich die Frage, was die kleinstmöglichen Radien bei einer Werkstoffdicke von 7 mm sind.

Um diese Frage beantworten zu können, wurden Presswerkzeuge mit verschiedenen Radien gefertigt (Außenradius 15mm / Innenradius 8 mm), (A.R. 12 / I.R. 5), (A.R. 10 / I.R. 3), (A.R. 9 / I.R. 2).

Für den direkten Vergleich zwischen dickem (3 mm) und dünnem (0,6 mm) Furnier, wurden mit den jeweiligen Furnieren Formholzteile hergestellt.

Wie zu erwarten war, ist die Qualität der Formholzteile aus 0,6 mm dickem Albasia-Furnier grundsätzlich besser. Während mit dem 3 mm dicken Furnier nur Radien bis (A.R. 12 / I.R. 5) möglich waren, konnten mit dem 0,6 mm Furnier auch Radien bis (A.R. 9 / I.R. 2), hergestellt werden.

1.2.2.2 Handlaufherstellung

Für den Anwendungsfall 3 "Handlauf" wurden zwei unterschiedliche Varianten konstruiert und

gefertigt:

Variante 1:

Ein L-förmiger Handlauf mit einer auf Gehrung ausgeführten Ecke, hergestellt aus 35mm dickem Albasia-Sperrholz. Der Handlauf wurde mit einer über Eck verlaufenden Neigung gefertigt.

Variante 2:

Ein ebenfalls über Eck verlaufender Handlauf mit einer 90°-runden Ecke, die aus mehreren 3 mm dicken Albasia-Sperrholzlagen aufgebaut wurde.



Abbildung 13: Formholzherstellung Aufzugshandlauf - oben Variante 1, unten Variante 2

Hierfür wurde auf Basis der Erkenntnis aus den vorangegangene Formholzversuchen zunächst eine Schablone gefertigt, um die einzelnen Furnierlagen passgenau zu verleimen und in Form zu bringen. Beide Handlauf-Varianten konnten erfolgreich hergestellt werden. Dabei zeigte sich, dass die Produktion von Formteilen in größeren Geometrien grundsätzlich möglich ist. Allerdings erwies sich der Fertigungsprozess als sehr aufwändig. Für eine mögliche Serienproduktion sollten daher optimierte Schablonen und Fertigungsprozesse entwickelt werden.

1.2.2.3 Seitenwand Güterkapsel

Die Wandelemente der Güterkapsel bestehen aus Formteilen in der Mittellage, die auf Basis der ursprünglichen Trapezpressgeometrie gefertigt und miteinander verklebt sind. Sie liegen zwischen zwei Sperrholzplatten, die außen mit einer dünnen Aluminiumschicht versehen wurden. So entsteht ein leichter und zugleich stabiler Wandaufbau.

Die Formteile der Mittellage bestehen aus drei Lagen Albasia-Furnier mit einer Dicke von jeweils etwa 3 mm. Diese werden im $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ Verbund verleimt, wobei die 0° -Lage in Längsrichtung der Formholzteile verläuft. Zuerst wurde die Pressform aus Negativ- und Positivform konstruiert, sodass im dazwischen entstehenden Hohlraum die Formholzteile mit der richtigen Wandstärke verpresst werden. Die Konstruktion der Formholzteile sieht einen Versatz zwischen den beiden Flanschen des Formteils vor (siehe Abbildung 14 a)). Dies hat den Zweck, dass im Wandsegment die Formteile aneinander geleimt werden können (siehe Abbildung 14 b)). Die Formteile haben nach der Fertigung in der Presse bereits die gewünschte Länge. Lediglich die Flansche müssen auf beiden Seiten besäumt werden. Als Klebstoff für die Herstellung der Formteile kommt ein 1K-PUR Klebstoff zum Einsatz.



a) CAD-Modell der Form für die Formholzteile b) Formholzteil als Mittellage im Wandsegment

Abbildung 14: CAD-Modell der Pressform und Formholzteil der Mittellage der Wandsegmente

Bei der Fertigung wurden die Vorgaben des Projektpartner sowie Erfahrungen aus der Formholzherstellung einbezogen. Das Wandelement mit den Maßen 1 x 1 Meter wurde als Ecke ausgeführt und zur besseren Handhabung auf einer Palette verschraubt. Das Wandsegment ist in Abbildung 15 dargestellt. Stehend auf der Ecke des Wandsegements ist ein Demonstrator-Segment mit einer Decklage aus Aluminium zu sehen. Dieses Segment, das ein Ausschnitt des Wandelements ist, wird für die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten genutzt (siehe Kapitel 1.3.9.)



Abbildung 15: Wandsegment als Demonstrator der Güterkapsel

1.2.2.4 Hybrides Materialsystem

Verdichtung von Plattenwerkstoffen

Erkenntnisse aus Vorversuchen

Vor der weiteren Versuchsplanung gewannen wir aus bereits durchgeführten Druckversuchen Erkenntnisse darüber, dass Albasia-Sperrholzplatten im Vergleich zu herkömmlichen Spanplatten eine niedrigere Drucktoleranz aufweisen. Dies führte dazu, dass unser Interesse daran zunahm, die Albasia-Sperrholzplatten unter Einbeziehung von Schichtstoffen zu untersuchen. Ziel war es, die potenziellen Effekte der Wechselwirkung zwischen Trägermaterial und Schichtstoffen auf das Gesamtverhalten genauer zu bestimmen.

Da wir als verarbeitender Betrieb das Interesse haben, die Sperrholzplatten zu dekorativen Zwecken im Aufzugsbau einzusetzen und durch zusätzliche Verbundbeschichtungen zu modifizieren, bestand die Frage, ob sich das Material trotz der verhältnismäßig geringen Dichte mit den üblichen Pressdrücken beschichten lässt.

Überprüfung der Beschichtungstauglichkeit von Albasia-Sperrholzplatten

Um diese Frage zu beantworten, sollten die verschiedenen zur Verfügung stehenden Albasia-Sperrholzplatten unter einer Furnierpresse mit dem spezifischen, bei dem Beschichten üblichen Drücken, verpresst werden.

Wichtige Kennwerte für die Beurteilung der Beschichtungstauglichkeit sind die mittlere Dickenänderung [mm] und die Dichte [Kg/m³].

Die mittlere Dickenänderung gibt Aufschluss darüber, ob das Plattenmaterial durch die Dimensionsänderung noch im Toleranzbereich zur weiteren Be- und Verarbeitung im Möbel

bzw. Aufzugsbau geeignet ist. Die Dichte soll als Vergleichskennwert zu herkömmlich verwendetem Plattenmaterial wie z.B. Span- oder MDF-Platte dienen.

Um diese Kennwerte zu bestimmen, wurde vorher der Querschnitt der Prüfkörper von 350 x 350 mm (L x B) festgelegt und jeweils vier Prüfkörper zugeschnitten. Anschließend wurde das Gewicht und die Dicke vor- und nach dem Pressvorgang bestimmt. Durch die gemessenen Werte konnten die Durchschnittswerte für Gewicht, Dicke, Dickenänderung, Volumen, Volumenänderung sowie Dichte und Dichteänderung errechnet werden.

Getestet wurden Plattendicken von 15, 30 und 40mm. Die Schälfurnierschichten Albasia wurden mit 2,3mm Mittelwert gemessen. In folgender Tabelle wird die Dichteänderung während des Pressvorgangs nochmals genauer dargestellt.

Tabelle 3: Zusammenfassung Dichtenänderung durch Pressvorgang

Art	Zusammenfassung Dichtenänderung durch Pressvorgang				
	Plattendich nach AB [mm]	Mittlere Dicken änderung [mm]	Mittlere Dichte vor Pressvorgang [kg/m³]	Mittelwerte Dichte nach Pressvorgang [kg/m³]	Mittlere Dichtenänderung [kg/m³]
d+d Albasia, Qual. B/BB, 5/7-fach	15	-0,28	371,998	378,666	6,668
d+d Albasia, Qual. B/BB, 13-fach	30	-0,51	335,65	342,477	6,827
d+d Albasia, Qual. B/BB, 19-fach	40	-0,15	312,841	314,076	1,235
Birke Schaldeck B/BB 0,6mm nach SFS 2413	15	-0,25	353,898	358,815	4,917
beidseitig Okoume Deck, Qual. B/BB	15	-0,07	382,823	384,281	1,458
Albasia/ Facata Schälfurnier	2,3	-0,24	205,103	223,752	18,649

Während der Analyse der erhobenen Daten konnte festgestellt werden, dass die Verdichtung / Dickenreduzierung bei den Prüfkörpern mit höherer Dichte geringer als bei den Prüfkörpern mit geringerer Dichte ausgefallen ist.

Überraschenderweise wiesen die Albasia-Sperrholzplatten bereits vor dem Pressen Dickentoleranzen innerhalb der Platte (15mm) von bis zu 2 mm auf. Dies führte zu der Feststellung, dass die Produktionstoleranzen schließlich größer waren als die tatsächliche Dickenänderung nach dem Pressvorgang. Die mittlere Dickenänderung, die durch den Pressvorgang verursacht wurde, betrug 0,25 mm. Eine zusätzliche Beobachtung war, dass die Dichte der Platten mit zunehmender Dicke abnahm.

Während der Pressversuche wurden interessante Erkenntnisse gewonnen. Überraschenderweise wiesen die Albasia-Sperrholzplatten bereits vor dem Pressen Dickentoleranzen innerhalb der Platte (15mm) von bis zu 2 mm auf. Dies führte zu der Feststellung, dass die Produktionstoleranzen schließlich größer waren als die tatsächliche Dickenänderung nach dem Pressvorgang. Die mittlere Dickenänderung, die durch den Pressvorgang verursacht wurde, betrug 0,25 mm. Eine zusätzliche Beobachtung war, dass die Dichte der Platten mit zunehmender Dicke abnahm.

Insgesamt ergab sich die Schlussfolgerung, dass die Dickenänderungen infolge des Pressvorgangs zwar vorhanden waren, jedoch innerhalb akzeptabler Grenzen lagen.

Gleichzeitig wurde erkannt, dass die Toleranzen in der Plattendicke an sich beträchtlich waren. Dies führt zu Klärungsbedarf mit der Firma Broszeit, hinsichtlich der Plattendicken und den entsprechenden Bezeichnungen.

Des Weiteren hat sich bei der Analyse der Daten gezeigt, dass Albasia-Sperrholzplatten zum Beschichten mindestens eine Dichte im Bereich von 350 -380Kg/m³ benötigen um im Toleranzbereich von < 0,3mm Dickenänderung zu bleiben. Dieser Toleranzbereich basiert auf Erfahrungswerten im Schreinerhandwerk. Dicke Toleranzen > 0,3 mm führen erfahrungsgemäß zu optischen Mängeln und zu Problemen bei der Be- und Verarbeitung an den Holzbearbeitungsmaschinen.

Wenn man in der Tabelle die Plattenarten betrachtet, in denen die Dickenänderung im oben genannten Toleranzbereich liegt, konnte festgestellt werden, dass die Prüfkörper der jeweiligen Plattenarten (Lieferschein Pos. 3+(5) + 6+7 eine mittlere Dichte im Bereich von 350 Kg/m³ bis 390 Kg/m³ aufweisen. Unterhalb einer Dichte von 350 Kg/m³ liegt die Dickenänderung nicht mehr im Toleranzbereich.

Als Fazit kann dementsprechend angemerkt werden, dass handelsübliche Albasia-Sperrholzplatten ab einer Dichte von 350 Kg/m² für eine Oberflächenbeschichtung mit üblichen, in einer Schreinerei angewendeten Pressdrücken tauglich ist. Somit steht auch der Modifikation der Platten hinsichtlich der Beschichtungen für die Verbesserung weiterer technischer Kennwerte nichts im Wege.

Vorausgesetzt andere technische Kennwerte erfüllen bei der geringen Dichte die für den jeweiligen Einsatzzweck geforderten Anforderungen, so hätte man eine Gewichtsersparsnis von einer handelsüblichen Spanplatte zu einer Albasia-Sperrholzplatte von ca. 310 Kg/m³ (Dichte Spanplatte = 660 Kg/m³, Dichte Albasia Sperrholz = 350Kg/m³). Das Gewicht verringert sich um rund 47%.

1.2.3 Herstellung von Plattenwerkstoffen

1.

Verarbeitung von Albasia-Furnieren zu Sperrholz – Herausforderungen und Lösungsansätze

Phenolharzleim wird als Standardleim in der Produktion bei der Broszeitgruppe im Bereich Sperrholz eingesetzt.

Phenolharzleim, genauer Phenol-Formaldehyd-Harz (PF), gehört zur Gruppe der duroplastischen (thermisch härtenden) Kunsthärzleime. Diese Leime härteten unter Wärmeeinwirkung chemisch irreversibel aus und sind nach der Aushärtung dauerhaft form- und temperaturbeständig. Aufgrund ihrer hervorragenden Beständigkeit

gegenüber Feuchtigkeit, Hitze und chemischen Einflüssen finden sie seit Jahrzehnten breite Anwendung in der industriellen Holzwerkstoffverarbeitung – insbesondere für Anwendungen im Außenbereich.



Abbildung 16: links: Laumauftrag auf Furniere in der Industrieproduktion ; rechts: Etagenpresse mit Heizplatten

Typische Merkmale:

- Hohe Wasser- und Witterungsbeständigkeit
- Hohe Wärmebeständigkeit
- Dunkle Leimfuge (braun bis schwarz)
- Gute Alterungsbeständigkeit

Vorteile:

- Ideal für Außenanwendungen (z. B. Schalungsplatten, Fahrzeugbau, Marinebau)
- Hohe mechanische Festigkeit
- Gute chemische Beständigkeit
- Geeignet für Heißverpressung bei industriellen Prozessen

Nachteile:

- Gesundheitliche Risiken durch Formaldehyd-Emission (muss reguliert und kontrolliert werden – z. B. E1-Zertifizierung)
- Hohe Aushärtungstemperaturen erforderlich (i. d. R. > 120 °C)
- Dunkle Leimfuge kann in sichtbaren Anwendungen unerwünscht sein

Bei der Verpressung von Albasia-Furnieren zu Sperrholz treten im Vergleich zu anderen Holzarten häufiger Probleme auf. Besonders in Kombination mit Phenolharzleim ergeben sich spezifische Herausforderungen:

2. Wash-Out:

Albasia hat die Eigenschaft, Leim stark aufzusaugen, was zum sogenannten Wash-Out führen kann. Dabei verbleibt zu wenig Leim in der Leimfuge, wodurch keine ausreichende Kohäsion erreicht wird. Das führt zu unzureichender Verklebung und potenziell hoher Ausschussrate.

3. Leimspalter:

Wird versucht, den Wash-Out durch eine Erhöhung der Leimmenge zu kompensieren, entstehen bei wasserbasierten Leimen häufig sogenannte Leimspalter. Die Ursache liegt in der Dampfbildung, die im Leim enthaltene Feuchtigkeit verdampft während der Heißverpressung (bei Phenolharzleim in der Regel bei ca. 120°C).

Sobald der Pressdruck nachlässt, können die Platten durch den Dampfdruck aufspalten werden und die Leimfugen zerstören.

Eine Reduktion der Leimspalter konnte durch die Überwachung der Kerntemperatur mittels Temperatursensoren erzielt werden. Kritisch ist dabei, dass die Temperatur im Plattenkern 90 °C nicht überschreitet.

Dieses Vorgehen ist jedoch in der industriellen Serienfertigung kaum praktikabel oder wirtschaftlich, da die Presszeit deutlich erhöht werden muss und der Überwachungsaufwand dementsprechend hoch ist.



Abbildung 17: links: Ergebnis durch Wash-Out ; rechts: Leimspalter



Abbildung 18: links: Pressvorgang mit Phenolharzleim und Temperaturüberwachung im Kern der Platte um 90°C nicht zu übersteigen; rechts: Ergebnis der fertigen Platte Albasia d+d ohne Spalter und ohne Wash-Out

4. Rückmeldung aus der Praxis

Nach Rücksprache mit einer erfahrenen indonesischen Produktionsstätte, die Albasia Sperrholz herstellt, wurde bestätigt, dass auch dort regelmäßig mit den genannten Problemen zu tun hat und mit erhöhtem Ausschuss kalkulieren muss.

Lösungsansatz: Verwendung von Leimfilm

Zur Weiterentwicklung des SuMatHrA-Projekts wurde entschieden, auf Leimfilm umzustellen. Dieser trockene Klebstoff reagiert ausschließlich durch Wärmeeinwirkung, ohne zusätzliches Wasser aus dem Leim in das Furnierpaket einzubringen.

Dadurch konnten Leimspalter vollständig vermieden werden.

Wirtschaftlichkeit:

Für die klassische Sperrholzproduktion ist der Einsatz von Leimfilm wirtschaftlich nicht sinnvoll, da die Kosten etwa 10- bis 15-mal höher sind als bei herkömmlichem Phenolharzleim. Für spezifische Anwendungen – etwa in der Fahrzeugkomponentenfertigung – könnte auf Grund der hohen Wertschöpfung ein wirtschaftlich vertretbarer Rahmen vorliegen.

Albasia ist ein schnell wachsendes Holz mit einer vergleichsweise geringen Rohdichte von etwa 300 bis 350 kg/m³. Diese Eigenschaft bringt mehrere Besonderheiten mit sich, die bei der Verarbeitung zu Sperrholz berücksichtigt werden müssen.

Ein wesentlicher Nachteil der geringen Rohdichte ist, dass sich bereits bei geringem Pressdruck deutliche Toleranzen in der Plattenstärke ergeben. Die fertigen Platten weisen sowohl innerhalb einer Platte als auch im Vergleich zwischen den hergestellten Platten eine deutlich höhere Stärkevarianz auf als Beispielsweise bei Birken- oder Buchenhölzern, die wir fortlaufend verarbeiten in der regulären Produktion.

Trotz dieser Schwankungen kann die DIN EN 315 eingehalten werden! (Europäische Norm zur Maßhaltigkeit von Sperrhölzern)

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die hohe Hygroskopizität des Holzes. Albasia reagiert sehr schnell auf Veränderungen der Umgebungsfeuchte. Während dies im Herkunftsland Indonesien – mit konstant hoher Luftfeuchtigkeit – weniger problematisch ist, muss bei der Verarbeitung unter mitteleuropäischen Klimabedingungen stärker auf Lagerung und klimatische Einflüsse geachtet werden. Das Holz nimmt innerhalb kurzer Zeit Feuchtigkeit auf oder gibt sie ab, was direkte Auswirkungen auf Maßhaltigkeit und Verarbeitbarkeit hat.

Daher ist eine kontinuierliche Kontrolle der Holzfeuchte in der Produktion unerlässlich, um Qualitätsprobleme zu vermeiden und stabile Fertigungsprozesse zu gewährleisten.



Abbildung 19: links Albasia d+d Sperrholzplatte mit Leimfilm verarbeitet eine Kante besäumt, eine Kante roh; rechts Albasia d+d Sperrholzplatte mit Leimfilm verarbeitet besäumte Sägekante, (offenporige, fasrige Kante deutlich zu sehen)

1.2.3.1 Hybridisierung: Albasia als Trägermaterial

Der Vorteil einer Hybridisierung liegt darin, die jeweiligen Eigenschaften verschiedener Holzsorten zu kombinieren und dadurch die jeweilige positive oder gewünschte Eigenschaft zu nutzen.

Bsp.:

Das Holz der Albasia zeichnet sich durch eine sehr geringe Rohdichte im Bereich von etwa 280–350 kg/m³ aus und zählt damit zu den ausgesprochen leichten Laubholzarten. Diese geringe Dichte geht jedoch mit einer vergleichsweise niedrigen mechanischen Belastbarkeit einher, insbesondere in Bezug auf die Druckfestigkeit, die typischerweise Werte von nur 18–25 N/mm² erreicht.

Demgegenüber steht die Buche als schweres und zugleich mechanisch sehr leistungsfähiges Holz. Mit einer mittleren Rohdichte von etwa 700 kg/m³ sowie einer hohen Druckfestigkeit von

52–60 N/mm² bietet Buche hervorragende Festigkeits- und Steifigkeitswerte, wird jedoch aufgrund ihres hohen Gewichts nicht ohne Weiteres für Leichtbauanwendungen bevorzugt.

Durch die gezielte Hybridisierung dieser beiden Holzarten – konkret durch die Kombination von Albasia als leichten Trägerkern mit dünnen Decklagen aus Buche – lässt sich eine neuartige Verbundplatte erzeugen, die die Vorteile beider Materialien vereint: ein sehr geringes spezifisches Gewicht bei gleichzeitig signifikant verbesserter Druckfestigkeit und Oberflächenhärte. Solche mehrschichtigen Platten können insbesondere dort technische Vorteile bieten, wo einerseits Gewichtseinsparung, andererseits aber auch eine gewisse strukturelle Tragfähigkeit und Oberflächenbelastbarkeit gefordert sind, beispielsweise im Fahrzeugbau, Möbelbau oder Innenausbau.

Diese Kombination eröffnet somit neue Einsatzmöglichkeiten im Bereich des konstruktiven Leichtbaus und stellt eine interessante Alternative zu reinmassiven Plattenwerkstoffen dar. Eine gezielte Materialanordnung – Leichtkern plus harte Decklage – folgt dabei dem Prinzip der lastangepassten Werkstoffoptimierung.

Diese Kombination von Holzeigenschaften ist die Grundlage aller Holzwerkstoffe und deshalb auch sehr wichtig in der Sperrholsherstellung und Vermarktung.

Folgende Hybride wurden hergestellt:

Vergleich Rohdichte (Ø-Werte, 12 % HF):

- **Albasia:** 280–350 kg/m³
- **Pappel:** 380–450 kg/m³
- **Birke:** 600–700 kg/m³
- **Buche:** 680–750 kg/m³

Tabelle 4: oben: Albasia-Schichtholz mit Buchendecklage; Mitte: Albasia-Schichtholz mit Birkendecklage; unten: Albasia-Schichtholz mit Pappeldecklage

Kern	Deck-lage	Bilddarstellung	Beschreibung

			Buchendecklage: Erhöht die Druckfestigkeit, erhöht die Auszugsfestigkeit von Beschlagsteilen und Beschlagschrauben (Innenausbau von Fahrzeugen und Yachten) Dekorativer Anspruch kann angepasst werden. Decklage konnte mit allen vier Leimsystemen ohne Probleme verklebt werden. Platten haben sich nicht verzogen, Spannung in der Platte ausgeglichen bei symmetrischem Aufbau.
Albasia	Buche		Birkendecklage: erhöht die Druckfestigkeit, erhöht die Auszugsfestigkeit von Beschlagsteilen und Beschlagschrauben (Innenausbau von Fahrzeugen und Yachten) Dekorativer Anspruch kann angepasst werden. Decklage konnte mit allen vier Leimsystemen ohne Probleme verklebt werden. Platten haben sich nicht verzogen, Spannung in der Platte ausgeglichen bei symmetrischem Aufbau.

			Pappeldecklage: Pappel erhöht das Gewicht nur minimal, da nur wenig höhere Dichte hat als Albasia. Pappel kann im Vergleich zu Albasia eine gleichmäßige Faserstruktur und lässt sich besser schleifen, lackieren und ergibt saubere Kanten bei der zerspanenden Bearbeitung. Decklage konnte mit allen vier Leimsystemen ohne Probleme verklebt werden. Platten haben sich nicht verzogen, Spannung in der Platte ausgeglichen bei symmetrischem Aufbau.
Albasia	Pappel		



Abbildung 20: Etagenpresse mit beheizten Pressblechen zur Verarbeitung von Phenolharz



Abbildung 21: l. o.: Leimauftragswalze mit D4 Leim ; l. u.: Leimbild nach Leimauftrag ; m. o.: leimauftragswalze mit PU-Leim ; m. u.: „aufgeschäumter“ PU- Leim nach der Reaktion und Aushärtung ; r. o.: Leimauftrag Phenolharzleim ; r. u.: Leimbild Phenolharzleim

1.2.3.2 Verarbeitete Leimsysteme

Folgende weitere Leimsorten wurden getestet:

Phenolhartleim Prefere 14J175

Technisches Datenblatt

Prefere® 14J175

Construction Resins



Anwendung

Dieses Produkt ist in Verbindung mit einem pulverförmigen Härter geeignet zur Herstellung von Sperrholz im Naßverfahren. Bei sachgerechter Verleimung werden die Anforderungen der EN 314-2/Klasse 3 erfüllt.

Eigenschaft	Kennwert	Standard
Viskosität (20°C)	200 – 300mPas	DIN EN ISO 12058-1
Nichtflüchtige Anteile (1g, 2h, 120°C)	47,0 – 49,0%	RD 152
Dichte (20°C)	1,19 – 1,21g/cm³	DIN EN ISO 3675

Abbildung 22: Auszug technisches Datenblatt prefere

Weißleim D4 Grünig



Technisches Datenblatt PVAc-Klebstoff 811/4503

Datum: 20.03.2025

Anwendungsbeschreibung:

Der Klebstoff 811/4503 ist ein einkomponentiger Dispersionsklebstoff für Verklebungen die eine hohe Feuchtebeständigkeit nach EN204 D4 erfordern und verfügt über eine Wärmebeständigkeit nach DIN EN 14257 (WATT 91) von 7,6 N/mm². Dem Klebstoff 811/4503 wird kein Füllstoff oder Formaldehyd zu gesetzt. Klebstoff 811/4503 wird bei unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt.

Unser 1-K-D4 Klebstoff 811/4503 kann kalt, warm und mit Hochfrequenz verpresst werden.

Spezifikation:

Farbe:	weiß
Form:	flüssig
Feststoffgehalt in %:	50 +/- 1
Schutzkolloid:	Polyvinylalkohol
Viskosität in mPas:	7.000 +/- 1.000
Dichte:	1,08 g/cm ³ +/- 0,01 g/cm ³
pH-Wert:	3,0 +/- 0,5
Oberfläche:	trocken
Reißdehnung:	leicht elastisch
Arbeitstemperatur:	Minimum 20 °C

Abbildung 23: Auszug technisches Datenblatt Gründig

Pu- Leim (PU-160.530) COSMO

Technisches Datenblatt

COSMO PU-160.110

***COSMOPUR 810

1-K-PUR-Klebstoff

Presszeit

Holz-/Holzverleimungen bei +20 °C	ca. 90 min
-----------------------------------	------------

Aushärtezeit

bei +20 °C, 50 % r.F. zu ~75 %	24 h
--------------------------------	------

bis zum Erreichen der Endfestigkeit	7 d
-------------------------------------	-----

Wärmeklebfestigkeit

nach DIN EN 14257 (WATT 91)	ca. 8,5 N/mm ²
-----------------------------	---------------------------

Zugscherfestigkeit

nach DIN EN 1465, Buche bei +20 °C	ca. 13 N/mm ²
------------------------------------	--------------------------

Auftragsmenge

je nach Trägermaterial	ca. 100-350 g/m ²
------------------------	------------------------------

Mindestverarbeitungstemperatur	ab +7 °C
---------------------------------------	----------

Abbildung 24: Auszug technisches Datenblatt COSMO

Leimfilm Surfactor



SURFACTOR® gluTEG SURFACTOR® GM, GP Leimfilm formaldehydreduziert

ALLGEMEINES

SURFACTOR® gluTEG 188, 188 und 190 (GP 188, GP 188, GP 190) sind Leimfilme auf der Basis eines modifizierten Phenolharzes zum Verkleben von Furnieren mit Aluminiumfolien und dünnen Aluminiumblechen. Bei entsprechend ausgelegten Presswerkzeugen können auch Aluminiumdruckgußteile verklebt werden. Die Eignung für die jeweiligen Legierungen muss im Einzelfall erprobt werden.

SURFACTOR® gluTEG 212, 410, 411, 412, 422 (GM 212, GM 410, GM 411, GM 412, GP 422) sind modifizierte Melamin oder Phenol Leimfilme. Sie eignen sich besonders zur Verleimung von Furnieren.

SURFACTOR® gluTEG 426 (GP 426) ist ein Phenolharzleimfilm für Holz/Holz-Verleimungen und wird bevorzugt eingesetzt, wenn man optisch störende Harzdurchschläge bei der Verpressung von Edelholzfurnieren vermeiden will.

SURFACTOR® gluTEG 113 (GM 113) ist ein Melaminharzleimfilm und wird speziell bei Holz/Holz-Verleimungen eingesetzt, wenn helle Klebfugen erwünscht sind. Der Film weist eine erhöhte Flexibilität auf. Enge Radien sind möglich. Verarbeitungstemperaturen ab 110°C sind möglich.

Durch den Einsatz von Leimfilmen werden exakt dosierte Leimmengen in die Klebfuge eingebracht. Im Gegensatz zur Flüssigverleimung entfällt der für den Leimauftrag erforderliche Wasseranteil in der Leimflotte.

TECHNISCHE DATEN

Produktnamen		Filmgewicht (g/m ²)	Verklebung	Klebfuge	Kochfestigkeit
Neu	Alt				
gluTEG 188	GP 188	95	Holz/Aluminium	dunkel	A 100
gluTEG 188	GP 188	95	Holz/Aluminium	schwarz	A 100
gluTEG 190	GP 190	95	Holz/Aluminium	tiefschwarz	A 100
gluTEG 426	GP 426	90	Holz/Holz	dunkelbraun	A 100
gluTEG 422	GP 422	120	Holz/Holz	dunkelbraun	A 100
gluTEG 113	GM 113	100	Holz/Holz	hell	A 100
gluTEG 212	GM 212	95	Holz/Holz	dunkelbraun	A 100

Abbildung 25: Auszug technisches Datenblatt Surfactor

1.2.4 Herstellung Schwellerblöcke

Die Herstellung der Schwellerblöcke erfolgte mit PU-Leim und Albasia Furnieren in verschiedenen Furnierlagen. Es wurden 9 verschiedene Varianten hergestellt und jeweils 10 Teile.

Die Schwierigkeit lag darin, dass die Furniere bei einigen Varianten einen sehr hohen Aufbau hatten und der PU-Leim unter Zugabe von Pressdruck wie Gleitmittel gewirkt hat. Dadurch

sind die Furniere verrutscht und eine Verleimung unter Pressdruck nicht möglich. Wir haben Abhilfe geschaffen, indem wir mit langem Holzdübel die Furniere fixiert haben.



Abbildung 26: Schwellerblöcke mit verschiedenen Furnieraufbauten und Furnierlagen innerhalb des Schwellers.

1.3 Materialcharakterisierung

1.3.1 Quasistatische und dynamische Charakterisierung von Albasia

Neben der umfassenden quasistatischen Materialcharakterisierung des Albasia-Holzes, die für die Entwicklung von Simulationsmodellen notwendig ist, wird im Rahmen dieses Forschungsprojektes weiterhin eine dehnrateabhängige Charakterisierung des Werkstoffes durchgeführt. Bei der Betrachtung der geplanten Anwendungsfälle, insbesondere bei der

crashbelasteten Struktur der Volkswagen AG, ist das Verständnis eines dehnratenabhängigen Materialverhaltens in der Druckbelastung von besonderer Bedeutung.

1.3.1.1 Probengeometrie, Versuchsaufbau und -durchführung

Für die Untersuchung des dehnratenabhängigen Materialverhaltens werden würfelförmige Prüfkörper mit einer Kantenlänge von 30 mm aus Albasia-Schichtholz gefertigt. Der Laminataufbau besteht dabei aus unidirektional angeordneten Furnieren. Die einzelnen Furniere haben eine Stärke von ca. 3 mm. Daraus ergibt sich, dass ein Würfel aus 9 einzelnen Furnierlagen sowie zwei sehr dünnen Decklagen aufgebaut ist.

Der Versuchsaufbau der quasistatischen Prüfungen ist in der Abbildung 27 dargestellt. Die quasistatischen Druckprüfungen werden auf einer ZwickRoell Universalprüfmaschine mit einer Maximalkraft von 250 kN bei einer Prüfgeschwindigkeit von 0,1 mm/s durchgeführt. Da die Prüfkörper aus unidirektional aufgebauten Platten hergestellt wurden, ist es möglich, dass die folgenden drei Ausrichtungen der Würfel geprüft werden: longitudinal, tangential sowie radial.

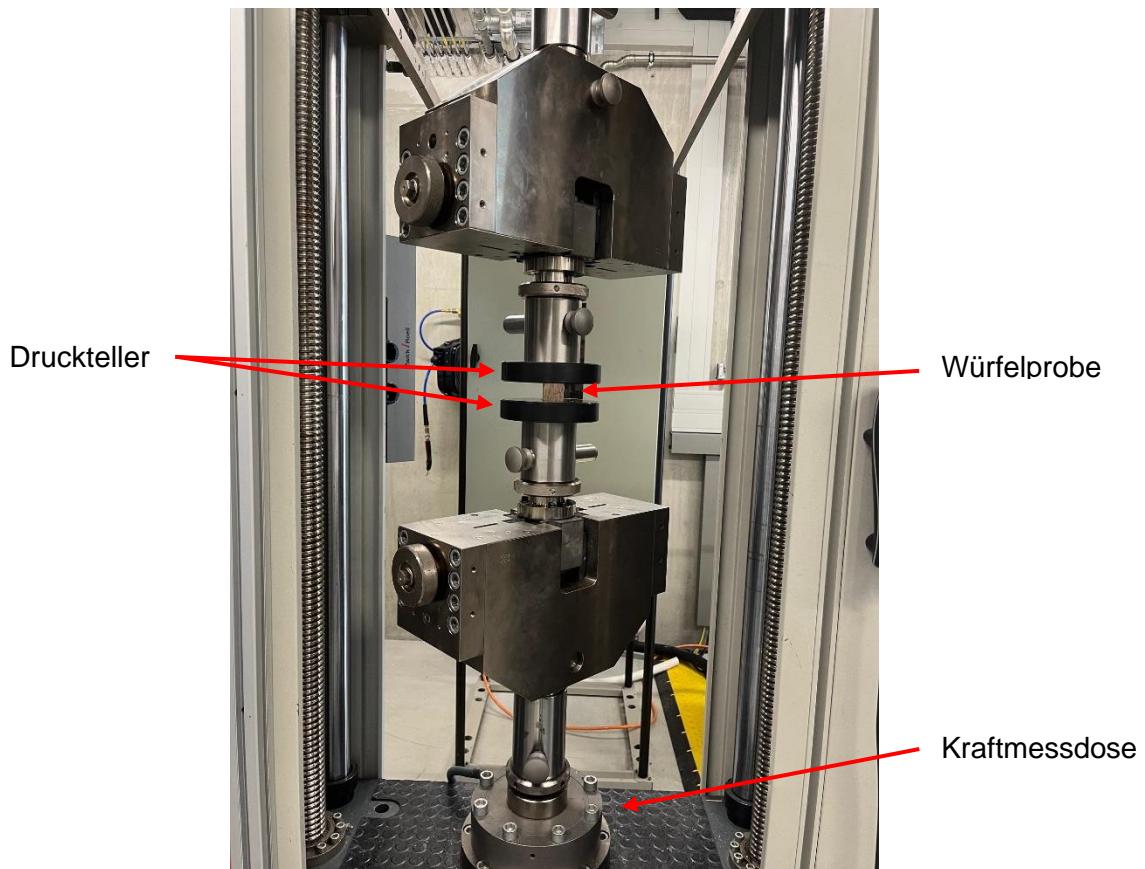


Abbildung 27: Versuchsaufbau der quasistatischen Druckprüfungen an Würfelproben

Die dynamischen Prüfungen werden auf einer ZwickRoell HTM 16020 mit einer Maximalkraft von 100 kN durchgeführt. Für die dynamische Materialcharakterisierung wurden Prüfgeschwindigkeiten von 1 m/s, 10 m/s und 20 m/s ausgewählt.

1.3.1.2 Ergebnisse der Materialcharakterisierung

Wie bereits erwähnt, wurde die drei Faserrichtungen: longitudinal, radial und tangential geprüft. Für jede der drei Orientierungen wurden mindestens drei Proben pro Prüfgeschwindigkeit getestet. Die dargestellten Abbildungen zeigen jeweils eine repräsentative Probe pro Prüfgeschwindigkeit und Faserorientierung. Die Auswertung der dynamischen Materialcharakterisierungen an den Würfelproben erfolgt anhand der Kraft-Weg-Charakteristik. Dabei wird die gemessene Kraft der Kraftmessdosen über die Intrusion des Druckellers aufgetragen.

Bei der Betrachtung der radialen Faserorientierung zeigt sich im Allgemeinen ein ähnlicher Kraft-Weg-Verlauf bei dem Vergleich der einzelnen Prüfgeschwindigkeiten (s. Abbildung 28). Bis zu einer Intrusion von circa 15 mm lässt sich ein stetiger Kraftanstieg verzeichnen. Hervorzuheben ist hierbei, dass die Proben mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 m/s und 20 m/s einen steileren Kraftanstieg aufweisen und dehnrateabhängige Effekte in der Steifigkeit erkennbar sind. Des Weiteren lassen sich bei den Proben mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 m/s und 20 m/s dynamische Effekte der Prüfungen in Form von wellenförmigen Kraft-Weg-Verläufen erkennen. Ab einer Intrusion von circa 15 mm zeigt sich ein exponentieller Kraftanstieg bis hin zur maximalen Prüfkraft von 100.000 N. Die Proben mit der höchsten Prüfgeschwindigkeit weisen hierbei die stärkste Steigung auf, wohingegen die Proben mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,1 m/s den flachsten Kraftanstieg erkennen lassen.

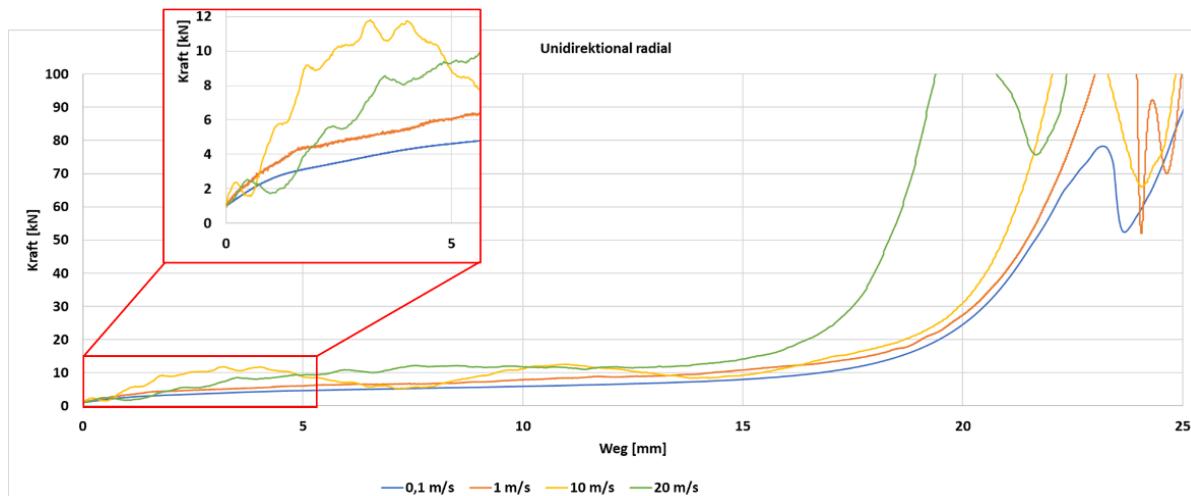


Abbildung 28: Repräsentative Kraft-Weg Charakteristik der radialen Würfelproben aus unidirektionalem Albasia-Schichtholz

Die Abbildung 29 zeigt die repräsentativen Kraft-Weg-Verläufe der Proben mit einer tangentialen Faserorientierung. Bei einer Intrusion unterhalb von 5 mm zeigt sich bei allen Proben ein erstes Kraftmaximum. Die Proben mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,1 m/s lassen hierbei ein Kraftmaximum von circa 4.500 N erkennen, wohingegen die Proben mit

einer Geschwindigkeit 20 m/s maximale Kräfte von circa 11.000 N aufzeigen. Eine 200-fach erhöhte Prüfgeschwindigkeit führt somit zu einer circa 2,5-fach erhöhten Maximalkraft. Nach dem ersten Kraftmaximum fällt die Kraft erkennbar ab und ab einer Intrusion von circa 15 mm zeigt sich ein sehr ähnlicher Kraft-Weg-Verlauf, wie bei den Proben mit der radialen Faserorientierung. Die Kompaktierung der Proben setzt ein und die Kraft-Weg-Verläufe weisen einen exponentiellen Anstieg in Abhängigkeit der Prüfgeschwindigkeit auf.

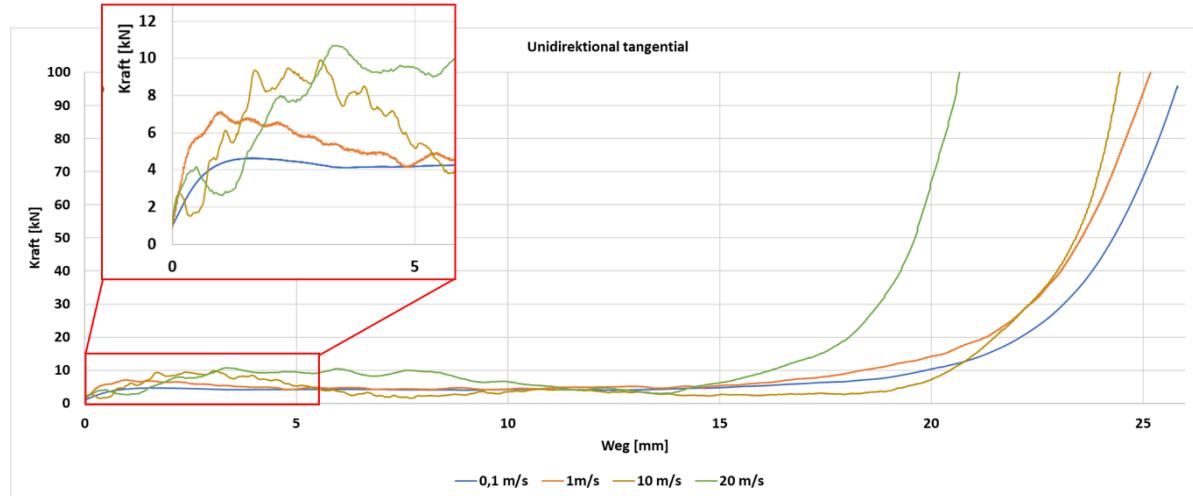


Abbildung 29: Repräsentative Kraft-Weg Charakteristik der tangentialen Würfelproben aus unidirektionalem Albasia-Schichtholz

Die Ergebnisse der Proben mit einer longitudinalen Faserorientierung unterscheiden sich deutlich von den Kraft-Weg-Verläufen der zwei anderen Faserorientierungen (s. Abbildung 30). Da die Krafteinleitung bei dieser Probenanordnung in die Richtung der Fasern wirkt, lässt sich ab dem Beginn der Prüfungen ein erheblich steilerer Kraftanstieg erkennen. In Abhängigkeit der Prüfgeschwindigkeiten zeigen sich unterschiedliche Maximalkräfte innerhalb der ersten 5 mm der Intrusion. Bei einer Prüfgeschwindigkeit von 0,1 m/s wird eine Kraft von 30.000 N erreicht, wohingegen eine 10-fache Prüfgeschwindigkeit von 1 m/s zu einer Maximalkraft von circa 50.000 N führt. Auffällig ist, dass die maximale Kraft der Proben mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 m/s mit circa 85.000 N eine deutlich höhere Maximalkraft aufweisen als die Proben bei 20 m/s.

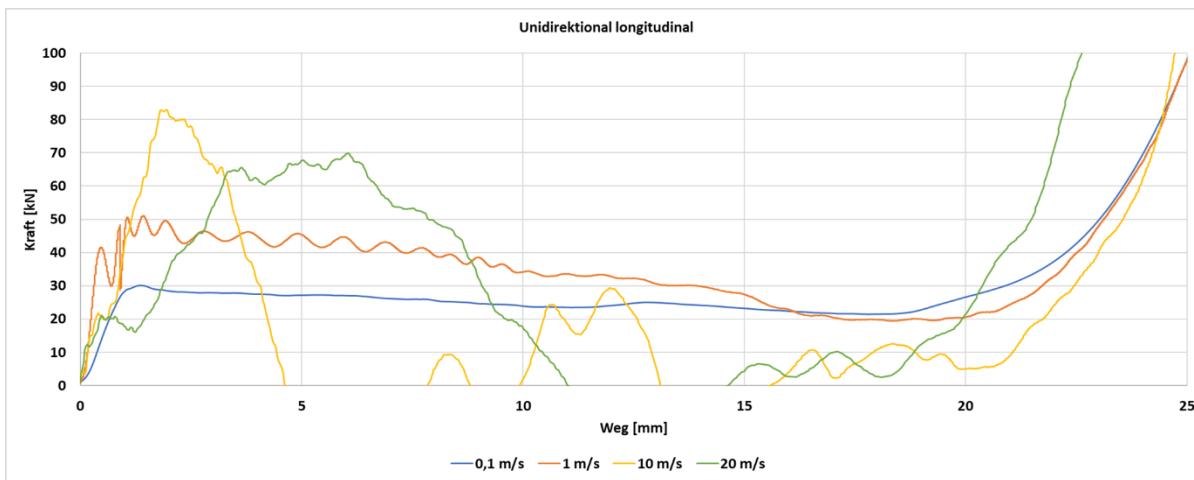


Abbildung 30: Repräsentative Kraft-Weg Charakteristik der longitudinalen Würfelproben aus unidirektionalem Albasia-Schichtholz

Grundsätzlich weist der Werkstoff Holz ein dehnrateabhängiges Werkstoffverhalten auf, welches bereits in vielen Untersuchungen nachgewiesen werden konnte. In [2] werden unterschiedliche Literaturquellen zusammengefasst, die im Allgemeinen belegen, dass der Werkstoff Holz sowohl bei einer longitudinalen als auch bei radialer und tangentialer Faserorientierung ein dehnrateabhängiges Verhalten besitzt. Es wäre zu erwarten gewesen, dass die maximalen Kräfte bzw. Spannungen bei höheren Prüfgeschwindigkeiten zunehmen. Eine Erklärung für dieses Ergebnis kann die Wahl des Aufbaus der Proben sein, welche aus einem Schichtholzverbund hergestellt sind. Das Versagen des Klebstoffes bzw. der einzelnen Klebefugen kann einen erheblichen Einfluss auf das Materialverhalten haben. Ein frühzeitiges Abknicken der einzelnen Furnierlagen, welches durch ein Versagen des Klebstoffes begünstigt wird, könnte zu einem frühzeitigen Kraftabfall in den aufgezeichneten Daten führen. Videoaufnahmen mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera könnten in diesem Fall bei der Analyse des Materialverhaltens dienlich sein. Bei den Proben mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,1 m/s und 1 m/s ist bis zu einer Intrusion von circa 18 mm ein leichter Kraftabfall auf circa 20.000 N zu verzeichnen wohingegen der Kraftabfall bei den Proben mit 10 m/s und 20 m/s erheblich stärker ist. Ab einer Intrusion von circa 18 mm beginnt bei allen Proben die Kompaktierung und ein exponentieller Kraftanstieg bis zum Kraftmaximum von 100.000 N.

Abschließend soll noch erwähnt werden, dass eine quantitative Auswertung der Ergebnisse bei diesen Untersuchungen nicht durchgeführt wurde. Dies lässt sich unter anderem mit der Auswahl der verwendeten Messtechnik begründen. Für eine Reduzierung der Komplexität im Versuchsaufbau und der späteren Versuchsauswertung wurde auf den Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera verzichtet. Sowohl die aufgezeichneten Versuchsergebnisse als auch die geprüften Würfelproben zeigen jedoch, dass eine Videoaufnahme bei der Analyse der Versuchsergebnisse mit Blick auf die Einflüsse aus dem dynamischen Versuch sowie das

Materialverhalten der Schichtholzproben dienlich wäre. Letztendlich bleibt festzuhalten, dass die Ergebnisse aus den durchgeführten Untersuchungen ein grundsätzliches Verständnis des Werkstoffverhaltens im Zusammenhang mit den projektbezogenen Anwendungsfällen schaffen, sie aber keine normgerechte Materialcharakterisierung der Holzart Albasia darstellen.

1.3.2 Verdichtung von Couponproben

Im Rahmen der Materialcharakterisierung wurde ein besonderer Fokus auf die Verdichtung der hergestellten Prüfkörper gelegt, um den Einfluss der Verdichtung auf die mechanischen Eigenschaften von Albasiasperrholz zu analysieren. Aufgrund der vergleichsweise geringen Dichte des Albasiaholzes ergibt sich ein hohes Verdichtungspotenzial, welches systematisch in vier Verdichtungsvarianten untersucht wurde. Das Ziel dabei war es, die optimale Verdichtungsstufe hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und dem Strukturverhalten zu identifizieren.

Die Herstellung der Sperrholzprüfkörper erfolgte mit jeweils fünf Furnierlagen, die miteinander verleimt und anschließend mit 2, 10, 20 und 40 MPa verpresst wurden. Zur Verbesserung der Klebstoffhaftung wurden die Furniere vor der Verleimung mit einem feinen Wasserfilm benetzt und 20 min unter einem Gewicht von 5 kg konditioniert. Anschließend erfolgte die gleichmäßige Klebstoffapplikation mit einem Leimzahnspachtel. Dafür wurde ein 1K PUR Klebstoff verwendet. Die Furniere wurden nach dem Prinzip der Kreuzverleimung gestapelt und anschließend bei einer Pressflächentemperatur von 95 °C für 30 min verpresst. Die erhöhte Temperatur unterstützt dabei die Aushärtung des Klebstoffs durch eine beschleunigte Wasserverdampfung. Die relevanten Parameter für den Pressvorgang sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Überblick über die Einstellung der Parameter beim Pressen der Furniere

Parameter	Angabe
Lagenanzahl der Furniere	5
Dicke der Furniere (Albasia)	3,2 mm
Pressstemperatur	95 °C
Pressdauer	30 min oder 10 + 10 min
Verdichtung	2, 10, 20 und 40 MPa

Nach der Verpressung der Platten erfolgte der Zuschnitt der Prüfkörper auf Basis der Norm DIN EN 310, welche zur Bestimmung der Biegefestigkeit und des Elastizitätsmoduls von Holzwerkstoffen dient. Die Norm schreibt eine Probenbreite von 50 mm fest, während sich die Probenlänge aus der zwanzigfachen Dicke zuzüglich 50 mm ergibt. Die resultierenden

Geometrien sind in Tabelle 6 aufgeführt und berücksichtigen die unterschiedlichen Dicken infolge der variierenden Verdichtung.

Tabelle 6: Überblick der unterschiedlichen Probengeometrien durch die verschiedenen Probendicken

Furnier	Verdichtung (MPa)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Stützlänge (mm)	Gesamtlänge (mm)
Albasia	2	50	16,5	330	380
Albasia	10	50	11	220	270
Albasia	20	50	10	200	250
Albasia	40	50	8	160	210

Die zugeschnittenen Couponproben wurden nach dem Versuchsaufbau aus Abbildung 31 einer 3-Punkt-Biegeprüfung unterzogen. Die Ergebnisse der Biegeprüfung sind für alle getesteten Proben in Abbildung 32 dargestellt. Neben den Proben aus Albasiaholz wurden für den Vergleich auch Proben aus Buchenfurnieren getestet. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass eine moderate Verdichtung das mechanische Verhalten der Albasia-Sperrholzproben erheblich verbessern kann. Insbesondere bei einer Verdichtung von 10 MPa wurde eine nahezu verdoppelte Biegefestigkeit gegenüber den Proben mit einer Verdichtung von 2 MPa festgestellt. Ab einer Verdichtung von 20 MPa jedoch nehmen die Festigkeiten wieder ab, was auf eine mögliche Zerstörung der Zellstruktur durch übermäßige Kompression sowie auf eine nachteilige Beeinflussung der Klebstoffverteilung zurückgeführt werden kann.

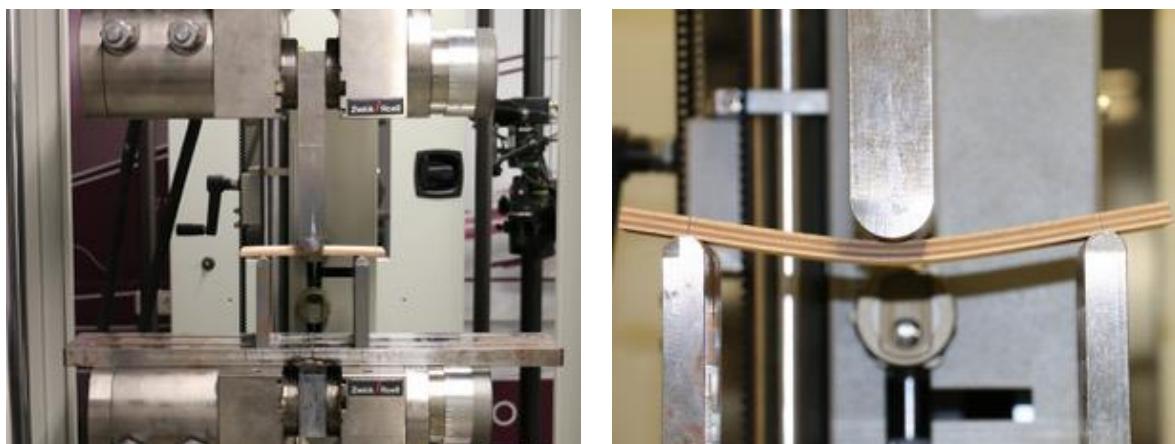


Abbildung 31: Eingespannte Biegeprüfvorrichtung mit einem Holzprüfkörper während der Biegeprüfung

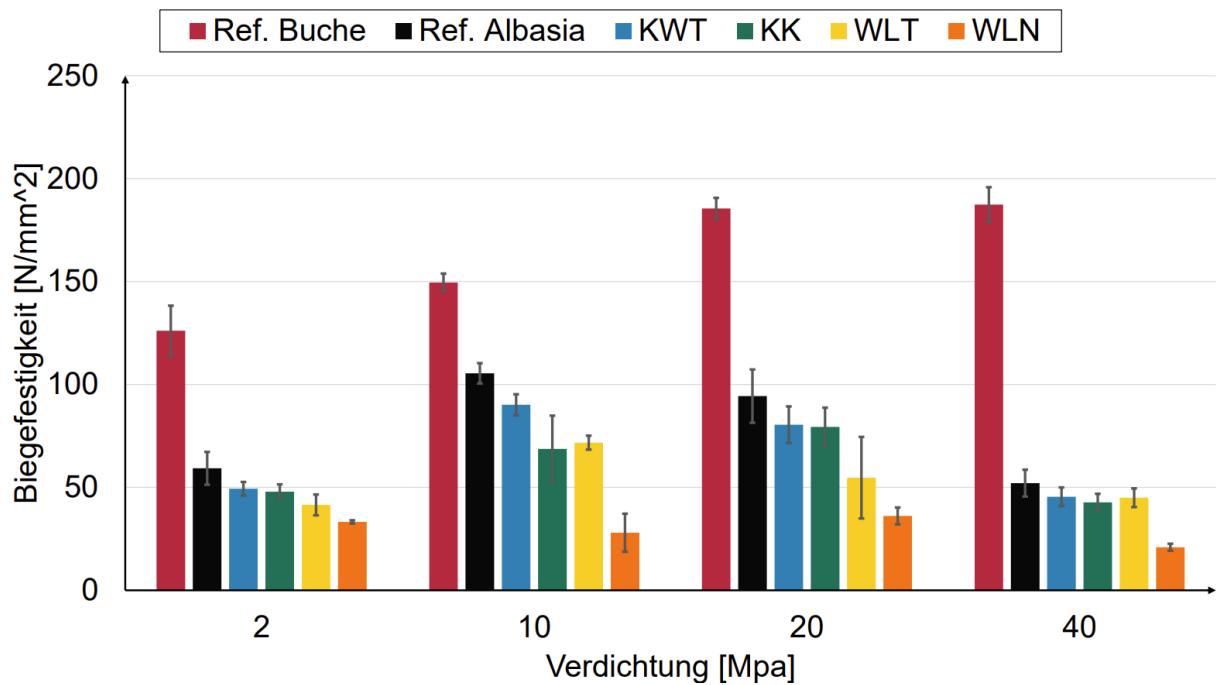


Abbildung 32: Mittlere Biegefestigkeiten inkl. Standardabweichung der Versuchsreihen aus der 3-Punkt-Biegeprüfung mit Couponproben

Bei den Buchenfurnieren hingegen ist eine kontinuierliche Verbesserung der Festigkeit bis 20 MPa zu erkennen, bevor ein Plateau erreicht wird. Dies zeigt die Materialabhängigkeit des Verdichtungsverhaltens und betont die Notwendigkeit einer gezielten Anpassung der Pressparameter an die jeweilige Holzart. Die erzielten Ergebnisse belegen insgesamt das Potenzial einer gezielten Verdichtung zur Optimierung von Leichtbau-Holzwerkstoffen, wobei jedoch eine Überverdichtung vermieden werden muss, um strukturelle Schäden und Festigkeitsverluste zu verhindern.

1.3.3 Charakterisierung von Fügeelementen

Im Rahmen des Arbeitspakets 6.2 wurde in Zusammenarbeit von DLR und Alfred Kiess GmbH das Fügen von punktförmigen Fügeelementen an Albasia-Sperrholz sowie hybriden Proben untersucht und Auszugsversuche durchgeführt. Das Ziel hierbei ist die Charakterisierung einer lösbareren, kostengünstigeren und schnelleren Fügeverbindung für Albasia-Sperrholz. Die Untersuchungen der Fügeelemente hinsichtlich der maximalen Kräfte bei Auszugsversuchen wurden auf einer ZwickRoell Universalprüfmaschine mit einer Maximalkraft von 250 kN durchgeführt. Als Prüfgeschwindigkeit wurden 10 mm/min definiert. Die quadratischen Probenkörper haben eine einheitliche Kantenlänge von 130 mm. Für die Auszugsuntersuchungen der Fügeelemente wurden die Probenkörper während der Versuchsdurchführung im Randbereich von circa 15 mm mit einer geeigneten Vorrichtung verspannt. Der Aufbau der Vorrichtung lässt sich in der Abbildung 33 erkennen.

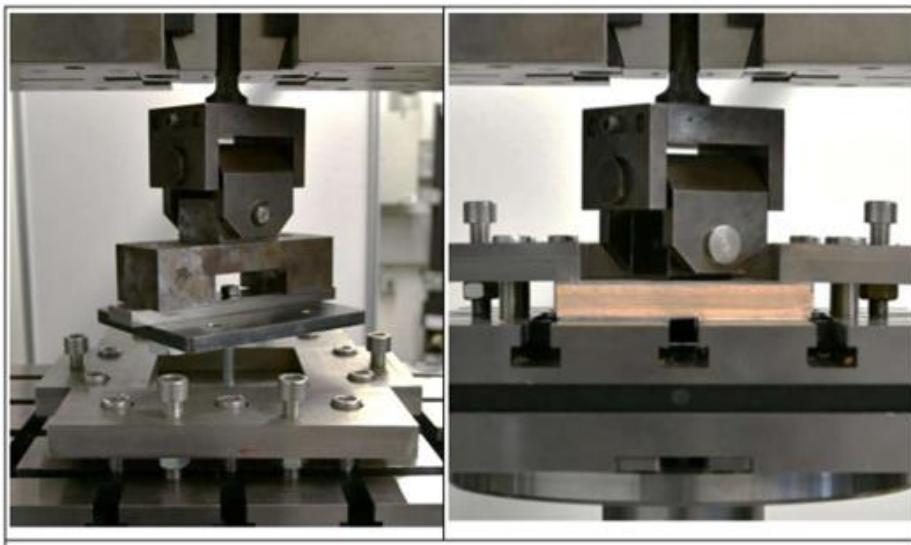


Abbildung 33: Varianten des Prüfaufbaus der Auszugsversuche punktförmiger Fügeelemente

Untersucht wurden das Albasia Sperrholz sowie im Vergleich dazu Buche Sperrholz, Spanplatte und MDF-Platte. Die Prüfung erfolgte für die Materialstärken 15 mm und 30 mm. Folgende Fügeelemente wurden verwendet:

- Spanplattenschraube ASSY 3.0 4,0 mm x 20 mm (bei 15 mm starken Platten)
- Spanplattenschraube ASSY 3.0 4,5 mm x 30 mm (bei 30 mm starken Platten)
- Verbundmuffen vom Typ Würth SKD M5 (10 mm Außendurchmesser, 12 mm Länge)

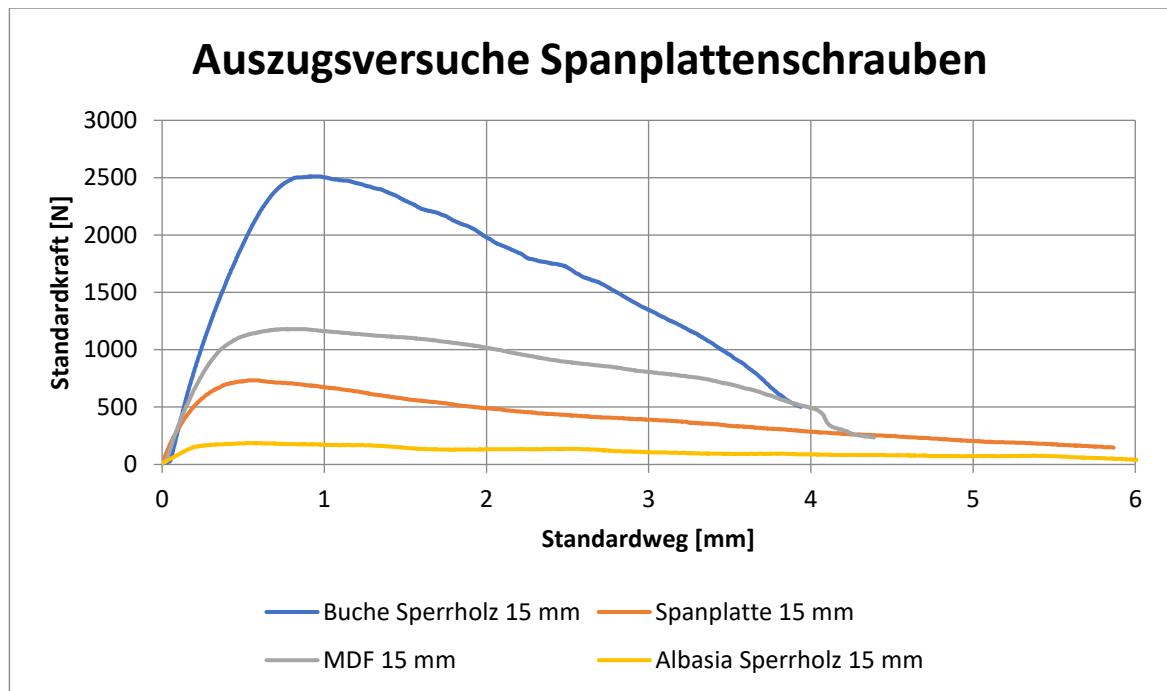


Abbildung 34: Kraft-Weg Verlauf der Auszugsversuche mit Spanplattenschrauben an 15 mm dicken Plattenproben

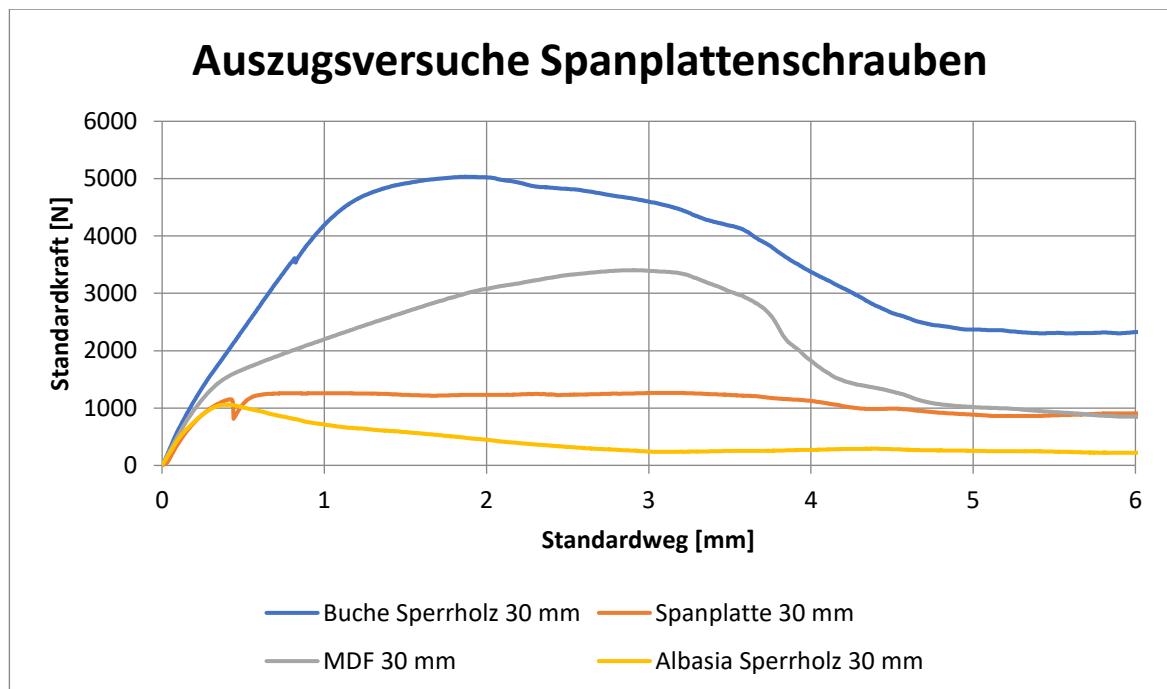


Abbildung 35: Kraft-Weg Verlauf der Auszugsversuche mit Spanplattenschrauben an 30 mm dicken Plattenproben

Die Ergebnisse der Schraubenauszugsversuche an Spanplattenschrauben an 15 mm Plattenproben sind in Abbildung 34 und an 30 mm Platten in Abbildung 35 abgebildet. Dargestellt ist die Kraft, die am Schraubenkopf anliegt über dem Auszugsweg. Dargestellt sind die Ergebnisse von Buche-Sperrholz, Spanplatte, MDF und Albasia-Sperrholz. Bei beiden

untersuchten Plattendicken zeigt sich, dass die Buche Sperrholzprobe die höchste Auszugskraft aufweist, gefolgt von MDF und Spanplatte bei 15 mm Plattenstärke. Bei 30 mm Plattendicke erreichen die Spanplattenprobe und die Albasia-Sperrholzprobe eine Auszugskraft von ca. 1000 N, während die Buche-Sperrholzprobe 5000 N erreicht.

Die durchgeführten Schraubenauszugsversuche haben gezeigt, dass herkömmliche Fügeelemente wie Spax-Schrauben und Gewindemuffen im Albasia-Sperrholz nicht ausreichend befestigt werden können. Auch klassische Spanplattenschrauben und Gewindemuffen erwiesen sich als ungeeignet. Diese Resultate verdeutlichen die Verbindungsherausforderungen bei der Anwendung von Fügeelementen mit Albasia-Sperrholz.

Untersucht wurden das Albasia Sperrholz sowie im Vergleich dazu Multiplex, Spanplatte und MDF-Platte. Die Prüfung erfolgte für die Materialstärken 8mm, 15mm und 30mm. Die Materialproben hatten die Dimension 130x130 mm mit 2,5mm Loch in der Mitte.

Die weiteren Versuchsreihen mit einem hybriden Prüfkörperaufbau mit den bisherigen Dimensionen zielten darauf ab, geeignete punktförmige Fügeelemente für unsere hybriden Materialien zu identifizieren.

Folgende Prüfkörper wurden dafür vorbereitet, die verschiedene Materialproben umfassen:

- 15mm Sperrholz Albasia mit HPL (B1)
- 15mm Sperrholz Albasia mit 0,8mm Metall
- 15mm Sperrholz Albasia mit 0,6mm Eiche Furnier
- 12mm Spanplatte mit HPL (B1)
- 12mm Spanplatte mit 0,8mm Metall
- 12mm Spanplatte mit 0,6mm Eiche Furnier
- 12mm OSB mit HPL (B1)
- 12mm OSB mit 0,8mm Metall

Ziemlich schnell gab es die Erkenntnis, dass auch weitere handelsübliche punktförmige Fügeelemente, wie Holzschrauben als langfristiges Fügelemente gänzlich ungeeignet sind. Im hybriden Aufbau hielt meist nur die Decklage, was auf unzureichende Festigkeiten des Albasiaholzes zurückzuführen ist. Bereits beim Eindrehen einiger Schrauben war ein Durchdrehen zu vermerken.

Bedingt durch dieses schnelle und eindeutige Ergebnis wurde im weiteren Verlauf auf einen Test mit Verbundmuffen vom Typ SKD M5 aufgebaut.



Abbildung 36: Verbundmuffe Würth - Typ SKD M5 - Verbundmuffe Typ SKD mit Innensechskant und Bund (037625 12) online kaufen | WÜRTH

In den Abbildung 37 und Abbildung 38 sind die Ergebnisse der Auszugversuche an Gewindemuffen für 15 mm und 30 mm Plattenstärke dargestellt. Erneut zeigt sich hier das gleiche Bild, wie bereits bei den Spanplattenschrauben. Die Buche Sperrholzproben zeigen die höchste Auszugskraft, gefolgt von der MDF und Spanplatte bei 15 mm Plattenstärke. Bei 30 mm Plattendicke erreicht die Albasia-Sperrholzprobe leicht höhere Auszugskräfte als die Spanplatte.

Das Fügeelement metrische Verbundmuffe wies zwar etwas bessere Ergebnisse auf, kam aber letzten Endes in einer größeren Testreihe nicht zum Einsatz. Als Alternative wurden Schaumstoff- & Rigips Schrauben diskutiert, die durch die eindeutigen Ergebnisse der bisher untersuchten Holzschrauben ebenso nicht weiter getestet wurden. Für den Anwendungsfall 2 & 3 im Aufzug ergab sich daraus das Fazit, dass eine einseitige Verschraubung langfristig nicht funktioniert. Um eine Befestigung langfristig zu garantieren ist bei dickeren Materialien > 15mm der Einsatz von Verbundmuffen in Kombination mit metrischen Schrauben möglich. Bei geringeren Materialstärken ist demnach der technisch beste Kompromiss der Einsatz metrischer Schrauben, welche rückseitig gekontert werden von Vorteil.

Auszugsversuche Gewindemuffen

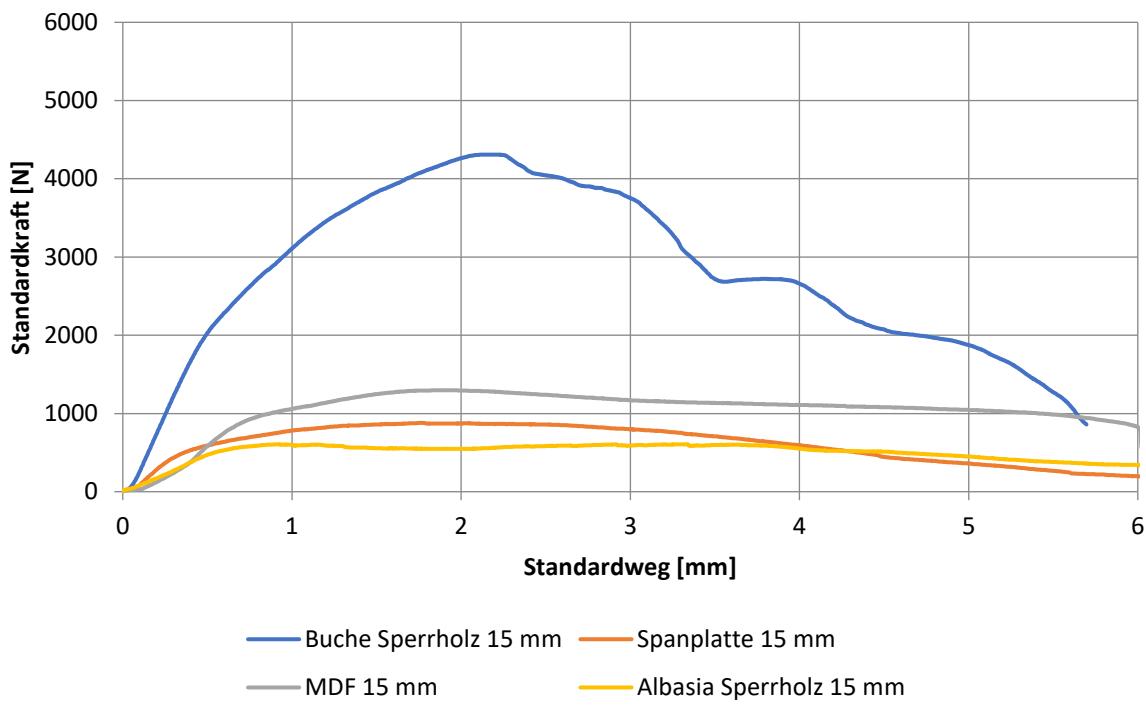


Abbildung 37: Kraft-Weg Verlauf der Auszugsversuche mit Gewindemuffen an 15 mm dicken Plattenproben

Auszugsversuche Gewindemuffen

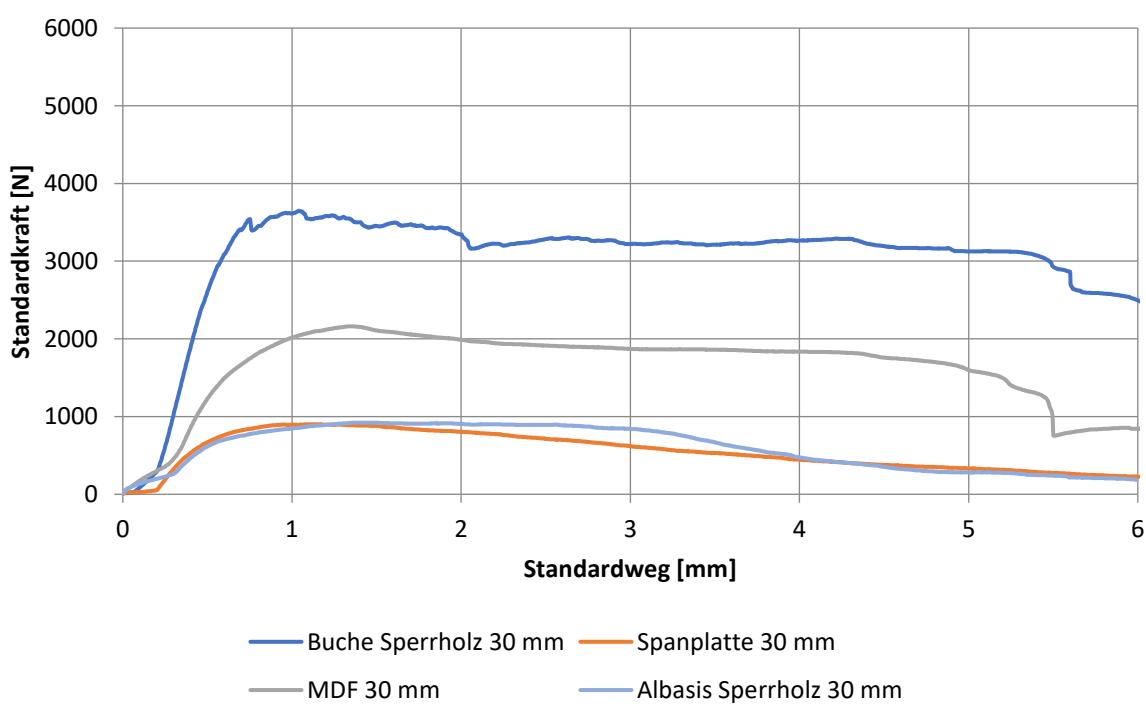


Abbildung 38: Kraft-Weg Verlauf der Auszugsversuche mit Gewindemuffen an 30 mm dicken Plattenproben

1.3.4 Stauchtests an Plattenwerkstoffen

1.3.4.1 Pfahltests an Plattenwerkstoffen

Zur Charakterisierung von Plattenwerkstoffen unter quasi-statischer Stauchbelastung, wie sie im Pfahlcrashversuch auftreten, wurden Plattenwerkstoffe aus Albasiasperrholz und als Vergleich Buchensperrholz untersucht.

Probengeometrie, Versuchsaufbau und -durchführung

Für die Untersuchung wurden Rechteckproben aus Albasia-Sperrholz und zum Vergleich Buchensperrholz verwendet. Die Probengeometrie betrug 450 mm x 225 mm in Breite und Höhe. Von Albasia-Sperrholz wurden Plattenstärken von 8 mm, 15 mm und 30 mm geprüft. Die Buchensperrholzproben hatten eine Dicke von 16 mm. Die Albasia-Sperrholzplatten wurden von Projektpartner Broszeit beschafft. Zu Beginn des Prüfprogramms wurden insgesamt 10 Proben des 30 mm Albasia-Sperrholz geprüft. Der Laminataufbau der Probenkörper mit 30 mm Materialstärke bestanden aus neun Furnierlagen aus Albasia sowie zwei Meranti-Decklagen. Aufgrund der ungeraden Anzahl an Furnierlagen wurden die Proben in die Kategorien „Längs“ und „Quer“ unterteilt basierend auf der Faserorientierung der Decklagen in Bezug auf die Kraftrichtung des Pfahls. Dadurch hatten die Proben der Kategorie „Längs“ vier Furnierlagen mit Orientierung in Lastrichtung sowie fünf mit Orientierung quer zur Lastrichtung. Dementsprechend war die Verteilung bei den Proben der Kategorie „Quer“ fünf Furnierlagen in Lastrichtung und viel Lagen quer zur Lastrichtung.

Zusätzlich zu den 30 mm Albasia-Sperrholz Proben mit Meranti Decklagen wurden reine Albasia Proben mit 8 mm und 15 mm Plattenstärke geprüft. Von diesen Proben wurden jeweils fünf Proben geprüft. Für einen ersten Vergleich von Albasia mit heimischen Holzsorten werden 16 mm dicke Buchensperrholzplatten geprüft. Hier wurden drei Probenkörper geprüft.

In einem zweiten Schritt wurde der Einfluss einer Hybridisierung mit Stahlblech untersucht. Die Untersuchung erfolgte an den 30 mm Sperrholzproben. Die Hybridisierung erfolgte durch Blech aus unlegiertem Tiefziehstahl DC04 mit einer Dicke von 0,65 mm, das auf beiden Seiten auf die Außenfläche der Proben aufgeklebt wurde. Auf der oberen Stirnfläche, auf die der Pfahl aufdrückt, überlappen sich die Bleche. Dadurch soll gewährleistet werden, dass es durch das Eindrücken des Pfahls nicht zu einem Abschälen der Bleche kommt. Ziel der Hybridisierung ist, die Integrität der Sperrholzplatte während des Stauchprozesses durch einen plastischen Beulprozess des Bleches zu bewahren und zusätzlich durch eine Verdichtung des Holzes eine hohe Energieabsorption zu erzielen. Ein Wegbrechen größerer Holzstücke soll vermieden werden, was eine reduzierte Energieabsorption zur Folge hätte. Für die Verklebung des Stahlbleches an das Holz sowie zueinander in der Überlappung wird

der 3M™ Scotch-Weld™ 2-Komponenten-Konstruktionsklebstoff auf Epoxidharzbasis DP490 verwendet.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 39 dargestellt. Die quasi-statischen Pfahltests wurden in einer ZwickRoell 250 kN Universalprüfmaschine mit einer maximalen Prüfkraft von 250 kN durchgeführt. Als Prüfkörper wird ein Pfahl mit einem Durchmesser von 10 Zoll (254 mm) verwendet. Die Plattenprüfkörper sind im unteren Bereich über eine Höhe von 45 mm eingespannt. Die Prüfgeschwindigkeit, mit der der Pfahl in die Prüfkörper gefahren wird beträgt konstant 1 mm/s. Die maximale Intrusion in die Platten betrug 150 mm und soll verhindern, dass der Pfahl in Kontakt mit der unteren Einspannung kommt.

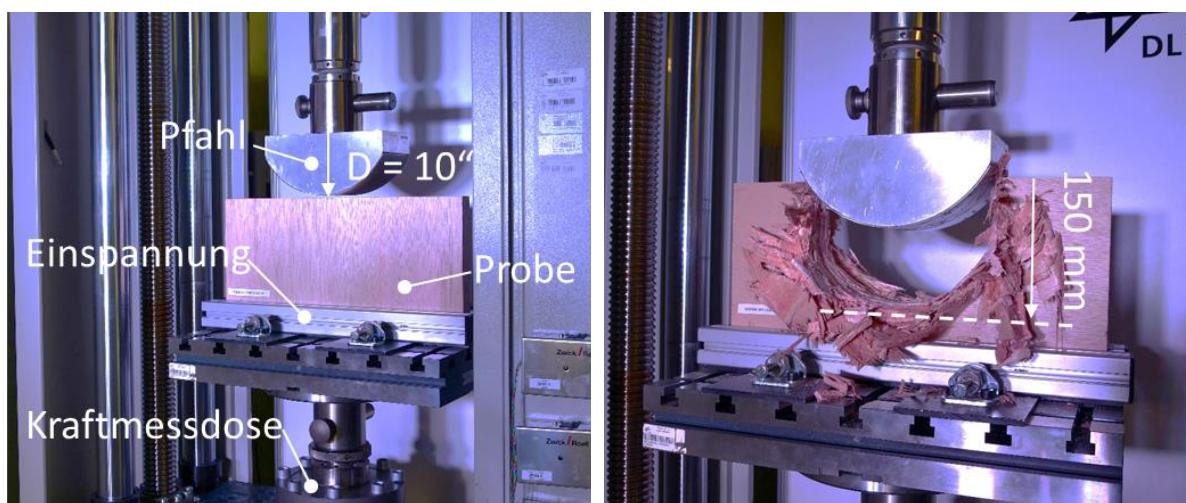


Abbildung 39: Versuchsaufbau der quasi-statischen Pfahltests an Plattenwerkstoffen (links). Probe nach durchgef\u00fchrtem Versuch (rechts)

Ergebnisse Pfahltests an Plattenwerkstoffen

Die Auswertung der quasi-statischen Pfahltests an Plattenwerkstoffen erfolgt anhand der Kraft-Weg Charakteristik. Dabei wird die gemessene Kraft der Kraftmessdose über der Intrusion des Pfahls aufgetragen. Zusätzlich wird die Absorbierte Energie (EA) und die Spezifische Absorbierte Energie (SEA) ausgewertet. Die absorbierte Energie errechnet sich aus dem Integral des Kraft-Weg Verlaufes und die spezifische absorbierte Energie setzt die absorbierte Energie in Beziehung zur Masse, die diese Energie im Stauchprozess absorbiert. Insbesondere die SEA ist für den Vergleich von Materialien und deren Leichtbaupotenzial nützlich. Zur Berechnung der SEA ist jedoch erforderlich, die Masse, die die Energie absorbiert, zu bestimmen. Hierbei gibt es mehrere Ansätze. Ein konservativer Ansatz nutzt die gesamte Masse der Probe auch wenn es Bereiche der Probe gibt, die im Stauchprozess nicht geschädigt werden. In diesem Prüfprogramm wurde jedoch ein anderer Ansatz gewählt. Es wird nur die Masse im Schädigungsbereich berücksichtigt. Diese ergibt sich aus:

$$D_{Pfahl} \times u_{Intrusion} \times t_{Sperrholz} \times \rho_{Sperrholz}$$

1-1

Mit D_{Pfahl} dem Durchmesser des Pfahls, $u_{Intrusion}$ der Intrusion des Pfahls in die Probe, $t_{Sperrholz}$ der Dicke der Sperrholzprobe und $\rho_{Sperrholz}$ der Dichte des Sperrholzes.

Zur Auswertung der 30 mm Albasia-Sperrholzproben sind in Abbildung 40 und Abbildung 41 die Verläufe der Standardkraft über der Intrusion der fünf Proben mit der Faserorientierung „Längs“ (Abbildung 40) bzw. „Quer“ (Abbildung 41) abgebildet. Dargestellt sind die Kraft-Weg-Verläufe für die jeweils fünf geprüften Proben.

Zur qualitativen Bewertung der Kraft-Weg-Verläufe zeigt sich für beide Probenvarianten („Längs“ und „Quer“) eine gleiche Charakteristik. Die Kraft steigt bis zu einer Intrusion von 10 mm an bevor sich ein erstes Plateau im Kraftverlauf zeigt. Die Kraft steigt anschließend erneut an, bevor die Kraft um einen Plateauwert schwankt. Dieses gleichbleibende Kraftniveau deutet auf ein progressives Versagensverhalten hin. Progressives Stauchen ohne ausgeprägte Kraftsprünge ist die bevorzugte Versagensart für Energieabsorption im Stauchlastfall.

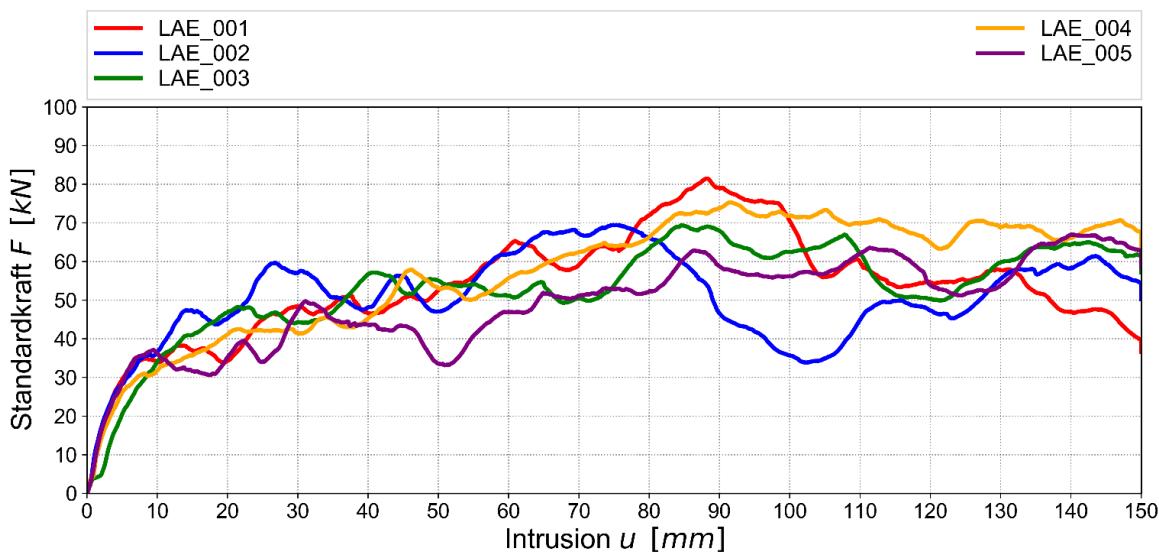


Abbildung 40: Kraft-Weg Charakteristik der 30 mm Albasia-Sperrholz Proben mit Faserorientierung der Decklagen „Längs“ zur Kraftrichtung.

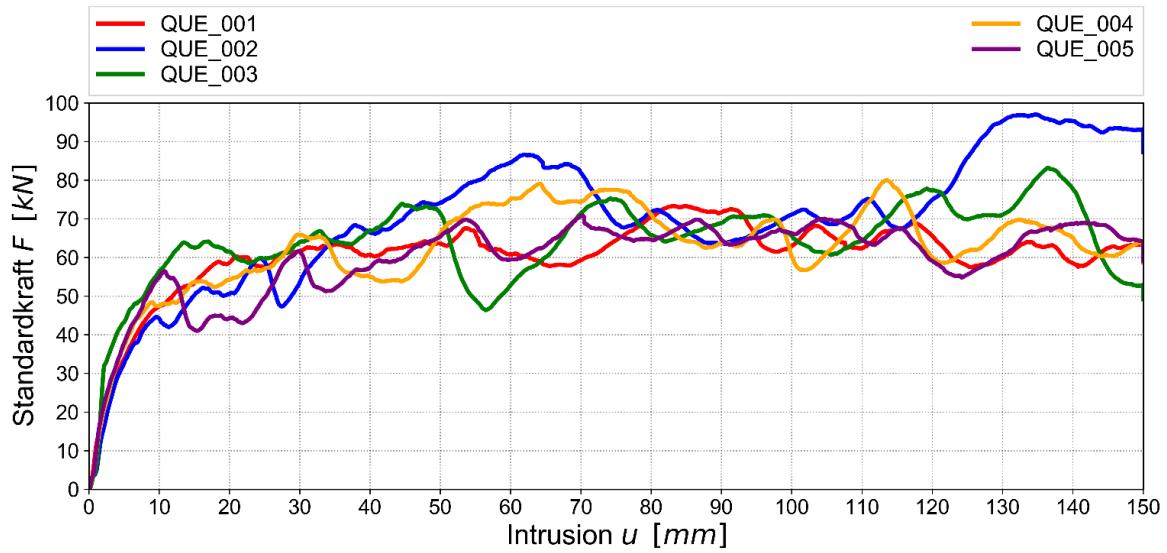


Abbildung 41: Kraft-Weg Charakteristik der 30 mm Albasia-Sperrholz Proben mit Faserorientierung der Decklagen „Quer“ zur Kraftrichtung.

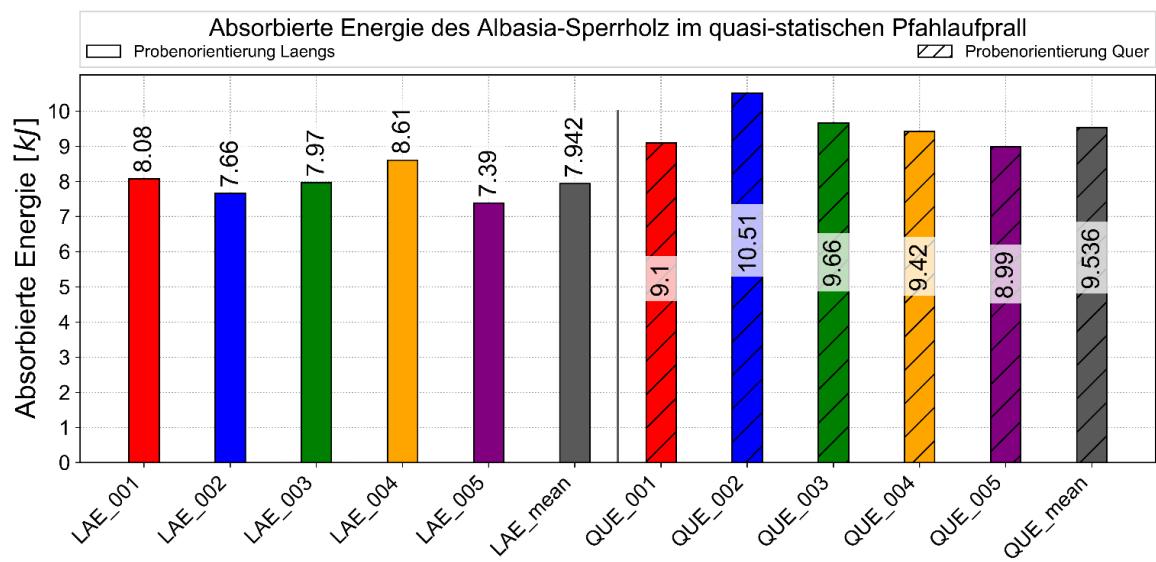


Abbildung 42: Absorbierte Energie der 30 mm Albasia-Sperrholz Proben mit Faserorientierung der Decklagen „Längs“ zur Kraftrichtung.

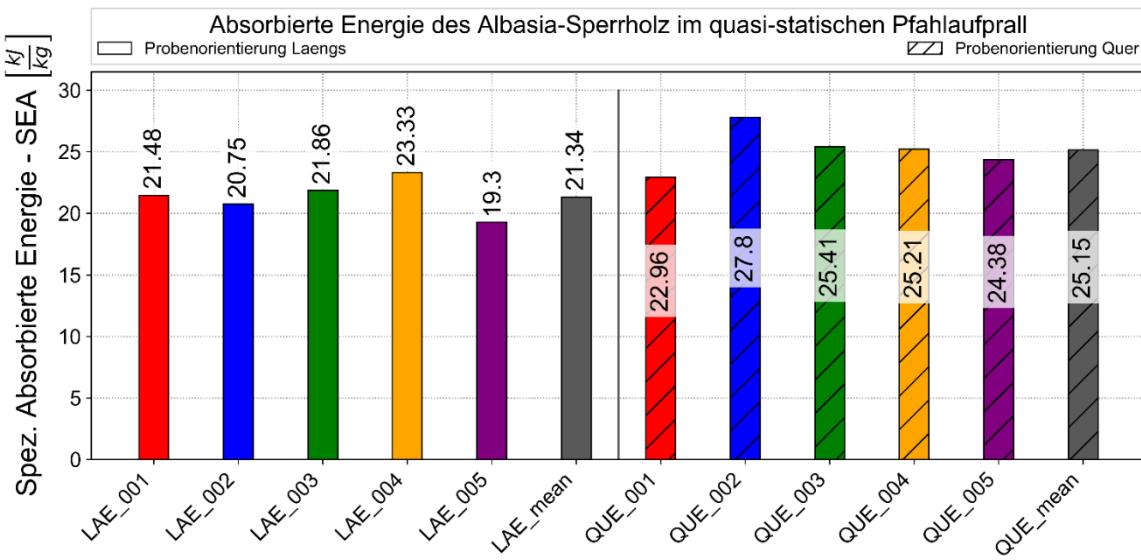


Abbildung 43: Absorbierte Energie der 30 mm Albasia-Sperrholz Proben mit Faserorientierung der Decklagen „Quer“ zur Kraftrichtung.

Quantitativ betrachtet zeigen sich Unterschiede bei den Kräften für die beiden Probenvarianten. Wie in Tabelle 7 aufgelistet, liegt die maximale Kraft F_{max} für die Variante „Längs“ bei 81,5 kN und bei der Variante „Quer“ bei 86,6 kN. Die maximale Kraft in Abbildung 41 von 97 kN, die bei einer Intrusion von etwa 130 mm auftritt, wird nicht berücksichtigt, da eine Interaktion mit dem unteren Einspannbereich nicht ausgeschlossen werden kann. Dieser Unterschied durch die Furnierorientierung im Sperrholzaufbau zeigt sich dementsprechend auch in der EA und SEA, dargestellt in Abbildung 42 und Abbildung 43 sowie in Tabelle 7. Sowohl die Maximal- als auch die Mittelwerte über die fünf Proben liegen bei der Probenvariante „Quer“ über den Werten der Variante „Längs“.

Die höheren Kraft- als auch EA- und SEA-Werte bei der Probenvariante „Quer“ lassen sich auf die größere Anzahl Furnierlagen zurückführen, deren Faserorientierung in Lastrichtung liegt. Bei der Variante „Längs“ haben vier Furnierlagen die Faserorientierung in Lastrichtung wohingegen bei der Variante „Quer“ fünf Furnierlagen in Lastrichtung liegen. Dieser Unterschied zeigt, dass vor allem die Fasern in Lastrichtung die Widerstandskraft gegen Stauchen aufbringen und damit zur höheren Energieabsorption beitragen.

Um den Einfluss der Plattendicke auf die Kraft-Weg-Charakteristik sowie die Energieabsorption zu untersuchen, wurden zusätzlich Albasia-Sperrholzproben mit 8 mm und 15 mm Plattenstärke geprüft. Die Ergebnisse des Kraft-Weg-Verlaufs sind in Abbildung 44 dargestellt. Wie zu erwarten, steigt das Kraftniveau sowie EA mit der Plattendicke an. Die spezifische absorbierte Energie SEA steigt mit der Plattendicke ebenfalls an. Da in die Berechnung der SEA die Masse der Platten einbezogen ist, kommt dieser Anstieg nicht durch

zusätzliches Material. Die SEA kann nur ansteigen, wenn zusätzliche Mechanismen der Energieabsorption ins Spiel kommen. Sei dies durch ein progressiveres Schädigungsverhalten oder durch zusätzliche Mechanismen. In diesem Fall wird der Anstieg der SEA auf einen höheren Grad der Verdichtung zurückgeführt. Umso dicker die Platte umso größer sind die Bereiche im inneren, die verdichtet werden und nicht nach außen wegbrechen.

Um die Ergebnisse der Stauchtests an Albasia mit heimischen Holzsorten zu vergleichen wird Buchensperrholz mit 16 mm Plattendicke untersucht. Hiervon wurden drei Proben getestet. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Abbildung 44 dargestellt. Im Kraft-Weg-Verlauf zeigt sich, dass für Buche ausgeprägte Kraftspitzen mit einer maximalen Kraft von ca. 134 kN. Diese Charakteristik deutet auf Wegbrechen größerer Holzbruchstücke hin, und kein progressives Stauchversagen. Zwar liegt die absorbierte Energie aufgrund dieser hohen Kraft deutlich über der der Albasia Sperrholzprobe mit 15 mm Plattendicke jedoch ist die SEA aufgrund der deutlich höheren Dichte von Buche nur etwa 4% höher als bei Albasia. Dies verdeutlicht das hohe Energieabsorptionspotenzial von Albasia.

Um den Effekt der Energieabsorption durch Verdichtung zu verstärken wird eine Hybridisierung mit Stahlblech untersucht. Durch die plastische Deformation des Bleches soll ein Wegbrechen von Albasia-Bruchstücken verhindert werden. Ein Wegbrechen ist ein Schädigungsmechanismus mit relativ geringer Energieabsorption. Ziel ist hingegen, dass das Holz in die Beulfalten des Bleches gedrückt, dort sehr stark verdichtet wird und dadurch die Energieabsorption steigt. Der Kraft-Weg-Verlauf der hybriden 30 mm Probe ist Abbildung 44 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Kraftverlauf der hybriden Probe zu Beginn des Stauchprozesses ähnlich zu der 30 mm Albasia Probe ist. Ab einer Intrusion von etwa 15 mm steigt die Kraft der hybriden Probe wieder an. Hier setzt das Faltenbeulen des Stahlblechs ein. Anschließend erfolgt progressives Faltenbeulen. Eine Interaktion der Falten führt zu weiteren Kraftanstiegen. Das Faltenbeulen des Bleches am Ende des Stauchprozesses ist deutlich in Abbildung 46 zu erkennen. Um die Verdichtung des Holzkerns im inneren zu verdeutlichen wurde die Probe nach dem Test mittig aufgesägt. Der Querschnitt ist im rechten Bild in Abbildung 46 abgebildet. Deutlich sind die Falten des Stahlblechs zu erkennen. Ebenso ist zu sehen, dass die Falten mit Holz gefüllt sind. Im Holzkern zeigt sich eine hohe Verdichtung gekennzeichnet durch das starke Falten der vormals zueinander parallelen Furnierlagen. Insbesondere ab einer Intrusion von 80 mm zeigt sich das deutlich höhere Kraftniveau der hybriden Variante. Dies spiegelt sich auch in der absorbierten Energie wider. Die spezifische absorbierte Energie ist hingegen bei der hybriden Variante geringer. Dies liegt jedoch in der unterschiedlichen Berechnung der Masse, die zum Stauchprozess beiträgt. Während bei den Varianten ohne Hybridisierung nur die Fläche unter dem Pfahl berücksichtigt wurde, zeigt sich bei der hybriden Variante, dass ein großer Anteil des Stahlblechs im

Faltenbeulen versagt (siehe Abbildung 46) und damit mit in die Berechnung der SEA einfließen muss.

Um den Effekt der Verdichtung als Energieabsorption weiter zu untersuchen wurde die Plattendicke auf 100 mm erhöht. Der Aufbau des Holzkerns erfolgte über ein Verleimen von Sperrholzplatten mit 30 mm, 15 mm und 8 mm Plattenstärke. Zur Verleimung der Holzplatten wurde ebenfalls 3M™ Scotch-Weld™ DP490 Klebstoff verwendet. Aufgrund der deutlich höheren Kräfte wurde dieser Versuch auch einer Prüfmaschine mit größerer Kraftmessdose durchgeführt und ein Pfahl-Prüfkörper mit größerer Länge aber ebenfalls 254 mm Durchmesser verwendet. Die Einspannung der Probe ist identisch mit den anderen Prüfungen.

Ein Vergleich der Kraft-Weg Kurven für die hybriden Proben ist in Abbildung 45 dargestellt. Es zeigt sich deutlich das höhere Kraftniveau sowie die höhere Energieabsorption der 100 mm Probe. Die spezifische Energieabsorption der 100 mm Probe ist ebenfalls in Tabelle 7 angegeben. Es zeigt sich deutlich, dass durch die höhere Dicke des Albasia-Holzkerns die SEA um ca. 70 % ansteigt. Da in die Berechnung der SEA die Masse mit einfließt lässt sich dieser Anstieg der SEA nur auf einen effizienteren Stauchprozess zurückführen. Wie bereits in den Ergebnissen der 30 mm Probe, erfolgt die Energieabsorption im Albasia-Kern hauptsächlich durch Verdichtung. Ein Anstieg der SEA deutet darauf hin, dass eine höhere Verdichtung im Kern durch die größere Plattendicke stattfindet. Die 100 Probe wurde nach dem Test ebenfalls aufgesägt. Der Querschnitt ist in Abbildung 47 abgebildet. Es zeigt sich deutlich, dass ebenfalls eine starke Verdichtung im Kern stattfindet. Dies lässt sich gut durch die schwarzen Klebefugen sehen, an denen die einzelnen Sperrholzplatten verklebt wurden. Durch die höhere Plattendicke wird der gleiche Mechanismus erzeugt wie durch die Hybridisierung mit dem Stahlblech. Die Furnierlagen im Innersten werden von den benachbarten Lagen am Wegbrechen gehindert und dadurch stark verdichtet.

Tabelle 7: Ergebnisse der quasi-statischen Pfahltests an Albasia-Sperrholzproben

Probenvariante	F_{max} [kN]	EA_{max} [kJ]	EA_{mean} [kJ]	SEA_{max} [kJ/kg]	SEA_{mean} [kJ/kg]
Albasia, 30 mm, „Längs“	81,5	8,61	7,9	23,3	21,3
Albasia, 30 mm, „Quer“	86,6	10,51	9,54	27,8	25,2
Albasia, 8 mm	30,0	1,85	1,57	16,2	13,4
Albasia, 15 mm	45,0	3,91	3,44	19,04	16,74
Buche, 16 mm	121,4	10,66	9,29	20,03	17,45
Albasia hybrid, 30 mm	134,29	14,11	-	22,01	-
Albasia hybrid, 100 mm	482,56	57,49	-	37,41	-

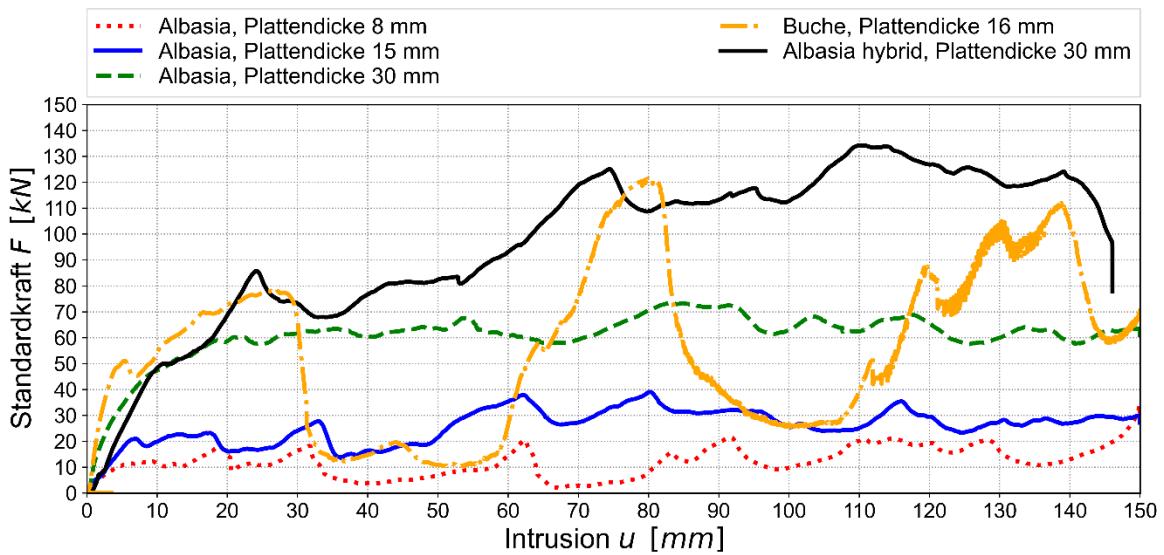


Abbildung 44: Kraft-Weg Charakteristik der Albasia-Sperrholz Proben mit unterschiedlichen Dicken sowie Buchen Sperrholz mit 16 mm Plattenstärke. Hybride Albasia-Stahl Probe mit 30 mm Plattendicke.

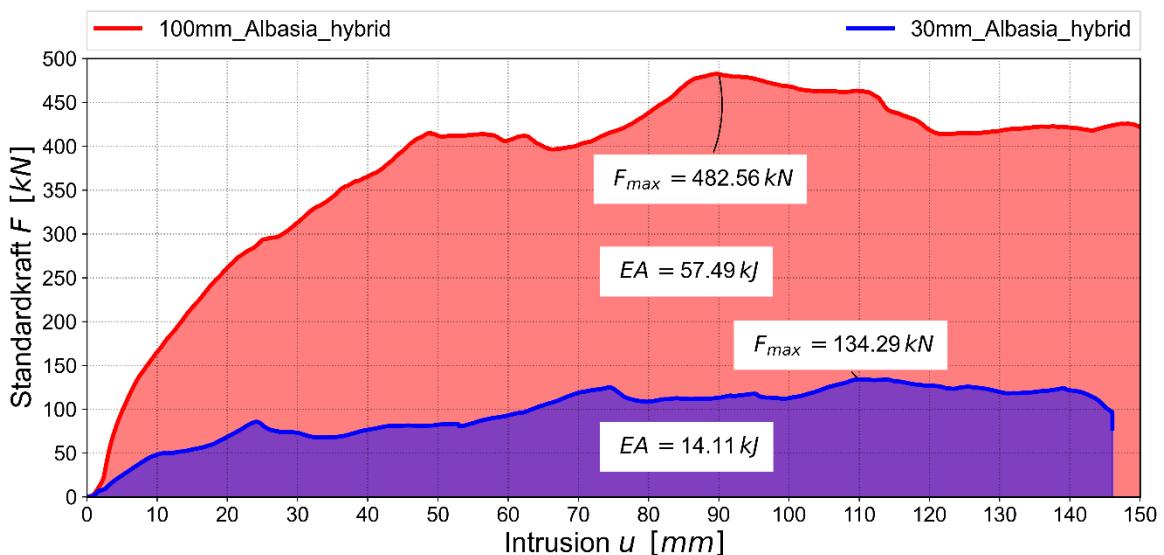


Abbildung 45: Kraft-Weg Charakteristik der hybriden Albasia-Sperrholzproben mit 100 mm Plattendicke (rot) im Vergleich mit 30 mm Plattendicke (blau). Dargestellt sind jeweils die maximalen Kräfte sowie die absorbierten Energien.



Abbildung 46: Stauchversagen der hybriden Albasia-Sperrholzprobe mit 30 mm Plattenstärke beplankt mit Stahlblech (links). Querschnitt der Probe nach dem Test zeigt die starke Verformung und Verdichtung des Albasia Holzkerns (rechts)



Abbildung 47: Stauchversagen der hybriden Albasia-Sperrholzprobe mit 100 mm Plattenstärke Versuchsaufbau (links). Querschnitt der Probe nach dem Test zeigt die starke Verformung und Verdichtung des Albasia Holzkerns (rechts)

Abschließend lässt sich anhand der Stauchversuche an Plattenwerkstoffen zusammenfassen, dass Albasia für die Energieabsorption im Pfahlaufprall sehr gut geeignet ist. Aufgrund der offenporigen Mikrostruktur des Weichholzes, das einem Schaumwerkstoff gleicht, erfolgt die Energieabsorption durch Verdichten der Mikrostruktur, analog zu Schaumwerkstoffen. Um diesen Effekt zu verstärken kommt es darauf an, dass die Holzstruktur möglichst stark verdichtet wird und nicht größere Bruchstücke wegbrechen können. Zusätzlich zeigte sich, dass gerade das Faltenbeulen des Stahlblechs vorteilhaft für die Verdichtung des Holzkerns ist. Ziel einer späteren Anwendung sollte daher sein, dass der Albasia-Holzkern stark

verdichtet wird und keine größeren Bruchstücke wegbrechen. Zusätzlich sollte das Stahlblech in einem Faltenbeulen versagen und sich beispielsweise nicht vom Holzkern abschälen.

1.3.5 Plattenbiegung

Die Prüfkörper wurden auf einem Metallrahmen mit rundem Stempel bei einer Belastung bis 300 N mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 mm/min untersucht. Ziel der Versuche war es, die Eignung von Albasia-Sperrholz und hybridisierten Platten für den Einsatz im Aufzugsausbau zu bewerten. Abbildung 48 zeigt die Versuchsvorrichtung mit dem Stempel und dem Metallrahmen, auf den die Platten aufgelegt werden. In Anlehnung an DIN EN 81-20 soll die Plattenprobe eine Belastung von 600 N ertragen, ohne dass eine plastische Verformung von mehr als 1 mm auftritt.

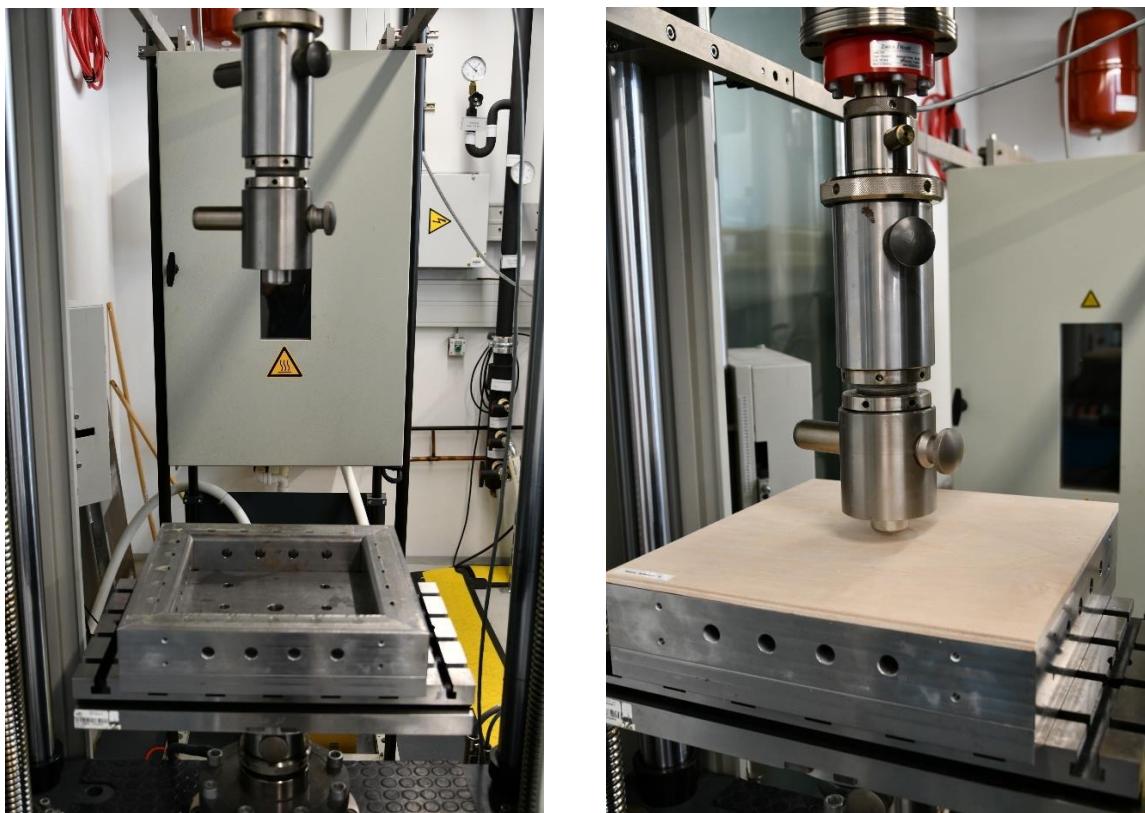
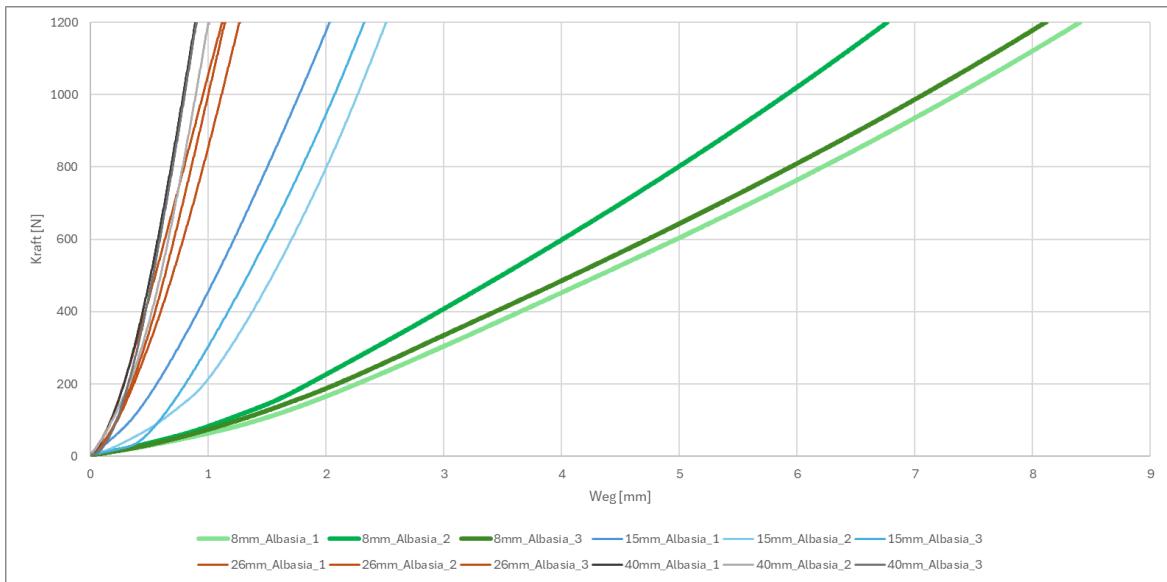
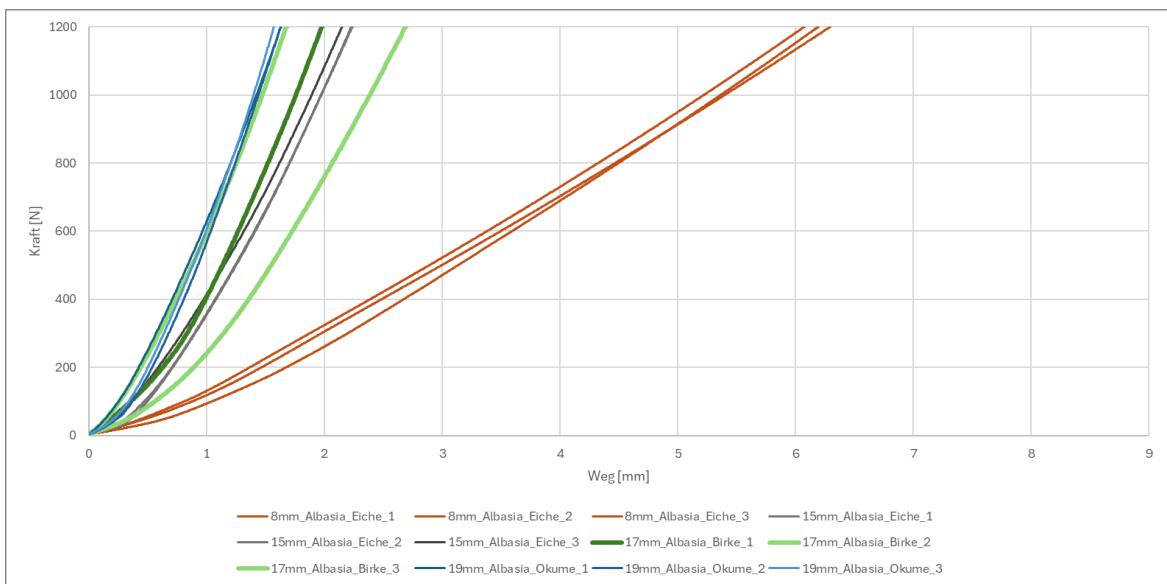


Abbildung 48: Versuchsvorrichtung der Plattenbiegungsversuche. Prüfvorrichtung mit Rahmen und Stempel (rechts) und Prüfaufbau mit Platte.

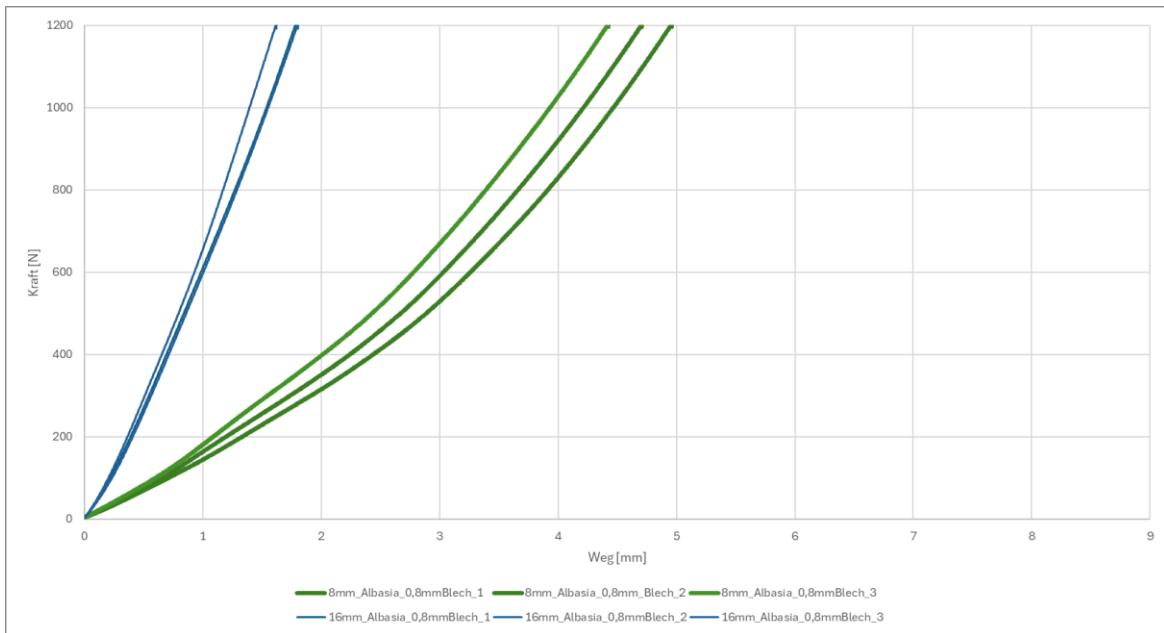
Die Ergebnisse zeigen, dass die in Anlehnung an DIN EN 81-20 definierten Kriterien deutlich übertroffen werden und Belastungen bis 1200 N erreicht werden. Nachdem eine Belastung von 600 N keinerlei Schädigung auf den Platten zeigte wurde beschlossen, die Belastung auf 1200 N zu erhöhen. In Abbildung 49 sind die Ergebnisse der Plattenbiegung an den Proben mit Albasia als Trägermaterial abgebildet. Die Ergebnisse der Referenzmaterialien sind hier nicht abgebildet, wurden jedoch ebenfalls in gleicher Art getestet.



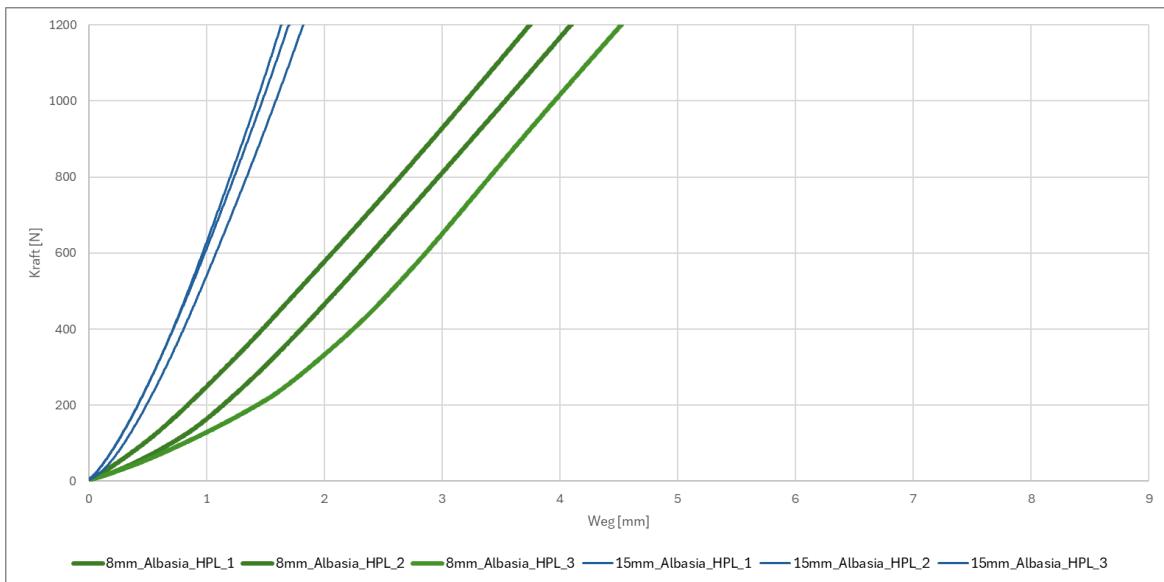
a) Albasia ohne Decklage, 8 mm, 15 mm, 26 mm und 40 mm



b) Albasia mit Holzfurnier als Decklage, 8 mm mit Eiche, 15 mm mit Eiche, 17 mm mit Birke und 19 mm mit Okoume



c) Albasia mit 0,8 mm Blech als Decklage, 8 mm und 16 mm



d) Albasia mit HPL-Beschichtung, 8 mm und 15 mm

Abbildung 49: Kraft-Weg-Diagramme der Plattenbiegungsversuche mit Albasia als Trägermaterial

Für die Untersuchungen kamen sowohl neu entwickelte Hybridaufbauten als auch Referenzmaterialien und unbehandelte Platten zum Einsatz, um eine umfassende Vergleichbarkeit sicherzustellen. Zu den hybriden Prüfkörpern gehörten Albasia-Sperrholzplatten mit HPL-Beschichtung, mit 0,8 mm Metallauflage sowie mit 0,6 mm Eiche-Furnier. Ergänzend wurden etablierte Materialien wie Spanplatten und OSB mit HPL-Beschichtung, Metallauflage oder Furnier berücksichtigt. Darüber hinaus flossen unbehandelte Vergleichswerte in die Versuche ein, unter anderem Albasia-Sperrholz in verschiedenen Dicken zwischen 8 mm und 40 mm, Varianten mit Decklagen aus Birke oder

Okoume sowie Spanplatten und OSB-Platten mit 12 mm Dicke. Auf diese Weise konnte sowohl die Materialwirkung des Trägers als auch die Effekte der Hybridisierung mit etablierten Lösungen verglichen werden.

Die Biegefestigkeitsprüfung nach DIN EN 81-20 ergab, dass bereits eine rohe 8 mm Albasia-Sperrholzplatte ohne Schichtstoff die geforderten Normwerte erfüllt. Aufbauend darauf wurden die Belastungen für weitere Prüfkörper auf das Dreifache gesteigert, um das Verhalten unter erhöhter Beanspruchung zu analysieren. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass hybridisierte Platten deutliche Leistungssteigerungen aufweisen. So übertrifft eine 8 mm Albasia-Platte mit 0,8 mm Edelstahlauflage die Biegefestigkeit einer 12 mm OSB-Platte, und eine 15 mm Albasia-Sperrholzplatte mit HPL-Beschichtung erreicht höhere Werte als eine gleich aufgebaute OSB-Platte.

Damit wird sichtbar, dass Albasia-Sperrholz und seine Hybridvarianten nicht nur die relevanten Anforderungen erfüllen, sondern auch gegenüber herkömmlichen Werkstoffen wie Span- und OSB-Platten Vorteile aufweisen. Langfristig ergibt sich daraus das Potenzial, gängige Materialien im Aufzugsausbau durch Albasia-basierte Hybride zu ersetzen.

1.3.6 Bruch und Splitterverhalten von hybriden Plattenwerkstoffen

Die Bruchtests wurden auf Grundlage der Norm DIN EN 13501-1 durchgeführt.

Die Bruchtests wurden an einer ZwickRoell Universalprüfmaschine durchgeführt. Die Versuchsvorrichtung ist dabei identisch zu den Plattenbierungsversuchen in Abschnitt 1.3.5. Um einen Schlag mit einem stumpfen Gegenstand zu simulieren, wurde der halbkugelförmige Impaktor mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/s, was der maximalen Belastungsgeschwindigkeit der Prüfmaschine entsprach, beschleunigt. Bilder der Prüfsequenz sind in Abbildung 50 dargestellt.

Untersucht wurden Glas-Verbundelemente mit einer Größe von 360 mm × 360 mm, bestehend aus 4 mm Glas mit 0,5 mm Blech sowie 4 mm Glas mit 4 mm Albasia-Sperrholz als Trägermaterial. Das Glas wurde entweder rückseitig lackiert oder unlackiert auf die jeweiligen Träger aufgebracht, um mögliche Unterschiede im Verbundverhalten zu erfassen.

Der Ablauf der Versuche gliederte sich in zwei Phasen. Zunächst wurde die Belastung ausgehend von der in der Norm vorgegebenen Belastung von etwa 800 N belastet und anschließend um das 1,5-fache (1200 N) und 2,0-fache (1600 N) bis zum ersten äußerlich erkennbaren Bruch gesteigert, anschließend erfolgte eine weitere Beanspruchung bis zum vollständigen Versagensfall des Verbunds. Während der Prüfungen wurde das Bruchverhalten per Videoaufzeichnung dokumentiert.

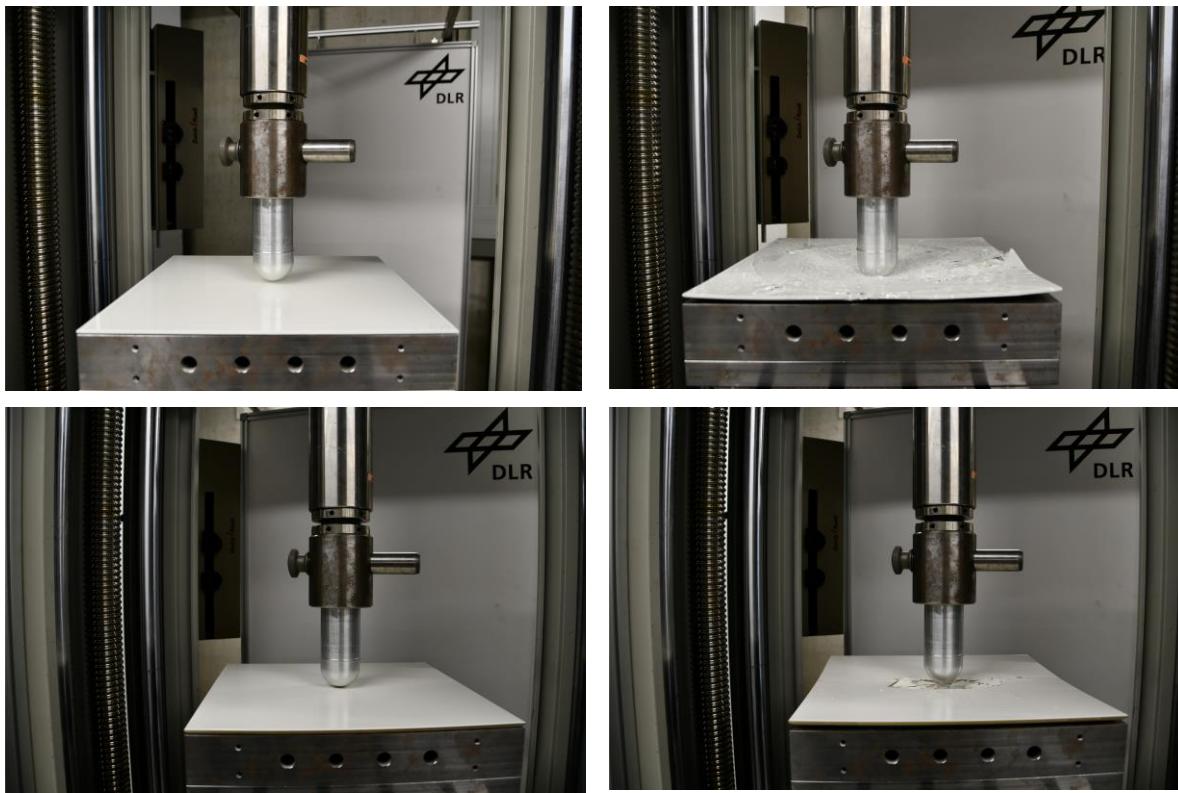


Abbildung 50: Prüfkörper Glas mit Blech und Glas mit Albasia (vor und nach dem Versuch)

Die Ergebnisse der Versuche sind in Abbildung 51 dargestellt und zeigen, dass die Glas-Verbundelemente sowohl mit Blech- als auch mit Albasia-Träger ein sehr günstiges Bruchverhalten aufweisen. In der ersten Phase bleibt der Verbund stabil, es tritt kein Absplittern auf, und die grundlegenden Anforderungen an einen Einsatz im Aufzugsbereich werden erfüllt. Die Untersuchungen verdeutlichen damit das Potenzial, auch Albasia als tragfähigen Werkstoff für den Einsatz in diesem Anwendungsfeld zu nutzen.

Langfristig besteht das Ziel, über das Projekt hinaus eine weiterführende Zertifizierung anzustreben. Geplant ist eine Prüfung in Anlehnung an DIN EN 12600, bei der das Splitterverhalten der Glas-Verbundelemente systematisch untersucht wird. Damit soll ein mit Verbundsicherheitsglas vergleichbares Verhalten nachgewiesen und eine Grundlage für eine breitere Zulassung geschaffen werden.

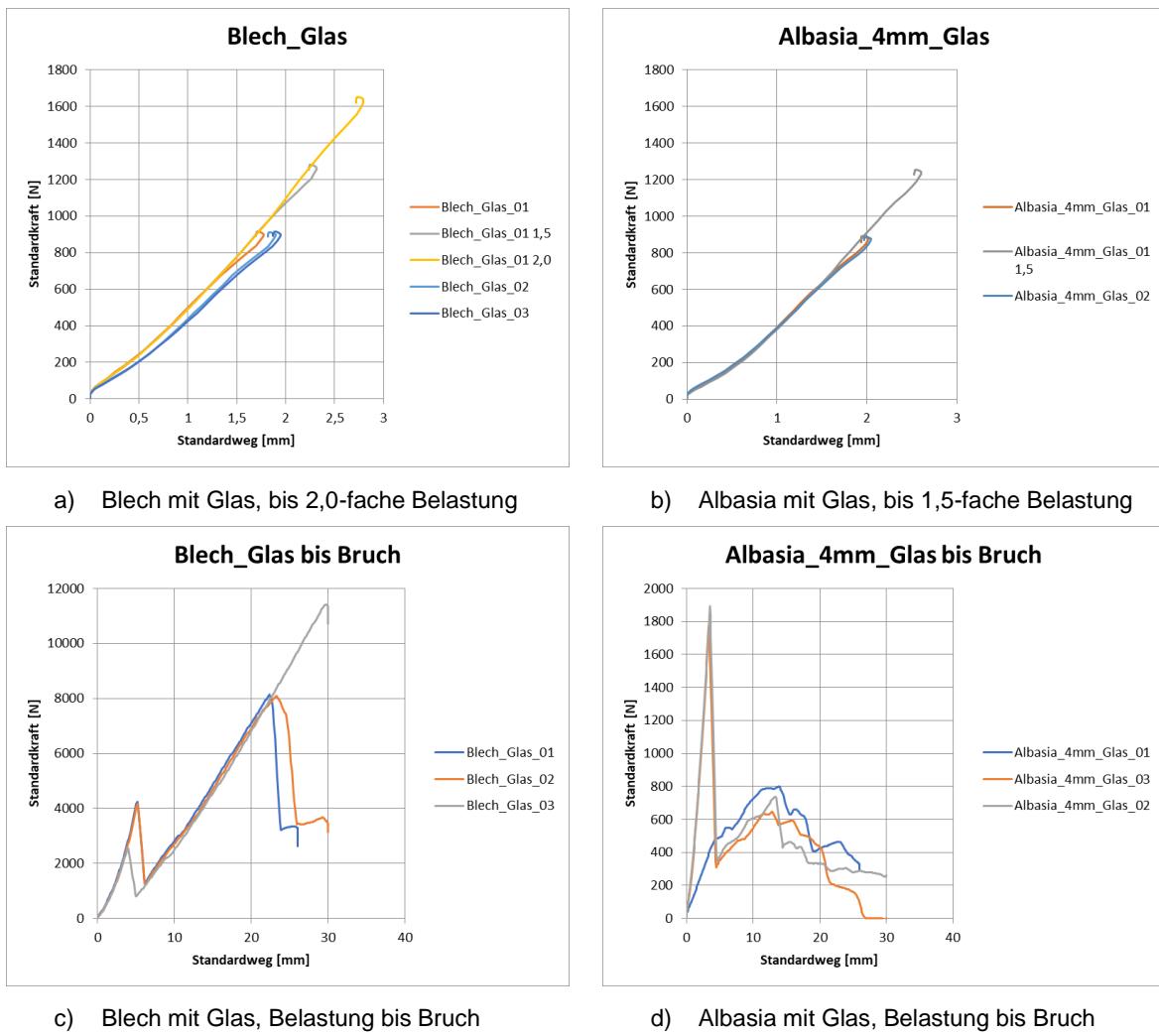


Abbildung 51: Plattenbiegung/Bruchtest an Blech-Glas und Albasia-Glas Proben

1.3.7 Branduntersuchungen von hybriden Proben

Im Rahmen des Arbeitspakets 7.3 wurden Brandtests durchgeführt, um einen Vortest für eine mögliche Zertifizierung von Wandverkleidungen im Aufzugsbereich zu erstellen. Die Grundlage der Prüfungen bildete die Norm DIN EN 13501-1.

Untersucht wurden verschiedene Materialaufbauten, die den späteren Wandaufbau in Aufzügen sowie im Aufzugdemonstrator repräsentieren. Die Prüfkörper hatten eine einheitliche Größe von 130 × 130 mm und wurden jeweils dreifach gefertigt.

Folgende Verbundelemente wurden hergestellt:

- Sperrholz Albasia 15 mm mit Blech 0,5 mm
- Blech 0,5 mm mit 4 mm Glas
- Sperrholz Albasia 15 mm ohne Beschichtung

Als neutrale Referenzmaterialien dienten:

- Furnierte Spanplatte P2 mit Eichefurnier, 19 mm
- Sperrholz Birke, 15 mm
- Sperrholz Buche, 15 mm
- OSB, 15 mm
- MDF, 15 mm

Der Versuchsaufbau wurde in Kooperation mit dem DLR entwickelt. Die Prüfkörper wurden vertikal aufgehängt und mit einem Oberflächenwinkel von 90° beflammt. Die Temperaturrentwicklung wurden sowohl auf der Seite der Beflammlung als auch auf der dem Bunsenbrenner gegenüberliegenden Seite mittels Draht gemessen zusätzlich wurde auf der Rückseite die Temperatur mit einer Wärmebildkamera gemessen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 52 dargestellt. Das Brandverhalten wurde kamerabasiert dokumentiert, um Rückschlüsse auf die Ausbreitung des Brandherdes zu ermöglichen.

Die Beflammlung erfolgte mittels eines Butan/Propan Bunsenbrenners mit einer Temperatur der Flamme von 1200°C. Der Bunsenbrenner ist mit einem Abstand von ca. 100 mm zur Probe befestigt. Als Dauer der Beflammlung wurden etwa 10 Minuten festgelegt, außer es zeigte sich, dass die Proben bereits vorher abgebrannt waren.



Abbildung 52: Versuchsaufbau Brandtest

Die Vortests zeigten, dass alle getesteten Prüfkörper die Kriterien der DIN EN 13501-1 erfüllen. Besonders die Albasia-Träger konnten im Vergleich zu Blech deutlich länger beflammt werden, ohne dass die Verbundelemente in ihre Einzelkomponenten zerfielen.

Zwar wurden die Temperaturen auf beiden Seiten der Probe mittels eines Messsystems über die gesamte Dauer der Beflammmung gemessen, jedoch kam es zu einem Fehler im Messsystem weshalb die Temperaturverläufe im Anschuss nicht ausgeschrieben werden konnten. Es zeigte sich jedoch, dass bei den Albasia-Proben die Temperatur auf der Rückseite innerhalb der 10 Minuten nicht über 60°C anstieg und es auch nicht zu einem Durchbrennen der Proben kam. Abbildung 53 b) zeigt den Brandversuch an der Albasia-Sperrholzprobe nach ca. 5 Minuten Beflammmung. Wie zu erkennen ist, ist die Vorderseite der Probe zwar stark verkohlt, es kommt jedoch nicht zu einem Durchbrennen der Probe. Durch die Pyrolyse des Holzes entsteht eine isolierende Schicht, die ein Durchbrennen und starken Temperaturanstieg auf der Rückseite verhindert.



a) Versuchsvorrichtung mit Spanplatte als Referenz

b) Albasia-Sperrholzplatte nach ca. 5 Minuten Beflammdauer

Abbildung 53: Brandversuche an Plattenproben

Aufgrund der eindeutigen Ergebnisse wurde auf eine weiterführende Versuchsreihe verzichtet. Die gewonnenen Erkenntnisse können für zukünftige Materialzertifizierungen im Aufzugsbereich genutzt werden.

1.3.8 Klimawechseltests

Hohe Temperaturschwankungen und Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit haben einen signifikanten Einfluss auf die Materialeigenschaften von Holz. Daher wurde dieser Effekt durch einen Klimawechseltest an unterschiedlichen Proben untersucht. Der Klimawechseltest unterliegt der konzerneigenen Prüfvorschrift der Volkswagen AG und dient zur Prüfung der Klimawechselfestigkeit von Fahrzeugbauteilen. Während des Tests werden die zyklischen Wechsel von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit, denen Fahrzeuge in ihrem Betrieb ausgesetzt sind, simuliert. Dabei variiert die Temperatur in klar definierten Zyklen zwischen -

40 °C und 80°C und die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 30 % und 80 %. Typische Folgen solcher Belastungen sind Rissbildungen, Verformungen sowie das Lösen von Verbindungen bei den getesteten Prüfkörpern. Somit können auch die Langzeitbeständigkeit und Leistungsfähigkeit der Materialien bewertet werden. Dies ist besonders relevant bei der Verwendung von Holz in Fahrzeugstrukturen, da Holz ein natürliches Material ist, dessen Eigenschaften stark von Umgebungseinflüssen abhängen. Die Ergebnisse des Klimawechseltests liefern wertvolle Erkenntnisse darüber, wie Holz unter extremen klimatischen Bedingungen reagiert und sind damit unerlässlich für die Entwicklung robuster und langlebiger Holzkonstruktionen. Durch die Identifizierung potenzieller Schwachstellen und die Optimierung der Materialeigenschaften kann die Zuverlässigkeit und Sicherheit von Holzbauteilen in Fahrzeugen erheblich gesteigert werden.

Zur Durchführung des Klimawechseltests werden zwei verschiedene Bauteilarten verwendet. Zum einen werden unterschiedlich stark verdichtete Couponproben, wie in Kapitel 1.3.2 beschrieben, verwendet und zum anderen werden Sperrholzproben mit klassischen Decklagen aus dem Aufzugbau getestet. Vor dem Start der Prüfung werden das Gewicht und die Maße der Proben ermittelt sowie beschriftet und in den Klimawechselschrank gelegt. Insgesamt werden die Proben für 20 Zyklen getestet und anschließend entnommen. Da ein Zyklus 12 h dauert ergibt sich somit eine Gesamtprüfdauer von 10 d. Für die Vergleichbarkeit der Proben werden sie im Anschluss des Tests für mehrere Tage bei Raumklima akklimatisiert, da sie während des Tests Wasser über die Luftfeuchtigkeit aufgenommen haben. Das Gewicht wird in regelmäßigen Abständen ermittelt und mit dem Ursprungsgewicht vor dem Test verglichen. Nach der Akklimatisierung erfolgte bei den Couponproben die 3-Punkt-Biegeprüfung nach der DIN EN 310 zur mechanischen Charakterisierung und bei den Sperrholzproben aus dem Aufzugbau eine visuelle Begutachtung.

Ergebnisse der unterschiedlich verdichteten Couponproben

Im direkten optischen Vergleich zeigten sich an den Proben vor und nach dem Klimawechseltest keine sichtbaren Veränderungen. Weder Schwachstellen im Material bzw. Schichtaufbau noch Rissbildungen oder Farbveränderungen konnten festgestellt werden. Dies deutet von außen betrachtet auf eine hohe Formstabilität sowie eine hohe Haftfestigkeit der einzelnen Füllstoffe hin. Über den gesamten Test hinweg weisen die Proben eine geringe Massenzunahme auf. Für die gesamte Probenserie wurde die Wasseraufnahme pro Volumeneinheit berechnet, um den Einfluss zyklischer Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen auf das Feuchteverhalten der Werkstoffe zu bewerten sowie die unterschiedlichen Probenverdichtungen miteinander zu vergleichen. Die ermittelten Werte

zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Verdichtung der Prüfkörper und sind in Tabelle 8 zu sehen.

Tabelle 8: Mittelwerte der Wasseraufnahme pro Volumen und der Gewichtszunahme der Proben nach dem Klimawechseltest

Verdichtung (MPa)	Wasser- aufnahme (g)	Gewicht vor Test (g)	Gewichts- zunahme (%)	Spez. Gewichtszunahme (g/cm³)
2	127,26	130,33	2,41	0,012
10	115,03	118,69	3,18	0,023
20	96,96	101,06	4,23	0,022
40	60,14	63,72	5,95	0,024

Die mittlere Wasseraufnahme bei den 2 MPa-Proben liegt bei $0,012 \text{ g/cm}^3$, während die restlichen Verdichtungsvarianten mit $0,023 \text{ g/cm}^3$, $0,022 \text{ g/cm}^3$ und $0,024 \text{ g/cm}^3$ doppelt so hoch ausfallen und sich alle in einem ähnlichen Bereich befinden. Es lässt sich eine Schwelle zwischen 2 MPa bis 10 MPa beobachten, bei der scheinbar ein Sättigungseffekt eintritt, bei dem die weitere Verdichtung nur noch begrenzt zur Erhöhung der Wasseraufnahme beiträgt. Mit einer Gewichtszunahme von maximal 5,95 % bei den 40 MPa-Proben ist die Erhöhung der Masse im Vergleich zu den anderen Probenvarianten sehr gering ausgefallen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die zyklische Klimabelastung zwar zu einer messbaren Feuchteaufnahme führt, jedoch keine strukturellen Schwächen der Proben aufdeckt. Um mögliche materialbezogene Alterungseffekte darstellen zu können, wird im Folgenden eine detaillierte Bewertung der mechanischen Auswirkungen anhand der 3-Punkt-Biegeprüfung durchgeführt. Dadurch lässt sich auch feststellen, welchen Einfluss die hohen Temperaturunterschiede auf die Holzproben haben.

Ergebnisse der Begutachtung der Aufzugproben

Für die Klimawechseltests wurden Prüfkörper aus Standardmaterialien sowie aus hybridisierten Verbundaufbauten hergestellt, die typische Wandverkleidungselemente im Aufzugsbereich repräsentieren. Ziel der Tests war es, das Quell- und Schwindverhalten von Albasia-Sperrholz sowie die Stabilität der Klebeverbindungen unter zyklischen Belastungen durch Temperatur und Luftfeuchtigkeit zu untersuchen.

Die Prüfkörper hatten eine Größe von $150 \times 150 \text{ mm}$ und wurden jeweils dreifach gefertigt.

Untersucht wurden Varianten aus Albasia-Sperrholz mit HPL, Metall oder Furnier, Spanplatten mit HPL, Metall oder Furnier sowie OSB mit HPL oder Metall.

Nach Abschluss der Tests wurden die Prüfkörper visuell begutachtet und bewertet.

Die Ergebnisse zeigten, dass bei hybridisierten Albasia-Prüfkörpern mit HPL oder Metall Ablösungen der Trägerschichten auftraten, während die Klebeverbindung zwischen Albasia und Glas durchgehend stabil blieb. Nicht-hybridisierte Albasia-Sperrholzplatten wiesen weder Ablösungen einzelner Furnierschichten noch optische Veränderungen auf.

Die Untersuchung liefert damit erste wertvolle Erkenntnisse zum Verhalten hybridisierter Materialien unter zyklischen klimatischen Belastungen im Aufzugsbereich. Obwohl die Prüfnorm ursprünglich für den Pkw-Bereich konzipiert ist und nicht direkt die Anforderungen an innere Aufzugsverkleidungen abbildet, zeigt sie deutlich, dass bei Verbundaufbauten mit HPL oder Metall Optimierungspotenzial in der Klebstoffauswahl besteht.

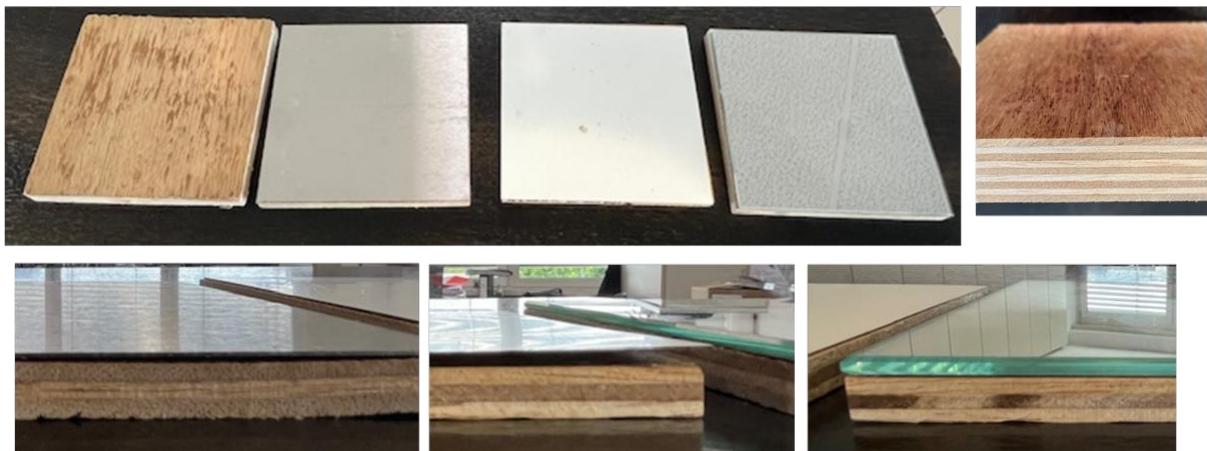


Abbildung 54: Prüfkörper nach Versuchsdurchführung

1.3.9 Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizient für Formholzteile

Für die Anwendung in der U-Shift Güterkapsel und insbesondere in der Version der Frischekapsel ist eine Bestimmung der Isolationseigenschaften des Albasia-Formholzverbundes erforderlich, um die Variante mit den Materialien im Stand der Technik vergleichen zu können. Zur Bestimmung der Isolationseigenschaften werden die Wärmeleitfähigkeit und der Wärmewiderstand sowie der Wärmedurchgangskoeffizient von zwei Probentypen ermittelt. Zum einen wird eine Albasia-Sperrholzplatte mit einer Aluminium-Beplankung und einer Materialstärke von 37,55 mm, zum anderen ein Ausschnitt aus dem Wandsegment (siehe Abschnitt 1.2.2.3) mit Albasia-Formholzteilen im Kern sowie Decklagen aus Buchensperrholz und Aluminiumblech mit einer Materialdicke von 49 mm untersucht. Die Probenkörper sind in Abbildung 55 dargestellt.

Für die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit und des Wärmewiderstandes wird eine der beplankten Seiten über 72 Minuten auf eine Temperatur von 35°C erwärmt, während die andere Seite auf 15 °C gekühlt wird. Im Mittelwert ergibt sich eine Temperatur 25 °C. Aus den

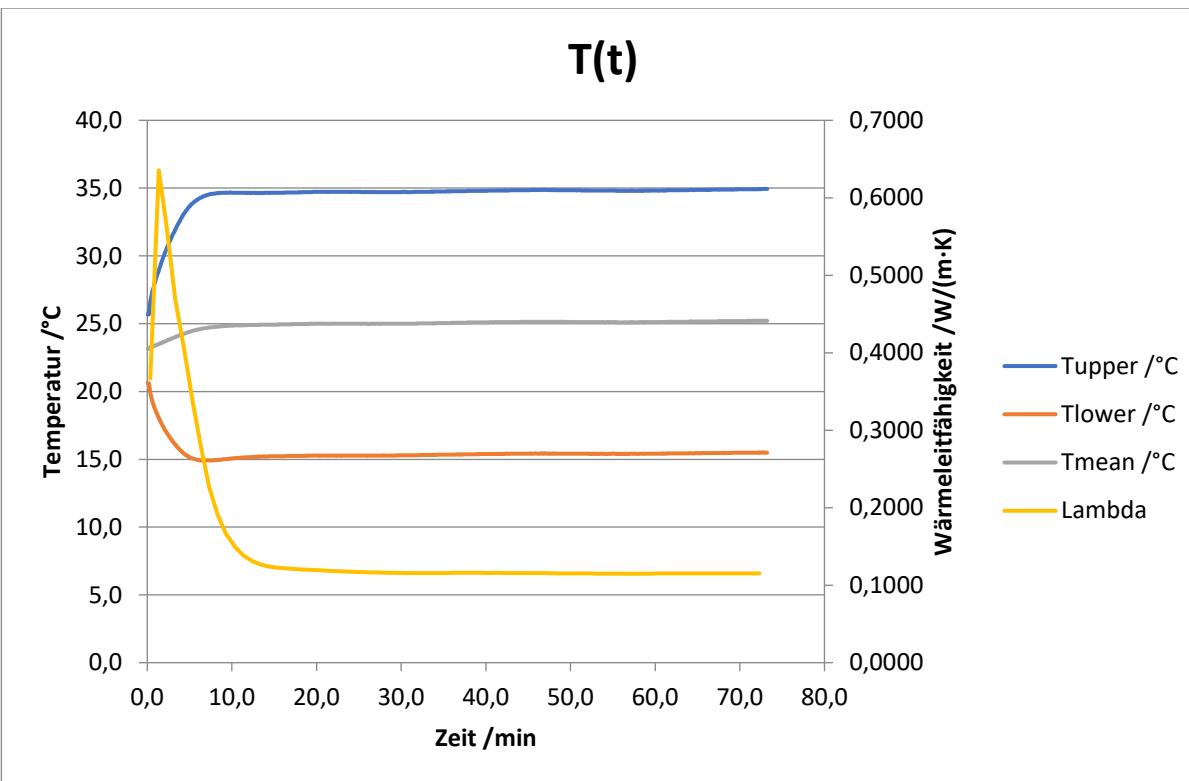
Messwerten ergeben sich die Wärmeleitfähigkeit und der Wärmewiderstand sowie der Wärmedurchgangskoeffizient, welcher der Kehrwert des Wärmewiderstandes des Verbundes ist, die in Tabelle 9 angegeben sind.



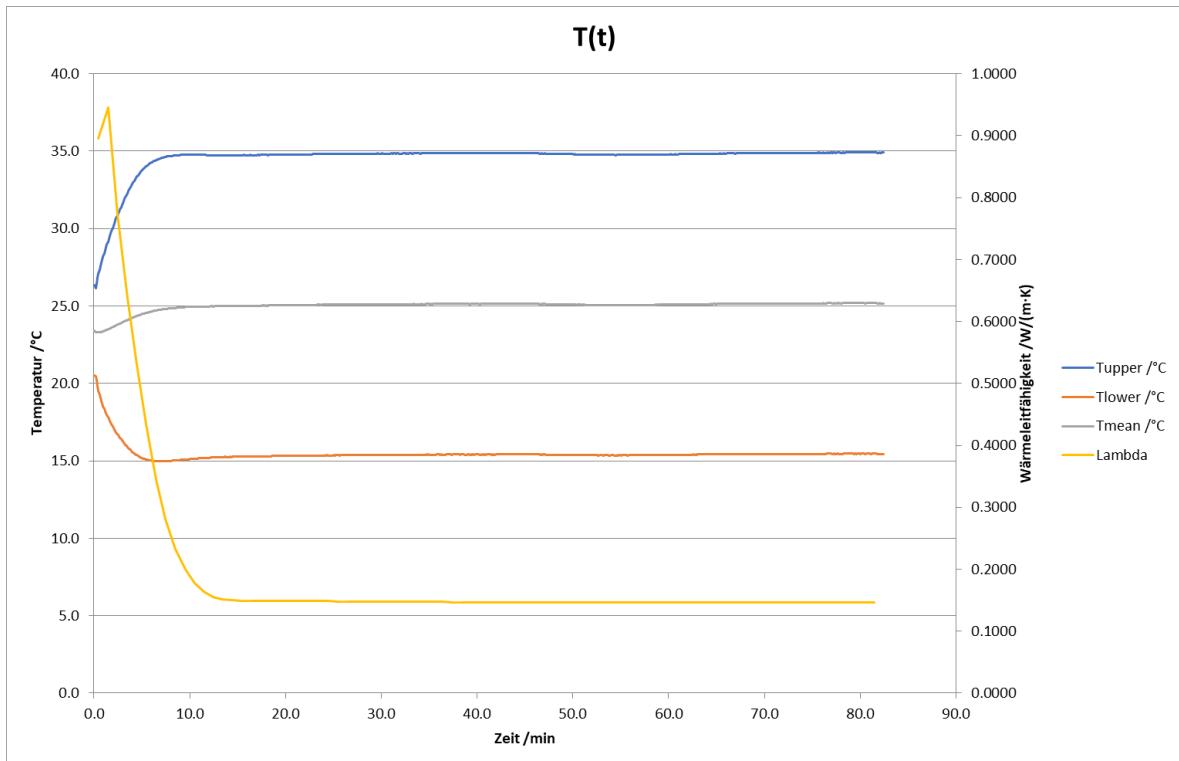
Abbildung 55: Proben für die Bestimmung der Wärmeleiteigenschaften von Albasia-Hybridmaterialien. Sperrholzplatte und Ausschnitt aus dem Wandsegment mit Albasia-Formholz-Kern

Tabelle 9: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit von Alabasia-Sperrholz und Alabasia-Formholz – gemessene Ergebnisse

Probenbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Wärmewiderstand [(m ² K)/W]	Wärmedurchgangs- koeffizient U [W/(m ² K)]
Albasia-Sperrholz 37,55 mm	0,115	0,326	3,07
Albasia-Formholz 49,0 mm	0,146	0,335	2,99



a) Temperaturverläufe und Wärmeleitfähigkeit λ für die Albasia-Sperrholzplatte



b) Temperaturverläufe und Wärmeleitfähigkeit λ für Albasia-Formholz

Abbildung 56: Temperaturverläufe auf beiden Seiten der Proben und Wärmeleitfähigkeit über Zeit für a) Albasia-Sperrholz und b) Albasia-Formholz

Der Wärmewiderstand ergibt sich aus dem Verhältnis der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Plattenseiten und dem Wärmefluss durch die Platte. Der Wärmewiderstand bei hybriden Materialien ergibt sich aus der Summe der Wärmewiderstände der Einzelmaterialeien bezogen auf die Materialdicke. Der Wärmedurchgangskoeffizient liegt bei der Albasia-Sperrholzplatte bei 3,07 W/(m²K) und bei dem Wandsegment aus Albasia-Formholz bei 2,99 W/(m²K). Betrachtet man die unterschiedlichen Materialstärken der Proben zeigt sich, dass die Albasia-Sperrholzplatte einen geringeren Wärmedurchgangskoeffizienten als das Albasia-Formholz aufweist. Zwar war zu erwarten, dass bei den Albasia-Formholzproben aufgrund der offenen Struktur und den mit Luft gefüllten Kammern ein niedrigerer Wärmedurchgangskoeffizient vorliegt, aber aufgrund der Probengeometrie und dem Prüfaufbau konnte die Luft durch die offenen Kammern strömen wodurch keine Isolationswirkung der Luft zu Stande kam. Um die Ergebnisse der Proben besser vergleichen zu können werden die ermittelten Werte auf eine einheitliche Materialstärke von 50 mm umgerechnet. Dies erfolgt anhand der gemessenen Wärmewiderständen der Einzelmaterialeien (Albasia, Aluminium, Buchen-Sperrholz) sowie einer Erhöhung der Materialstärken der Einzelmaterialeien. In Tabelle 10 sind die skalierten Ergebnisse aufgelistet. Hier zeigt sich deutlich, dass eine hybride Albasia-Sperrholzplatte mit 50 mm Materialstärke einen geringeren Wärmedurchgangskoeffizient als das Wandsegment mit gleicher Materialstärke aufweist. Auch hier ist der Grund wieder die Zirkulation der Luft durch die Kammern während dem Test. Nimmt man als Annahme ruhende Luft in den Kammern des Wandsegments reduziert sich der Wärmedurchgangskoeffizient auf 1,708 W/(m²K) (-25,1%). Werden die Hohlräume im Wandsegment mit Dämmmaterial, beispielsweise Holzwolle, gefüllt kann der Wärmedurchgangskoeffizient um 52 % auf 1,096 W/(m²K) reduziert werden. Um einen für die Frischekapsel geforderten Wärmedurchgangskoeffizient von etwa 0,5 W/(m²K) zu erreichen müsste das Wandsegment auf eine Materialstärke von 80 mm erhöht werden sowie ein Dämmmaterial verwendet werden. Dies wäre für die Frischekapsel wie in Abbildung 9 dargestellt realisierbar, da im Bereich oberhalb des Driveboards ausreichend Platz zur Verfügung steht

Tabelle 10: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit von Albasia-Sperrholz und Albasia-Formholz – Skalierte Ergebnisse auf 50 mm Materialstärke

Probenbezeichnung	Wärmewiderstand [(m ² K)/W]	Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m ² K)]
Albasia-Sperrholz – 50 mm	0,438	2,281
Albasia-Formholz – 50 mm	0,338	2,955

Albasia-Formholz – 50 mm Luft ruhend	0,585	1,708
Albasia-Formholz – 50 mm mit Dämmung	0,912	1,096
Albasia-Formholz – 80 mm mit Dämmung	1,760	0,568

1.4 Simulation

In der Literatur finden sich mehrere Ansätze zur numerischen Modellierung von Leichtholz. Insbesondere Materialmodelle speziell für Holz, die zellulären Modelle und die Verbundstoffmodelle sind dabei besonders relevant. Alle drei Ansätze haben ihre Vor- und Nachteile; ein grober Überblick über den über den Stand der Technik dieser Modellierungsansätze soll zu Beginn gegeben werden.

Ein Holzmaterialmodell wurde von Murray [3] entwickelt, das ein elasto-plastisches Schadensmodell mit Temperatur-, Feuchtigkeits- und Dehnrateneffekten für Holz umfasst und im kommerziellen FE-Code LS-Dyna als *MAT_WOOD (*MAT_143) implementiert ist. Derzeit ist es das einzige, auf Holz bezogene Materialmodell in LS-Dyna. Das Modell wurde ursprünglich für Sicherheitsanwendungen im Straßenverkehr, z.B. für den Aufprall von Fahrzeugen auf hölzerne Telegrafenmasten entwickelt. Das Materialmodell ist jedoch auf die meisten dynamischen Anwendungen anwendbar. Das Modell kann entweder unter Verwendung von Standard-Materialeigenschaften verwendet werden (die meisten von ihnen stammen von Holzproben typischer Anwendungen in US-Amerikanischen Telegrafenmasten wie der Südlichen Gelbkiefer und der Douglasie) oder durch die Bereitstellung der benötigten Eingabeparameter. Dennoch kann das Modell nur für Volumenelemente verwendet werden, die in der Berechnung numerisch sehr teuer sind. Bei den meisten Anwendungen im Automobilbereich, bei denen Zeitschritte und damit die Gesamtdauer einer Simulation entscheidend sind, werden Schalenelemente gegenüber Volumenelementen bevorzugt.

Auf mikroskopischer Ebene hat Holz eine zelluläre Anordnung entlang der Fasern. Seine Struktur hat Ähnlichkeiten mit einer Honigwabe (siehe Abbildung 57). Daher untersuchte Maillot [4] die Möglichkeit, Balsaholz in LS-Dyna mit den Wabenmodellen *MAT_026 und *MAT_126 zu modellieren, im Vergleich zu dem Modell *MAT_WOOD. Die Modelle werden für die Simulation von Dämpferabsorbern in nuklearen Castor-Behältern verwendet, die einer Druckbelastung ausgesetzt sind. Es zeigt sich, dass *MAT_WOOD das Verhalten von Balsaholz bei Druckbelastung nicht gut wiedergibt. Dagegen liefert *Mat_126 angemessene Ergebnisse, um das Druckverhalten von Balsaholz zu modellieren. Tagarielli [5] entwickelte

ein elastisch-plastisches konstitutives Modell für transversal isotrope kompressible Festkörper (Schäume). Die Materialkonstanten des Modells werden aus Druck- und Scherversuchen ermittelt. Das Modell wird dann in dem Finite-Elemente-Programm Abaqus verwendet, um die Reaktion von Balsaholz auf einen konischen Impaktor vorherzusagen. Die Modellvorhersagen werden mit denen eines isotropen Schaummodells verglichen. Es wird eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen Messungen und den Simulationen des transversal isotropen kompressiblen Festkörpermodells festgestellt. Andererseits erweist sich das gewählte isotrope Schaummodell als unzureichend, um die Reaktion auf die Eindrücke zu erfassen.

Klein [6] verglich schaumartige (*MAT_057 und *MAT_063) und wabenartige (*MAT_026 und *MAT_142) Modellierungsansätze zur Modellierung von Holzmaterial in LS-Dyna. Die Arbeit konzentriert sich auf die dynamische Holzkompression, indem ein Holzstoßbegrenzer unter Stoßbelastung getestet wird. Alle Modelle zeigen ein Entlastungsverhalten, das nicht dem entspricht, was im Experiment beobachtet wurde. Die Schaumstoffmodelle *MAT_057 und *MAT_063 sagen keine angemessene Querdehnung voraus. Das Wabenmodell *MAT_026 scheint das am besten geeignete Modell zu sein (beste Korrelation mit den experimentellen Ergebnissen).

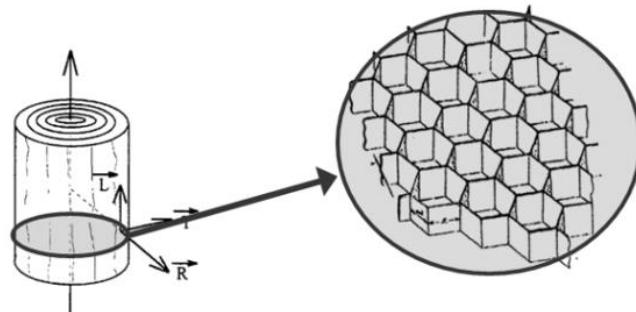


Abbildung 57: Honigwabenartige Mikrostruktur von Holz entlang der Holzfasern, entnommen aus [4]

Auf der Makroskalenebene ist Holz ein orthotroper Werkstoff. Aufgrund seiner Eigenschaften, die von den Belastungsrichtungen in Bezug auf die Richtung der Holzfasern abhängen, kann Holz mit Verbundwerkstoffen verglichen werden (siehe Abbildung 58) und daher mit einem Materialmodell modelliert werden, das normalerweise für Verbundwerkstoffe reserviert ist. Newaz [7] modellierte Balsaholz als Verbundwerkstoff mit Fasern und Matrix mit der Software GENOA. Die Kalibrierung des Modells erfolgt durch den Vergleich von Simulationen und experimentellen Ergebnissen (Zug-, Druck- und ScherTests entlang und quer zur Faserrichtung). Die erhaltenen Eigenschaften stimmen mit den in der Literatur verfügbaren

Ergebnissen überein. Außerdem wurde Balsaholz in LS-Dyna unter Verwendung von *MAT_022 und *MAT_058 modelliert und die Simulationen wurden mit den Schertests verglichen. Die Modelle passen gut für den elastischen Bereich, bilden aber das plastische Verhalten nicht zufriedenstellend ab.

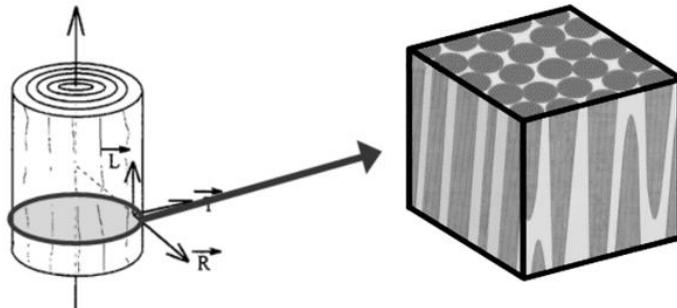


Abbildung 58: Verbundwerkstoffartige Makrostruktur von Holz mit Fasern, entnommen aus [4]

Baumann [8] hat die Modelle *MAT_058 und *MAT_WOOD mit quasistatischen Zug-, Druck- und Dreipunktbiegeversuchen an massivem Birkenholz verglichen und validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell *MAT_058 das Zugverhalten (in longitudinaler, tangentialer und radialer Richtung) genau wiedergibt. Bei der longitudinalen und tangentialen Kompression gelingt es keinem der beiden Modelle, das Holzverhalten zu erfassen. Das Modell *MAT_058 ist in der Lage, die radiale Drucktestkurve recht gut zu beschreiben. Bei der Biegung haben beide Materialmodelle Schwierigkeiten, das Verhalten ab einem bestimmten Verformungswert zu beschreiben.

Am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) modellierte Piazza [9] eine einzelne Buchenfurnierschicht mit dem Materialmodell *MAT_054 und validierte es durch Zug- und Druckversuche (in Längs- und Querrichtung). Anschließend wurde ein geschichteter Schalenmodellierungsansatz verwendet, um das Furnierlaminat für den quasi-statischen Dreipunkt-Biegetest zu modellieren. Der Vergleich zwischen Test und Simulation zeigt eine gute Übereinstimmung. Außerdem konnte das Bruchmuster in guter Näherung abgebildet werden.

Basierend auf dem Stand der Technik wurden folgende Lücken in der Charakterisierung und Simulation von Leichthölzern, insbesondere Albasia, identifiziert:

- Die mechanischen Materialparameter, die für Leichtholz, insbesondere Albasia für die numerische Simulation benötigt werden, sind rar.

- Leichtholz oder Holz im Allgemeinen werden größtenteils auf ihre typischen Anwendungsfelder im Bauwesen charakterisiert. Eine Charakterisierung mit dem Ziel einer numerischen Simulation ist selten. Insbesondere auf Furnierebene wird Holz kaum charakterisiert.
- Allgemein wird Holz selten in numerischen Simulationen verwendet. Das zeigt sich dadurch, dass es in LS-Dyna nur ein Materialmodell für Holz gibt. Andere Materialmodelle sind vorwiegend für andere Materialien (bspw. Schäume oder Verbundwerkstoffe) entwickelt worden. Eine Nutzung dieser Materialmodelle für die Simulation von Holz geht daher immer mit Kompromisslösungen einher.

Daher ist die Motivation der Forschungsthemen im Rahmen dieses geförderten Forschungsprojektes die Charakterisierung des Leichtholzes Albasia und die Simulation in LS-Dyna mit bestehenden Materialmodellen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten umfassen:

- Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Albasia (Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahlen, Festigkeiten, Festigkeitsdehnung und Versagensdehnung) unter Zugbelastung in den beiden Hauptrichtungen auf Furnierebene.
- Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Albasia (Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahlen, Festigkeiten) unter Druckbelastung auf Fünfer-, Laminat- und Vollholzebene
- Auswahl und Bewertung von geeigneten Materialmodellen in LS-Dyna

Die Ergebnisse in den Kapiteln 1.4.1 und 1.4.2 entstanden im Rahmen von studentischen Masterarbeiten am DLR. Daher wird nur ein Überblick über die Ergebnisse gegeben. Für weitere Details wird auf [10] und [11] verwiesen.

1.4.1 Materialcharakterisierung von Leichtholz für die numerische Simulation

Die Ergebnisse in diesem Kapitel unterteilen sich in eine Charakterisierung von Albasia unter Zugbelastung, beschrieben im Detail in [10], sowie unter Druckbelastung, beschrieben im Detail in [11]. Zugcharakterisierung

1.4.1.1 Charakterisierung von Albasia unter Zugbelastung

Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Charakterisierung unter Zugbelastung erfolgt zuerst an zwei Arten von Einzelfurnieren. Zum einen werden die Eigenschaften für die beiden Hauptrichtungen (in Faserrichtung und Quer zur Faserrichtung) an reinem Albasiafurnier bestimmt. In einem zweiten Schritt werden die gleichen Materialeigenschaften an Fünfer beschichtet mit Holzklebstoff bestimmt. Ziel der Charakterisierung auf Einzelfurnierebene ist die Bestimmung der Materialeigenschaften auf der Grundstufe des Modellierungsansatzes. Dabei werden zwei Ansätze für das modellierte

Material in Betracht gezogen: Reines Albasia-Furnier und Albasia-Furnier, das mit Holzklebstoff beschichtet ist. Der zweite Ansatz ist durch die Tatsache gerechtfertigt, dass Furnier für technische Anwendungen im Allgemeinen in Form von LVL (Laminated Veneer Lumber - Furnierschichtholz) oder Sperrholz verwendet wird, bei denen die Schichten mit Holzleim verklebt sind. Die folgenden verschiedenen Konfigurationen von Albasia-Furnier werden unter Zugbelastung untersucht:

- Einzelfurnier (reines Albasia – *pure Albizia*)
- Einzelfurnier beschichtet mit Holzklebstoff (beleimtes Albasia – *glued Albizia*)
- Albasia Sperrholzlaminate mit 0° und 90° Furnierlagen (Furnierschichtholz – *plywood*)

Da keine spezifische Testnorm für die Zugcharakterisierung von Einzelfurnier bekannt ist, wurde ein eigenes Testverfahren auf Basis von folgenden Prüfnormen entwickelt:

- DIN 52188
- ISO 13061-6
- ISO 13061-7
- DIN ISO 527-4
- DIN ISO 527-5

Während die ersten drei Normen für die Charakterisierung von Holzwerkstoffen entwickelt wurden, befassen sich die letzten Zwei Normen mit der Charakterisierung von faserverstärkten Kunststoffen. Basierend auf den Anforderungen an die Charakterisierung von Einzelfurnier wurde ein Prüfverfahren in Anlehnung an DIN ISO 527-5 verwendet.

Die Geometrie der Einzelfurnier-Prüfkörper umfasst eine Probenlänge von 250 mm sowie eine Breite der Einzelfurniere von 60 mm. Die Probenbreite sowie die Länge des Einspannbereichs (siehe Abbildung 59) ergaben sich nach eingehenden Untersuchungen mit dem Ziel, eine lokale Verdichtung der Furnierproben im Einspannbereich zu vermeiden. Auf eine Verstärkung der Proben im Einspannbereich, wie in DIN ISO 527-5 angegeben wurde verzichtet.

Für die Herstellung der Proben wurden Albasia Furnierblätter mit einer Dicke von 3,0 mm und 3,6 mm verwendet, daraus wurden die Proben zugeschnitten, sodass die Faserorientierung in Zugrichtung (1-Richtung) oder quer zur Zugrichtung (2-Richtung) verläuft. Zusätzlich wurden für die Charakterisierung der beleimten Zugproben Furnier mit 3,6 mm Dicke vollflächig und beidseitig mit 220 g/m²PVAc Holzkleim (Ponal Classic HV710) bestrichen.

Basierend auf einer statistischen Berechnung über die benötigte Probenanzahl (siehe [10]) wurde folgende Probenanzahl getestet:

- 43 Proben reine Albasia-Furnier-Proben mit Faserorientierung in 1-Richtung. Die Dichte variiert von 140 bis 400 kg/m³, der Feuchtigkeitsgehalt beträgt etwa 9% und die Dicke der Furnierproben liegt zwischen 2,7 mm und 4,0 mm.
- 21 beleimte Alabsia-Proben mit Faserorientierung in 1-Richtung. Die Dichte beträgt im Mittel 317 kg/m³, der Feuchtigkeitsgehalt beträgt etwa 10,1% und die Dicke der Furnierproben etwa 3,7 mm.
- 43 Proben reine Albasia-Furnier-Proben mit Faserorientierung in 2-Richtung. Die Dichte variiert von 240 bis 400 kg/m³
- 16 beleimte Alabsia-Proben mit Faserorientierung in 2-Richtung. Die Dichte beträgt im Mittel 321 kg/m³

Die Zugversuche werden bei Raumtemperatur mit der Universalprüfmaschine Zwick/Roell 250 durchgeführt. Die Geschwindigkeit ist auf 1,0 mm/min eingestellt. Die Kraft wird mit einer Kraftmessdose gemessen (Nennkraft = 20 kN und Empfindlichkeit = 2mV/V). Die Dehnung wird mit der Traversenverschiebung und einem auf der Probe befestigten Extensometer gemessen.



Abbildung 59: Probengeometrie und Versuchsvorrichtung für die Charakterisierung von Einzelfurnier unter Zugbelastung, aus [10].

Ergebnisse der Charakterisierung unter Zugbelastung

Von den 43 geprüften reinen Albasia-Furnier-Proben mit Faserorientierung in 1-Richtung gab es 14 Proben, die im Bereich oder nahe der Einspannung versagten, diese Proben wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt. Von den 21 beleimten Albasia-Proben in 1-Richtung zeigten alle Proben ein akzeptables Versagensverhalten und wurden ausgewertet. Bei den

Proben mit Faserorientierung in 2-Richtung wurden 6 der 43 reinen Albasiproben und 1 der 16 beleimten Albasiproben aufgrund fehlerhaften Versagensverhaltens aussortiert. Abbildung 60 zeigt repräsentative Spannungs-Dehnungs-Kurven für Albasia-Furnierproben in 1-Richtung und 2-Richtung für sowohl reine als auch beleimte Albasia-Proben. Während reine Albasia-Proben ein sehr sprödes Bruchverhalten unter Zugbelastung zeigen, verhindert die Beleimung den Rissfortschritt und das Schädigungsverhalten ändert sich hin zu einem plastischen Versagen.

Die Materialparameter Zugfestigkeit, Dehnung bei Zugfestigkeit (als Festigkeitsdehnung bezeichnet) und Elastizitätsmodul in 1-Richtung und 2-Richtung sind als Funktion der Holzdichte in Abbildung 61, Abbildung 62 und Abbildung 63 abgebildet. Die analytischen Modelle sind in Tabelle 11 und Tabelle 12 angegeben. Bei Belastung in 1-Richtung zeigt sich, dass alle Parameter mit der Holzdichte ansteigen. Es zeigt sich jedoch, dass die Streuung der Ergebnisse sowohl für die reinen als auch geklebten Albasia-Proben mit der Dichte ebenfalls ansteigt. Bei Betrachtung der Proben zeigte sich, dass die Faserrichtung nicht optimal in Lastrichtung ausgerichtet ist. Dadurch reduzieren sich die Materialparameter umso mehr, je größer die Abweichung der Faserrichtung von der Richtung der Lasteinleitung ist. Der Grund liegt im natürlichen Wachstumsprozess des Holzes und dem Herstellungsprozess der Holzfurniere. Bei den Proben mit geringer Holzdichte kann dieser Effekt zwar ebenfalls auftreten, allerdings zeigte sich, dass für alle Proben die Faserrichtung sehr nahe an der Lastrichtung ausgerichtet sind.

2-Richtung:

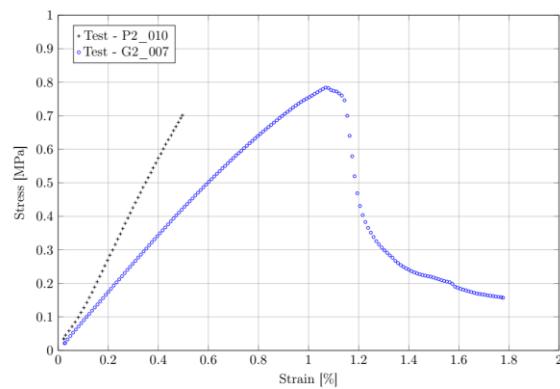
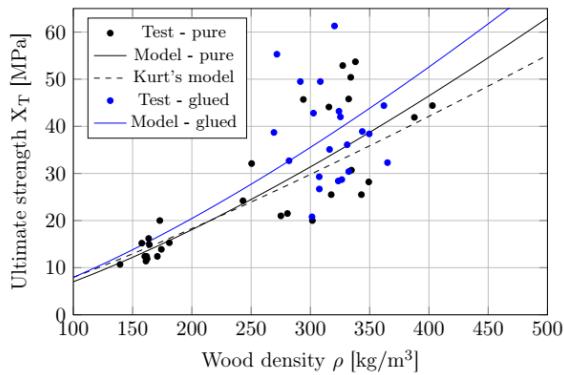


Abbildung 60: Spannungs-Dehnungs-Kurve der Albasia-Furnierproben in 1-Richtung und 2-Richtung für reines Albasia (P1_010, P2_010) und beleimtes Albasia (G1_020, G2_007), aus [10].

1-Richtung:



2-Richtung:

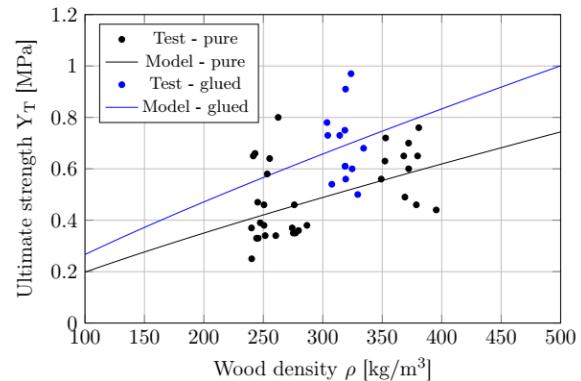
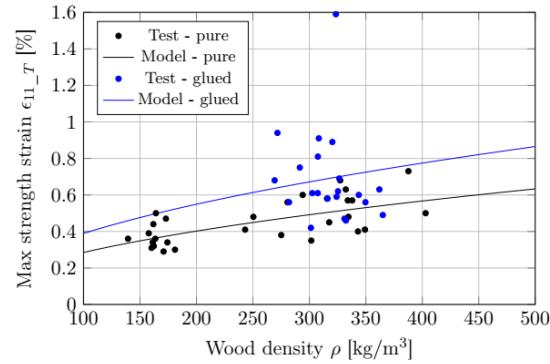


Abbildung 61: Zugfestigkeit vs. Holzdichte für Albasia-Furnierproben in 1-Richtung und 2-Richtung, aus [10].

1-Richtung:



2-Richtung:

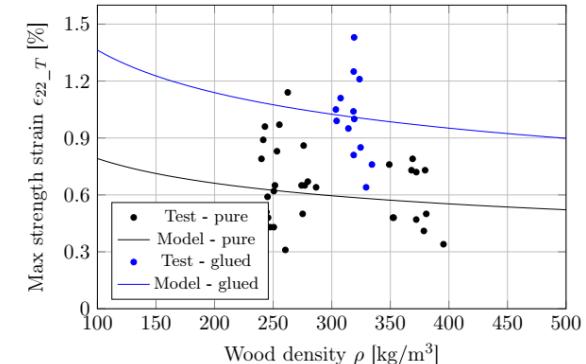


Abbildung 62: Festigkeitsdehnung vs. Holzdichte für Albasia-Furnierproben in 1-Richtung und 2-Richtung, aus [10].

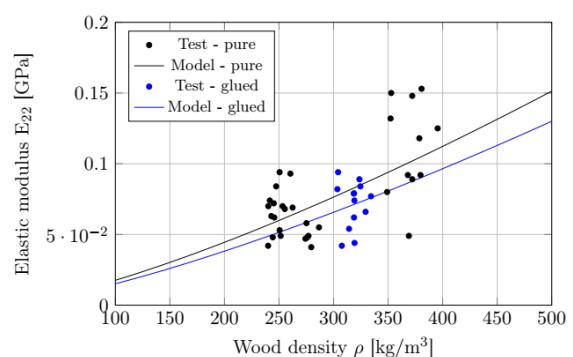
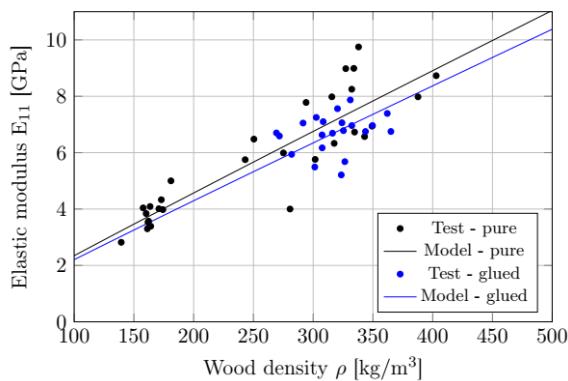


Abbildung 63: Elastizitätsmodul vs. Holzdichte für Albasia-Furnierproben in 1-Richtung, aus [10].

Tabelle 11: Analytisches Modell für reine und beleimte Albasia-Furnierproben unter Zugbelastung in 1-Richtung.

Parameter	Einheit	Analytisches Modell	Korrelationsfaktor R ²
<u>Reines Albasia</u>			
Festigkeit X_T	MPa	$1,32e * 10^{-2} * \rho^{1,363}$	0,78
Festigkeitsdehnung ϵ_{11_T}	%	$2,903e * 10^{-2} * \rho^{0,496}$	0,45
Elastizitätsmodul E_{11}	GPa	$2,78e * 10^{-2} * \rho^{0,963}$	0,83
<u>Beleimtes Albasia</u>			
Festigkeit X_T	MPa	$1,494 * 10^{-2} * \rho^{1,363}$	-
Festigkeitsdehnung ϵ_{11_T}	%	$3,966e * 10^{-2} * \rho^{0,496}$	-
Elastizitätsmodul E_{11}	GPa	$2,612e * 10^{-2} * \rho^{0,963}$	-

Tabelle 12: Analytisches Modell für reine und beleimte Albasia-Furnierproben unter Zugbelastung in 2-Richtung.

Parameter	Einheit	Analytisches Modell	Korrelationsfaktor R ²
<u>Reines Albasia</u>			
Festigkeit Y_T	MPa	$4,495e * 10^{-3} * \rho^{0,822}$	0,24
Festigkeitsdehnung ϵ_{22_T}	%	$2,609e * \rho^{-0,259}$	0,02
Elastizitätsmodul E_{22}	GPa	$3,727e * 10^{-5} * \rho^{1,337}$	0,4
<u>Beleimtes Albasia</u>			
Festigkeit Y_T	MPa	$6,051 * 10^{-3} * \rho^{0,822}$	-
Festigkeitsdehnung ϵ_{22_T}	%	$4,492 * \rho^{-0,259}$	-
Elastizitätsmodul E_{22}	GPa	$3,203e * 10^{-5} * \rho^{1,337}$	-

Charakterisierung von Albasia Sperrholzproben unter Zugbelastung

Zusätzlich zur Zugcharakterisierung von Einzelfurnier wurden Albasia Sperrholzproben unter Zugbelastung und den gleichen Testeinstellungen wie das Einzelfurnier charakterisiert. Dazu wurde fünflagiges Albasia Sperrholz mit dem Aufbau [90°/0°/90°/0°/90°] und die Lagendicke beträgt [0,4/2,4/2,4/2,4/0,4]mm geprüft, wobei die 0°-Richtung wieder parallel zur Lastrichtung verläuft. 20 Sperrholzproben wurden getestet. Die Dichte der Sperrholzproben lag bei etwa 380 kg/m³ inklusive Klebstoff und der Feuchtigkeitsgehalt um 11,5%. Die Dicke der

Sperrholzproben betrug 8,0 mm. Abbildung 64 zeigt eine Sperrholzprobe vor und nach der Prüfung unter Zugbelastung.

Acht von 20 Proben wurden für die Auswertung herangezogen. Abbildung 65 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der acht Proben. Die durchschnittlichen Materialeigenschaften sind in Tabelle 13 angegeben.

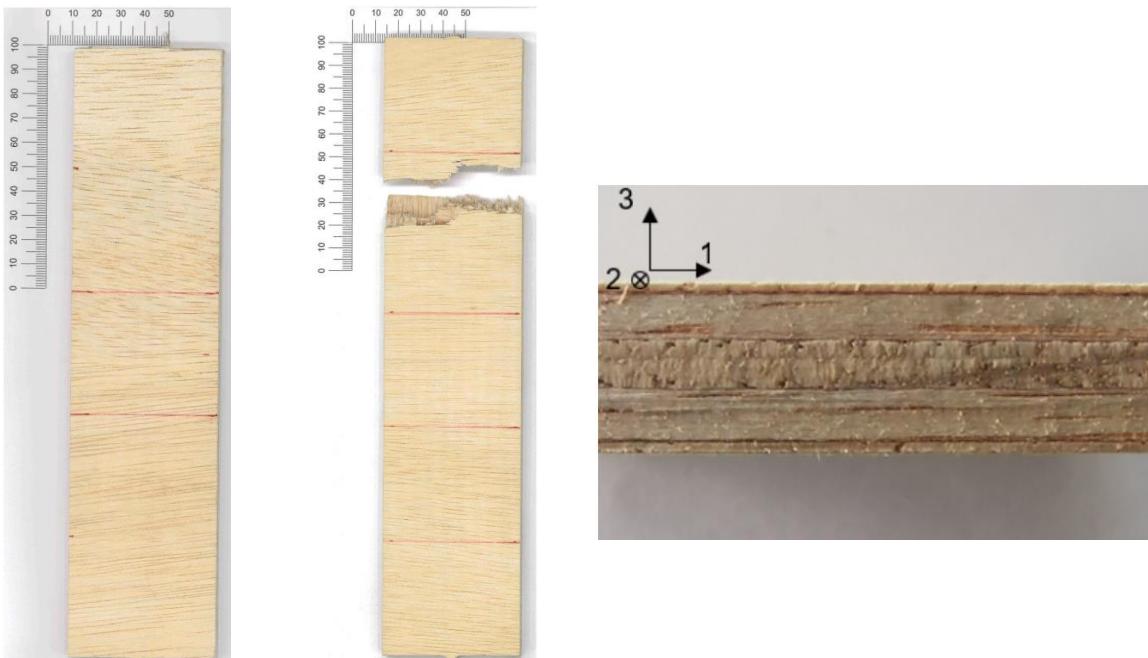


Abbildung 64: Albasia-Sperrholzproben vor (links) und nach (Mitte) der Zugprüfung. Seitenansicht (rechts) zeigt den Schichtverbundaufbau

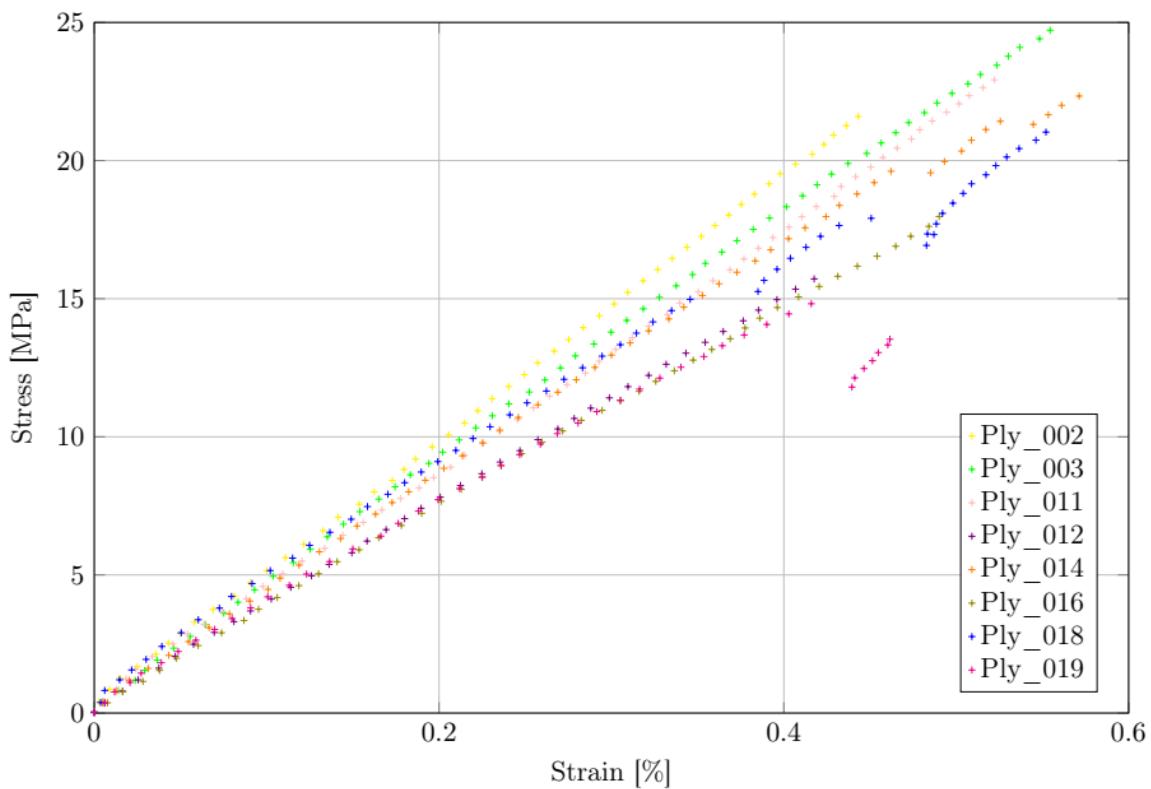


Abbildung 65: Spannungs-Dehnungs-Verläufe für Albasia-Sperrholzproben unter Zugbelastung, aus [10].

Tabelle 13: Materialeigenschaften für Albasia-Sperrholzproben unter Zugbelastung, aus [10].

Parameter	Durchschnittswert
Zugfestigkeit	$20,26 \pm 3,49$ MPa
Festigkeitsdehnung	$0,50 \pm 0,06\%$
Elastizitätsmodul	$4,08 \pm 0,41$ GPa

1.4.1.2 Charakterisierung von Albasia unter Druckbelastung

Die Charakterisierung von Albasia unter Druckbelastung erfolgte im Rahmen einer Masterarbeit am DLR [11]. Zur Charakterisierung von Leichtholz bei Druckbelastung wurden unterschiedliche Probenarten untersucht:

- dreilagiges UD-Laminat mit je $2,5 \pm 0,5$ mm Stärke
- dreilagiges Sperrholz mit je $2,5 \pm 0,5$ mm Stärke
- Vollholzproben mit $30 \times 15 \times 10$ mm ($L \times B \times H$) als Vergleich
- mehrlagiges Sperrholz

Für ein grundlegendes Verständnis des Druckverhaltens von Leichtholz wird zunächst UD-Laminat untersucht. Hierfür wird UD-Laminat aus drei Einzellagen Schälfurnier hergestellt. UD-Laminat wird untersucht, da im technischen Kontext Einzellagen nur eine geringe Relevanz haben. Bei mehrlagigen Laminaten werden lokale Fehlstellen, Inhomogenitäten oder Dichteunterschiede in den Einzellagen ausgeglichen. Die experimentelle Untersuchung erfolgt in Anlehnung an ASTM D6641 und DIN EN ISO 14126, da diese für die Prüfung von FVK-Laminaten gedacht sind und somit am besten geeignet erscheinen. Die produzierten Prüflinge werden parallel und senkrecht zur Faser getestet, also in L- und T-Richtung.

Versuchsvorbereitung und Versuchsdurchführung UD-Laminat

Im ersten Schritt werden drei Lagen aus Albasia Schälfurnier mit einer Seitenlänge von 200 mm mit dem PVAc-Weißleim *Ponal Classic* bestrichen. Die Auswahl der verklebten Einzellagen mit ca. 2,5 mm Stärke erfolgt zufällig aus verschiedenen Furnierblättern. Es wird darauf geachtet, dass die Fasern jeder Einzellage möglichst parallel zueinander orientiert sind, sofern dies möglich ist. Lokal kann es dazu kommen, dass Fasern gekrümmmt sind. Die Leimmenge beträgt 200 g/m². Gemäß dem technischen Datenblatt des *Ponal Classic* werden die Laminate 20 Minuten lang zwischen zwei Drucktellern mit einer Flächenpressung von 1 N/mm² verpresst. Gemäß DIN EN ISO 14126 werden die Proben nach Typ B2 gefertigt, da sich dieser Probenkörpertyp aufgrund der Analogie zu groben Geweben eignet. Der Testaufbau der Norm besteht aus einer HCCF-Vorrichtung (Hydraulic Composites Compression Fixture), mit der die Proben in hydraulischen Spannbacken eingespannt werden können (siehe Abbildung 66). Alle Proben werden auf ein Maß 155 x 25 mm gefräst mit einer freien Länge der Einspannung von 25 mm.

Die bereits beschriebene HCCF-Vorrichtung wird in eine Zwick Roell Universalprüfmaschine mit 250 kN Kraftmessdose eingebaut. Für die spätere Auswertung mittels Videos wird zudem eine Kamera installiert, wie in Abbildung 66 Links zu erkennen ist. Die Proben werden in den hydraulischen Spannbacken mit einer Flächenpressung von 1 N/mm² eingespannt, sodass dadurch keine Schädigung auftritt. Das Prüfprogramm beinhaltet eine weggesteuerte Stauchung der Proben um 6 mm – was einer Dehnung von $\epsilon = 0,24$ entspricht – mit einer Geschwindigkeit von 0,1 mm/s. In den Vorversuchen zeigt sich, dass eine weitere Dehnung keine zusätzlichen Informationen liefert, da die Proben ihr Versagensverhalten bereits gezeigt haben. Zudem ist eine weitere Kompaktierung der Proben aufgrund der Geometrie der Spannbacken nicht sinnvoll. Während der Prüfung werden neben dem Video Kraft, Weg und Zeit mit einer Abtastrate von 10 Hz aufgezeichnet. Proben, die während des Versuches ein ungültiges Versagen zeigen, werden dennoch bis zum Ende getestet. Auf Basis der Berechnungen des Probenumfangs werden insgesamt 15 Proben mit UD-Laminat in

Faserrichtung (davon sechs gültige Versuche) und 15 Proben senkrecht zur Faserrichtung getestet.

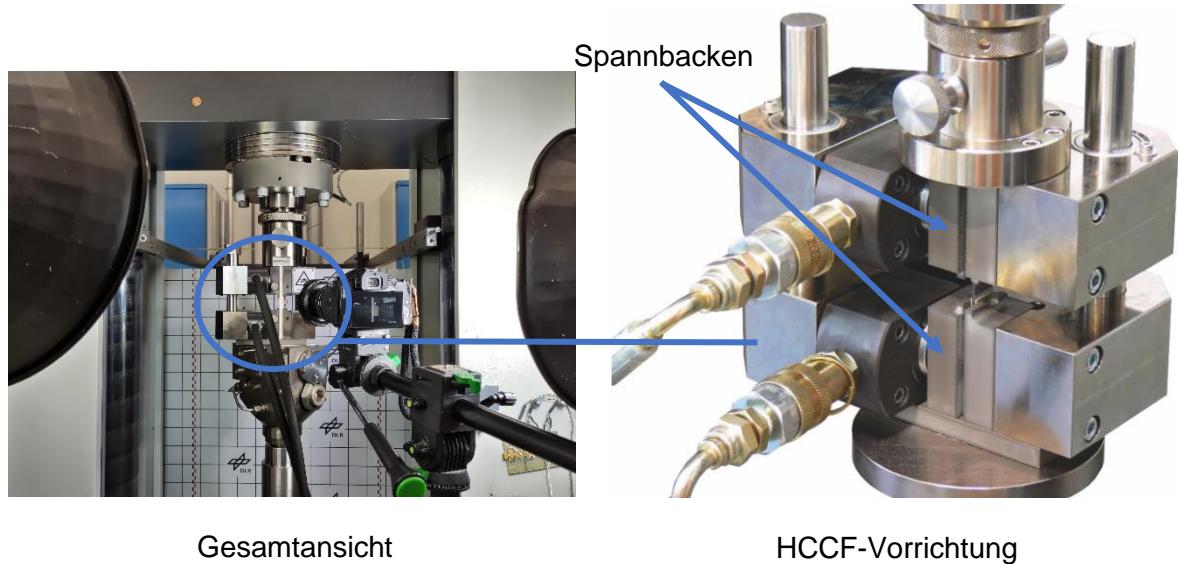


Abbildung 66: Prüfaufbau HCCF-Vorrichtung aus [11]

Versuchsauswertung UD-Laminat

Zunächst wird die Versuchsreihe des UD-Laminats mit Belastung in Faserrichtung betrachtet. In Abbildung 67 ist von links nach rechts bei zunehmender Stauchung das Versagen einer beispielhaft ausgewählten Probe dargestellt. Im zweiten Bild der Sequenz lässt sich erkennen, dass die Fasern seitlich aus der Lamineebene abknicken und anschließend brechen.

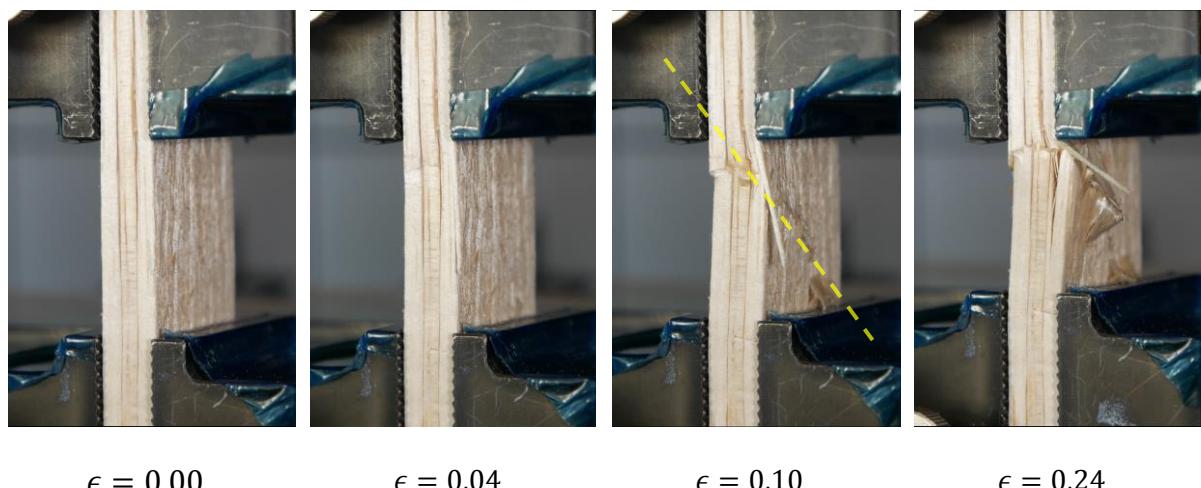


Abbildung 67: Serienbilder UD-Laminat parallel zur Faser

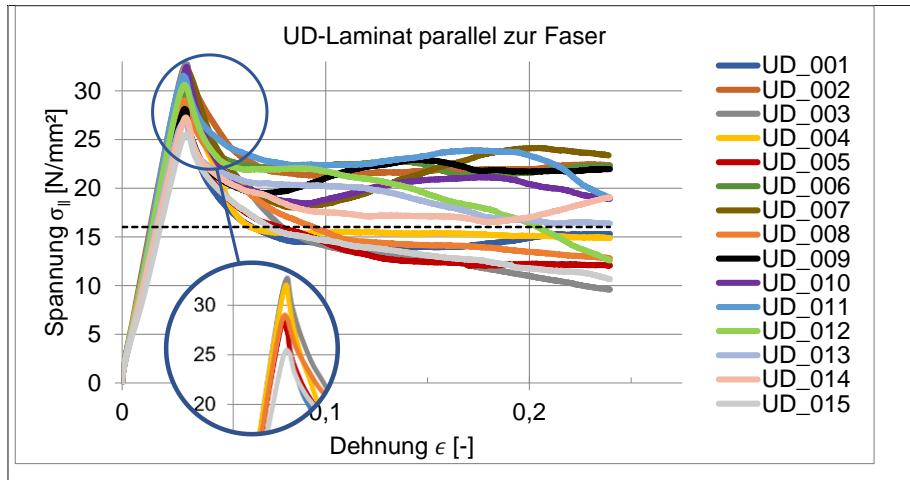


Abbildung 68: Spannungs-Dehnungs-Diagramm des UD-Laminats parallel zur Faser mit Detailaufnahme der gültigen Proben, aus [11]

In Abbildung 68 ist das Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Albasia-UD-Proben parallel zur Faser dargestellt. Nach ASTM D6641 sind solche Proben, die nahe oder in der Einspannung gebrochen sind als ungültig zu bewerten. Neun Proben haben ein ungültiges Verhalten gezeigt, wie im Spannungs-Dehnung-Diagramm ebenfalls zu erkennen ist. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 68 horizontal eine gestrichelte Linie eingezeichnet. Proben, die diese Linie nach dem Bruch unterschreiten, sind gültige Proben.

Aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm kann der E-Modul sowie die Druckfestigkeit ermittelt werden, die in Abbildung 69 in Abhängigkeit der Holzdichte aufgetragen sind. Hierbei werden auch solche Proben mit aufgenommen, die ein ungültiges Versagen aufweisen, da

dies ausschließlich einen Einfluss auf den plastischen Bereich und nicht auf die elastischen Kennwerte hat.

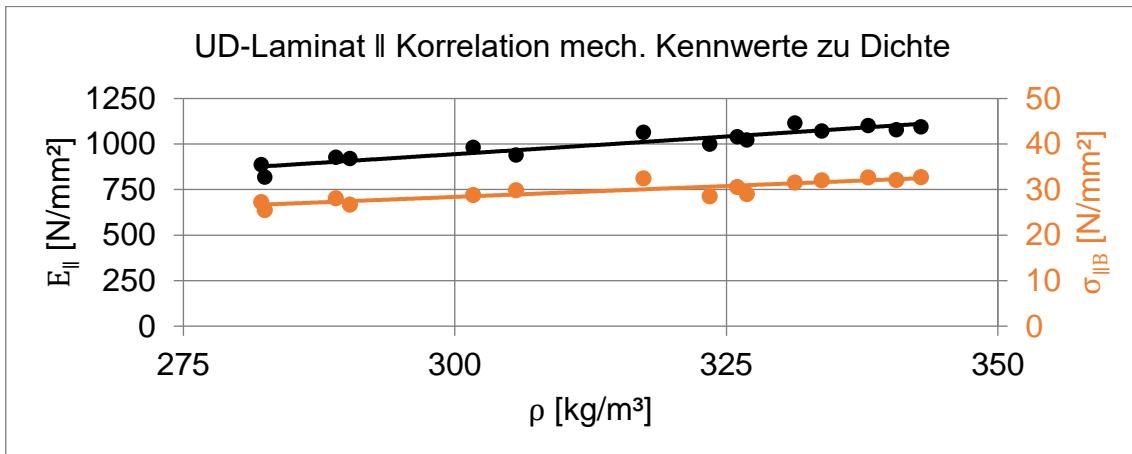


Abbildung 69: UD-Laminat II Korrelation mech. Kennwerte zu Dichte, aus [11]

Analog zu der Versuchsauswertung des UD-Laminats mit Last in Faserrichtung wird nun das UD-Laminat mit Belastung senkrecht zur Faser betrachtet. Abbildung 70 zeigt das Druckverhalten bei zunehmender Stauchung. Im Gegensatz zu den Serienbildern in Abbildung 67 werden die quer zur Lastrichtung liegenden Fasern des Laminats zunächst komprimiert, bevor sie zur Seite ausscheren. Erst am Ende der Kompression reißt die Matrix des Holzes auseinander, dann aber bedingt durch das Ausbeulen und damit hauptsächlich durch eine Biegung. Um auszuschließen, dass es sich bei dem Versagen um Eulersches Knicken nach Fall Vier handelt, wird gemäß DIN EN ISO 14126 die Mindestdicke t der Probe überprüft. L ist die freie Knicklänge zwischen den Einspannungen und entspricht 25 mm. Der Schubmodul G_{13} wird auf Basis von Balsa nach Feichtinger [12] da er für Albasia nicht vorliegt. Die Berechnung ergibt, dass die Probendicke $t \geq 6,1 \text{ mm}$ gewählt werden muss, was mit der vorhandenen Dicke von $t = 7,5 \pm 0,2 \text{ mm}$ erfüllt ist. Somit liegt kein Eulersches Knicken vor und die Proben sind als gültig zu beurteilen.

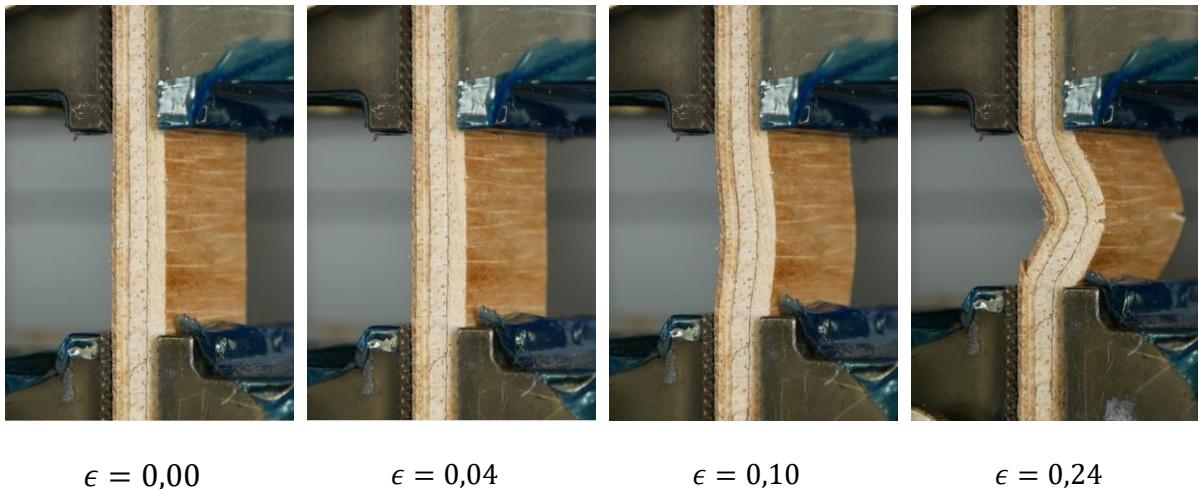


Abbildung 70: Serienbilder UD-Laminat senkrecht zur Faser, aus [11]

Bei Druckbelastung des UD-Laminats senkrecht zur Faser ergibt sich das Spannungs-Dehnungs-Diagramm für alle 15 Proben gemäß Abbildung 71. Es ist davon auszugehen, dass bereits vor Erreichen der maximalen Spannung Plastizität auftritt, da der Anstieg der Spannung nicht linear ist. Aus diesen Gründen wird der E-Modul für jede Probe im selben Intervall der Dehnung abgelesen von $\epsilon = 0,005$ bis $\epsilon = 0,025$. Der Mittelwert des E-Moduls ist in diesem Intervall in Abbildung 104 eingezeichnet. Zudem wird die Annahme getroffen, dass die Bruchfestigkeit im Punkt der höchsten Spannung vorliegt, um eine einheitliche Auswertung zu ermöglichen. Daraus ergibt sich das Diagramm der Dichte-Korrelation nach Abbildung 72. Tabelle 14 enthält die Parameter für ein UD-Laminat bei Belastung parallel und senkrecht zur Faser.

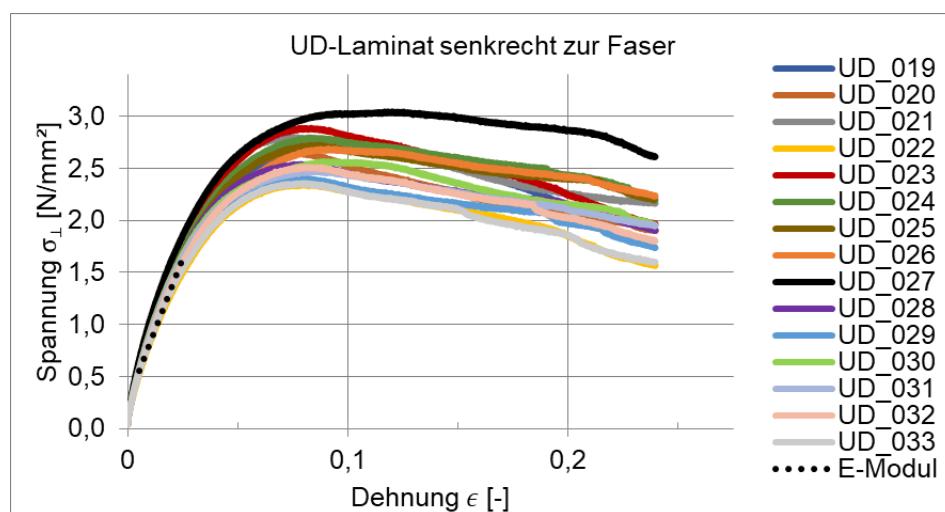


Abbildung 71: Spannungs-Dehnungs-Diagramm UD-Laminat senkrecht zur Faser, aus [11]

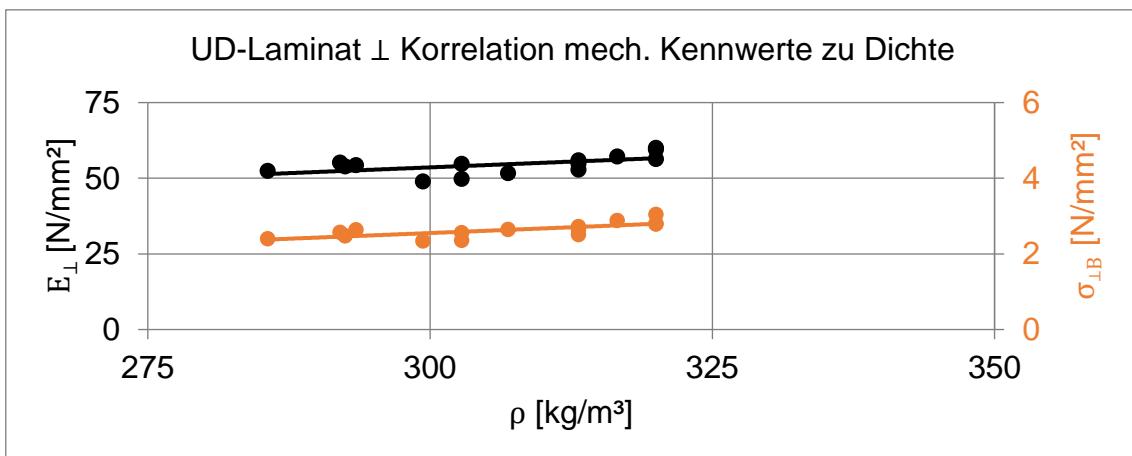


Abbildung 72: UD-Laminat \perp Korrelation mech. Kennwerte zu Dichte, aus [11]

Tabelle 14: Analytische Berechnung der Materialparameter von Albasia UD-Laminat parallel und senkrecht zur Faser, aus [11]

Parameter	Einheit	Analytische Formel	Korrelationsfaktor
E-Modul E_{\parallel}	N/mm²	$E_{\parallel}(\rho) = 0,9130 \cdot \rho^{1,2170}$	$R^2 = 0,8708$
Druckfestigkeit $\sigma_{\parallel B}$	N/mm²	$\sigma_{\parallel B}(\rho) = 0,0888 \cdot \rho^{1,0111}$	$R^2 = 0,7683$
E-Modul E_{\perp}	N/mm²	$E_{\perp}(\rho) = 0,4167 \cdot \rho^{0,8515}$	$R^2 = 0,3140$
Druckfestigkeit $\sigma_{\perp B}$	N/mm²	$\sigma_{\perp B}(\rho) = 0,0008 \cdot \rho^{1,4235}$	$R^2 = 0,5222$

Untersuchung von Sperrholz unter Druckbelastung

Aufbauend auf den Untersuchungen von UD-Laminat im vorherigen Abschnitt wird dreilagiges Sperrholz aus Albasia untersucht. Dies ermöglicht Erkenntnisse darüber, inwiefern die Ergebnisse der UD-Laminate übertragbar sind auf Sperrholz.

Das dreilagige Sperrholz, das in diesem Kapitel betrachtet wird, besteht aus einem $[0 / 90 / 0^\circ]$ -Aufbau, beziehungsweise einem $[90^\circ / 0^\circ / 90^\circ]$ -Aufbau. Eine Ausrichtung einer Laminatebene mit 0° bedeutet hierbei, dass die Fasern parallel zur Belastungsrichtung orientiert sind. Im Folgenden meint daher die Bezeichnung „Sperrholz parallel zur Faser“ eine Charakterisierung von Sperrholz, bei dem die Fasern der beiden äußeren Decklagen parallel zur Belastung

ausgerichtet sind. Da die Prüfung analog zur Prüfung der UD-Laminate stattfindet, werden hier ebenfalls Probekörper vom Typ B2 gemäß DIN EN ISO 14126 gefertigt.

Die Versuchsdurchführung für die Prüfung des dreilagigen Sperrholzes findet in allen Punkten analog zur Vorgehensweise des UD-Laminats statt. Es wird an dieser Stelle davon abgesehen, die Prüfung gemäß DIN 52376 zur Prüfung von Sperrhölzern durchzuführen, um vergleichbare Ergebnisse zu denen des UD-Laminats zu erhalten. Eine Überprüfung des Feuchtigkeitsgehaltes ergibt auch hier einen Wert von 10 %.

Abbildung 73 zeigt das Bruchverhalten einer beispielhaften Probe des Sperrholzes mit einer Belastung parallel zur Faserrichtung bei zunehmender Stauchung von links nach rechts. Am Ende der Deformation bei $\epsilon = 0,24$ ist zu erkennen, dass die Mittellage bevorzugt an den Stellen der Schälrisse versagt. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der 13 geprüften Proben sind in Abbildung 74 dargestellt.

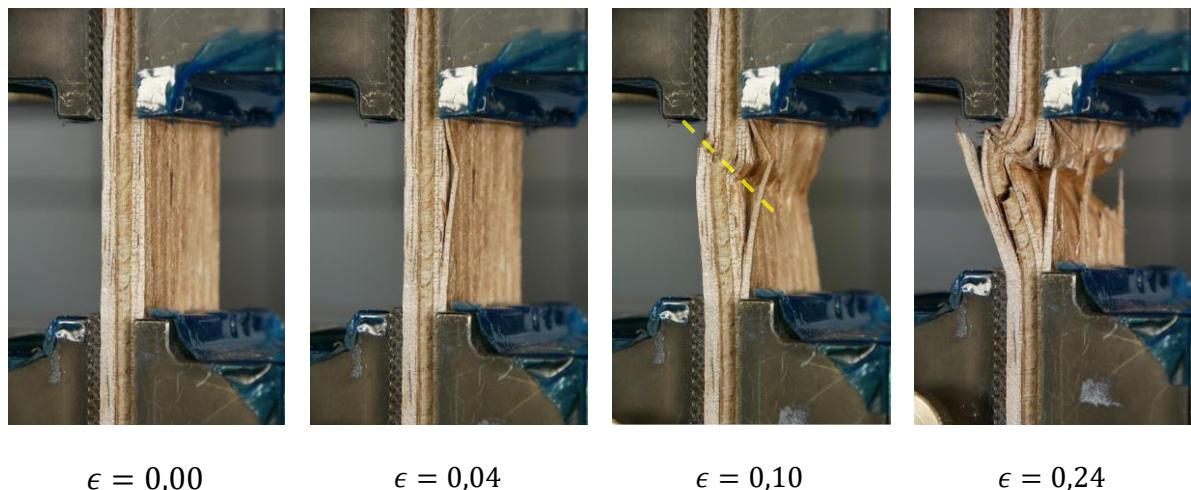


Abbildung 73: Serienbilder Sperrholz parallel zur Fase, aus [11] r

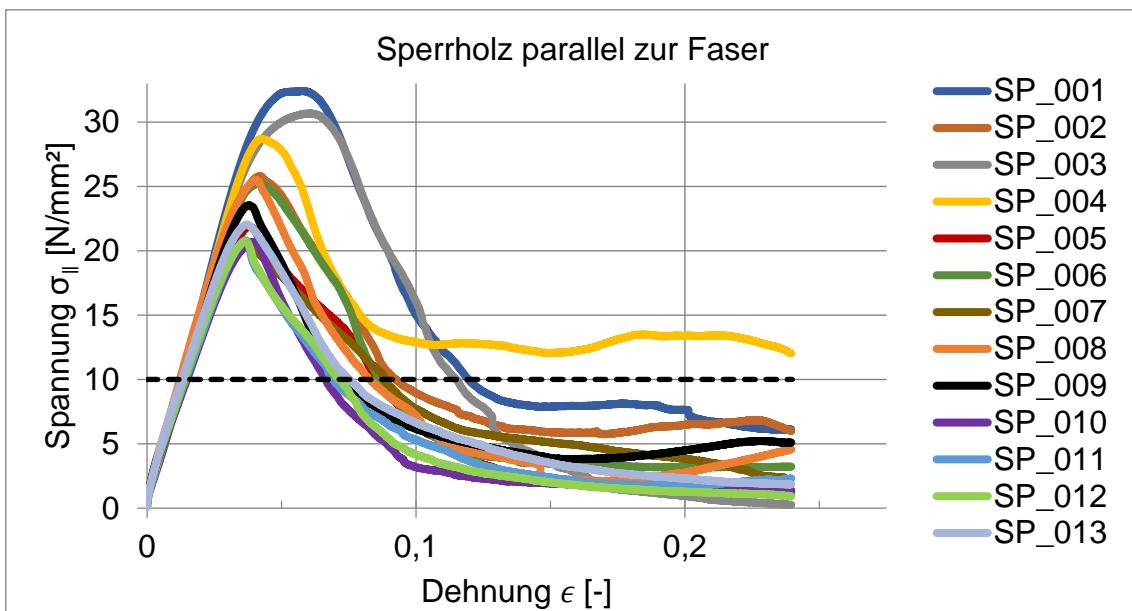


Abbildung 74: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Sperrholz parallel zur Faser, aus [11]

Aus den Daten lässt sich mit Hilfe der jeweiligen Massen die Abhängigkeit von der Dichte darstellen (siehe Abbildung 75). Es sei angemerkt, dass die Dichte des Sperrholzes über dem Bereich des UD-Laminats liegt, was jedoch aufgrund der Verfügbarkeit seitens des Herstellers nicht beeinflusst werden kann. Mögliche Gründe für den Unterschied können in einem anderen Klebstoffsysteams des Herstellers liegen. Die analytische Berechnung der Parameter mittels der Trendlinien ist Tabelle 15 zu entnehmen. Ein exponentieller Ansatz der Näherungsgleichung liefert, wie schon bei den vorherigen Ergebnissen, einen höheren Korrelationsfaktor (1,2 %).

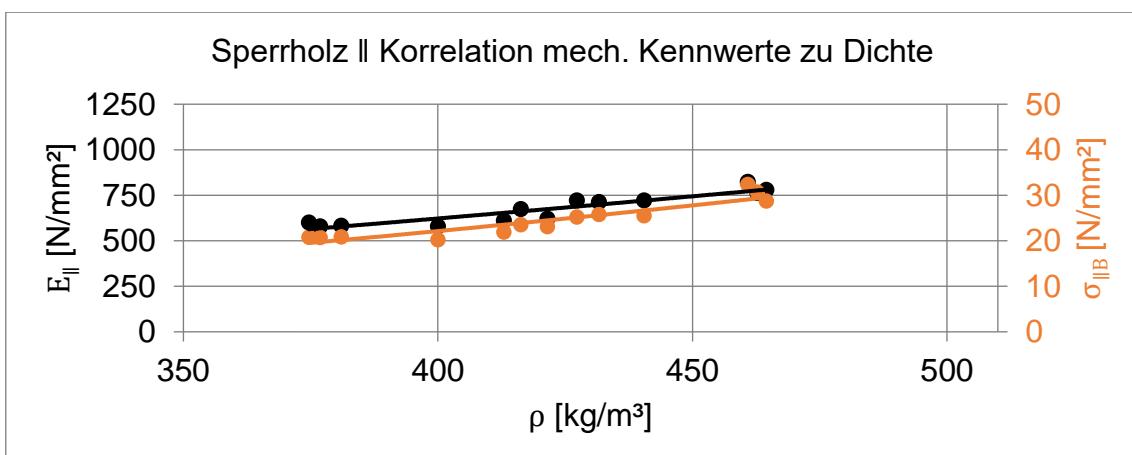


Abbildung 75: Sperrholz \parallel Korrelation mech. Kennwerte zu Dichte, aus [11]

Als Zweites wird die Versuchsreihe mit einer Ausrichtung des Sperrholzes senkrecht zur Belastungsrichtung ausgewertet, also mit einer $[90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ -Schichtung. Die Bildfolge in Abbildung 76 zeigt das charakteristische Verhalten unter Druck.

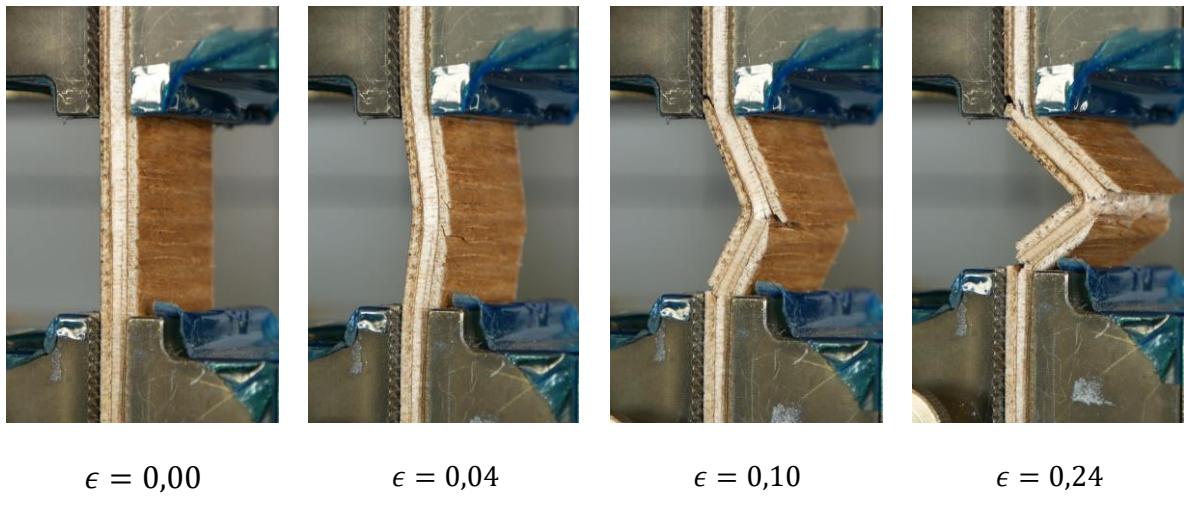


Abbildung 76: Serienbilder Sperrholz senkrecht zur Faser, aus [11]

Bereits bei einer Stauchung von $\epsilon = 0,04$ ist zu erkennen, dass Versagen in der äußeren Lage stattfindet, die durch das Ausbeulen auf Zug belastet ist. Initiale Schädigungen aufgrund von Schälrisse sind dabei Startpunkte des Versagens. Zudem ist auffällig, dass die Mittellage mit einer 0° Ausrichtung nicht aufgrund von Kompression versagt, sondern durch Biegung, die ein Zugversagen der äußeren Fasern verursacht. Bei der Versuchsreihe tritt kein ungültiges Versagen auf und die statistischen Kennwerte sind besser als die vorherigen Annahmen,

sodass die zwölf getesteten Prüflinge ausreichen. Die Ergebnisse sind im Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abbildung 77 dargestellt.

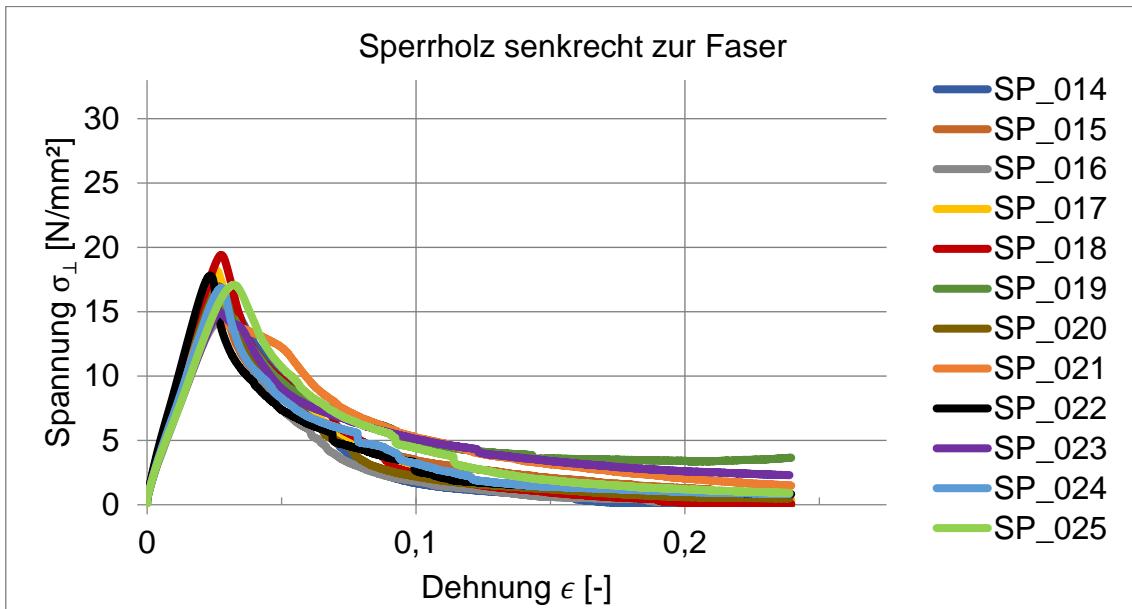


Abbildung 77: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Sperrholz senkrecht zur Faser, aus [11]

Bei der Darstellung der Ergebnisse in Abhängigkeit von der Dichte ist auffällig, dass die Druckfestigkeit mit zunehmender Dichte kaum steigt (s. Abbildung 78). Jedoch ist auch der Korrelationsfaktor der Trendlinie mit $R^2 = 0,0777$ sehr gering. Alternativ zur Beschreibung durch die Trendlinie kann daher für die Druckfestigkeit der konstante Wert von $\sigma_{\perp B} = 15,1 N/mm^2$ angesetzt werden, was dem Mittelwert aller Proben entspricht. Für eine Erklärung dieser Ergebnisse wäre es notwendig, eine höhere Anzahl an Prüflingen in einem breiten Dichte-Intervall zu untersuchen. Aus dem Diagramm lassen sich die Formeln der

Trendlinien in Tabelle 15 ableiten, die mit ihrem potenziellen Formelansatz eine höhere Korrelation zeigen als mit einem linearen Ansatz.

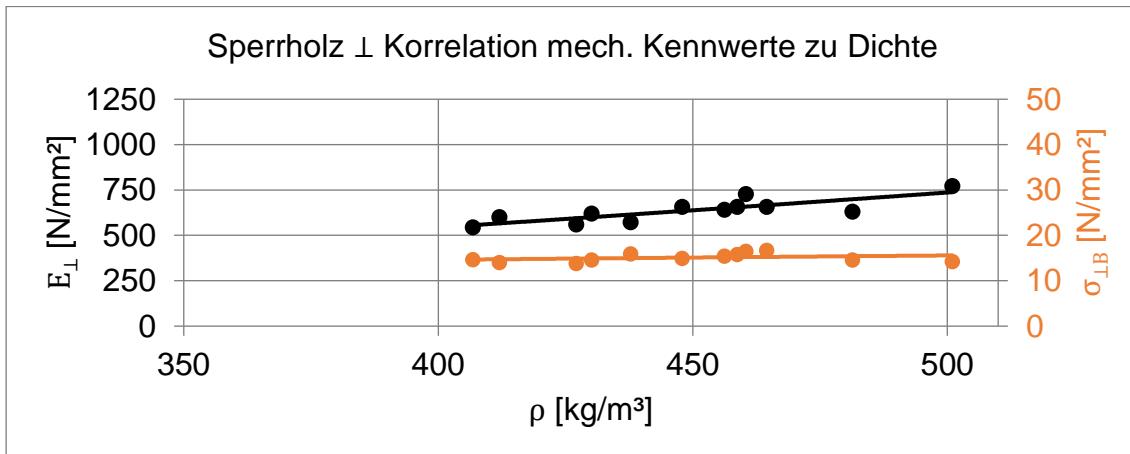


Abbildung 78: Sperrholz ⊥ Korrelation mech. Kennwerte zu Dichte, aus [11]

Tabelle 15: Analytische Berechnung Sperrholz parallel und senkrecht zur Faser, aus [11]

Parameter	Einheit	Analytische Formel	Korrelationsfaktor
E-Modul E_{\parallel}	N/mm²	$E_{\parallel}(\rho) = 0,0708 \cdot \rho^{1,5159}$	$R^2 = 0,8474$
Druckfestigkeit $\sigma_{\parallel B}$	N/mm²	$\sigma_{\parallel B}(\rho) = 0,0002 \cdot \rho^{1,9260}$	$R^2 = 0,8624$
E-Modul E_{\perp}	N/mm²	$E_{\perp}(\rho) = 0,1606 \cdot \rho^{1,3656}$	$R^2 = 0,6681$
Druckfestigkeit $\sigma_{\perp B}$	N/mm²	$\sigma_{\perp B}(\rho) = 2,6491 \cdot \rho^{0,2850}$	$R^2 = 0,0777$

Untersuchung von Würfelproben unter Druckbelastung

Nach der experimentellen Untersuchung und Simulation von laminaren Proben mithilfe der HCCF-Vorrichtung werden in diesem Kapitel Würfelproben aus Vollholz betrachtet. Dies dient dem Vergleich und der Bewertung der bisher gesammelten Erkenntnisse. Die Würfelproben werden zwischen zwei Drucktellern bis zur vollständigen Kompression belastet, was mit einer HCCF-Vorrichtung derartig nicht möglich ist. Somit können ebenfalls neue Erkenntnisse bezüglich des Verhaltens bei sehr hoher plastischer Verformung erlangt werden.

Im Gegensatz zu den Proben aus Schälfurnieren werden die Proben aus Vollholz aus dem Stamm gesägt und enthalten dadurch keine Schälrisse. Die Prüfung auf einer Universalprüfmaschine mit zwei Drucktellern wird nach ISO 13061-5 in Faserrichtung bzw. nach ISO 13061-17 senkrecht zur Faserrichtung der Proben durchgeführt. Die Maße betragen 30 mm in Längsrichtung, 20 mm in der Breite und 15 mm in der Dickenrichtung. Da mit zwei

Drucktellern eine vollständige Kompaktierung möglich ist, wird als Abbruchkriterium im Prüfprogramm eine maximale Druckkraft eingestellt, bis zu der mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,1 mm/s verfahren wird. Neben der Aufzeichnung von Zeit, Kraft und Weg bei einer Schreibrate von 100 Hz wird ebenfalls wieder ein Video aufgezeichnet.

In Abbildung 79 ist beispielhaft eine Würfelprobe mit Belastung in Faserrichtung im Verlauf des Versagens dargestellt. Im unteren Bereich der Probe ist bei einer Stauchung von $\epsilon = 0,05$ eine 53° -Gleitebene zu erkennen. Im weiteren Verlauf versagt die Probe an mehreren Stellen Bildung neuer Gleitebenen, durch seitliches Abscheren sowie durch frontales Crushing. Bei einer Stauchung von $\epsilon = 0,80$ ist die Probe vollständig geschädigt und die Kompaktierung bis zum Ende der Messung setzt ein.

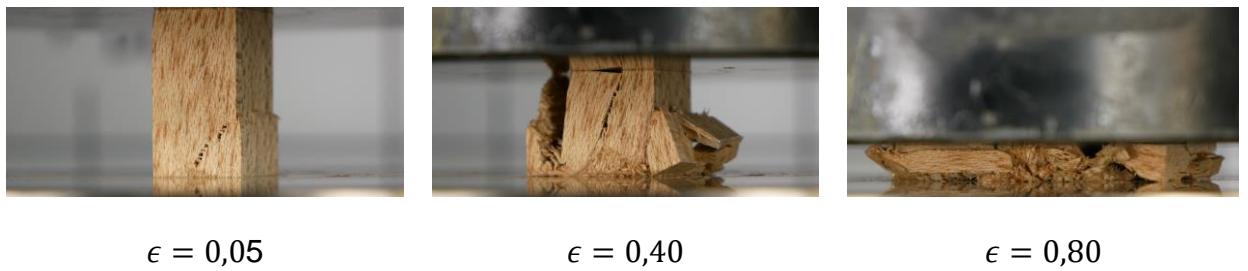


Abbildung 79: Serienbilder Vollholzwürfel parallel zur Faser, aus [11]

In Abbildung 80 sind die Spannungs-Dehnungs-Verläufe für die sechs geprüften Vollholzwürfel parallel zur Faser dargestellt.

Qualitativ betrachtet lässt sich das Ergebnis mit dem theoretischen Verhalten nach Maillot et al. [4] vergleichen – mit dem Unterschied, dass ein stärkerer Spannungsabfall nach dem Bruch stattfindet. Ebenfalls variieren die Proben im plastischen Bereich stärker als die UD-Laminate, was darauf zurückzuführen ist, dass sich die Rissbildung zwischen den einzelnen Proben deutlich unterschiedlich ausbildet. Dennoch kann näherungsweise von einem konstanten Spannungsniveau im Bereich zwischen $0,4 < \epsilon < 0,7$ gesprochen werden. Eine signifikante Abhängigkeit der Höhe des Spannungsplateaus von der Probendichte oder von der Druckfestigkeit ist dabei nicht erkennbar. Die Verdichtung ab $\epsilon > 0,8$ ermöglicht außerdem die Angabe des sogenannten Kompressionsmoduls E_{Bulk} . Dies beschreibt die Steifigkeit des Materials bei der vollständigen Verdichtung. Für den Kompressionsmodul kann keine Abhängigkeit von der Dichte, der Steifigkeit oder der Festigkeit festgestellt werden. Der Mittelwert bei den sechs Proben beträgt $E_{Bulk,\parallel} = 2240 \text{ N/mm}^2$ bei einer Variation von 18 %. Er ist damit um 25 % höher als der gemittelte E-Modul des linear-elastischen Bereichs. Des

Weiteren können die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Dichte dargestellt werden, wie in Abbildung 81 zu sehen ist.

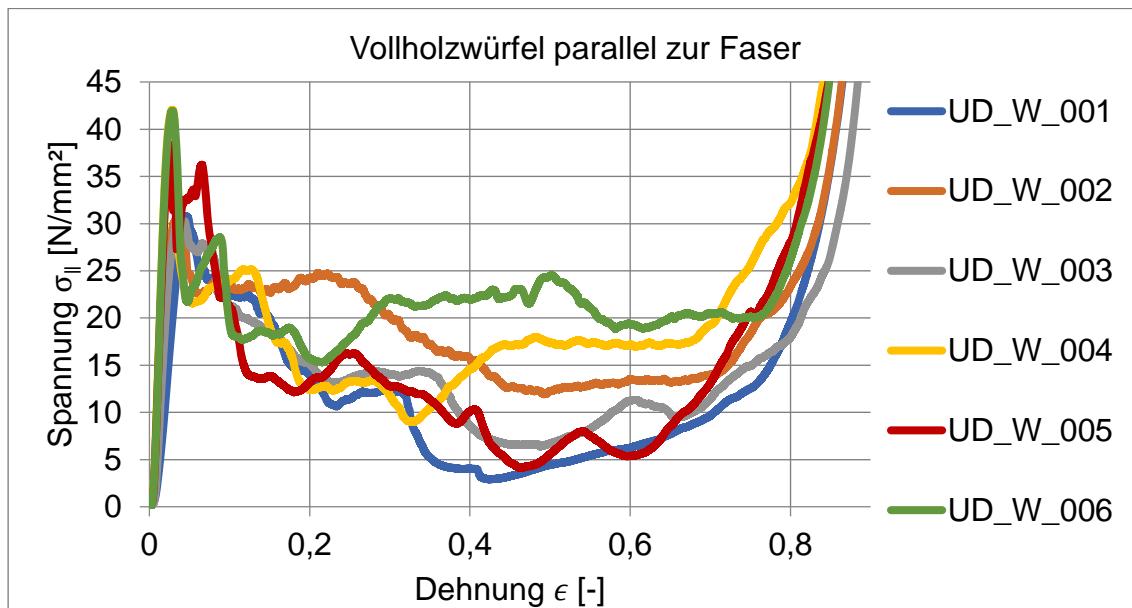


Abbildung 80: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Vollholzwürfel parallel zur Faser, aus [11]

Aufgrund der hohen Spannweite der Dichte ist die Variation der mechanischen Eigenschaften erwartungsgemäß hoch und damit über den Annahmen, die bei der Stichprobenberechnung angesetzt sind. Nach einer Normierung der Ergebnisse auf die jeweilige Dichte liegt die Variation jedoch unterhalb der Annahme. Zudem zeigt sich ein hoher Korrelationsfaktor für die Trendlinien der analytischen Berechnung (s. Tabelle 16), weshalb keine zusätzlichen Proben untersucht werden.

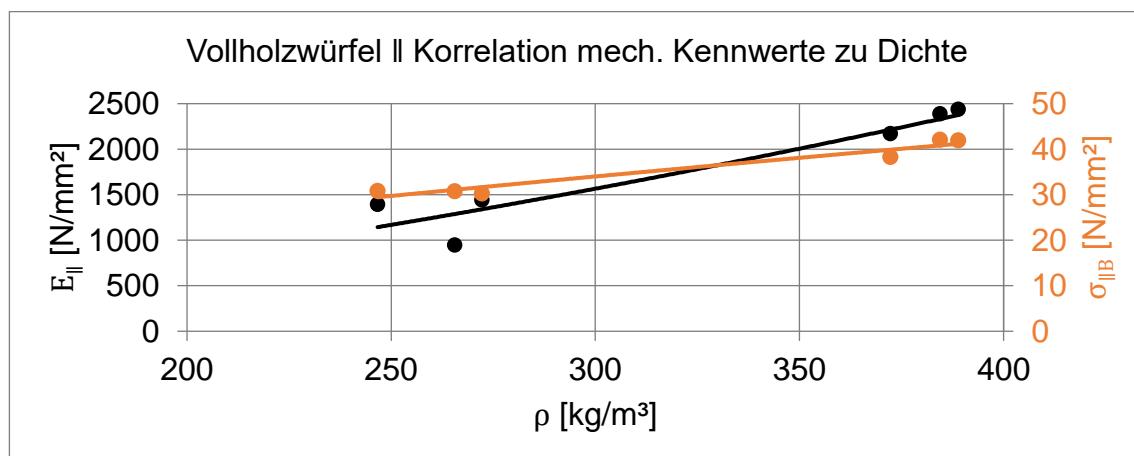


Abbildung 81: Vollholzwürfel || Korrelation mech. Kennwerte zu Dichte, aus [11]

Im Gegensatz zu den Versuchen der Vollholzwürfel mit Belastung in Faserrichtung verhalten sich die Proben bei Belastung senkrecht zur Faser deutlich anders. In Abbildung 82 ist zu erkennen, dass die Würfelprobe keine Risse ausbildet, sondern in Analogie zu einem Schaum komprimiert wird.

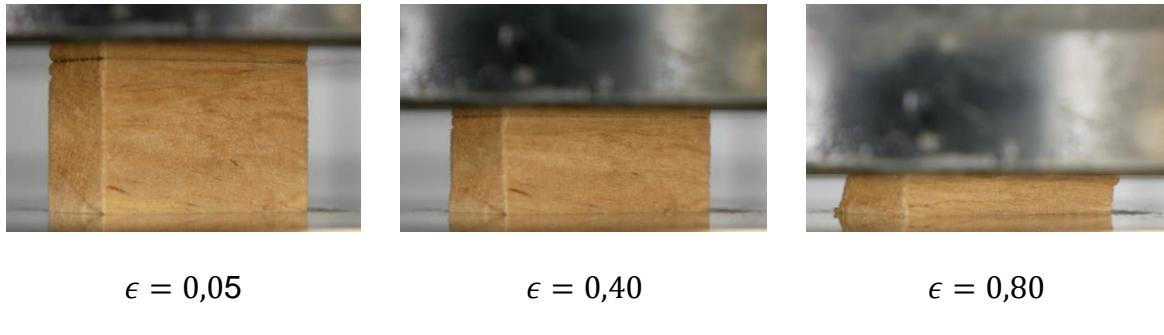


Abbildung 82: Serienbilder Vollholzwürfel senkrecht zur Faser, aus [11]

Das Druckverhalten der Proben ist ebenfalls im Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abbildung 83 zu sehen. Da die Proben aus zwei verschiedenen Stäben des Tischlerplattenkerns entnommen sind, finden sich diese zwei Gruppen auch im Diagramm wieder. Im Gegensatz zu den Vollholzwürfeln in Faserrichtung fällt die Druckspannung nach dem elastischen Bereich nicht ab, sondern steigt näherungsweise mit verringelter Steigung konstant an, bis die vollständige Kompaktierung ab etwa $\epsilon > 0,5$ beginnt. Dieses Verhalten ist mit dem schaumartigen Verhalten ohne Rissbildung zu erklären. Ebenso variiert das plastische Verhalten kaum, wie es bei den Würfeln in Faserrichtung zu beobachten ist. Da sich der elastische und der plastische Bereich sehr gut trennen lassen, wird an der Übergangsstelle die Druckfestigkeit abgelesen. Zusammen mit dem E-Modul lässt sich die Dichte-Korrelation nach Abbildung 84 aufzeichnen. Der Kompressionsmodul ist auch bei dieser Belastungsrichtung in keiner Abhängigkeit zu anderen Parametern und kann daher als Mittelwert mit $E_{Bulk,\perp} = 178 \text{ N/mm}^2$ bei einer Varianz von 8 % für die sechs Proben mit geringerer Dichte angegeben werden.

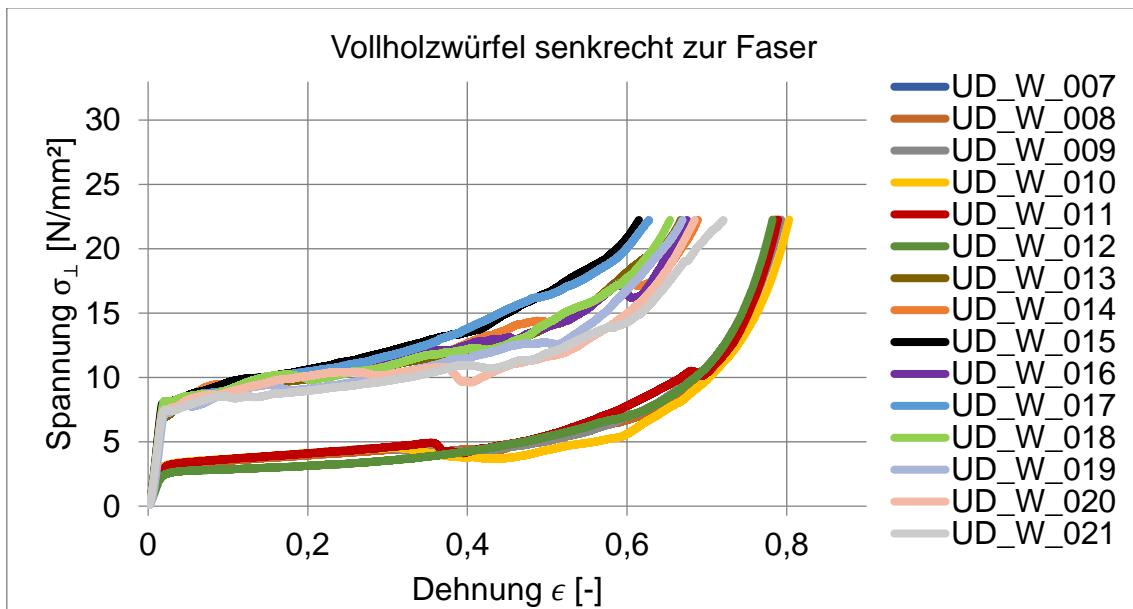


Abbildung 83: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Vollholzwürfel senkrecht zur Faser, aus [11]

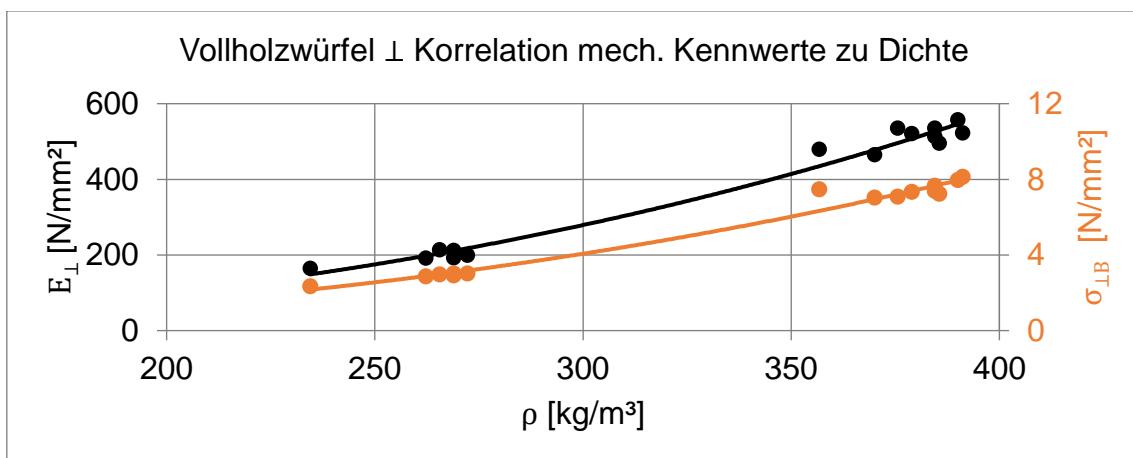


Abbildung 84: Vollholzwürfel \perp Korrelation mech. Kennwerte zu Dichte, aus [11]

Die Variation der mechanischen Eigenschaften liegt durch die hohe Streuung der Dichte über den vorherigen Annahmen. Jedoch zeigt sich auch hier ein hoher Korrelationsfaktor für die Trendlinien der Dichteabhängigkeit, sodass die 15 Proben als ausreichende Anzahl

angesehen werden. Die Trendlinien, die mit einem potenziellen Formelansatz wieder die bessere Näherung sind, lassen sich mithilfe der Formeln in Tabelle 16 bestimmen.

Tabelle 16: Analytische Berechnung Vollholzwürfel parallel und senkrecht zur Faser

Parameter	Einheit	Analytische Formel	Korrelationsfaktor
E-Modul E_{\parallel}	N/mm ²	$E_{\parallel}(\rho) = 0,1658 \cdot \rho^{1,6048}$	$R^2 = 0,8022$
Druckfestigkeit $\sigma_{\parallel B}$	N/mm ²	$\sigma_{\parallel B}(\rho) = 0,5059 \cdot \rho^{0,7377}$	$R^2 = 0,9455$
E-Modul E_{\perp}	N/mm ²	$E_{\perp}(\rho) = 0,0001 \cdot \rho^{2,5583}$	$R^2 = 0,9840$
Druckfestigkeit $\sigma_{\perp B}$	N/mm ²	$\sigma_{\perp B}(\rho) = 2 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^{2,5538}$	$R^2 = 0,9867$

Vergleich und Diskussion der Ergebnisse

Aus den durchgeführten Untersuchungen werden die physikalischen Materialeigenschaften in Abbildung 85 und Abbildung 86 im Vergleich zu den Literaturangaben [12, 13, 14, 15, 16] von Balsa und Fichte dargestellt. Die gewählten Dichten entsprechen dabei den charakteristischen Dichten für die jeweilige Holzart. Fichtenholz wird mit aufgenommen, um einen Vergleich mit einem Leichtholz zu ermöglichen, dass auch in Europa beheimatet ist. Dadurch ist eine Einordnung der Ergebnisse von tropischen Hölzern mit denen eines Holzes aus der Jahreszeitenklimazone möglich.

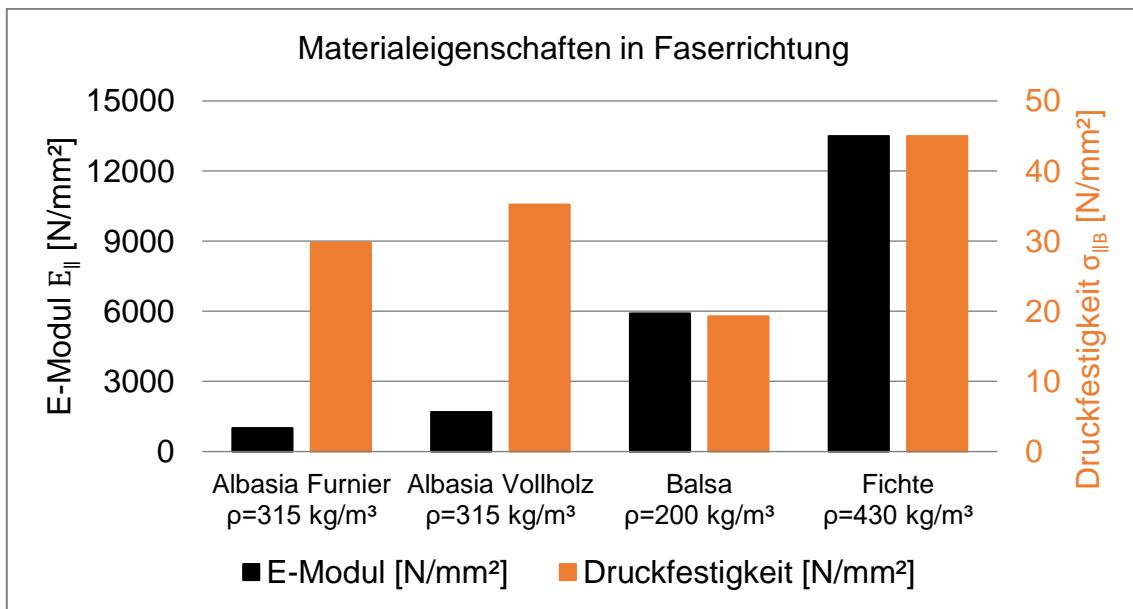


Abbildung 85: Vergleich der Materialeigenschaften unterschiedlicher Leichthölzer in Faserrichtung, aus [11]

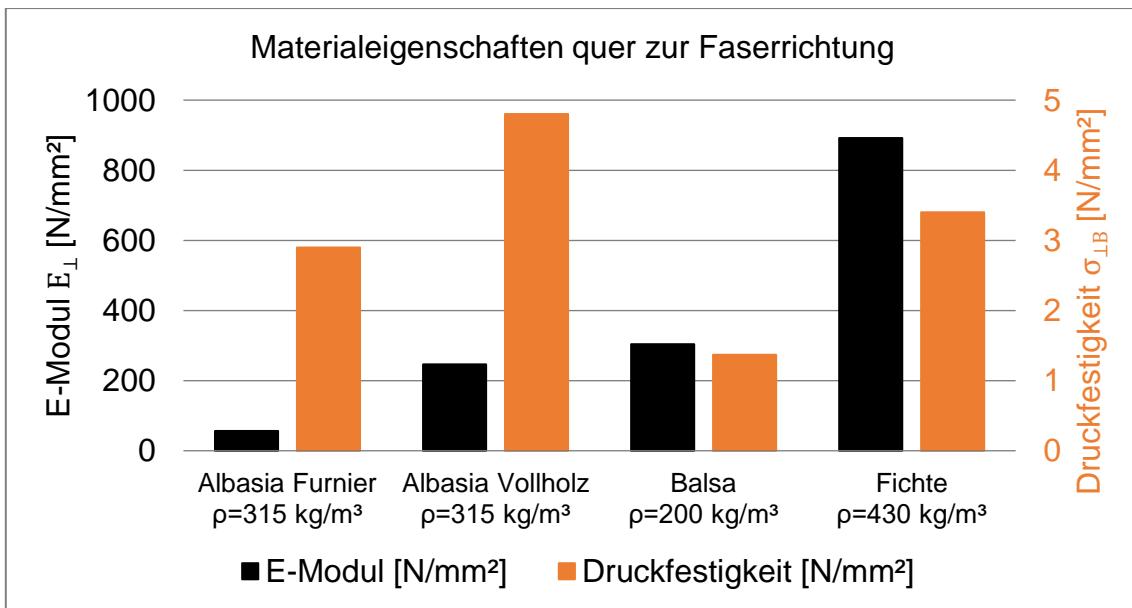


Abbildung 86: Vergleich der Materialeigenschaften unterschiedlicher Leichthölzer quer zur Faserrichtung, aus [11]

Generell ist zu erkennen, dass Albasia unabhängig von der Faserausrichtung im Vergleich zu den anderen Hölzern eine niedrige Steifigkeit besitzt. In Faserrichtung besitzt es ein ähnliches Festigkeit-zu-Dichte Verhältnis wie Fichte oder Balsa (s. Abbildung 85). Im Gegensatz dazu ist dieses Verhältnis quer zur Faser bei Albasia deutlich besser (s. Abbildung 86). In der Zusammenstellung der mechanischen Eigenschaften von Themessl [17] wird für Albasia eine Druckfestigkeit in Faserrichtung von $\sigma_{\parallel B} = 39 \text{ N/mm}^2$ bei einer Dichte von $\rho = 270 \text{ kg/m}^3$ angegeben [17]. Allerdings gibt Themessl jedoch keine Angaben zur verwendeten Messmethodik an, weshalb ein direkter Vergleich nicht möglich ist. Angaben zum E-Modul fehlen ebenfalls.

Im Vergleich mit Balsa und Fichte zeigt sich eine niedrigere Steifigkeit. Bei einem Einsatz von Albasia als Crash-belastete Struktur ist die niedrigere Steifigkeit nicht zum Nachteil, da die Energieabsorption hauptsächlich durch die Festigkeit sowie durch die Bruchdehnung bestimmt wird. Bei vielen Proben zeigen sich Gleitlinien bzw. -ebenen mit einem Winkel von 53° , die dafür sorgen, dass die Holzfasern nach initialer Schädigung abscheren. Es treten jedoch auch andere Versagensmechanismen auf, etwa beim frontalen Crushing, wenn die Tracheiden in Längsrichtung zusammenfallen, oder aber die rissfreie Kompaktierung von Vollholzwürfeln quer zur Faserrichtung. Die Analogie zum Verhalten von Faserwerkstoffen kann bei Albasia damit ebenfalls vor allem in Längsrichtung nachgewiesen werden, wohingegen in Querrichtung die Analogie zu Schäumen zutreffender ist.

Es hat sich gezeigt, dass auch bei Albasia eine Dichteabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften erkennbar ist. Diese ist jedoch nur dann hinreichend genau als Potenzfunktion bestimmbar, wenn eine hohe Bandbreite der Probendichte untersucht wird. Je nach Materialverfügbarkeit ergeben sich jedoch Limitationen des experimentellen Nachweises. Analoges gilt bei mehrschichtigen Sperrholzlaminate, bei denen sich Dichteunterschiede ausgleichen.

Neben der Dichte als Streufaktor ist ebenfalls festzustellen, dass innerhalb der Holzproben nicht gewährleistet werden kann, dass alle Fasern ideal längs oder quer ausgerichtet sind. Bedingt durch das inhomogene Wachstum von Bäumen ergeben sich sowohl in Schälfurnieren als auch in Vollholzproben krummlinige Faserorientierungen, die die mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Dies bewirkt bei einer Druckprüfung, dass die Probe nicht nur auf Druck, sondern auch auf Schub belastet wird, was die Ergebnisse verfälscht.

Die Charakterisierung von Leichtholz ausschließlich mithilfe der HCCF-Vorrichtung ist im Ganzen betrachtet nicht ausreichend. So ist dieses Verfahren für die Charakterisierung des elastischen Verhaltens von Laminaten gut geeignet. Jedoch eignen sich im plastischen Teil Prüfungen mit Drucktellern besser, da bis zur maximalen Kompaktierung verfahren werden kann. Bei dünnen Schälfurniere hingegen sind Druckprüfungen ohne feste Einspannung nicht geeignet. Für ein vollständiges Verständnis bedarf es also beider Prüfungen, da auch die Ergebnisse der Lamine quer zur Faserrichtung aus dem Test mit der HCCF-Vorrichtung nur mit Annahmen auswertbar sind.

Für weitere, detaillierte Diskussionen der Ergebnisse wird auf [11] verwiesen.

1.4.2 Entwicklung von Simulationsmethoden

Für die Simulation unter Zugbelastung werden ausschließlich Materialmodelle betrachtet, die für die Simulation mit Schalenelementen geeignet sind. Die Simulation von Druckbelastung betrachtet darüber hinaus Materialmodelle die für Solid-Elemente geeignet sind. Für weitere Detail wird auf [10] und [11] verwiesen. Es werden ausschließlich Materialkarten betrachtet, die im Finite-Elemente Programm LS-Dyna implementiert sind. Die verwendeten Materialkarten mit Nr. des Materialmodells und Bezeichnung ist in Tabelle 17 angegeben.

Tabelle 17: Verwendete LS-Dyna Materialkarten für die Simulation von Zug- und Druckbelastung

Nr. der Materialkarte MAT_	Bezeichnung	Kriterium für Auswahl / Simulierter Lastfall
022	<i>COMPOSITE_DAMAGE</i>	Analogie zu FVK / Zug und Druck
026	<i>HONEYCOMB</i>	Analogie der Mikrostruktur / Zug
054	<i>ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE</i>	Analogie zur FVK / Zug und Druck
057	<i>LOW_DENSITY_FOAM</i>	Analogie zu Schäumen / Druck
059	<i>COMPOSITE_FAILURE_OPTION_MODEL</i>	Analogie zu FVK / Zug und Druck
063	<i>CRUSHABLE_FOAM</i>	Analogie zu Schäumen / Druck
219	<i>CODAM2</i>	Analogie zu FVK / Zug und Druck
261	<i>LAMINATED_FRACTURE_DAIMLER_PINHO</i>	Analogie zu FVK / Zug und Druck

1.4.3 Simulation unter Zugbelastung

Zur Kalibrierung werden die experimentellen Testbedingungen aus den Zugversuchen in 1- und 2-Richtung (Abschnitt 1.4.1.1) mit der Finite-Elemente-Methode (Schalenelement) auf einem einzelnen Element simuliert. Diesem einzelnen Element wird dann ein Materialmodell zugewiesen. Die Wahl, reines und verleimtes Albasia-Einschichtfurnier mit einem einzigen Element zu simulieren, ist dadurch gerechtfertigt, dass der einzige Zweck der Simulation in dieser Arbeit darin besteht, die Spannungs-Dehnungskurve der untersuchten Materialmodelle für Zugbelastungen zu erhalten. Außerdem verkürzt sich dadurch die Simulationszeit im Vergleich zur Simulation der gesamten Probe. Abbildung 87 zeigt das Schema der Einzelementmodellierung für die Simulation von Zugbelastungen in 1- und 2-Richtung mit Randbedingungen und Materialrichtungen; eine festgelegte Verschiebung u wird zwei Knoten des Einzelements aufgezwungen.

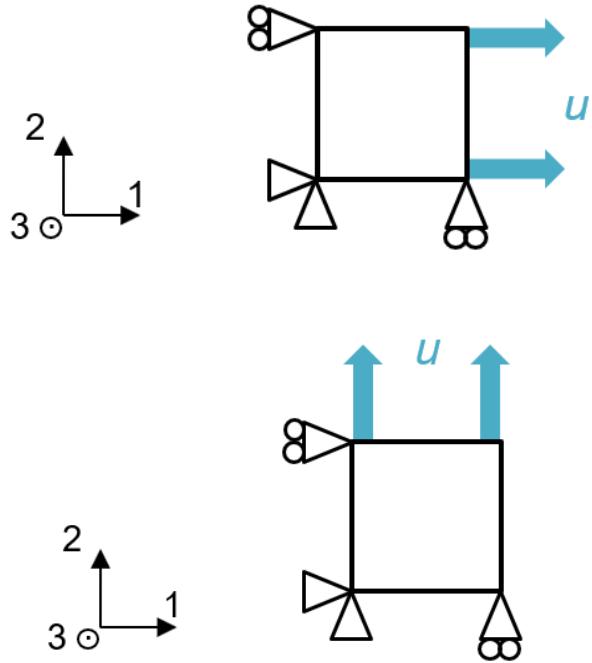


Abbildung 87: Schema der Einzelementmodellierung für Zuglast in 1- und 2-Richtung, aus [10]

Die Kalibrierung der physikalischen Parameter der Materialmodelle erfolgt auf Basis der Spannungs-Dehnungs-Kurven der Zugproben in 1- und 2-richtung für reines und beleimtes Albasia. Die verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 18 aufgelistet. In Abbildung 88 und Abbildung 89 sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven für reines und beleimtes Albasia im Vergleich der numerischen und experimentellen Kurven abgebildet.

Für reines Albasia, stimmen die Ergebnisse der Materialmodelle *MAT_022, *MAT_054, *MAT_059, *MAT_261/262 bei Simulation sowohl 1-Richtung als auch in 2-Richtung gut mit den experimentellen Ergebnissen überein. Alle Materialmodelle bilden unter Zugbelastung sowohl den linearen als auch die Festigkeit gut ab. Die Spannung aller Modelle außer *MAT_055 fällt nach der Festigkeit auf Null ab. Diese Materialmodelle werden für die weitere Untersuchung und Validierung des Sperrholzes weiter betrachtet.

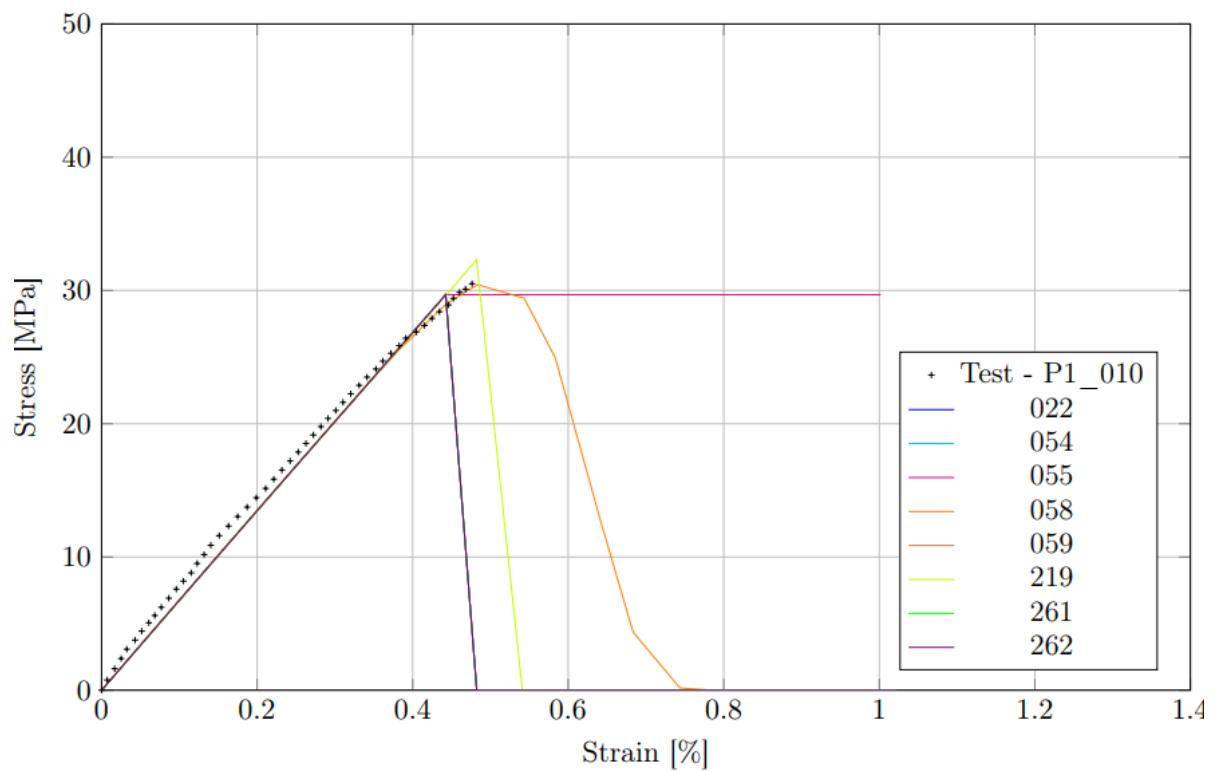
Für beleimtes Albasia, können alle Materialmodelle den linearen Anfangsbereich in beiden Richtungen gut abbilden. Erneut fällt die Spannung bei allen Modellen außer *MAT_059 auf Null ab. Bei Zugbelastung in 1-Richtung zeigen die Materialmodelle *MAT_022 und *MAT_059 ein sprödes Versagensverhalten, anders als das Versagen in den experimentellen Tests. In 2-Richtung zeigen die Materialmodelle *MAT_022, *MAT_059, *MAT_261 und *MAT_262 ein sprödes Versagen, während die Modelle *MAT_054, *MAT_058, *MAT_219 und *MAT_261 und *MAT_262 das Materialverhalten nach der Festigkeit zufriedenstellend abbilden können.

Daher werden diese Modelle für die weiteren Simulation von Zugbelastung am Sperrholz betrachtet.

Tabelle 18: Physikalische Eingabeparameter für die Zugsimulation der Einzelfurnierlagen

Parameter		Reines Albasia	Beleimtes Albasia	Einheit
ρ	1-dir	335	377	kg/m ³
	2-dir	372	384	kg/m ³
E_{11}		6,73	7,25	GPa
E_{22}		0,150	0,082	GPa
G_{12}	1-dir	0,62	0,84	GPa
	2-dir	0,81	0,89	GPa
ν_{21}		0,007	0,007	-
X_T		30,7	42,8	MPa
ε_{11_T}		0,48	0,61	%
Y_T		0,70	0,78	MPa
ε_{22_T}		0,47	1,05	%
S_C	1-dir	7,2	8,3	MPa
	2-dir	8,2	8,5	MPa
Y_C		$-Y_T$	$-Y_T$	MPa
$\varepsilon_{f_11_T}$		ε_{11_T}	0,99	%
$\varepsilon_{f_22_T}$		ε_{22_T}	1,75	%
$\varepsilon_{f_11_C}$		$-\varepsilon_{11_T}$	$-\varepsilon_{f_11_T}$	%
GXT		110	10^5	J/m
GYT		110	10^5	J/m

1-Richtung



2-Richtung

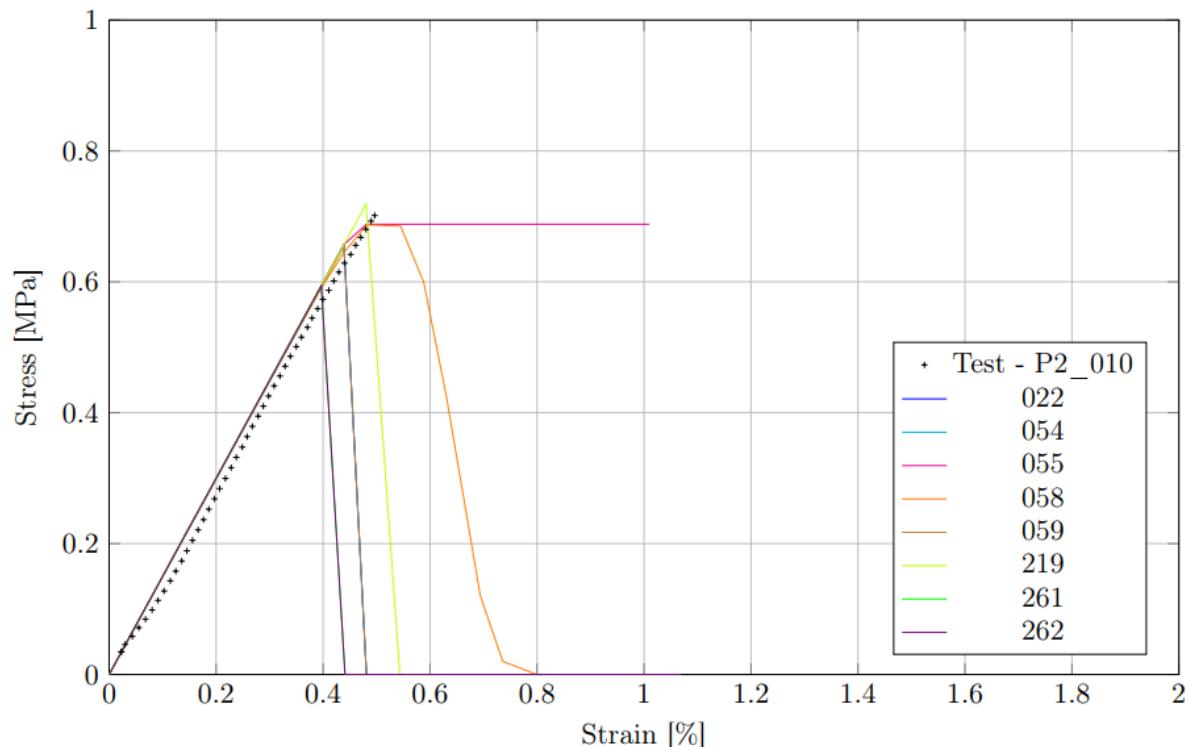
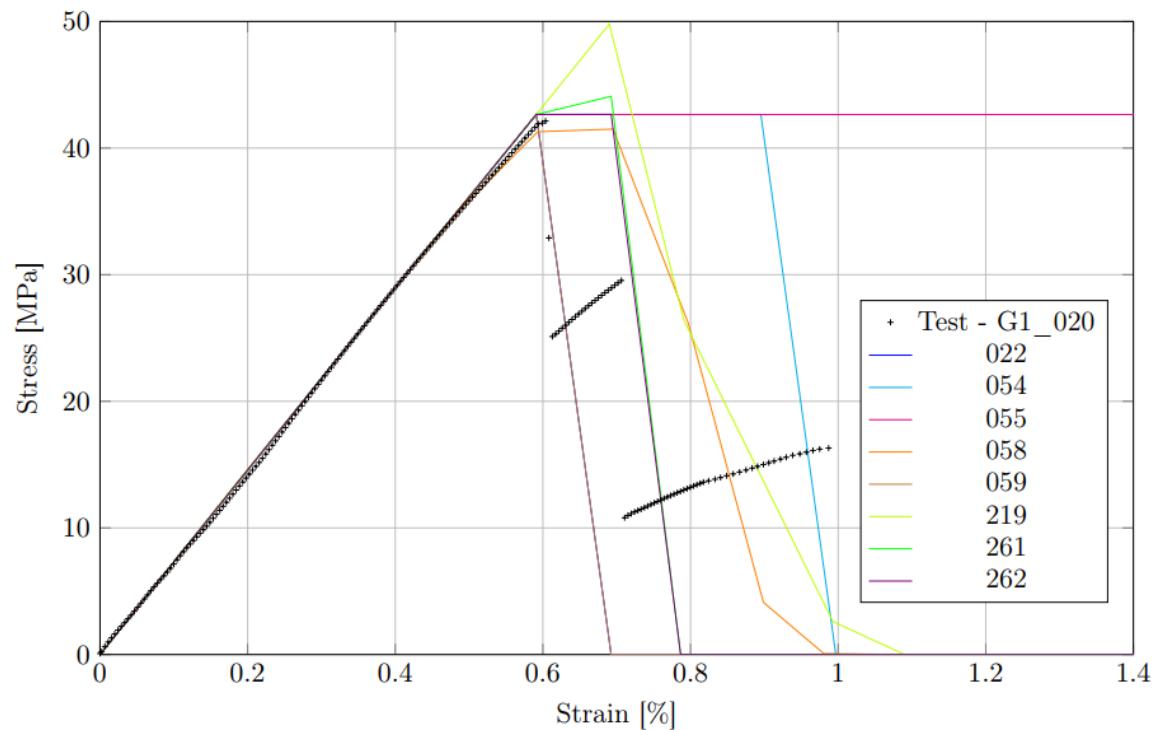


Abbildung 88: Spannungs-Dehnungs-Kurven von Einzelelementsimulationen in 1- und 2-Richtung für reines Albasia, aus [10]

1-Richtung:



2-Richtung:

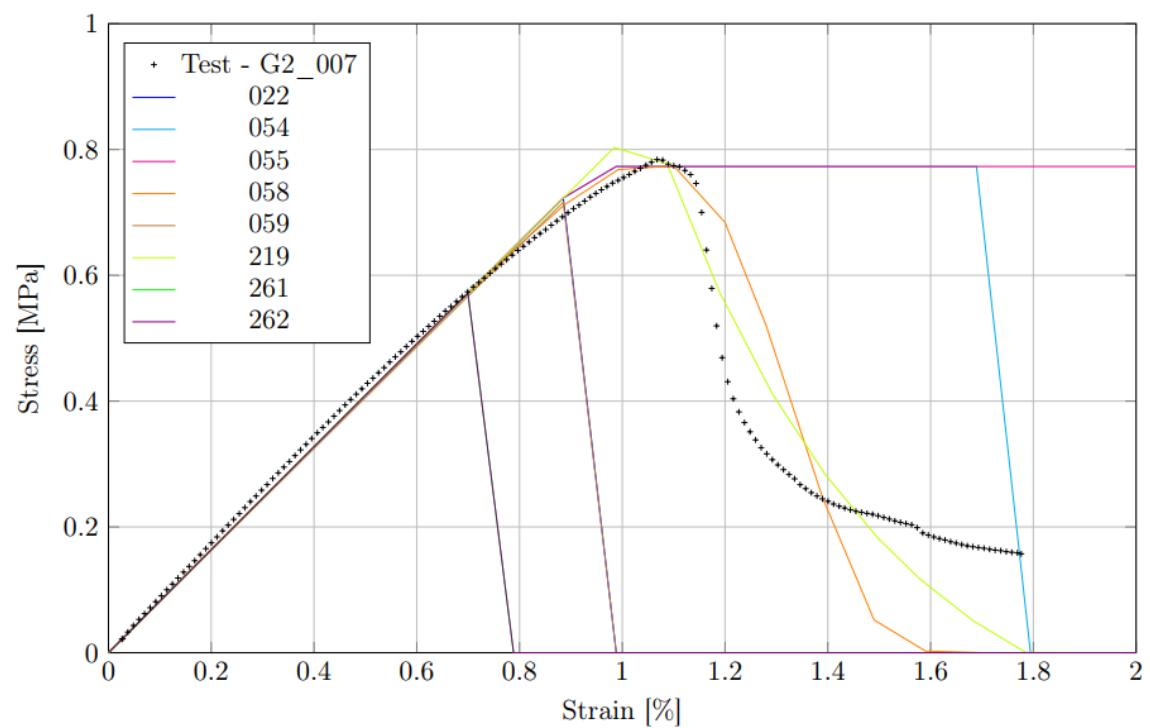
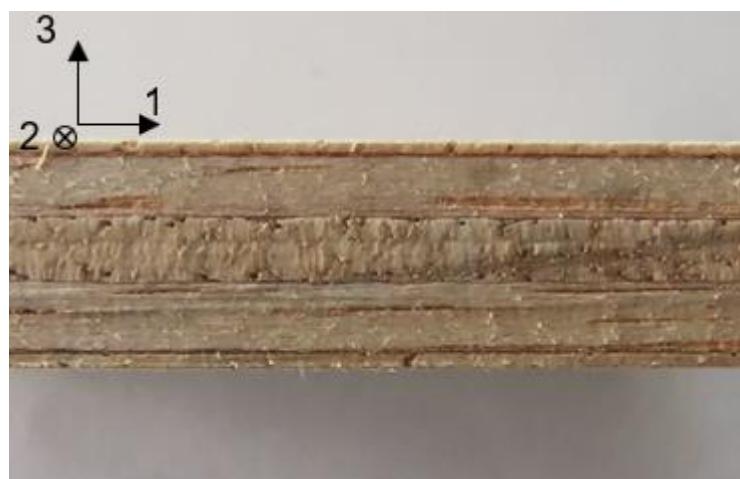


Abbildung 89: Spannungs-Dehnungs-Kurven von Einzelelementsimulationen in 1- und 2-Richtung für beleimtes Albasia, aus [10]

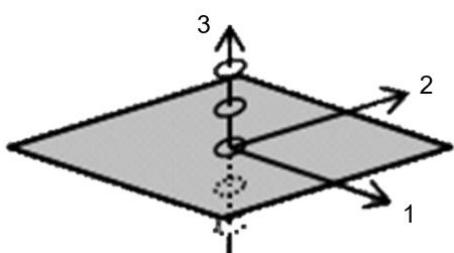
Validierung an Sperrholzproben

Zur Validierung wird das Sperrholzlaminat ebenfalls mit einem einzelnen Schalenelement modelliert. Die fünf Schichten [90/0/90/0/90] $^{\circ}$ des Sperrholzes werden in LS-Dyna mit *PART_COMPOSITE modelliert. Die Schichten werden als unabhängig betrachtet und als gestapelte Schalen modelliert, d.h. es gibt keinen Kontakt zwischen den Schichten und die Einzellagen werden als fest verbunden modelliert. Daher kann eine Delamination nicht modelliert werden. Die Simulation des Sperrholzlaminats wird mit den gleichen Randbedingungen wie für einlagiges Furnier durchgeführt. Abbildung 90 zeigt die Modellierung des Sperrholzes.

Die verwendeten physikalischen Parameter als Eingabeparameter der Simulation sind in Tabelle 19 angegeben.



a) Laminatansicht der Sperrholzprobe



b) Modellierung des Laminats mit Schalenelementen

0.4 mm	○	90°
2.4 mm	○	0°
2.4 mm	○	90°
2.4 mm	○	0°
0.4 mm	○	90°

c) Dimensionen und Orientierung der Einzellagen

Abbildung 90: Modellierung des Albasia-Sperrholzes in LS-Dyna mit *PART_COMPOSITE, aus [10]

Tabelle 19: Physikalische Eingabeparameter für die Zugsimulation der Sperrholzproben, aus [10]

Parameter	Reines Albasia	Beleimtes Albasia	Einheit

ρ	388	388	kg/m ³
E_{11}	8,65	8,13	GPa
E_{22}	0,108	0,093	GPa
G_{12}	0,92	0,92	GPa
ν_{21}	0,007	0,007	-
X_T	44,6	50,46	MPa
ε_{11_T}	0,48	0,61	%
Y_T	0,6	0,81	MPa
ε_{22_T}	0,63	1,01	%
S_C	8,6	8,6	MPa
Y_C	$-Y_T$	$-Y_T$	MPa
$\varepsilon_{f_11_T}$	ε_{11_T}	0,80	%
$\varepsilon_{f_22_T}$	ε_{22_T}	1,98	%
$\varepsilon_{f_11_C}$	$-\varepsilon_{11_T}$	$-\varepsilon_{f_11_T}$	%
GXT	110	10^5	J/m
GYT	110	10^5	J/m

Das Ergebnis der Validierung der Materialmodelle ist in Abbildung 91 dargestellt. Die experimentellen Daten sind als gekreuzte Punkte dargestellt, die Materialmodelle von reinem Albasia als einfache Linien und die Materialmodelle von verleimtem Albasia als gestrichelte Linien. Alle Materialmodelle, reines und verleimtes Albasia, überschätzen den Elastizitätsmodul und die Bruchfestigkeit. Das spröde Verhalten von Sperrholz wird durch die reinen Albasia-Materialmodelle besser dargestellt.

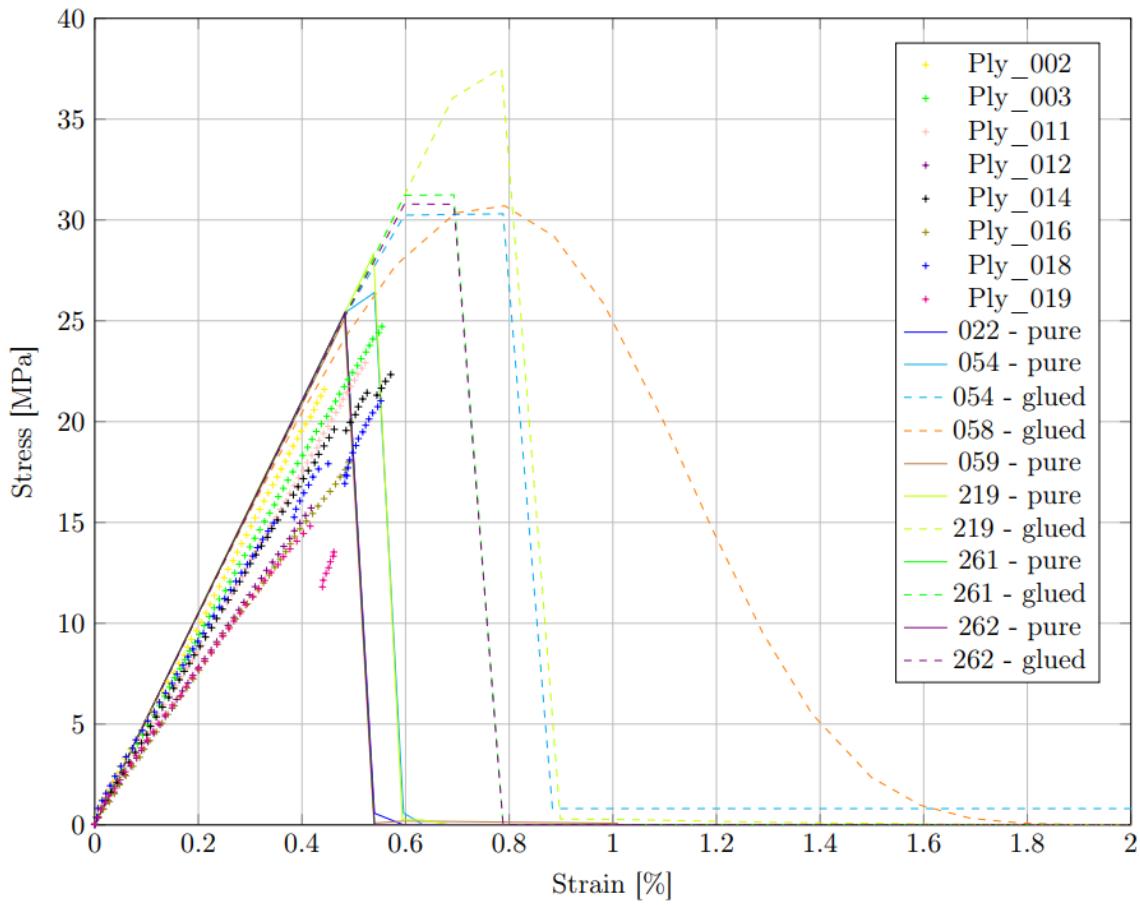


Abbildung 91: Spannungs-Dehnungs-Verläufe für die Einzelementsimulation des Sperrholzes, aus [10]

Anhand der Mischungsregel betragen die Werte für Steifigkeit und Festigkeit des Sperrholzlaminats (für Details siehe [10]) $E = 5,5 \text{ GPa}$ und $\sigma_{max} = 28,1 \text{ MPa}$, basierend auf den Ergebnissen der Zugcharakterisierung der Einzelfurniere. Die Ergebnisse der Zugcharakterisierung an Sperrholzproben liegen im gleichen Bereich mit einer Steifigkeit von etwa 4,08 GPa und einer Festigkeit von 20,26 MPa. Dies zeigt, dass die Modellierung von Sperrholz basierend auf den Eingabeparametern für Einzelfurnier eine sinnvolle Annahme ist. Allerdings zeigt sich, dass alle Materialmodelle die Steifigkeit und Festigkeit der experimentellen Ergebnisse überschreiten. Dies liegt daran, dass für die Dichte und damit die physikalischen Materialeingabeparameter nur das reine Holz ohne den Klebstoff im Sperrholz berücksichtigt wurde wodurch die Dichte des Holzes als zu hoch angenommen wurde was zu einer höheren Steifigkeit und Festigkeit führt. Durch ein anpassen der Dichte und damit der Eingabeparameter kann die simulative Spannungs-Dehnungs-Kurve den experimentellen Ergebnissen angenähert werden.

Letztendlich sind die vielversprechendsten Materialmodelle für die Modellierung von Holz unter quasistatischer Zugbelastung die für reines Albasia-Material implementierten Materialmodelle *MAT_022, *MAT_054, *MAT_059, *MAT_219, *MAT_261 und *MAT_262.

1.4.4 Simulation unter Druckbelastung

Die simulativen Untersuchungen von Albasia unter Druckbelastung sind im Detail in [11] beschrieben.

Für die simulative Untersuchung wird ein Einzelement als dreidimensionales Solid mit acht Knotenpunkten untersucht. Trotz höherer Rechenzeit wird bewusst das Solid ausgewählt, da nicht alle Materialmodelle zweidimensionale Schalenelemente unterstützen. Das Einzelement ist ein quadratischer Würfel mit einer Kantenlänge von einem Millimeter. Dies ermöglicht, die Spannungen direkt aus den Kräften abzulesen, da die Querschnittsfläche $A = 1 \text{ mm}^2$ beträgt. Eine Fläche des Würfels wird mit einer konstanten Verschiebung von $\Delta H = 0,5 \text{ mm}$ über die Simulationszeit belastet, während die Gegenüberliegende eingespannt wird (siehe Abbildung 92), wobei Querkontraktion in der Einspannfläche möglich ist.

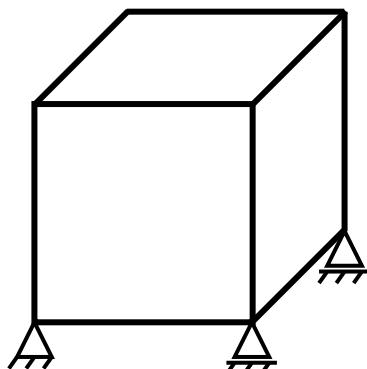


Abbildung 92: Schema des Simulationsmodell des Einzelements, aus [11]

Gemäß Tabelle 17 werden die ausgewählten Materialmodelle sukzessive untersucht. Die physikalischen Parameter der Versuche werden für eine Dichte von $\rho = 315 \text{ kg/m}^3$ errechnet und eingetragen, da dies der Mittelwert der Dichte aller Proben ist.

Simulative Untersuchung an UD-Laminat:

Abbildung 93 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten Materialmodelle bei der Simulation der Druckbelastung eines DU-Laminats im Vergleich mit der Mittelwertkurve der Druckcharakterisierung.

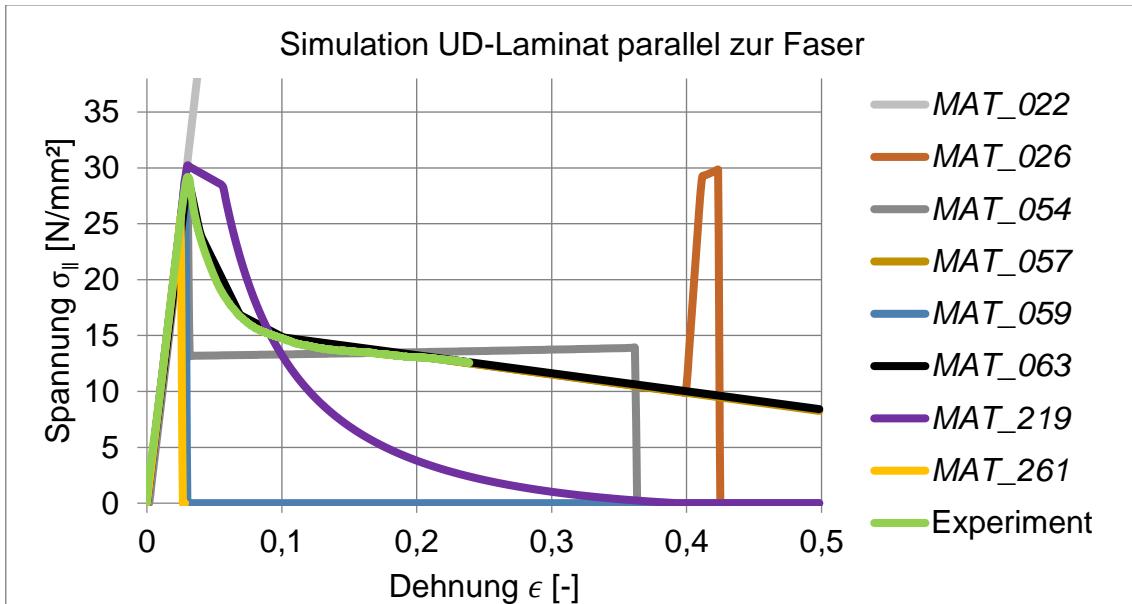


Abbildung 93: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Simulation UD-Laminat parallel, aus [11]

Bei der Simulation mit *MAT_COMPOSITE_DAMAGE (MAT_022) ist zu erkennen, dass sich dieses Materialmodell nicht für eine Druckbelastung in Faserrichtung eignet, da sich eine Druckfestigkeit oder ein Versagenskriterium für Druck nicht einstellen lassen und die Kurve lediglich mit der Steigung des E-Moduls konstant ansteigt. *MAT_HONEYCOMB (MAT_026), *MAT_LOW_DENSITY_FOAM (MAT_057) sowie *MAT_CRUSHABLE_FOAM (MAT_063) liefern erwartbare Ergebnisse, da bei diesen drei Modellen die Spannungs-Dehnungs-Kurve in tabellarischer Form hinterlegt ist.

Eine andere Materialmodellierung verfolgt *MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE (MAT_054). Durch die Eingabe von zusätzlichen „Softening“-Parametern kann der plastische Bereich kalibriert werden. So ist es möglich, nach Erreichen der Druckfestigkeit ein Plateau bis zum Versagen des Materials einzustellen. Dies ist ähnlich zu dem Plateau, welches sich bei den Experimenten zeigt. Das Spannungsniveau wird dabei so gewählt, dass die Flächen unter den Kurven näherungsweise gleich sind. Für *MAT_COMPOSITE_FAILURE_OPTION_MODEL (MAT_059) sowie *MAT_LAMINATED_FRACTURE_DAIMLER_PINHO (MAT_261) zeigt sich, dass beide Modelle nach Erreichen der hinterlegten Druckfestigkeit versagen, wobei das Einzelement bei MAT_261 direkt gelöscht wird, wohingegen MAT_059 in den mechanischen Eigenschaften auf null gesetzt wird und nicht gelöscht wird. Beide

Modelle spiegeln mit den aktuellen Parametern jedoch nicht den Verlauf der experimentellen Kurve wider.

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Materialmodellen zeigt sich bei **MAT_CODAM2 (MAT_219)* ein anderes Verhalten im plastischen Bereich. Durch die Eingabe von verschiedenen, nicht-physikalischen Parametern (siehe [11]) kann eine exponentielle Endfestigung eingestellt werden. Zwar geht diese bis auf eine Spannung von null zurück, jedoch ähnelt das exponentielle Endfestigungsverhalten dem Experiment. Auf Basis dieser Untersuchung werden daher im Folgenden nur drei Materialmodelle weiter betrachtet: *MAT_026* als Materialmodell für eine Honeycombstruktur, was auf hinterlegten Spannungs-Dehnungs-Kurven basiert, und *MAT_054* bzw. *Mat_219* als Materialmodelle für FVK-Werkstoffe mit Softening-Verhalten. Generell ist bei allen acht Materialmodellen festzustellen, dass die E-Module in L- und R-Richtung nicht für die Zug- und Druckbelastung separat einstellbar sind. Dies bedeutet, dass die E-Module für Albasia unter Zugbelastung aus dem vorherigen Abschnitt nicht eingetragen werden. Bei Verwendung der oben genannten Materialmodelle in einer späteren Anwendung muss daher je nach dominierender Belastung zwischen den Parametern für Zug- oder Druckbelastung unterschieden werden.

Mithilfe desselben Simulationsmodells werden auch die Spannungs-Dehnungs-Kurven bei Belastung des Einzelements mit senkrechter Ausrichtung der Fasern erzeugt. Es ergibt sich das Diagramm nach Abbildung 94, in der die Mittelwertkurve der Experimente zum Vergleich abgebildet ist.

MAT_026 liefert ebenfalls ein erwartbares Ergebnis aufgrund der tabellarisch hinterlegten Kurvenform und anschließender Verdichtung vor dem Versagen. Auch in diesem Fall ist es nicht möglich, in der Tabelle eine Kurve zu hinterlegen, die vor allem im Anfangsbereich eine höhere Steigung aufweist, als der eingestellte E-Modul in R-Richtung zulässt. Bei *MAT_054* wird mithilfe der nicht-physikalischen Parameter wiederum das Plateau im plastischen Bereich eingestellt, sodass die Flächen unter den Kurven näherungsweise gleich sind. *MAT_219* weist bei dieser Simulation eine größere Differenz zum Experiment auf, da die exponentielle Endfestigung im Versuch nicht ausgeprägt ist. Es ist also festzuhalten, dass *MAT_026* und *MAT_054* für diesen Belastungsfall am besten geeignet sind.

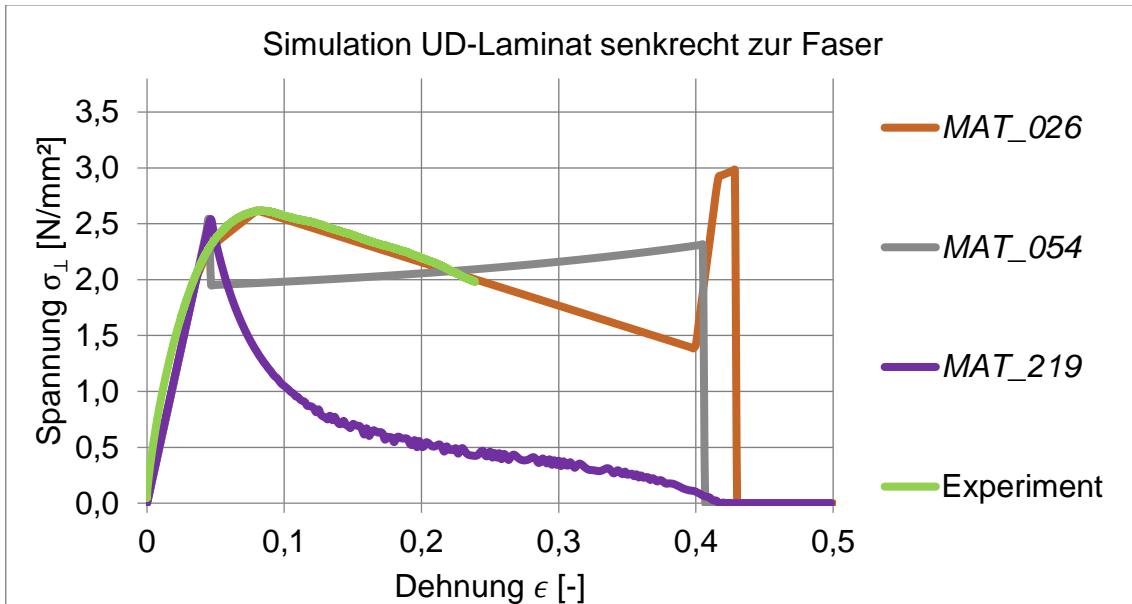


Abbildung 94: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Simulation UD-Laminat senkrecht, aus [11]

Simulative Untersuchung von Sperrholz:

Vor Beginn der Simulation des dreilagigen Sperrholzes ist es notwendig, die Materialkarten bezüglich der elastischen Kennwerte anzupassen. Im Gegensatz zur mittleren Dichte bei den UD-Laminaten von $\rho = 315 \text{ kg/m}^3$ beträgt die Dichte der untersuchten Sperrholzproben $\rho = 435 \text{ kg/m}^3$, sodass für einen korrekten Vergleich zwischen Experiment und Simulation Parameter wie E-Modul, Druckfestigkeit und Bruchdehnung skaliert werden müssen. Neben den Kennwerten ist ebenso eine Skalierung der tabellarischen Spannungs-Dehnungs-Kurven für MAT_026 erforderlich.

Für die Simulation des Sperrholzes werden ebenfalls Einzelemente betrachtet, um die Eignung verschiedener Materialmodelle zu untersuchen. Da die Materialkarte für MAT_026 nur Solid-Elemente zulässt, werden drei quadratische Würfel jeweils mit Kantenlänge 1 mm verbunden und die Kontaktflächen über die Bedingung `*CONTACT_AUTOMATIC_ONE WAY_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK` miteinander verbunden. Bei MAT_054 und MAT_219 wird zur Vereinfachung ein dreilagiges Schalenelement verwendet, um die Komplexität der Berechnung zu senken. Zudem wird zwischen R- und T-Richtung nicht differenziert. Dazu wird das Keyword `*PART_COMPOSITE` verwendet, in dem an den Integrationspunkten des Elements für jede Lage einzeln Dicke, Materialmodell und Faserausrichtung bestimmt

werden können. Die Einspannungen werden so gewählt, dass Querkontraktion möglich ist.

Die Simulationen für einen $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ -Aufbau liefert die Ergebnisse gemäß Abbildung 95 bzw. für den $[90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ -Aufbau nach Abbildung 96. In beiden Diagrammen ist zum Vergleich die experimentelle Mittelwertkurve der gültigen Proben eingezeichnet. Es zeigt sich, dass *MAT_026* in beiden Aufbauten erwartbare Ergebnisse liefert, da die hinterlegten Kurven im Verhältnis zwei zu eins gewichtet werden. Dies entspricht der klassischen Laminattheorie, die eine lineare Mischungsregel analog zu einer Parallelschaltung von elastischen Federn beschreibt. Im elastischen Bereich ergibt sich dadurch eine höhere Steifigkeit und Festigkeit parallel zur Faser, wohingegen die Simulation senkrecht zur Faser eine gute Übereinstimmung in dieser Hinsicht zeigt. Bei beiden Sperrholzern ist jedoch der plastische Bereich erwartungsgemäß mit *MAT_026* mit zu hohen Spannungen beschrieben.

MAT_054 und *MAT_219* werden zum einen auf Basis der skalierten experimentellen Parameter der UD-Laminate betrachtet, zum anderen werden die Ergebnisse der Sperrholzversuche zu Grunde gelegt. Die E-Moduln und Druckfestigkeiten für jede Laminatebene (E_{0° und E_{90° bzw. σ_{0° und σ_{90°) werden dafür mittels eines linearen Gleichungssystems (LGS) aus den experimentellen Werten der Sperrholzer errechnet auch hier gilt die klassische Laminattheorie.

Bei der Simulation parallel zur Faser zeigt sich, dass das Materialmodell *MAT_054* auf Basis der UD-Laminate eine zu hohe Steifigkeit und Festigkeit sowie ein zu hohes Plateau im plastischen Bereich ergibt. Auf Basis der Sperrholzversuche zeigt sich hingegen eine gute Übereinstimmung des elastischen Bereichs, jedoch nicht im plastischen Bereich. Eine manuelle Anpassung des Spannungsniveaus wäre hier jedoch möglich. Im Gegensatz dazu ist die Simulation mit *MAT_054* senkrecht zur Faser auf Basis der UD-Laminate in guter Übereinstimmung mit den Experimenten und weicht nach Anpassung stärker ab. In beiden Fällen ist das Spannungsniveau im plastischen Bereich jedoch auch hier zu hoch.

MAT_219 liefert in beiden Belastungsrichtungen über den gesamten Kurvenverlauf zu hohe Werte, qualitativ beschreibt es jedoch das Verhalten der exponentiellen Endfestigung im Vergleich zu allen Materialmodellen am besten. Zudem ist nach der Anpassung der Parameter in beiden Fällen die Abweichung zum Experiment geringer

und vor allem bei Belastung parallel zur Faser kann *MAT_219* den experimentellen Kurvenverlauf gut darstellen.

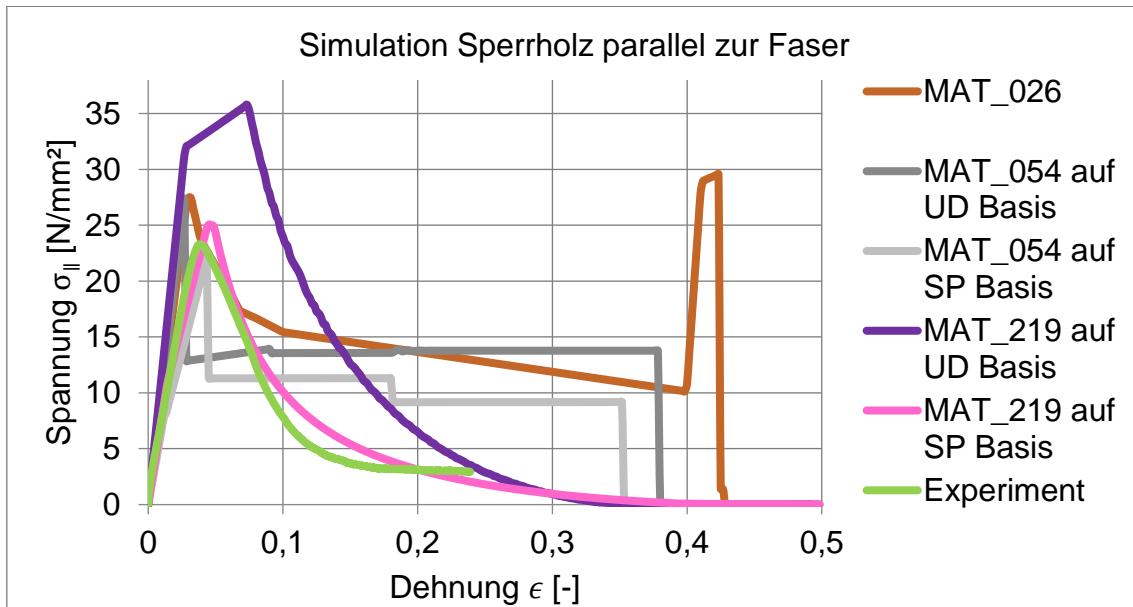


Abbildung 95: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Simulation Sperrholz parallel, aus [11]

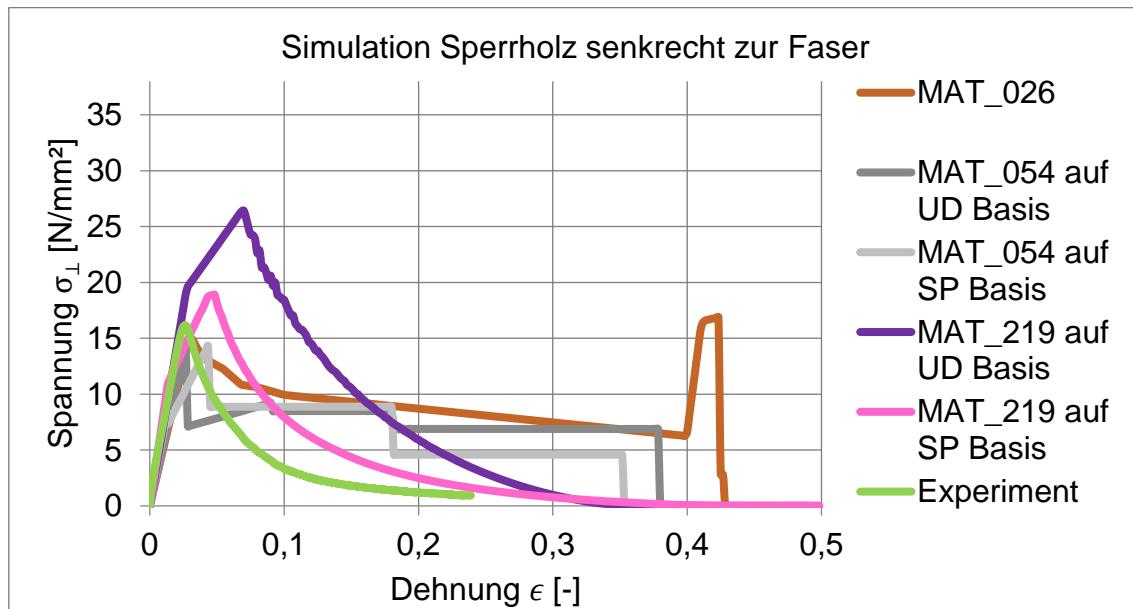


Abbildung 96: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Simulation Sperrholz senkrecht, aus [11]

Generell lässt sich für die Simulation von Sperrholz feststellen, dass die Ergebnisse der UD-Lamine mithilfe der klassischen Laminattheorie nicht direkt verwendbar sind, um eine realitätsnahe Simulation zu erhalten. Eine Anpassung auf Grundlage der speziellen Messungen von Sperrholz bewirkt in der Regel eine höhere Kongruenz, liefert für

verschiedene Belastungsrichtungen jedoch nicht immer die gleichen Resultate. Es ist zudem festzuhalten, dass sich die klassische Laminattheorie nur auf den linear-elastischen Bereich bezieht und somit die Vorhersage des plastischen Bereiches ausschließlich mit Ergebnissen der UD-Laminate nicht möglich ist. Allgemein ließe sich durch eine Anpassung der physikalischen Parameter eine bessere Übereinstimmung erzielen.

1.4.5 Simulation von Pfahltests an Platten

Die in den vorherigen Kapiteln entwickelten Simulationsmethoden werden auch für die Simulation der Pfahltests an den Albasia-Sperrholzplatten (siehe Kapitel 1.3.4.1) genutzt. Für die Validierung werden die experimentellen Ergebnisse der 30 mm Sperrholzplatte genutzt.

Da es sich bei den Pfahltests der Platten um eine hauptsächliche Druckbelastung handelt werden die Simulationsmodelle anhand der Simulationen für die Druckbelastung aufgebaut. Aufgrund des Verhaltens, das in den experimentellen Versuchen beobachtet werden konnte, wird eine Modellierung mit Solid-Elementen verwendet, da insbesondere das Verhalten des Materials in Dickenrichtung (was bei Schalenelementen nicht abgebildet werden kann) sowie die Kontakte der Einzellagen untereinander sowie der Kontakt zwischen modelliertem Holz und dem Pfahl essentiell für die Simulation des Stauchverhaltens sind.

In einem ersten Schritt werden die Simulationen für die 30 mm Albasia-Sperrholzplatten ohne Hybridisierung mit Stahlblech durchgeführt. Dies hat das Ziel, das reine Verhalten des Holzes ohne Interaktion mit dem Stahlblech zu validieren.

Modellerstellung und Simulationseinstellungen

Abbildung 97 zeigt das Simulationsmodell mit dem die Pfahltests an den 30 mm Albasiaplatten durchgeführt wurden. Für den Aufbau des Albasia-Sperrholzverbundes wird jede Einzelfurnierlage durch eine Lage Solid-Elemente modelliert. Die modellierte Dicke der Einzelfurnierlagen ergibt sich dabei aus der Element- und Knotendefinition der Solid-Elemente, sodass die Einzelfurnierlagen die gleichen Dicken wie in der Sperrholzprobe haben (1,4 mm für die Außenlagen und 3,2 mm bzw. 2,8 mm für die 0° und 90° Furnierlagen). Die Verbindung der Elementlagen, die die furnierlagen repräsentieren werden als ideal steife Verbindung ohne Schädigung über geteilte Knoten modelliert. Es wird die Kontaktbedingung gewählt, womit die Elementschichten miteinander in Kontakt sind und auch durch die Eliminierung von Elementen entstehende Kontaktflächen in der Kontaktberechnung einbezogen werden (*CONTACT_INTERIOR). Die Elementkantenlänge in den Elementschichten der Furnierlagen beträgt einheitlich 5 mm. Die Anzahl der Elemente im Modell der Platte beträgt 44550 und die Anzahl Knoten beträgt 92092.

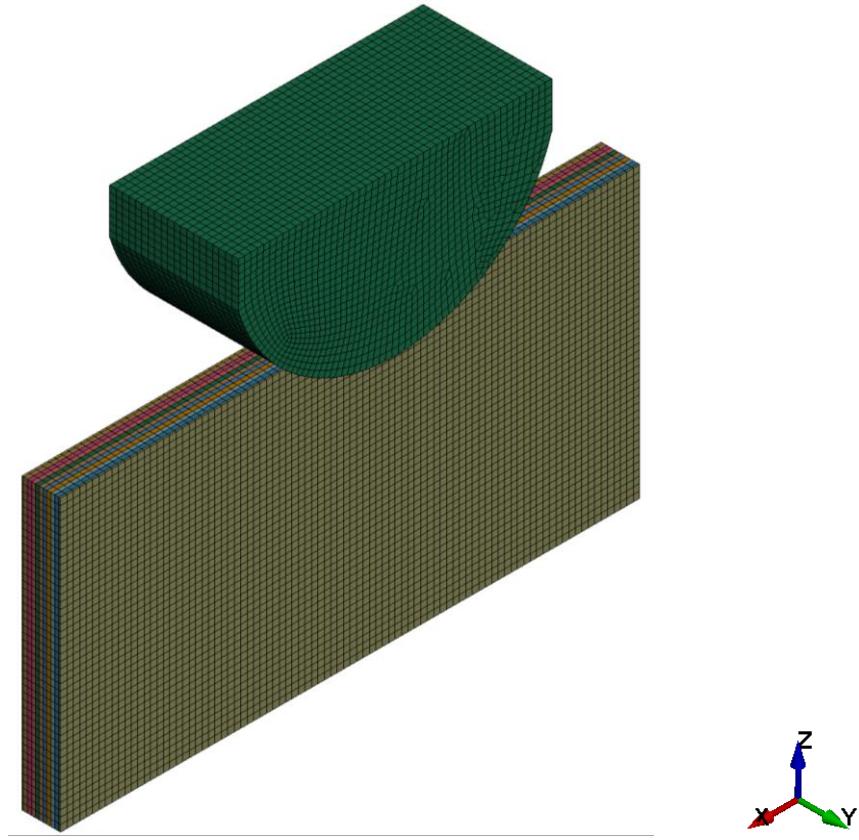


Abbildung 97: Numerisches Simulationsmodell des Pfahltests an Albasia-Platten

Für das Materialverhalten des Albasia-Leichtholzes wird das Materialmodell *MAT_026 (*MAT_HONEYCOMB) wie in Abschnitt 1.4.4 verwendet. Es wird nur dieses Materialmodell verwendet, da direkt die Spannungs-Dehnungs-Kurven aus den experimentellen versuchen aus Abschnitt 1.4.1.2 bzw. 1.4.4 verwendet werden und die Anzahl an numerischen Parameter relativ gering ist.

Der Pfahl wird ebenfalls aus Solid-Elementen modelliert. Die charakteristische Länge der Solid-Elemente beträgt ebenfalls 5 mm. Im Modell des Pfahls sind 21960 Elemente und 24423 Knoten enthalten. Die Maße des Pfahls entsprechen denen aus den Druckversuchen an Plattenwerkstoffen. Für die Modellierung des Materials wird das Material *MAT_024 (*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY) für die Modellierung des Stahls verwendet.

Für die Modellierung der Randbedingungen wird die unterste Knotenreihe in alle Raumrichtungen gesperrt. Dies soll das Aufliegen der Platte auf dem Maschinenbett der Prüfmaschine Modellierung. Zusätzlich werden an den beiden äußeren Decklagen die Knoten in einem Bereich von 45 mm in Y-Richtung (DOF2) gesperrt. Dies modelliert die Randbedingungen aus der seitlichen Einspannung (siehe Abbildung 39). Für die Belastung des Pfahls werden alle Knoten des Pfahls mit einer Geschwindigkeitsrandbedingung in

negativer Z-Richtung (DOF3) von 1 mm/ms beaufschlagt. Die Simulationsdauer beträgt 150 ms wodurch sich ein Weg von 150 mm für den Pfahl analog zum Experiment ergibt.

Abbildung 98 zeigt den Vergleich der Kraft-Weg-Kurven der experimentellen Daten mit der Simulation mit den Materialeingabeparameter wie in Abschnitt 1.4.4 mit dem Materialmodell *MAT026. Im Vergleich der Kraft-Weg-Kurven zeigt sich, dass die Anfangssteifigkeit der Simulation geringer ist als in den Tests. Die Ursache hierfür liegt in der Charakterisierung der Materialeingabeparameter anhand des 3-lagigen UD-Proben. Die dort ermittelte Steifigkeit ist geringer als in der 11-lagigen Sperrholzlage. Hinzu kommt, dass es im Verlauf der Kraft-Kurve bis zum Erreichen der maximalen Kraft bereits zu lokaler Verdichtung kommt. Dabei werden die inneren Lagen in einer Sperrholzplatte stärker verdichtet, als dies in der 3-lagigen UD-Probe der Fall ist. Eine höhere Verdichtung resultiert auch in einer höheren Steifigkeit. Zum anderen zeigt sich im Vergleich der experimentellen und simulativen Kurve, dass die maximale Kraft der Experimente in der Simulation nicht erreicht wird. Während in den experimentellen Pfahl-Tests im Intrusionsbereich bis 50 mm eine Maximalkraft von 65 kN und im Gesamten eine Maximalkraft von ca. 75 kN erreicht wird, zeigen die Simulationskurven eine Maximalkraft von 55 kN. Hier ist erneut die Verdichtung des Holzes während des Stauchprozesses die Ursache. Die Materialeingabeparameter in Form von Spannungs-Dehnung-Kurven der Einzelelemente sind für die hohe Verdichtung, wie sie im Pfahltests auftreten zu gering und müssen insbesondere im Bereich hoher Dehnungen angepasst werden.

Des Weiteren zeigt sich in der Simulation, dass die Kraft ab einer Intrusion von 50 mm abfällt, während die Kraft in den Pfahltest annähernd konstant bleibt oder sogar leicht ansteigt. Die Ursache hierfür liegt in den nicht-physikalischen Parametern der numerischen Materialkarte. Insbesondere die Eliminierung der Elemente. Eine Elementeliminierung in numerischen Simulationen ist notwendig um insbesondere bei hohen Verdichtungen numerische Instabilitäten in den Elementen zu vermeiden. Dieses Vorgehen hat allerdings insbesondere bei Materialien mit hoher Verdichtung einen negativen Effekt auf die Kraft-Kurve, da Elemente oftmals vorzeitig eliminiert werden müssen und dadurch die Reaktionskraft dieser Elemente wegfällt. Die numerischen Parameter die die Eliminierung der Elemente kontrollieren, können nicht experimentell charakterisiert werden sondern müssen mit experimentellen Daten für die vorherrschenden Lastbedingungen kalibriert werden.

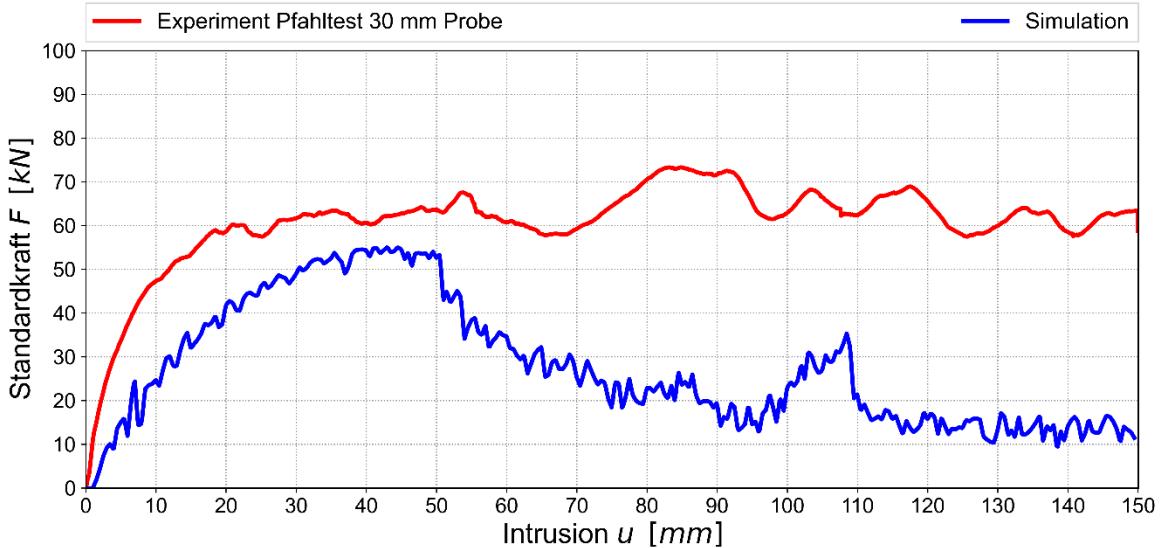


Abbildung 98: Vergleich der Simulation der Pfahltests der 30 mm Albasia-Platte mit den experimentellen Daten

Die Ergebnisse zeigen, dass die Materialcharakterisierung insbesondere unter Druckbelastung weiter optimiert werden muss. Bei einem Materialverhalten mit hoher Verdichtung muss dieses auch durch entsprechende Charakterisierungstests auf Materialebene nachgebildet werden um die Materialparameter für dieses Verhalten zu bestimmen. Dies würde dazu führen, dass die Spannungs-Dehnungs-Verläufe, die für die Materialeingabe benötigt werden, das Verhalten bei hoher Verdichtung besser Abbilden und dadurch auch die Kraft-Weg Kurven besser mit den experimentellen Verläufen übereinstimmen.

Aufgrund der Umstände, dass die nicht-physikalischen Parameter das Ergebnis der Simulation stark beeinflussten wurde entschieden, die Materialparameter nicht weiter zu kalibrieren um zu vermeiden, dass ein nicht-physikalisches Materialverhalten erzeugt wird, was nur für diesen Lastfall zu einer guten Übereinstimmung mit den experimentellen Daten führt.

1.4.6 Simulation der Schwellereinleger

Für die Simulation der Schwellereinleger werden die Materialmodelle und Materialparameter aus dem vorherigen Abschnitt übernommen um die Simulation der Pfahltests an den Schwellereinlegern durchzuführen. Dazu wurde zu Beginn die Konfiguration „Spitzer Winkel“ (siehe Abbildung 104) simuliert und im Vergleich mit den experimentellen Daten wurden die Simulationsergebnisse bewertet. Anschließend wurden drei weitere Querschnittsgeometrien simuliert und das Ergebnis bewertet. Diese drei Querschnittsgeometrien wurden nicht experimentell getestet, sondern rein numerisch Bewertet. Das Ziel dieser Untersuchungen lag

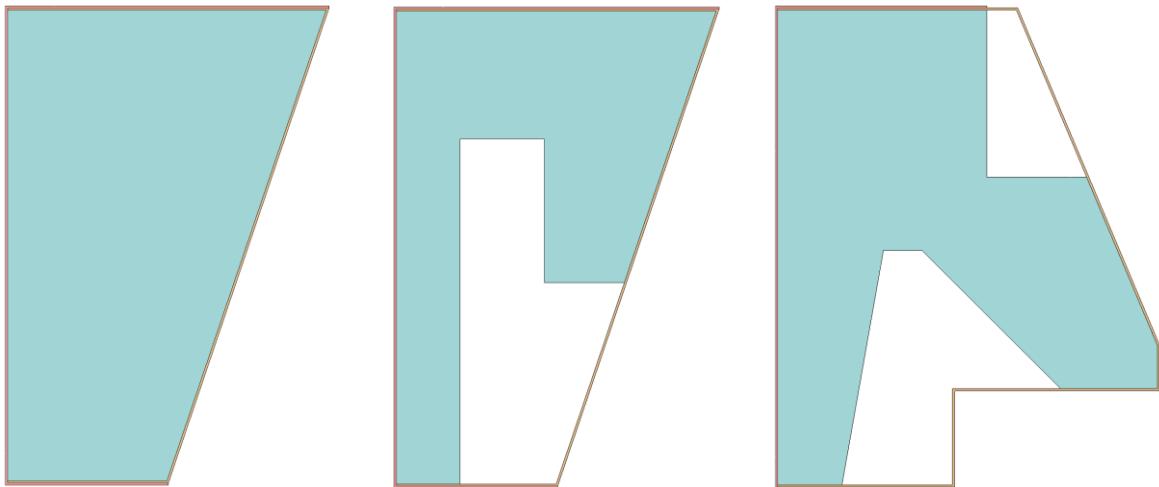
darin, die Kraft-Weg-Verläufe der Schwellerstruktur weiter in Richtung der Referenzstruktur zu optimieren.

1.4.6.1 Numerische Untersuchung weiterer Querschnittsgeometrien der Schwellereinleger

Mit dem Ziel, die Kraft-Weg-Charakteristik der Albasia-Schwellereinleger weiter in Richtung der Referenzstruktur hin zu optimieren werden drei weitere Querschnittsgeometrien rein numerisch untersucht. Konkrete Anforderungen aus der Referenz sind die Anfangssteifigkeit, ein erstes Kraftmaximum von etwa 250 kN eine maximale Kraft von etwa 400 kN und ein anschließender Kraftverlauf, bei dem die Kraft bis zu einer Intrusion von 80 mm nicht weiter ansteigt (siehe den Kraft-Weg-Verlauf der Referenzstruktur in Abbildung 103). Aus den Erkenntnissen die aus den Pfahltests an den Schwellereinlegern in Kapitel 1.5.1 können folgende Randbedingungen für die weiteren Geometrievarianten abgeleitet werden:

- Der maximale Bauraum von 148 mm x 118 mm ergibt sich aus dem Bauraum in der Karosserie und darf nicht überschritten werden.
- Die maximale Steifigkeit des hybriden Materialsystems bestehend aus Albasia im Kern und Stahlblecht ergibt sich durch eine einheitliche Anordnung der Fasern parallel zur Lastrichtung in den Furnieren. Eine weitere Steigerung der Steifigkeit könnte durch eine Erhöhung der Stahlblechdicke erzielt werden allerdings auf Kosten des Leichtbaus und der Nachhaltigkeit
- Aus geometrischen Aspekten kann die Steifigkeit erhöht werden, wenn die Fläche des Schwellereinlegers, mit dem der Pfahl zuerst in Kontakt kommt erhöht wird. Zusätzlich wird die Steifigkeit durch die Querschnittsgeometrie und die Stabilität des Querschnitts gegenüber dem Stauchen definiert.
- Der Kraftverlauf wird über die Querschnittsfläche entlang der Höhe (148 mm) des Schwellereinlegers eingestellt. Soll der Kraftverlauf gleichbleiben oder abnehmen, dann muss auch die Querschnittsfläche abnehmen.
- Ein deutlicher Abfall in der Kraft kann durch Hohlräume im Querschnitt erreicht werden. In diesen Bereichen findet keine Verdichtung des Holzes statt bis der Hohlraum vollständig durch Holzbruchstücke gefüllt ist oder komplett gestaucht wurde.

Anhand dieser Randbedingungen wurden drei zusätzliche Querschnittsgeometrien definiert, die numerisch bewertet werden. In Abbildung 99 sind die numerischen Modelle der drei Querschnittsgeometrien dargestellt. Der grüne Bereich zeigt den Albasia-Holzkern und das Stahlblech ist in braun angedeutet. Der modellierte Furnierlaminataufbau in allen drei Querschnittsgeometrien entspricht Variante 2 in Tabelle 22.



a) Variante 1

b) Variante 2

c) Variante 3

Abbildung 99: Neue Querschnittsgeometrien der numerischen Untersuchung. a) Variante 1; b) Variante 2; c) Variante 3

Variante 1 hat den Querschnitts eines Keils, hierbei soll die obere Seite maximal gewählt werden um die Anfangssteifigkeit der Geometrie zu erhöhen. Durch die abgeschrägte Seite nimmt die Stauchfläche (Fläche unter dem Pfahl) während des Stauchprozesses ab. Dadurch soll die Kraft während zunehmender Intrusion konstant bleiben. Variante 2 entspricht von den Maßen denen von Variante 1 jedoch sind Hohlräume im Querschnitt vorhanden. Hierbei soll die Verdichtung des Holzkerns teilweise gestoppt werden wodurch die Kraft abfällt und eine Blockbildung verhindert werden soll. Variante 3 orientiert sich am verfügbaren Bauraum der Referenzstruktur. Dabei soll durch die Formgebung bereits eine hohe Stabilität und damit Steifigkeit generiert werden. Zusätzlich sollen die Hohlräume den unkontrollierten Kraftanstieg und die Blockbildung verhindern.

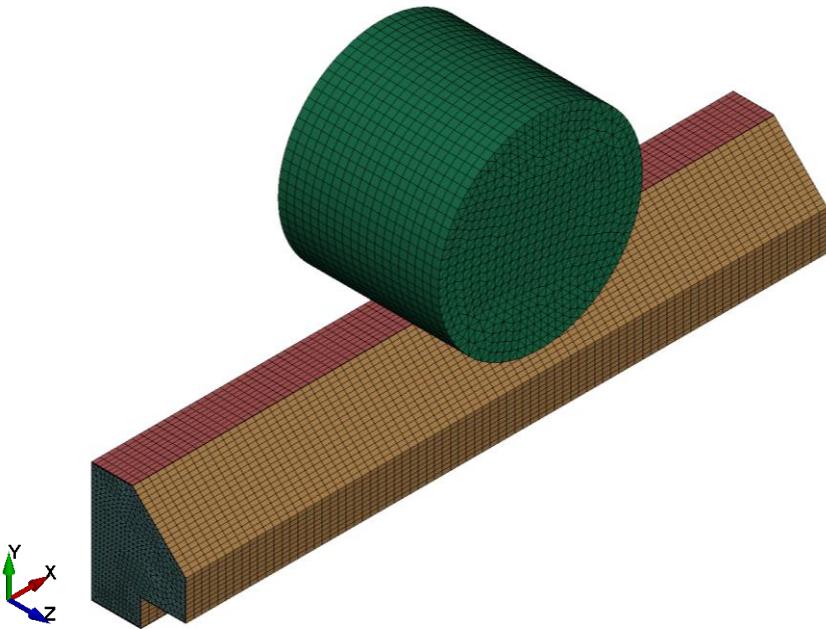


Abbildung 100: Numerisches Modell der Simulation der Schweller-Variante "Spitzer Winkel" mit Modell des Pfahls

Das numerische Modell der Simulation ist beispielhaft für die Variante „Spitzer Winkel“ in Abbildung 100 dargestellt. Der Albasia-Kern wird in der Simulation der Schwellereinleger als ein Volumenkörper modelliert. Die Modellierung jeder Einzelschicht würde zu einer großen Anzahl Elemente und damit einer hohen Rechenzeit führen. Die Materialorientierung im Kern wurde so eingestellt, dass sie dem Furnierverbundaufbau „Variante 2“ aus Tabelle 22 entspricht. Als charakteristische Elementgröße im Albasia-Kern sind 5 mm eingestellt während die Elementgröße im Pfahl und im Stahlblech 10 mm beträgt. Die Randbedingungen entsprechen denen im Pfahltest. Dazu wird die Unterseite des Schwellerblocks und die Unterseite der Aussparung in Y-Richtung (DOF2) gesperrt. Zusätzlich werden ein Teil der Knoten an der Vorder- und Rückseite in Z-Richtung (DOF3) gesperrt um den Einfluss der Klemmung im Versuchsaufbau zu modellieren. Für die Belastung des Pfahls werden alle Knoten des Pfahls mit einer Geschwindigkeitsrandbedingung in negativer Y-Richtung (DOF2) von 1 mm/ms beaufschlagt. Die Simulationsdauer beträgt 70 ms wodurch sich ein Weg von 70 mm für den Pfahl ergibt.

Abbildung 99 zeigt die Simulationsergebnisse der Simulationen der Schwellereinleger. Dargestellt sind die Kraft-Weg-Verläufe der Simulationen der drei Varianten aus Abbildung 99 (Bezeichnung „Variante 1“ bis „Variante 3“) sowie die Simulation und den experimentellen Ergebnissen der Geometrievariante „Spitzer Winkel“ (siehe Abbildung 104 bzw. Abbildung 105). Als Vergleich und Bewertungsgrundlage sind auch die Ergebnisse der Pfahltests an der Referenzstruktur dargestellt.

Ein Vergleich der Simulationsergebnisse der Variante „Spitzer Winkel“ mit dem Testergebnis dient der Validierung der Simulation.

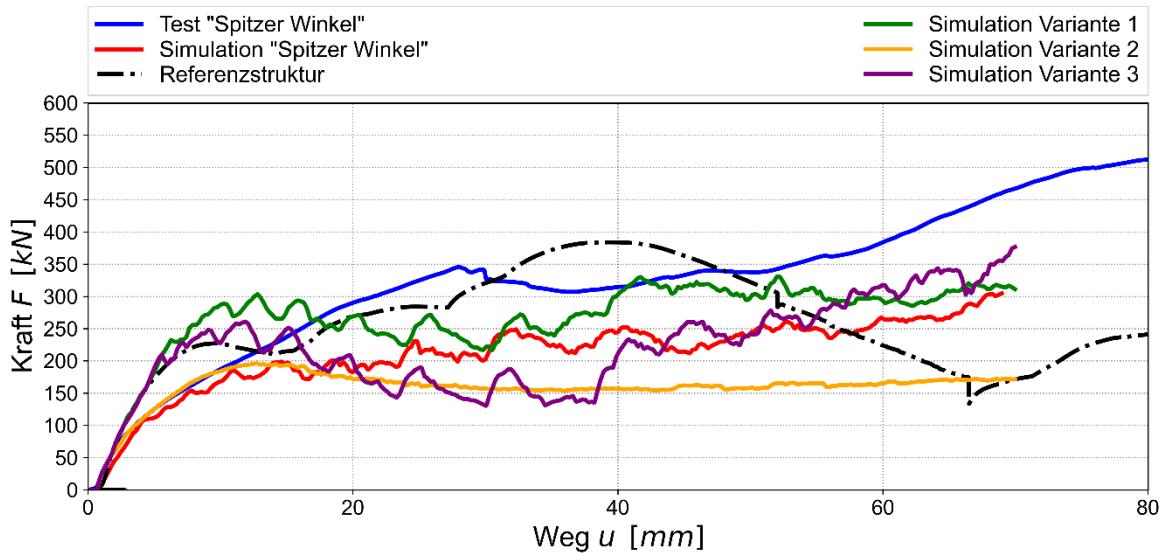


Abbildung 101: Simulation der unterschiedlichen Querschnittsvarianten im Vergleich mit der Referenzstruktur (schwarz)

Beim Vergleich der Kraft-Weg-Kurven der Simulation „Spitzer Winkel“ mit den experimentellen Kurven der Pfahltests zeigen sich die gleichen Effekte wie in den Simulationen der Pfahltests an den Platten im vorherigen Kapitel. Zu Beginn der Simulation zeigt sich Anfangssteifigkeit der Simulation noch gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen verlässt dann jedoch frühzeitig die experimentelle Kurve und erreicht eine erstes Kraftplateau von ca. 180 kN bei einer Intrusion von etwa 15 mm. Die experimentelle Kraft-Weg-Kurve steigt auf ein erstes Kraftmaximum von 350 kN. Der Grund für diesen Unterschied ist, dass die einsetzende Verdichtung des Albasia-Kerns mit den Spannungs-Dehnungs-Kurven aus der Druckcharakterisierung nur unzureichend modelliert werden kann, wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben. Im Falle der Pfahltests an den Schwellereinlegern ist die Verdichtung zudem noch stärker ausgeprägt als in den Pfahltests an den 30 mm Platten. Daher müsste der Materialinput der Simulation, die Spannungs-Dehnungs-Kurven nochmal deutlich stärker skaliert werden müssen. Zur Bewertung der neuen Geometrievarianten (Variante 1 bis Variante 3) soll daher der Vergleich zwischen dem Simulationsergebnissen genutzt werden.

Beim Vergleich der Simulationsergebnisse der drei neuen Querschnittsgeometrien mit der Geometrievariante „Spitzer Winkel“ zeigt sich, dass insbesondere die Variante 1 und Variante 3 eine höhere Steifigkeit der Struktur aufgrund der geänderten Querschnittsgeometrie und insbesondere der großen anfänglichen Kontaktfläche haben. Dies war ein Hauptziel bei der

Wahl des Querschnittes. Variante 2 hat zwar ein leicht höhere Anfangssteifigkeit als der Querschnitt „Spitzer Winkel“ allerdings eine geringe Steifigkeit als die anderen beiden neuen Querschnittsvarianten. Grund ist eine insgesamt geringe Gesamtsteifigkeit, die sich aus der Geometrie sowie den vergleichsweise großen Hohlräumen ergibt. Verglichen mit dem experimentellen Ergebnis der Referenzstruktur stimmen die Anfangssteifigkeiten bereits gut mit dem Zielwert überein. Die Steifigkeit lässt sich mit den experimentellen Ergebnissen vergleichen, da die oben beschriebenen Effekte der Verdichtung, als Hauptgrund für die Unterschiede in den simulativen und experimentellen Ergebnisse, erst auftreten, wenn Schädigung bzw. die Verdichtung einsetzt. Die Simulationen der Variante 1 und Variante 3 erreichen ein erstes Kraftmaximum von 300 kN bzw. 250 kN. Verglichen mit den experimentellen Ergebnissen der Referenzstruktur sind diese Kräfte bereits höher als die erste Kraftspitze im Pfahltest von etwa 230 kN. Berücksichtigt man die Skalierung der Eingabeparameter für die Verdichtung liegen diese Kraftwerte bei etwa 400 kN und damit im Bereich des Kraftmaximum der Referenzstruktur. Die Kraft-Weg-Kurven von Variante 1 und Variante 3 zeigen nach dem ersten Kraftplateau einen stetigen Abfall der Kraft aufgrund des Querschnitts mit der abnehmenden (Variante 1) bzw. gleichbleibenden (Variante 3) Stauchfläche. Im Anschluss daran steigt die Kraft wieder an. Diese Simulationsergebnisse, auch wenn aufgrund der Verdichtung eine höheres Kraftniveau zu erwarten ist, zeigen, dass die simulierten Geometrievarianten die gewünschte Kraftantwort erzeugen.

- Durch eine Erhöhung der Kontaktfläche zu Beginn des Stauchprozesses steigt die Steifigkeit
- Eine Reduktion der Stauchfläche führt zu einem konstanten Kraftabfall.
- Der Effekt der Hohlräume im Querschnitt konnte in der Simulation nicht untersucht werden.

Im Rahmen der Projektlaufzeit konnten die angepassten Geometrievarianten nicht mehr geprüft werden. Es ist jedoch geplant, die Forschungsarbeiten in diesem Bereich weiterzuführen.

1.5 Demonstratoren

Beschreibung der Demonstratoren und Erfüllung der Anforderungen aus Kapitel IV (Anforderungsprofile an Demonstratoren/Anwendungsfälle)

1.5.1 Schwellereinleger

1.5.1.1 Pfahltest der Referenzstruktur

Um das Anforderungsprofil an einen Schwellereinleger eines Batterieelektrischen Fahrzeugs (BEV) zu konkretisieren wurden quasi-statische Pfahleindrückversuche an einem Serienbauteil durchgeführt. Die aus diesen Versuchen ermittelte Kraft-Weg Charakteristik

dient im Folgenden als Zielgröße auf die Auslegung der hybriden Holz-Schweller aus Albasia hin optimiert werden soll. Alle Proben zeigen ab einer Dehnung von $\epsilon = 0,10$ ein ähnliches Verhalten auf, dass sich ein nahezu waagerechtes Plateau der Spannung ausbildet.

Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden ebenfalls auf der Prüfmaschine mit einer Maximalkraft von 500 kN durchgeführt, auf der auch die Pfahltests an den hybriden 100 mm Plattenproben durchgeführt wurden (siehe Abschnitt 0). Zur Anwendung kommt ebenfalls wieder ein Pfahl mit einem Durchmesser von 254 mm. Für die Ermittlung der Referenz wurde ein Serienbauteil eines Schwellereinlegers eines BEV der Mittelklasse genutzt. Die Gesamtlänge des Schwellereinlegers beträgt ca. 1,60 m. Dieser wurde für die Prüfungen auf 0,8 m gekürzt aufgrund der Beschränkungen im Bauraum der Prüfmaschine. Das Gewicht dieses Abschnitts beträgt ohne sekundäre Anbindungsstrukturen (zur Anbindung des Schwellereinlegers an die Karosserie) 6,8 kg. Zur Ermittlung einer realistischen Einspannung des Schwellereinlegers in die Maschine wurden Voruntersuchungen durchgeführt. Ziel ist es eine Einspannung bzw. Auflagerung des Schwellereinlegers zu erzielen, die der Anwendung in der Karosserie entspricht. Der Versuchsaufbau ist im linken Bild in Abbildung 102 dargestellt. Die finale Lagerung des Schwellereinlegers in der Maschine soll ein Kippen während dem Test verhindern. Dazu wird der Schwellereinleger mit Keilen (nicht abgebildet) auf der linken Seite gestützt. Auf der gegenüberliegenden Seite (rechte Seite des Schwellereinlegers in Abbildung 102) wird der Schwellereinleger mit einer Stahlstange unterlegt. Als Prüfgeschwindigkeit wird ebenfalls 1 mm/s eingestellt, was als quasi-statische Verformung angenommen wird. Die Maximalkraft der Maschine beträgt 500 kN mit einer Sicherheitsreserve von 50 kN. Die Maschine schaltet sich bei Erreichen der 550 kN aus Sicherheitsgründen ab.



Abbildung 102: Versuchsaufbau der quasi-statischen Pfahltests am Referenzschwellereinleger (links). Aufnahme nach dem Test (rechts).

Ergebnisse Pfahltests Referenzbauteil

Die Ergebnisse der Pfahltests am Referenzbauteil werden ebenfalls als Verlauf der Kraft des Pfahls über der Intrusion, also der Eindrücktiefe des Pfahls aufgetragen. Der Verlauf dieser Kraft-Weg Kurve ist in Abbildung 103 dargestellt. Die Kraft-Weg Charakteristik zeigt einen kaskadischen Kraftanstieg, der sich durch den Querschnitt des Strangpressprofils (siehe Abbildung 102, links) ergibt. Nach einem ersten Kraftanstieg bis zu einem ersten Kraftniveau von ca. 230 kN fällt die Kraft zunächst wieder ab bevor sie anschließend in Stufen bis zu einer Maximalkraft von ca. 387 kN ansteigt. Die Kraft fällt im Anschluss bis auf eine Kraft von unter 150 kN ab bevor es zur Kompaktierung des Materials kommt wodurch die Kraft bis zur Maximalkraft der Prüfmaschine ansteigt und der Versuch beendet ist. Die maximale Energieabsorption der Referenzstruktur im Bereich von 0 bis 80 mm Intrusion beträgt ca. 21,6 kJ (siehe auch Tabelle 20).

Aus diesem Kraft-Weg-Verlauf zeigen sich bereits Charakteristika, die für den Albasia Holzschweller relevant sind. Zum einen ist die Anfangssteifigkeit und die der Wert des ersten Kraftniveaus entscheidend. Zum anderen darf die maximale Kraft nicht überschritten werden, da es sonst zu einer Intrusion in die hinter dem Schweller liegende Batteriebox kommen kann. Die Energieabsorption ist ebenfalls relevant. In einem ersten Vergleich sind in Abbildung 103 bzw. in Tabelle 20 die Ergebnisse der Albasia-hybrid Platte mit 100 mm angegeben. Im Vergleich der beiden Kurven in Abbildung 103 zeigt sich, dass der Kraftanstieg der 100 mm Albasia-hybrid Platte flacher ansteigt. Dies belegt, dass die Steifigkeit der Plattenprobe geringer als die Referenzstruktur ist. Die Kraft steigt bis zu einem Kraftniveau von über 400 kN an, was über der maximalen Kraft der Referenzstruktur liegt. Die Kraft fällt im Anschluss nicht wie bei der Referenzstruktur ab. Dies deutet auf einen progressiven Stauchprozess hin. Diese Kraftplateau ist auf die Ursache für die deutlich höhere Energieabsorption im Intrusionsbereich von 0 – 80 mm.

Anhand des Vergleichs der Pfahltests an der Referenzstruktur mit der 100 mm Albasia-hybrid Platte zeigt bereits das Potential, des Holz-Hybriden zum Einsatz als Schwellereinleger, da die Energieabsorption der Referenzstruktur erreicht werden kann. Beim Vergleich der beiden Ergebnisse muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Tiefe der Referenzstruktur (0,8 m) sowie der 100 mm Albasia-hybrid Platte (0,45 m) unterschiedlich sind.

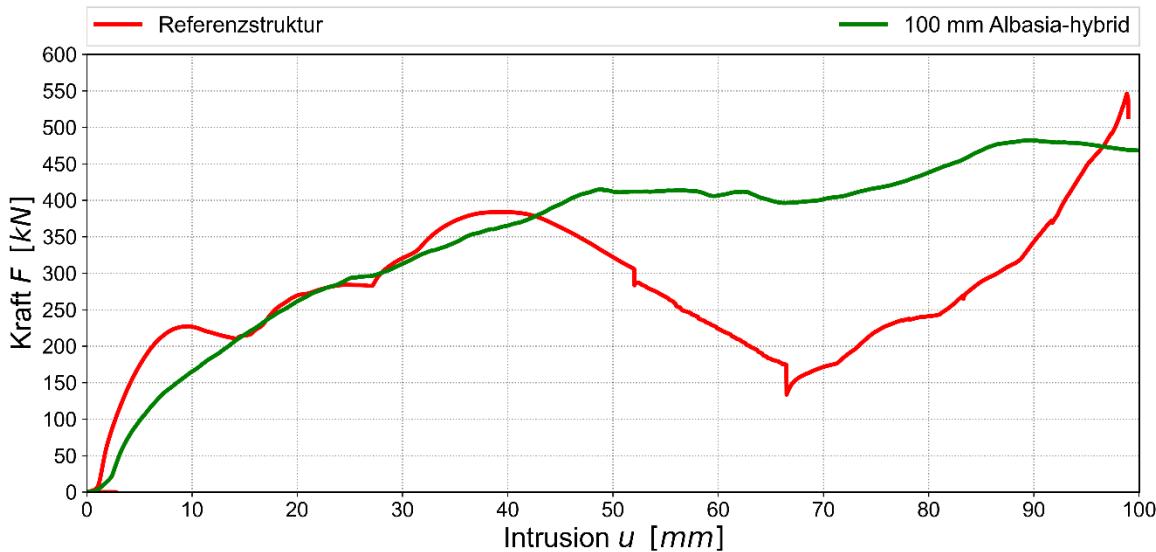


Abbildung 103: Kraft-Weg Charakteristik der Pfahltests des Referenz-Schwellers (rot) im Vergleich mit der Albasia-Hybrid Platte mit 100 mm (grün).

Tabelle 20: Maximale Kraft und Energieabsorption des Pfahltests an der Referenz-Schwellereinleger im Vergleich zur 100 mm Albasia-hybrid Platte.

Probenvariante	F_{max} (0 – 80 mm) [kN]	EA_{max} (0 – 80 mm) [kJ]
Referenzstruktur	387	20,6
100 mm Albasia-hybrid	438	25,6

1.5.1.2 Optimierung der Querschnittsgeometrie der Schwellereinleger

Um den Einfluss des Querschnitts auf das Stauchverhalten zu untersuchen wurden drei Geometrien definiert, die aus dem verfügbaren Bauraum und aus dem Querschnitt der Referenzgeometrie abgeleitet wurden. Der Querschnitt der Referenzstruktur ist in Abbildung 104 a) dargestellt. Die maximalen Maße der Geometrie betragen 148 mm in der Höhe und 118 mm in der Breite sowie einer Länge von 800 mm entsprechend der Referenz. Bei Ausnutzung des maximalen Bauraums als Rechteckprofil ergibt sich der Querschnitt dargestellt in Abbildung 104 b). Wird der Querschnitt dem der Referenzstruktur angenähert und dadurch das Gewicht des Schwellers optimiert, ergeben sich die Querschnitte in Abbildung 104 c) und d) die sich lediglich im Winkel im oberen rechten Bereich unterscheiden. Die Schwellereinleger wurden nicht wie bei den Albasia-hybrid Proben im vorherigen Abschnitt aus Plattenwerkstoff aufgebaut sondern von Projektpartner Broszeit als Sperrholzplatte aus ca. 40 Furnierlagen aufgebaut und auf die finale Geometrie gefräst.

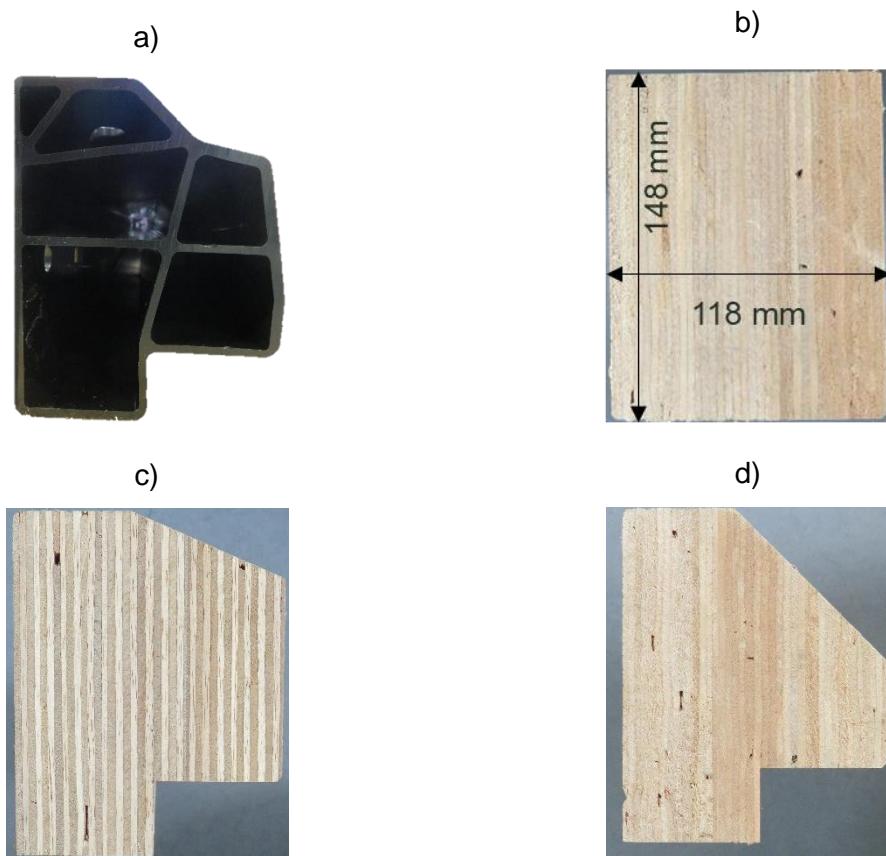


Abbildung 104: Querschnitt der Referenzstruktur a). Nutzung des maximal verfügbaren Bauraum b).

Optimierter Querschnitt mit flachem Winkel c). Optimierter Querschnitt mit spitzem Winkel d).

Die Hybridisierung der Albasia-Holzblöcke erfolgte bei diesen Versuchen wieder mit dünnem Stahlblech. Bei dieser Untersuchung wurde neben dem Tiefziehstahl DC04 auch Edelstahl verwendet, da geplant war, aus dieser Geometrie einen ersten Demonstrator aufzubauen, der unter anderem auf dem Stand des BMWK auf der Hannovermesse 2023 ausgestellt wurde (siehe Abbildung 106). Die Blechstärke des Stahlblechs beträgt 0,65 mm (DC04) bzw. 0,5 mm (Edelstahl). Die Herstellung der hybriden Schweller erfolgte erneut mit dem 2-Komponenten Klebstoff 3M™ Scotch-Weld™ DP490. Je nach Geometrie betragen die Gewichtsanteile für den Albasia-Kern zwischen 4,0 kg und 5,0 kg, das Stahlblech zwischen 1,6 kg und 2,4 kg und zwischen 0,05 kg und 0,2 kg für den Klebstoff. Das Gewicht der Varianten im Vergleich zur Referenz ist in Tabelle 21 angegeben. Es zeigt sich zum einen, dass durch die Albasia-hybrid-Bauweise der Schwellereinleger gewichtsneutral realisiert werden kann, auch wenn der maximale Bauraum ausgenutzt wird, zum anderen gibt es durch die Optimierung des Querschnitts erhebliches Potenzial zur Gewichtsreduktion von knapp 15 % bei der Variante mit spitzem Winkel.

In Abbildung 105 sind die Kraft-Weg-Verläufe für die drei Querschnittsvarianten im Vergleich zur Referenz dargestellt. Die Variante Block zeigt hierbei eine Anfangssteifigkeit der Struktur,

die mit der Referenz vergleichbar ist während die Steifigkeiten der optimierten Varianten geringer sind. Dieser Einfluss ergibt sich aus der Fläche des Schwellers, die zu Beginn des Stauchprozesses mit dem Pfahl in Kontakt ist. Während bei der Variante „Block“ mit einer Breite von 118 mm die ganze Breite in Kontakt mit dem Pfahl ist, sind es bei den optimierten Varianten zu Beginn lediglich 50 mm. Im Vergleich der drei Albasia-hybrid Varianten mit der Referenz zeigt sich jedoch, dass die Steifigkeit des Holz-hybrid Materialverbunds mit Stahlblech geringer ist als die des Aluminium-Strangpressprofils der Referenz. Die Kraft der Variante Block steigt bis zu einer maximalen Kraft von ca. 500 kN bei einer Intrusion des Pfahls von 60 mm an. Der Einfluss des Winkels der abgeschrägten Flanke der optimierten Varianten zeigt sich in einem unterschiedlich starken Anstieg der Kraft sowie einer unterschiedlichen maximalen Kraft. Während die optimierte Variante mit flachem Winkel eine erste Kraftspitze von etwa 420 kN bei einer Intrusion von 40 mm erreicht, ist die Kraft der Variante mit spitzem Winkel bei gleicher Intrusion etwa 90 kN geringer. Im Anschluss an die lokalen Kraftmaxima fällt die Kraft bei den Varianten Block und flacher Winkel ab. Jedoch ist die Charakteristik dieses Kraftabfalls bei der Referenz deutlich ausgeprägter. Ab einer Intrusion von etwa 45 mm zeigen alle drei Varianten der Albasia-hybrid Struktur ein deutlich höheres Kraftniveau im Vergleich zur Referenz. Dies ist auch der Hauptgrund für die zum Teil deutlich höhere Energieabsorption im Vergleich zur Referenz (siehe Tabelle 21).

Tabelle 21: Vergleich der Kennwerte der Referenz des Schwellereinlegers mit den Albasia-hybrid Varianten mit unterschiedlichen Querschnitten. Änderungen in % beziehen sich auf die Referenz.

Bezeichnung	Gewicht [kg]	Maximale Kraft F_{max} (0 – 80 mm) [kN]	Energieabsorption EA (0 – 80 mm) [kJ]
Referenz	6,8	387	20,6
Variante „Block“	6,9 (+2,2 %)	501,3 (+29,5 %)	30,8 (+49,5 %)
Optimiert, flacher Winkel	6,3 (-7,4 %)	465,4 (+20,3 %)	26,0 (+26,2 %)
Optimiert, spitzer Winkel	5,8 (-14,7 %)	406,2 (+4,9 %)	22,5 (+9,2 %)

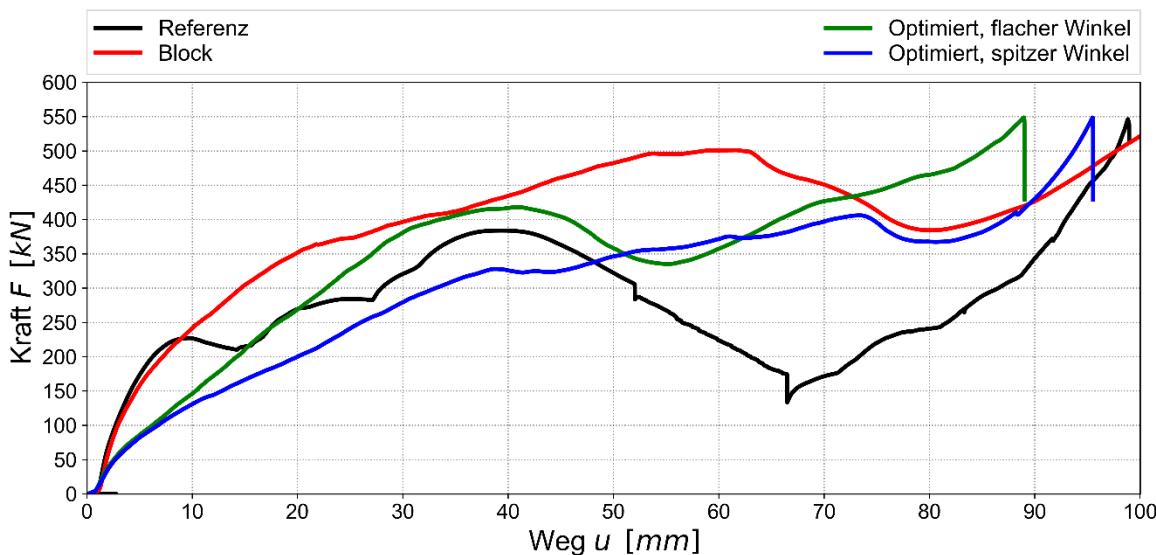


Abbildung 105: Kraft-Weg Charakteristik der Pfahltests an der Referenzkurve (schwarz) mit den Albasia-hybrid Varianten mit unterschiedlichen Querschnitten. Block (rot), optimiert mit flachem Winkel (grün) und optimiert mit spitzem Winkel (blau).

Basierend auf den optimierten Varianten wurde ein erster Demonstrator des Schwellereinlegers hergestellt, der in Abbildung 106 dargestellt ist. Dieser Demonstrator wurde auf dem Stand des Bundeswirtschaftsministeriums als Vertreter des Technologietransferprogramms-Leichtbau auf der Hannover Messe 2023 ausgestellt. Gezeigt wurde die Variante optimiert, spitzer Winkel.



Abbildung 106: Demonstrator des Hybriden Schwellereinlegers. Symbolisiert wird der Aufprall gegen Pfahl.
Abbildung rechts zeigt den aufgesägten Schwellen zur Darstellung der Verdichtung des Holzkerns.

Zusammenfassend lässt sich zur Untersuchung der Querschnittsgeometrie sagen, dass die Albasia-hybrid Varianten bereits wesentliche Kriterien der Referenz erfüllen kann. So wird die Energieabsorption im Pfahlaufprall übertroffen und die maximale Kraft ist nur geringfügig höher als in der Referenz. Es konnte gezeigt werden, dass das Gewicht in der Albasia-hybrid Varianten mit optimierten Querschnitt deutlich reduziert werden können. Allerdings wird die

Anfangssteifigkeit der Referenz nur von der Variante „Block“ erreicht. Um insbesondere die Steifigkeit zu verbessern werden im nächsten Schritt der Verbundaufbau des Albasia-Holzkerns genauer untersucht.

1.5.1.3 Optimierung des Furnierverbundaufbaus

Zur Untersuchung des Einflusses des Furnierverbundaufbaus im Albasia-Holzkern des Schwellereinlegers werden neun unterschiedliche Varianten untersucht. Die Varianten unterscheiden sich dabei in der Furnieranordnung, hierbei sind die Furniere „stehend“ und „liegend“ angeordnet, sowie in der Orientierung der Fasern in den einzelnen Furnieren. Dabei orientiert sich die 0° -Richtung parallel zur Kraftrichtung des Pfahls. In Abbildung 107 sind die Definitionen in der Furnier- und Faserorientierung dargestellt. In Tabelle 22 sind die Definitionen der neun untersuchten Varianten aufgelistet.

Die Schwellerblöcke wurden von Projektpartner Broszeit in der Geometrievariante „Block“ hergestellt. In einem ersten Schritt wurden diese Varianten ohne Hybridisierung mit Stahlblech untersucht um den isolierten Einfluss des Laminataufbaus untersuchen zu können. In einem zweiten Schritt wurden die Schwellerblöcke mit Stahlblech hybridisiert sowie die Geometrievariante „Optimiert, spitzer Winkel“ mitbetrachtet. Insgesamt wurden von jeder Furnierverbundvariante fünf Schwellerblöcke getestet. Der Versuchsaufbau ist dabei unverändert zum vorherigen Abschnitt und zur Referenz.



Abbildung 107: Definitionen des Furnierverbundaufbaus im Albasia-Holzkern

Tabelle 22: Definition der Furnier- und Faserorientierung im Albasia-Holzkern der Schwellereinleger

Bezeichnung	Furnieranordnung	Faseranordnung
Variante 1	Liegend in Balken- Längsrichtung	Unidirektional in Balken- Längsrichtung (90°)
Variante 2	Liegend in Balken- Längsrichtung	Unidirektional in Balken- Querrichtung (0°)
Variante 3	Stehend in Balken- Längsrichtung	Unidirektional in Balken- Längsrichtung (90°)

Variante 4	Stehend in Balken-Längsrichtung	Unidirektional in Balken-Querrichtung (0°)
Variante 5	Stehend in Balken-Querrichtung	Unidirektional in Balkenquerrichtung (0°)
Variante 6	Stehend in Balken-Querrichtung	Unidirektional in Balken-Längsrichtung (90°)
Variante 7	Liegend in Balken-Längsrichtung	Sperrlagenaufbau ($0^\circ/90^\circ$)
Variante 8	Stehend in Balken-Längsrichtung	Sperrlagenaufbau ($0^\circ/90^\circ$)
Variante 9	Stehend in Balken-Querrichtung	Sperrlagenaufbau ($0^\circ/90^\circ$)

Die Ergebnisse der Pfahltests an den Furnieraufbauvarianten sind in Abbildung 108 dargestellt. Gezeigt werden jeweils eine Referenzkurve für die Geometrievarianten „Block“ ohne und mit Hybridisierung sowie „Optimiert, spitzer Winkel“ mit Hybridisierung.

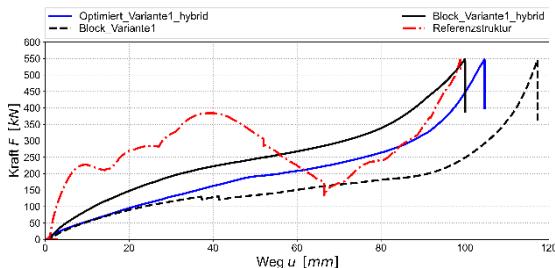
Bei Vergleich der neun Varianten lässt sich erkennen, dass insbesondere die Faseranordnung einen großen Einfluss auf das Stauchverhalten im Pfahleindrückversuch hat. Insbesondere bei den Varianten mit bei denen es Furnierlagen mit Faserorientierung in Lastrichtung des Pfahls gibt (Varianten 2, 5, 7 und 9), zeigt sich eine deutlich höhere Anfangssteifigkeit und höheres Kraftniveau während des Stauchprozesses im Vergleich zu den Varianten, bei denen die Faserorientierung quer zur Lastrichtung angeordnet ist. Vergleicht man beispielsweise die Ergebnisse für Variante 2 oder Variante 5 mit den Ergebnissen in Abbildung 105, zeigt sich sowohl für die Geometrievariante „Block“ als auch „Optimiert, spitzer Winkel“ dass durch eine reine 0° -Faserorientierung eine höhere Steifigkeit sowie höhere Maximalkraft erzielen lässt.

Der Einfluss der Furnieranordnung ist dagegen gering. Im Vergleich der Varianten mit stehenden Furnierlagen in Balken-Längs- und Querrichtung (siehe Variante 2 und 5) zeigen sich bei gleicher Faserorientierung nur geringe Unterschiede im Kraft-Weg Verlauf. Ebenso im Vergleich der Varianten mit stehenden und liegenden Furnierlagen. Der Effekt der Hybridisierung zeigt sich vor allem in einer leicht erhöhten Anfangssteifigkeit, höherem maximalen Kraftniveau und insbesondere im Versagensverhalten. Besonders bei den Varianten mit stehenden Furnierlagen in Balken-Querrichtung und ohne Hybridisierung zeigt sich während dem Stauchprozess, dass die Schwellerblöcke an den Verleimungen der Furnierlagen versagen und anschließend größere Stücke des Schwellerblocks neben dem Pfahl weggeschoben werden. Im Kraft-Weg Verlauf zeigt sich dies durch eine stark abfallende

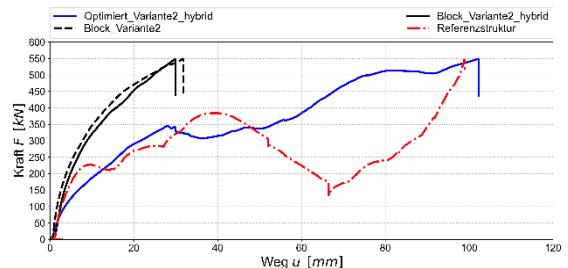
Kraft (siehe bspw. Variante 9 in Abbildung 108) da eine Verdichtung des Holzes nur noch in einem sehr begrenzten Teil des Schwellerblocks direkt unter dem Pfahl erfolgt. Durch eine Hybridisierung mit Stahlblech wird ein Auseinanderschieben von Furnierblöcken verhindert und dadurch erfolgt eine höhere Verdichtung und die Kraft steigt weiter an.

Ein Vergleich der Ergebnisse mit der Referenzstruktur zeigt, dass nur die Varianten mit Faserorientierung in Lastrichtung (Varianten 2, 5), die Anforderungen (insb. Steifigkeit und Kraftniveau, also Energieabsorption) erfüllen können. Allerdings können beide untersuchten Geometrievarianten – Block und Optimiert – nicht alle Anforderungen an den Schwellerblock erfüllen. Obwohl die Geometrievariante Block die Anfangssteifigkeit der Referenz gut abbilden kann, ist die maximale Kraft noch deutlich zu hoch und auch der Anstieg der Kraft erfolgt ohne nennenswerten Kraftabfall wie dies bei der Referenz ab etwa 220 kN erfolgt. Dagegen hat die Geometrievariante Optimiert eine Maximalkraft bei 350 kN mit einer Kraft von 100 kN in guter Übereinstimmung mit der Referenz.

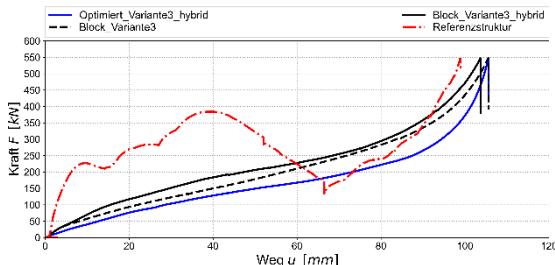
Variante 1:



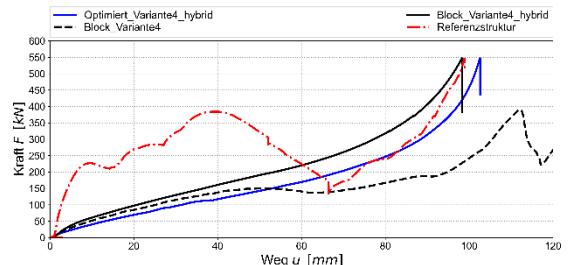
Variante 2:



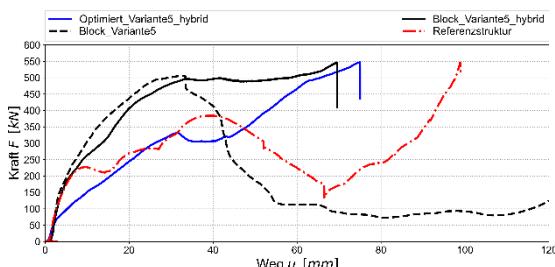
Variante 3:



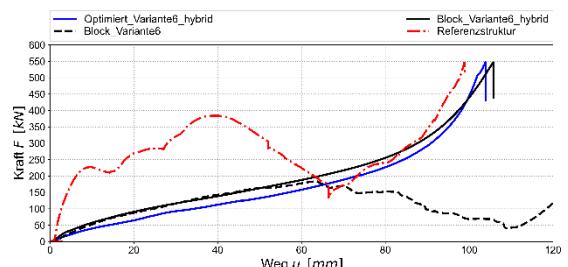
Variante 4:



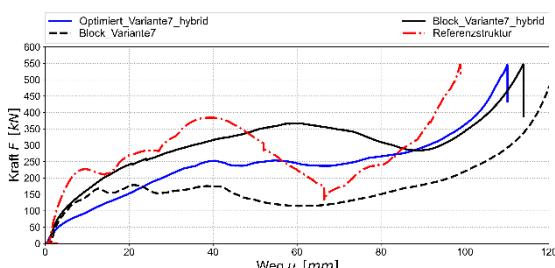
Variante 5:



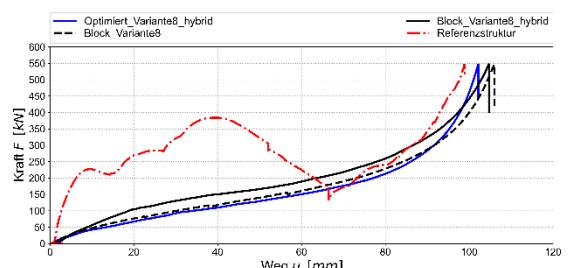
Variante 6:



Variante 7:



Variante 8:



Variante 9:

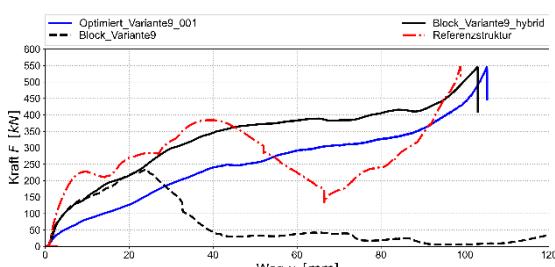


Abbildung 108: Kraft-Weg Charakteristik der unterschiedlichen Furnieraufbauvarianten im Vergleich zur Referenz. Gezeigt sind die Geometrievarianten "Block" (schwarz) als hybride Variante und reine Holzstruktur (gestrichelt), "optimiert, spitzer Winkel" (blau) sowie die Referenzstruktur (rot).

1.5.1.4 Zusammenfassung und Bewertung

Aus diesen Ergebnissen lässt sich folgende Erkenntnis ableiten:

- Die Faserorientierung sollte in Lastrichtung der Stauchkraft verlaufen. Nur so lässt sich das benötigte Lastniveau für die Energieabsorption erreichen.
- Die Anordnung der Furnierlagen im Verbund hat nur einen zweitrangigen Effekt. Die Orientierung der Fasern in den Furnieren dominiert. Eine stehende Furnierorientierung in Balken-Querrichtung bedeutet jedoch eine hohe Anzahl Klebschichten.
- Die Anfangssteifigkeit ergibt sich maßgeblich aus der Faserorientierung sowie der Fläche des Schwellers der zu Beginn in Kontakt mit dem Pfahl ist (siehe die Geometrieviariante „Block“ in Variante 2 und Variante 5).
- Eine Zunahme der Fläche des Schwellereinlegers, die am Stauchprozess beteiligt ist, wie in der Geometrieviariante „Optimiert“ führt zu einem deutlich flacheren Kraftanstieg.
- Ein Kraftabfall, wie er in den Varianten 2 und Variante 5 erkennbar ist, erfolgt dadurch, dass das Stahlblech auf der schrägen Fläche nach außen ausbeulen kann. Es entsteht ein Hohlraum in den das Holz im Verdichtungsprozess ausweichen kann wodurch die lokale Verdichtung in diesem Bereich geringer ist und die Reaktionskraft sinkt.

Daraus ergeben sich weitere Ansätze für die geometrische Optimierung des hybriden Schwellereinlegers mit dem Ziel, einer hohen Anfangssteifigkeit sowie einer Begrenzung der maximalen Kraft und Vermeidung einer Blockbildung:

- Große Fläche des Schwellerblocks, die zu Beginn mit dem Pfahl in Kontakt ist
- Sukzessive Reduzierung der Querschnittsfläche und Implementierung von Hohlräumen im mittleren Bereich des Schwellerblocks um ein Kraftplateau zu erzielen
- Deutliche Reduktion der Querschnittsfläche im unteren Bereich des Schwellereinlegers mit dem Ziel die Blockbildung zum Ende des Stauchprozesses zu reduzieren.

Im Rahmen des Forschungsprojektes konnten die weitere geometrische Optimierung nicht mehr experimentell, sondern nur noch numerisch untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Simulation sind in Abschnitt 1.4.6 beschrieben.

1.5.2 Aufzugkabine

Im Arbeitspaket 8 wurde der Aufbau unseres Demonstrators festgelegt. Dieser wird eine Kabinenecke eines Aufzugs aus Blech-Albasia-Lamellen umfassen und alle drei Anwendungsfälle präsentieren:

1. Anwendungsfall 1: Dekorative Wandverkleidung

2. Anwendungsfall 2: Wandelemente aus Albasia mit Blech

3. Anwendungsfall 3: Handlauf aus Formholzteilen mit Albasia

Dabei werden geeignete Fügeelemente verwendet und die Erkenntnisse aus den Materialversuchen einbezogen, um den optimalen Aufbau zu gewährleisten.

Der Demonstrator bündelt somit alle Erkenntnisse, die aus dem Projekt gewonnen werden konnten. Wir haben uns dazu entschlossen eine offene Aufzugskabinenecke darzustellen, die gut einsehbar ist. Boden und Decke, welche im Projekt nicht untersucht wurden, werden dabei nur symbolisch in Holz ausgeführt. Die Grundkonstruktion der Wände besteht aus den in Anwendungsfall 2 entwickelten Wandlamellen. Eine Seite wird aus Dekorativen Wandlamellen in Edelstahloptik ausgeführt.

Die andere Seite wird aus Wandlamellen in Stahl (ohne dekorativen Anspruch) ausgeführt, welche dann zusätzlich mit nachträglich aufgebrachten dekorativen Wandverkleidungen aus unserem Anwendungsfall 1 verkleidet wird.

Des Weiteren wird der in Anwendungsfall 3 entwickelte Handlauf in L-Form über beide Wandflächen montiert (siehe Kapitel 1.2.2.2). Die Aufzugskabinen-Ecke wird auf einer Palette montiert, um einen einfachen und flexiblen Transport zu ermöglichen. So kann der Demonstrator auch einfach zu demonstrativen Zwecken auf Messen oder anderen repräsentativen Events präsentiert werden.



Abbildung 109: Demonstrator Außenecke Blechlamellen



Abbildung 110: Demonstrator Detail Handlauf - Übergang Wandpaneel zu Zierleiste

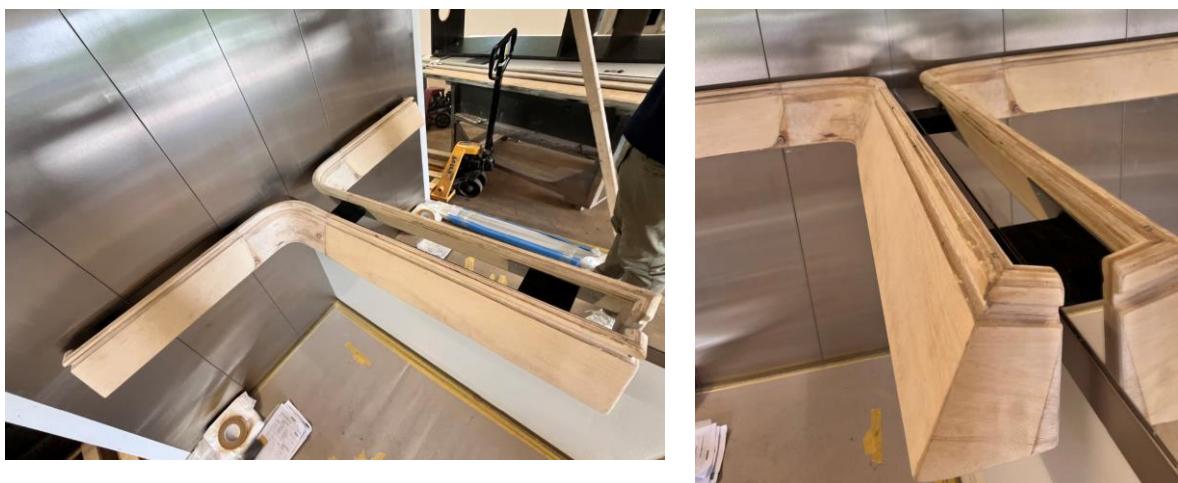


Abbildung 111: Demonstrator - Ansicht Handlauf

Im Zuge der Entwicklung und Herstellung des Aufzugsdemonstrators wurden die Erkenntnisse aus anderen Arbeitspaketen berücksichtig. Allerdings ist hierbei auch klar geworden, dass es noch offene Fragen gibt, die nicht innerhalb des Projektes final geklärt werden konnten.

- Feuchtebeständigkeit
Beobachtung des Systemverhaltens bei hoher Luftfeuchtigkeit; Bedarf an zusätzlichen Schutzmaßnahmen evaluieren. Ergebnisse aus Klimawechseltest detailliert aufarbeiten und einbeziehen.
- Brandschutz
Sicherstellung der erforderlichen Anforderungen nach DIN EN 81-20 der Brandschutzklassifizierung nach EN 13501-1; Vortests waren vielversprechend (siehe Kapitel 1.3.7). Für eine Markteinführung sind aber weitere Planungen und Zertifizierungen erforderlich. Diese müssen aber speziell auf die jeweiligen Systeme in Abstimmung mit den jeweiligen Aufzugsherstellern abgestimmt sein.
- Vandalismusschutz (EN 81-71)
Prüfung der Relevanz und Machbarkeit eines Vandalismusschutzes für spezifische Einsatzbereiche.
- Langzeitverhalten & Reparaturfähigkeit
Analyse der Materialbeständigkeit und Auswirkungen von Gebrauchsspuren auf Funktion und Erscheinungsbild. Bei den Konstruktionen der einzelnen Anwendungsfälle wurde darauf geachtet, dass die Montage möglichst ähnlich den bereits etablierten Systemen am Markt ausgeführt werden kann und der Monteur auf vertraute Montageprozesse zurückgreifen kann. Auch wurde darauf geachtet, dass alle Komponenten möglichst einfach zu tauschen sind. Eine finale Bewertung kann aber nur in konkreten, realistischen Situationen erfolgen.
- Produktionsaufwand
Für die Herstellung des Demonstrators war die Herstellung der einzelnen Komponenten noch sehr handwerklich und aufwändig. Hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Automatisierungspotenzial in Serie müssen die Fertigungsprozesse noch weiterentwickelt werden.
- Recyclingfähigkeit & Nachhaltigkeit
Langfristige Betrachtung der Materialtrennung und Auswirkungen auf die Ökobilanz müssen noch untersucht werden.

1.5.3 Nutzfahrzeugaufbauten

Im Anwendungsfall Nutzfahrzeugaufbauten wurde Albasia als Kernwerkstoff für Sandwichmaterialien untersucht, die in den Wänden der Güter- und Frischekapsel des

Konzeptfahrzeugs U-Shift zum Einsatz kommen sollten. Dazu wurde im Rahmen einer begleitenden studentischen Arbeit am DLR ein umfassendes Anforderungsprofil an die Güterkapsel in Holzbauweise erstellt. Daraus leiten sich die Anforderungen an die Wand, wie beispielsweise mechanische Belastungen aus der Gesamtstruktur sowie notwendige Anforderungen an die Ladungssicherung ab. Zusätzlich wurden Möglichkeiten der Eckverbindungen von Wandsegmenten erarbeitet. Aus den Konzepten und Anforderungen wurde eine Sandwichbauweise definiert, bei der der Kern aus Formholzteilen aus Albasia-Furnier besteht und die Decklagen aus Buchensperrholz und Aluminiumblech. Die Formholzteile wurden in enger Zusammenarbeit mit Projektpartner Kiess ausgelegt und hergestellt. Dafür wurden Pressformen für ein dreilagiges Albasia-Formholzteil konstruiert und damit die Formholz-Hutprofile hergestellt. Die Formholz-Hutprofile wurden aneinander geleimt um ein Wandsegment aufzubauen. Die Formholz-Hutprofile wurden anschließend mit Buche-Sperrholzplatten und Aluminiumblech beplankt. Die Eckverbindung erfolgte über gefräste Sperrholzplanken. Der Demonstrator zeigt, dass die Wandsegmente in Holzbauweise aufgebaut werden können. Die Untersuchungen zu Fügeelementen in Albasia-Platten hat gezeigt, dass aufgrund der Mikrostruktur von Albasia Fügelemente wie Schrauben oder Gewindemuffen keinen ausreichend Halt im Holz haben. Daher ist insbesondere für die Ladungssicherung zusätzliche Elemente in den Wandsegmenten erforderlich. Durch die Geometrie der Formholzteile können jedoch an den entsprechenden Positionen Verstärkungselemente eingebracht werden, in die Fügeelemente für Ladungssicherung befestigt werden können. Allerdings erweist sich die Herstellung der Wandsegmente als aufwändig, da die Formholz-Hutprofile einzeln in einem Pressprozess hergestellt werden müssen und anschließend zu flächigen Segmenten verleimt werden müssen. In einem geplanten Forschungsprojekt mit Beteiligung des DLR ist geplant, einen industriellen Herstellungsprozess für Formholzteile zu entwickeln.

Für eine Anwendung als Frischekapsel ist die thermische Isolation der Wandsegmente eine wichtige Anforderung. Die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten hat gezeigt, dass das Wandsegment, das untersucht wurde, noch einen zu hohen Durchgangskoeffizienten für die Nutzung in einer Frischekapsel aufweist. Um den geforderten Wärmedurchgangskoeffizienten von etwa $U = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ zu erreichen, ist eine Erhöhung der Materialstärke auf 80 mm im Wandsegment erforderlich. Zusätzlich sollten die Hohlräume mit einem Dämmmaterial gefüllt werden (beispielsweise Holzwolle)

1.6 Life Cycle Analysis of Albasia in the SuMatHrA project

1.6.1 Phase 1: Comparative LCA of Indonesian vs. German Production

1.6.1.1 Introduction

Human activity today shapes the planet more profoundly than any other natural force. As the global population is projected to rise to nearly 11 billion by the year 2100 [18, 19], increasing consumption of resources will place growing pressure on the environment [20]. One of the most pressing concerns is the impact of greenhouse gas emissions, primarily CO₂, which are accelerating anthropogenic climate change and warming the planet [21].

In response, industries and governments are turning their focus to renewable materials that can help reduce environmental burdens [22]. Among these, wood-based materials are especially promising due to their ability to store carbon during growth, their renewability, and their mechanical performance [23]. One such material is derived from the fast-growing Albasia tree (*Paraserianthes falcataria*), whose lightweight and strong timber makes it suitable for a wide range of industrial uses [24].

1.6.1.2 The SuMatHrA Project

The SuMatHrA project (“Substitution konventioneller Materialien für den Leichtbau durch Holz-Hybride auf Basis von Albasiaholz”) aims to explore the potential of Albasia plywood as a sustainable alternative to conventional materials in lightweight structural applications — including vehicles, elevators, and mobile homes. A key component of this initiative is a comprehensive Life Cycle Assessment (LCA) conducted by Fairventures. The LCA is structured in two phases:

1. Phase One: Comparative Production Assessment

This report (LCA part) begins by evaluating the environmental impacts of Albasia plywood production in Indonesia, where the timber originates and is initially processed, and Germany, where it could potentially be further processed or even locally manufactured using imported raw materials.

2. Phase Two: Material Substitution Study

Based on the outcomes of the production comparison, the second phase will investigate the environmental benefits of substituting aluminum with Albasia plywood in key lightweight applications.

1.6.1.3 Goal and Scope Definition

Note on Biomass Combustion Modeling: This study applies the 0/0 approach for internal biomass combustion (BC), in line with standard LCA practice and EN 15804 [25]. When wood

waste from plywood production is used internally for process heat (e.g., veneer drying or hot pressing), it is modeled without additional environmental burdens (zero input) and without energy credits (zero output) [26].

1.6.1.4 Goal of the Study

The primary goal of this Life Cycle Assessment (LCA) is to evaluate and compare the environmental impacts of Albasia plywood production in Indonesia and Germany. The assessment aims to determine which production route offers greater environmental efficiency in terms of greenhouse gas emissions, energy and resource consumption, transportation burden, and waste handling.

These findings will support strategic decisions in the SuMatHrA project and form the foundation for evaluating the substitution potential of Albasia plywood for aluminum in lightweight applications.

The LCA methodology follows the international standards ISO 14040 and ISO 14044 for Life Cycle Assessment [27] [28]. In addition, this study aligns with the requirements of the Product Category Rules (PCR) defined in DIN EN 15804, which standardizes the environmental declaration of construction products and provides rules for defining the functional unit, system boundaries, data quality, and impact assessment categories [25].

1.6.1.5 Scope of the Study

Functional Unit: *The functional unit for this assessment is defined as 1 cubic meter (1 m³) of finished Albasia plywood, suitable for structural or semi-structural use.* This corresponds to:

- A nominal thickness of 12 mm
- Density of approximately 350-450 kg/m³
- Surface-sanded, ready-to-use plywood panel
- Moisture content of 8-12%
- Compliant with industrial quality standards for use in interior lightweight structural applications (e.g., EN 636)

This definition is aligned with the PCR requirements outlined in DIN EN 15804, ensuring consistency and comparability of results with Environmental Product Declarations (EPDs) for similar construction materials [25].

System Boundaries: This study adopts a cradle-to-grave perspective. It includes all life cycle stages from raw material extraction and manufacturing through to the end-of-life treatment. In both scenarios (Indonesian and German production), the end-of-life stage is modeled to take

place in Germany, where the product is assumed to be used and ultimately disposed of or recycled.

The end-of-life analysis includes a comparison of two common treatment scenarios:

- **Recycling**, where plywood waste is reused in other wood-based products or materials.
- **Incineration with energy recovery** (waste-to-energy), where plywood is burned to produce heat and/or electricity, with associated emissions accounted for.

The system is organized according to DIN EN 15804 [25] life cycle modules:

- **A1–A3 (Product Stage)**: Raw material supply (nursery, plantation, harvesting), transport, and manufacturing of plywood
- **A4 (Transport)**: Shipment from Indonesia to Europe (to Port of Antwerp) and further to Germany (Stuttgart)
- **A5 (Construction/Installation Stage)**: Not included (installation impacts are assumed negligible or identical in both scenarios)
- **B1–B7 (Use Stage)**: Use phase is modeled generically, assuming similar behavior and durability
- **C1–C4 (End-of-Life Stage)**: Demolition/deconstruction, transport, recycling (C3), and incineration with energy recovery (C4)
- **D (Benefits and Loads Beyond the System Boundary)**: Included for recycling and energy recovery credits

1.6.1.6 System Boundaries: Included Life Cycle Stages

Abbildung 112 and Abbildung 113 illustrate the life cycle processes for System A (Indonesian production) and System B (German production using Indonesian veneer). Each diagram outlines the material flows, energy inputs, transport steps, and end-of-life pathways, structured according to EN 15804 modules [25]. The key difference is that System B shifts final plywood processing to Germany, introducing additional energy inputs and recycling outputs.

System A

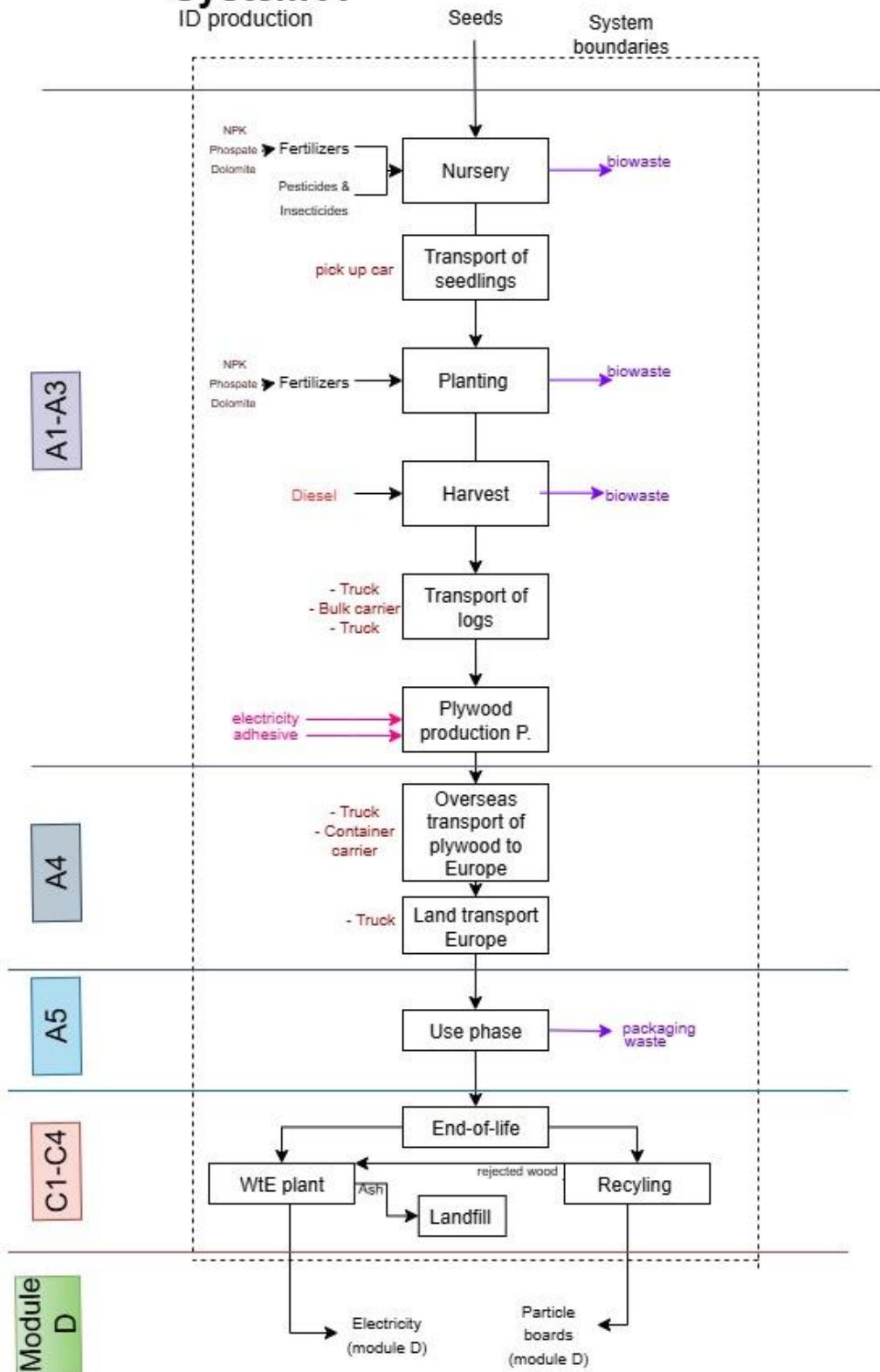


Abbildung 112: System boundaries and process flow for System A (Indonesian production)

System B

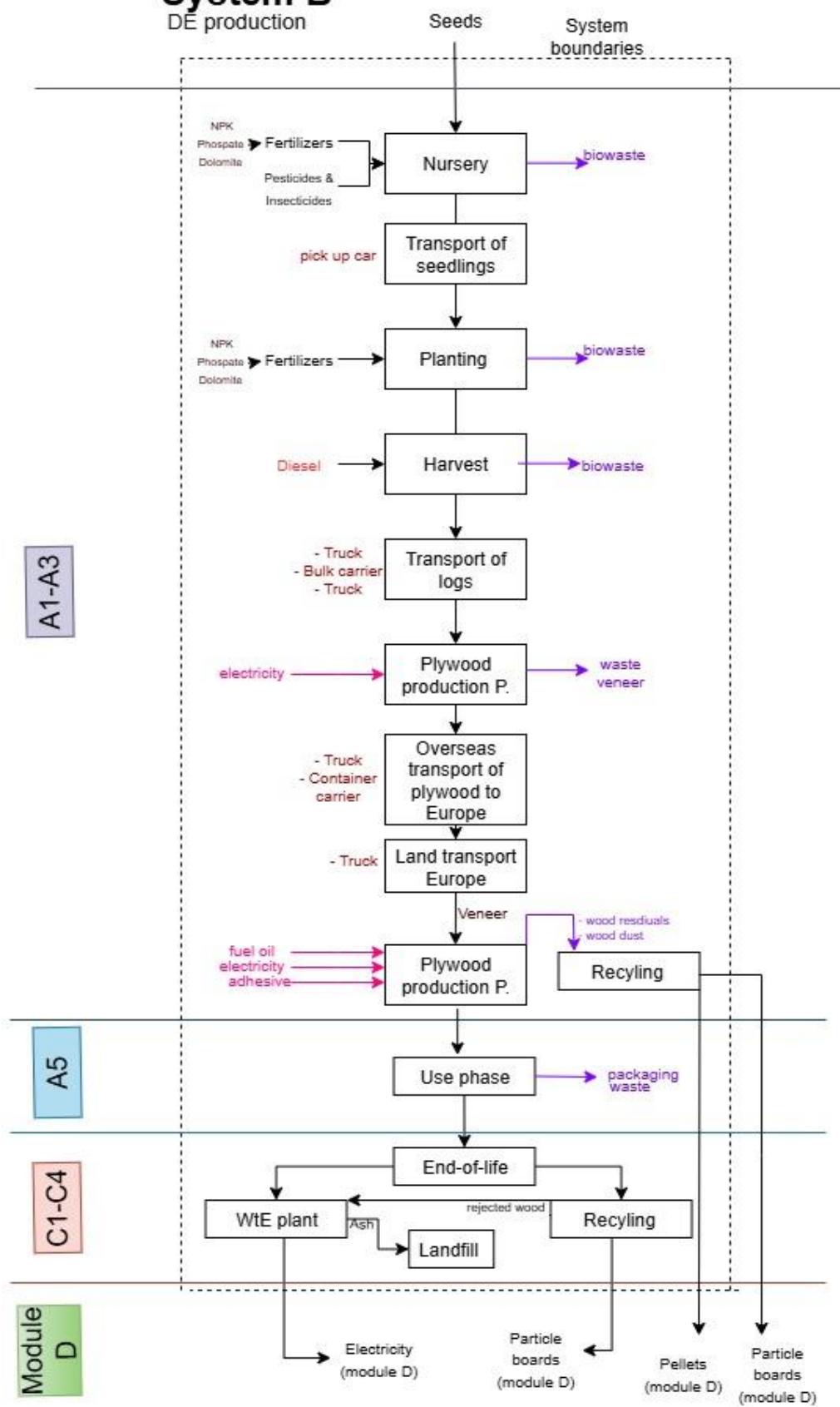


Abbildung 113: System boundaries and process flow for System B (German production)

1.6.1.7 System A – Production in Indonesia

The following life cycle stages reflect the cradle-to-grave production route of Albasia plywood manufactured entirely in Indonesia, including transport to Germany and end-of-life treatment (Tabelle 23). A separate system is defined below for production based in Germany (System B) in both cases the cradle-to-grave approach.

Tabelle 23: Description of process steps in A: ID production

Life Cycle Stage	Processes Included
Nursery	Germination, seedling growth (managed by Fairventures Worldwide)
Planting & Growing	Field prep, fertilization (Dolomite, Rock Phosphate, NPK), maintenance, thinning
Harvesting	Tree cutting (chainsaw), tractor haul to road, truck transport to port
Plywood Production	Log handling, peeling, drying (waste-wood fueled), veneer repair, glueing, pressing, sizing, sanding, repair, packaging
Transport (Indonesia)	Nursery → field (25 km), forest → road (9 km), road → Sampit port (294 km)
Transport (Java)	Sampit → Surabaya (ship, 665 km), Surabaya → factory (126 km), veneer repair (8 km)
Export Transport to EU	Surabaya Port → Port of Antwerp (sea freight, approx. 19,300 km)
Transport to Germany	Port of Antwerp → Stuttgart (truck, approx. 550 km)
Use Phase	Use in lightweight construction applications (assumed same for both scenarios)
End-of-Life (Germany)	Recycling and incineration (waste-to-energy) in Germany

1.6.1.8 System B – Production in Germany

System B (Tabelle 24) shares the same processes as System A from nursery up to veneer production (including harvesting and veneer peeling). After this point, the semi-finished veneer is exported:

Tabelle 24: Description of process steps in System B: DE production

Life Cycle Stage	Processes Included
Nursery to Veneer	Same as System A (up to and including veneer production in Java, Indonesia)
Transport Germany	to Surabaya Port → Port of Antwerp (sea freight, approx. 19,300 km)
Plywood Finishing (DE)	Glueing, pressing, drying, sanding, sizing, repair, packaging in Neugersdorf
Use Phase	Use in lightweight construction applications (same as System A)
End-of-Life (Germany)	Recycling and incineration (waste-to-energy) in Germany

Geographical Scope:

- Indonesia (native production site)
- Germany (potential processing site and location of end-of-life)

Temporal Scope: Data reflect 2023–2024 technologies and market conditions.

1.6.1.9 Allocation

Allocation was addressed in accordance with ISO 14044 [28]. Two distinct modeling situations were considered:

1. **Internal Energy Recovery (System A):**
 Wood waste generated during plywood production (e.g., bark, trimmings, offcuts) was combusted on-site to produce steam used internally for veneer drying and pressing. This internal energy loop was treated entirely within the system boundary, and no allocation was applied to the wood waste or the internally consumed steam. Emissions from combustion were fully included in the inventory. Biogenic CO₂ was treated as neutral and was therefore neither reported as an input nor as an emission in the Global Warming Potential (GWP) impact category, following the 0/0 approach [26]. Non-CO₂ emissions (e.g., CH₄, N₂O) from biomass combustion were included in the GWP category. End-of-life energy and material recovery processes are modeled separately and reported in Modules C and D.

2. **Co-product Allocation and End-of-Life Benefits (System B):**

Where co-products were generated—such as sawdust used for pellet production and wood residues used in particle board manufacturing—environmental burdens were

allocated among all outputs using a mass-based method in accordance with ISO 14044 and EN 15804 [28] [25]. The proportional share of impacts from the plywood production process was assigned to the main product (plywood) and to the co-products (pellets and Particle boards). In line with attributional LCA principles, no substitution or system expansion was applied within the core life cycle modules (A1–C3) [29]. However, potential environmental benefits beyond the system boundary—such as the use of co-products in downstream systems and the energy or material recovery at end-of-life—are reported in Module D, as credits for the displacement of equivalent virgin materials or grid energy [25].

1.6.1.10 Life Cycle Inventory (LCI)

This section documents the quantified inputs and outputs for each process within the systems studied, based on primary and secondary data collection. The inventory includes material and energy use, emissions, and transport activities associated with the life cycle stages defined in the system boundaries for both System A and System B.

Data Collection Strategy

Primary data were collected directly for nearly all process steps except for transportation. Specifically, data were obtained from:

- **Nursery, planting, and harvesting operations** – fully managed and monitored by Fairventures Worldwide (Indonesia Office). These data are considered highly reliable due to direct operational control.
- **Plywood production** – for System A, data were gathered onsite at a private production facility in East Java, Indonesia, with permission granted for direct measurement and observation. For System B, veneer finishing and plywood manufacturing data were collected at the Broszeit facility in Neugersdorf, Germany, where similar access was provided.

These datasets were personally collected by LCA practitioners from Fairventures, who visited all operational locations involved in both systems.

Secondary data were used exclusively for transportation stages, drawn from the Ecoinvent database to ensure consistency, reliability, and comparability across all modes of transport (road, sea).

All data were quality-checked and cross-referenced where applicable to ensure temporal and geographic representativeness (2022–2023).

Indonesian Production

This section provides the detailed life cycle inventory (LCI) for System A – Indonesian production, including material and energy inputs per functional unit (1 m³ of Albasia plywood) in Tabelle 25.

Tabelle 25: Material and energy inputs in System A: ID production

Process Step	Input Material or Energy	Quantity per 1 m³ of Plywood
Nursery	Seeds	4 pcs
	Coco Husk	1.90E-01 kg
	Humic Acid	4.00E-05 kg
	Rock Phosphate	7.00E-04 kg
	Control Fertiliser	8.70E-04 kg
	Fungicide	2.00E-05 kg
	Insectoids	4.00E-06 kg
	Diesel	3.36E-04 kg
Planting	Petrol	4.50E-03 kg
	Seedlings	4 pcs
	Rock Phosphate	2.80E-01 kg
	Dolomite Fertiliser	1.16E+00 kg
	NPK Fertiliser	9.20E-01 kg
	Diesel	2.80E-01 kg
Harvesting	Petrol	3.20E-01 kg
	Trees ready for harvest	4 pcs
	Petrol	9.98E-01 kg
Plywood production plant	Diesel	1.02E+00 kg
	Logs	3.20E+00/ 1.92E+00 Pcs / m ³
	Diesel	2.13E+00 kg
	Electricity	2.19E+02 kWh
	Adhesive	1.00E+02
	Repaired veneer	1.60E-01 m ³

Wood putty	3.36E+00 kg
Wooden pallets	5.60E-02 m ³
Plywood for packaging	3.20E-02 m ³
Plastic strap	5.28E-01 kg
Plastic wrap	2.92E-01 kg

The following Tabelle 26 summarizes the primary waste streams generated during the life cycle of 1 m³ of Albasia plywood, including their type and estimated quantity in the Indonesian production system. Waste flows are either internally treated (e.g., combustion for heat), sent for external recovery (e.g., recycling or energy recovery), or disposed of through appropriate waste management channels in accordance with regional practices.

Tabelle 26: Waste streams in System A: ID production

Process Step	Output Waste Material	Quantity per 1 m ³ of Plywood
Nursery	Plastic waste	2.00E-01 kg
	Biowaste	4.80E-03 kg
Planting	Plastic waste	1.60E-02 kg
Plywood production	Waste veneer	5.76E+01 kg
	Wood residuals	1.75E+02 kg
	Wood dust	2.00E+02 kg

German Production

This section provides the detailed life cycle inventory (LCI) for System B – German production, including material and energy inputs per functional unit (1 m³ of Albasia plywood) (Tabelle 27). The inputs and quantities for Nursery, Planting and Harvesting, are the same as in System A - Indonesian production (Tabelle 25).

Tabelle 27: Material and energy inputs in System B: DE production

Process Step	Input Material or Energy	Quantity per 1 m ³ of Plywood
--------------	--------------------------	--

Plywood production plant (veneer production)	Logs	3.20E+00 / 1.92E+00 Pcs / m3
	Diesel	2.13E+00 kg
	Electricity	4.67E+01 kWh
Plywood production plant	Veneer	1.10E+00 m3
	Adhesive	1.00E+02 kg
	Fuel oil	4.93E+00 kg
	Steam	1.50E+02 MJ
	Electricity	5.43E+00 kWh
	Wood putty	1.70E-01 kg

The following Tabelle 28 summarizes the primary waste streams generated during the production of Albasia plywood, including their type, estimated quantity, and destination in the German production system. The upstream waste is same as in System A and its present in Tabelle 26, same is for use phase and EoL phase.

Tabelle 28: Waste streams in System B: DE production

Process Step	Output Waste Material	Quantity per 1 m ³ of Plywood
Plywood production plant (veneer production)	Waste veneer	6.30E+01 kg
	Bark	4.70E+01
Plywood production plant	Wood residuals	1.40E+01
	Wood dust	2.89E+01
	Waste veneer	4.30E+01

Transportation and Logistics

Transportation plays a significant role in the life cycle of Albasia plywood, particularly in scenarios involving international supply chains. This section presents the key transport processes for both System A (Indonesian production) and System B (German processing), including distances, modes of transport (road, sea, and internal logistics), and estimated cargo weights. All transport activities are modeled per functional unit (1 m³ of plywood), with background data sourced from the Ecoinvent 3.9.1 database [30]. The calculation of

environmental impacts considers total distance, load capacity, vehicle type, and utilization rate. For both systems, transport routes are identical up to the delivery of logs to the production facility in East Java, Indonesia. The specific transport distances and cargo weights for each route are detailed in the tables below. In **System A**, seedlings are delivered from the nursery to planting fields using pickup trucks. Once the trees are harvested, small vehicles transport logs from the forest to the nearest accessible road, where they are then loaded onto larger trucks for the journey to Sampit port in South Kalimantan. From there, the logs are shipped via bulk cargo to Surabaya port and transported by truck to the plywood production facility in East Java. During production, some veneer sheets are rejected due to imperfections and sent to local communities for repair — this step involves short-distance trips with small trucks. Once finalized, the plywood is transported by truck back to Surabaya port, exported by sea freight to Antwerp, and then trucked to Stuttgart for distribution. The details regarding transportation and logistics are provided in Tabelle 29.

Tabelle 29: Transportation and logistics in System B

Process Step	Distance (km)	Weight (kg)	Type of transport
Transport of seedlings	2.50E+01	1.20E-03	Pickup car
Log sourcing from forest	9.00E+00	8.40E-01	Small truck (3.5–7 tons)
Transport of logs to Sampit port (Kalimantan)	2.94E+02	8.40E-01	Big truck (7–16 tons)
Transport of logs to Surabaya port (East Java)	6.67E+02	8.40E-01	Sea freight (Bulk Cargo Transport)
Transport of logs to plywood production plant (East Java)	1.26E+02	8.40E-01	Big truck (7–16 tons)
Transport of waste veneer to local community and back to factory	8.00E+00	4.68E-02	Small truck (3.5–7 tons)
Transport of plywood to Surabaya port	1.26E+02	3.51E-01	Big truck (7–16 tons)
Transport of plywood to Antwerp (plywood)	1.85E+04	3.50E-01	Sea freight (Containerized Cargo)
Transport of plywood to Stuttgart (Germany)	5.54E+02	3.50E-01	Big truck (7–16 tons)

In System B, transport follows the same initial flow up to veneer production in East Java. Instead of continuing full plywood processing locally, the semi-finished veneer is exported via sea freight from Surabaya to Antwerp, and then transported by truck to a plywood finishing plant in Neugersdorf, Germany (Broszeit). After final processing, the product is assumed to be distributed for use and eventually enters the same end-of-life treatment pathways as in System A. The details regarding transportation and logistics are provided in Tabelle 30.

Tabelle 30: Transportation and logistic in System A

Process Step	Distance (km)	Weight (kg)	Type of transport
Transport of veneer to Surabaya port	1.26E+02	3.85E-01	Small truck (3.5–7 tons)
Transport of veneer to Antwerp (plywood)	1.85E+04	3.85E-01	Sea freight (Containerized Cargo)
Transport of veneer to Neugersdorf (Germany)	8.65E+02	3.85E-01	Big truck (7–16 tons)

End-of-Life Modeling

The end-of-life (EoL) stage for Albasia plywood is modeled based on standard treatment practices in Germany, where the product is assumed to be disposed of after its use phase. Two primary treatment scenarios are included in the model:

- **Recycling (Module C3):** Plywood waste is mechanically processed into secondary wood material (e.g., chips or fibers) for reuse in composite wood products. The process includes collection, transport to a recycling facility, and shredding/sorting operations.
- **Energy Recovery (Module C4):** Plywood waste that is not suitable for recycling is sent to municipal waste-to-energy plants for incineration. Emissions from combustion are accounted for, and energy recovery is modeled based on average German plant efficiency.

For both scenarios, the modeling includes upstream activities such as **collection from the user, transport to treatment sites, and preprocessing steps**. Process-specific inputs (e.g., electricity, diesel) and outputs (e.g., emissions, recovered materials or energy) are accounted for using background data from Ecoinvent 3.9.1 [30]. Environmental credits for material and energy recovery are calculated under **Module D**. These credits reflect the **avoided production** of equivalent virgin materials (e.g., particleboard feedstock) or energy (e.g.,

German grid electricity). No direct impact values are reported in this section — they are presented in Section 5 (LCIA Results).

1.6.1.11 Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Impact Assessment Methodology

This study applies the ReCiPe 2016 Midpoint (H) method, focusing specifically on the Climate Change impact category, which corresponds to the Global Warming Potential over a 100-year time horizon (GWP100). All results are reported in kilograms of CO₂-equivalents (kg CO₂-eq) [31].

The assessment was conducted using OpenLCA software [32] in combination with the Ecoinvent v3.9.1 database [30]. ReCiPe 2016 was selected due to its scientific robustness, wide adoption in environmental assessments, and compatibility with EN 15804+A2 requirements.

The Climate Change category was chosen as the central impact focus of this study due to its high relevance for the SuMatHrA project's goal of reducing carbon emissions in lightweight construction. Other midpoint indicators were not assessed, as the study's scope is targeted toward evaluating greenhouse gas emissions in comparative production scenarios.

No normalization or weighting has been applied in accordance with ISO 14044 [27], ensuring that raw indicator results are used for interpretation.

Biogenic Carbon Content

The biogenic carbon content of 1 m³ of Albasia plywood is estimated at approximately **544 kg CO₂-equivalents**. This value reflects the carbon absorbed and stored in the biomass during the growth phase of the Albasia tree (*Paraserianthes falcataria*).

The calculation was performed in accordance with **EN 16449:2014** [33], which provides the methodology for determining biogenic carbon content based on the carbon fraction of dry wood mass. A carbon content of 50% (dry mass basis) was used, and the result was converted to CO₂-equivalents using the molar mass ratio (44/12). Wood density values used in the calculation were based on project-specific measurements of Albasia plywood.

Although biogenic CO₂ uptake is not included as a credit in the Climate Change impact category (GWP100) under the ReCiPe 2016 method, this value is reported separately in line with **EN 15804+A2** requirements for transparent reporting in Environmental Product Declarations (EPDs) [25].

LCIA Results Summary

The climate change impact results (expressed as Global Warming Potential over 100 years, GWP100) were calculated for both production systems using the ReCiPe 2016 Midpoint (H) [31] method with data sourced from the Ecoinvent 3.9 database [30]. The functional unit is 1 m³ of plywood, equivalent to approximately 350 kg. The results are presented below in Tabelle 31 and Tabelle 32 for ID production (System A) and DE production (System B), respectively.

System A – Indonesian Production

Tabelle 31: The LCIA results for System A - ID production

Product Stage	Kg CO2 eq	Note
A1–A3	5.94E+02	Cradle-to-gate
A4	1.03E+02	Transport to Europe
A5	2.64E+00	Installation (packing waste)
End-of-Life		
Energy recovery scenario		Incineration
C2	8.75E+00	Transport
C3	8.72E+00	Processing
C4	1.50E-01	Disposal
Total A1-C4	7.17E+02	Cradle-to-grave
Module D	- 1.12E+02	Credits (benefits of energy recovery)
Net Value	6.05E+02	Credits deducted from total burden (A1-C4)
Material recovery scenario		Recycling
C2	8.75E+00	Transport
C3	1.75E+01	Processing
C4	1.20E+00	Disposal
Total A1-C4	7.27E+02	
Module D	-2.54E+02	Credits (benefits of material recovery)
Net Value	4.73E+02	Credits deducted from total burden (A1-C4)

System B – German Production (based on Indonesian veneer)

Tabelle 32: The LCIA results for System B - DE production

Product Stage	Kg CO2 eq	Note
A1–A3	4.82E+02	Cradle-to-gate
A5	2.64E+00	Installation (packing waste)
End-of-Life (same scenarios as in System A)		
Total A1-C4 (Energy recovery)	5.02E+02	Cradle-to-grave
Net Value (Energy recovery)	3.90E+02	Credits deducted from total burden (A1-C4)
Total A1-C4 (Material recovery)		
	5.12E+02	Cradle-to-grave
Net Value (Material recovery)	2.58E+02	Credits deducted from total burden (A1-C4)

Comparison

1. Cradle-to-Gate Emissions (A1–A3):

- **System A:** 594 kg CO₂ eq (includes local raw material extraction and Indonesian manufacturing)
- **System B:** 482 kg CO₂ eq (includes Indonesian veneer production **plus** overseas transport to Germany and manufacturing in Germany)

2. Transport (A4)

- **System A only:** 1.03E+02 kg CO₂ eq (in System B oversea transport is part of A1-A3 phase)

3. Installation (A5):

- **Both systems:** 2.64E+00 kg CO₂ eq (Identical emissions from installation and packing waste handling)

4. End-of-Life Stages (C2–C4): (Identical for both systems)

Tabelle 33: The LIA result for for EoL phase

Scenario	C2 (Transport)	C3 (Processing)	C4 (Disposal)	Total C2–C4
Energy Recovery	8.75E+00	8.72E+00	1.50E–01	1.80E+01
Material Recovery	8.75E+00	1.75E+01	1.20E+00	2.77E+01

5. Module D (Credits Beyond System Boundary) (Identical for both systems)

Tabelle 34: Avoided environmental impacts from the recycling and energy recovery

Scenario	Module D (kg CO ₂ eq)
Energy Recovery	-1.12E+02
Material Recovery	-2.54E+02

6. Net Climate Impact (A1–C4 + Module D):

Tabelle 35: Total environmental impact of the system after subtracting the benefits gained from end-of-life recovery (recycling or energy recovery)

Scenario	System A (kg CO ₂ eq)	System B (kg CO ₂ eq)
Energy Recovery	6.05E+02	3.90E+02
Material Recovery	4.73E+02	2.58E+02

1.6.1.12 Interpretation of Results

The comparative analysis of System A (Indonesian production) and System B (German production using Indonesian veneer) reveals meaningful differences in environmental performance, primarily driven by the location and stage of production, and the type of transport involved.

1.6.1.13 Cradle-to-gate Performance (A1–A3)

The cradle-to-gate phase shows the most substantial difference in climate impact between the two systems. **System A** (Indonesian production) results in **594 kg CO₂ eq**, while **System B** (German production using Indonesian veneer) produces a lower impact of **482 kg CO₂ eq**.

This **nearly 19% reduction** is significant, especially considering both systems involve complex upstream transport and processing chains.

Transport Within A1–A3:

Both systems include extensive raw material transport:

- In **System A**, raw logs are sourced using multiple truck trips and are then shipped overseas from South Kalimantan to East Java before processing. These operations contribute notably to fossil fuel emissions.
- **System B** shares a similar transport profile in its veneer production phase. Logs are transported by trucks and veneer is shipped overseas from Indonesia to Germany, which is **already included in A1–A3**. However, the final production occurs in Germany, closer to the European market.

Despite these similar transport burdens, **System B still performs better**, indicating other dominating factors.

Electricity Consumption and Energy Efficiency

The most striking contributor to System A's higher impact is its **extremely high electricity use**:

- **System A** consumes **218.7 kWh of electricity per 1 m³** of plywood.
- **System B** uses only **72.4 kWh per 1 m³**, nearly **three times less**.

This dramatic difference is likely due to:

- Less efficient or older production technology in the Indonesian plant.
- Reliance on **carbon-intensive grid electricity** in Indonesia, where coal remains a significant source (more than 95%).
- Lower process automation or energy recovery systems compared to European standards.

In contrast, German production benefits from:

- **A cleaner, more decarbonized grid**, with higher penetration of renewables.
- **Energy-optimized processes**, possibly with better insulation, heat reuse, or digital control systems.
- Likely compliance with stricter industrial energy standards or certifications.

Conclusion for A1–A3

Although both systems share similarly complex and emission-intensive logistics for log and veneer transport, the substantial electricity consumption in System A's production process is the dominant contributor to its higher environmental impact. System B's advantage lies not in having less transport but in having a significantly more efficient, lower-emission production system.

1.6.1.14 Transport Impacts (A4)

- System A (Finished Product Transport – A4): $\approx 77.8 \text{ kg CO}_2$
- System B (Veneer Transport – Part of A1–A3): $\approx 103.6 \text{ kg CO}_2$

Despite shipping a lighter **semi-finished product (veneer)**, **System B accumulates higher transport emissions** due to:

- More complex inland logistics (e.g., multiple truck legs from Antwerp to Brosezit),
- Veneer having a **lower weight per m³** than finished plywood, but being shipped over the same ocean distance.

This shows that:

- **The shipping method alone isn't enough to reduce transport emissions** — the entire **logistics chain** matters.
- **System A benefits** from a more **direct, simpler shipping route**, even though the product is heavier.
- However, this higher A4 impact in System A must be weighed against its **much higher production emissions** (especially electricity use), which are dominant overall.

1.6.1.15 Unpacking (installation) and End-of-Life (A5, C2–C4)

Both systems have identical A5 phase emissions (2.64 kg CO₂ eq), here the installation process was neglected, but the packaging waste management was included. Because both systems produce the same amount of waste from unpacking the plywood, the A5 stage does not contribute to the differentiation between System A and System B. While small in absolute terms (less than 0.5% of total system emissions), A5 emissions could become more relevant in use-phase-sensitive applications, such as modular construction or reusable assemblies.

The **end-of-life (EoL)** stages (C2: transport to waste facility, C3: processing, and C4: final disposal) are **identical in both systems**, as both are assumed to reach the end of life within the same European region, utilizing the same waste treatment infrastructure.

Two EoL scenarios were modeled:

- **Energy recovery:**

Total impact = 18.0 kg CO₂ eq

This scenario assumes the plywood is incinerated in a facility with energy recovery, resulting in emissions from combustion of residual biomass/glue components but partially offset by electricity or heat production.

- **Material recovery: 27.7 kg CO₂ eq**

This scenario models collection, shredding, and recycling of the wood panel into new material streams (e.g., particleboard, insulation), which involves more processing emissions but also includes a certain percentage of incinerated plywood waste.

The end-of-life emissions (C2–C4) are identical for both systems, reflecting common disposal practices in Europe. In the **energy recovery scenario**, ~336 kg of waste is incinerated, generating ~20.2 kg of bottom ash and resulting in **17.62 kg CO₂ eq**, mainly from transport and incineration processes. In the **material recovery scenario**, 90% of the 350 kg waste stream is recycled, with only 10% incinerated, yet emissions increase to **27.45 kg CO₂ eq** due to the more energy-intensive processing required for recycling. Despite higher direct emissions, material recovery enables greater substitution potential (captured in Module D), which can improve the system's overall environmental performance.

1.6.1.16 Benefits Beyond the System Boundary (Module D)

Module D accounts for the **avoided environmental impacts** from recovered energy or materials at end-of-life, representing benefits “beyond the system boundary.” In the **energy recovery scenario**, incineration of 336 kg of plywood generates heat and electricity, resulting in a credit of **-112 kg CO₂ eq** per m³. In contrast, the **material recovery scenario**, where 90% of the waste is recycled into secondary wood products, yields a substantially higher credit of **-254 kg CO₂ eq**. This difference reflects the greater substitution potential of recycled material (e.g., replacing virgin wood in particleboard) compared to energy generation. These credits significantly reduce the net climate impacts of both systems, with **material recovery offering more than double the environmental benefit** of energy recovery.

USE PHASE: Elevator Case Study

A case study and a set of scenarios were developed to calculate the potential reduction in electricity consumption resulting from lowering the elevator’s weight. This approach provided a structured basis for estimating energy savings, while the detailed assumptions and results are explained in the subsequent sections of the study.

1. Defining case scenario:

Two scenarios are created according to inputs from Alfred Keis, the purpose of these scenarios is to calculate potential energy savings (CO₂ savings) in the use phase of elevator construction. The scenarios differ in material usage, baseline scenario does not induce any albasia plywood materials while other hybrid scenarios include Albasia plywood instead of steel sheet. The reduction in weight between baseline scenario and hybrid scenario is 68%, while the lifting capacity is the same for both cases: **up to 6 people (480 kg)**. The total weight of the cabins is presented in Tabelle 36.

Tabelle 36: Cabins and their weights

Scenario	Total weight of the cabin (kg)
Baseline	146.88
Hybrid	87.26

The elevator structure is used in residential buildings which have 5 floors, furthermore, the electrical engine is used and the mechanism is based on the principle that the motor drives a system of cables and counterweights over a sheave (pulley), this is so called traction elevator system. In this system the counterweight balances the cabin weight, reducing the power needed. Traction elevator systems are the most commonly used in residential buildings, especially mid- and high-rise apartments because they are considered as the most energy- and space-efficient solution available [34] [35].

2. Engine power calculations

Calculating the power required for an elevator motor involves understanding the relationship between force, work, and power [36]. **Force (*F*)**: The force needed to lift the elevator is determined by the combined weight of the cabin and its maximum load. This is calculated using Newton's second law:

$$F = (W_{cabin} + W_{load}) \times g$$

Where:

- W_{cabin} is the weight of the elevator cabin.
- W_{load} is the maximum load capacity.
- g is the acceleration due to gravity ($\approx 9.81 \text{ m/s}^2$)

Work (W): Work is the product of force and distance:

$$W = F \times d$$

Where: d is the distance over which the force is applied.

Power (P): Power is the rate at which work is done:

$$P = \frac{W}{t}$$

Where: t is the time over which the work is done.

This approach is to be adjusted and simplified for elevators because in the context of elevators, especially those with counterweights, the effective force is reduced because the counterweight balances a significant portion of the load [35]. The power required can be approximated by considering the unbalanced load and the desired speed:

$$P = \frac{(W_{cabin} + W_{load} - W_{Counterweight}) \times g \times v}{\eta}$$

Where:

- $W_{Counterweight}$ is the weight of the counterweight.
- v is the elevator's velocity (speed) and its defined as $0.63 \frac{m}{s^2}$.
- η is the system's efficiency (accounting for losses due to friction, etc.) and its defined as **0.8**.

The counterweight in an elevator system plays a critical role in reducing the engine power required to lift and lower the cabin. It balances the weight of the cabin and a portion of its load, allowing the motor to work primarily against the difference in weights rather than the full load [37]. The counterweight is a mass installed on the opposite side of the cabin, typically connected via a rope or chain and a pulley system. The counterweight is generally designed to balance the empty cabin weight plus a percentage of the elevator's load capacity, typically around 40–50% of the maximum load [37]. Therefore, the counterweight is calculated based on following principle:

$$W_{counterweight} = W_{cabin} + (0.4 \times W_{load})$$

The values of counterweight for each material case is presented in Tabelle 37 below.

Tabelle 37: Counterweight

Scenario	Counterweight (kg)
Baseline	339
Hybrid	279

Once when counterweight is determined the power of engine (P) can be calculated. The calculation showed that the engine for different material cases is around 2.23 kW. The same engine power requirements for all cases, despite a 60 kg difference in total weight of the cabin, can be explained by how the counterweight balances the system [36]. Here's the detailed reasoning:

- In case of baseline scenario:

$$F_{effective} = (W_{cabin} + W_{load} - W_{counterweight}) \times g$$

$F_{effective}$ is the net force that the motor must overcome to lift or lower the elevator cabin, accounting for the effects of gravity, the counterweight, and any additional load.

In this particular case $F_{effective}$ is 2825.28 N, with this input it is possible to calculate engine power (P) which is 2224 W or **2.23 kW**.

- In the case of Hybrid scenario: $F_{effective}$ is also 2825.28 N which means that power of engine is the same **2.23 kW**

Despite the difference in the cabin weights (W_{cabin}) in these two scenarios, the **effective force** and motor power remain identical. This happens because the **counterweight** has been adjusted for each cabin to specifically balance the cabin's weight difference [36] To finalise, to run the elevator system in all material cases the engine of **2.23 kW** power is needed.

3. Effective time of elevator usage

When it comes to the time that an elevator will work during its lifespan, it has been calculated on the following principle that the average lifespan of an elevator cabin is 20 years [38] [39]. To calculate the effective time of elevator usage the following assumptions and calculations are made [40] [41]:

- Building:
 - 5 floors
 - Typical residential usage: **4 trips per person per day.**
- Number of resident:
 - Assume 20 apartments with 2 residents each = **40 residents.**
- Rides per day:
 - Total rides per day = 40 people × 4 trips per person = 160 rides/day
- Rides pattern:
 - Assume the average ride distance is **2.5 floors** (typical distribution of trips in a mid-rise building).
- Elevator parameters:
 - Velocity (v) = 0.63 $\frac{m}{s^2}$
 - Floor height= 3 m/floor
 - Efficiency (η) = 0.8
 - Acceleration/Deceleration (a) = 1 $\frac{m}{s^2}$
 - Door operating time = 5 seconds (open + close)
 - Passenger boarding time = 3 seconds

Next step is to calculate the average ride time:

- Acceleration and deceleration time:
 - Time to reach full velocity ($v = 0.63 \frac{m}{s^2}$):

$$t_{accel} = \frac{v}{a} = \frac{0.63}{1} = 0.63 \text{ seconds}$$

Acceleration + deceleration time ($t_{accel/decel}$) = $2 \times 0.63 = 1.26$ seconds

- Constant speed travel time:

- Average distance ride = 2.5 floors \times 3 m/floor = 7.5 m

- During acceleration/deceleration, the elevator covers:

$$d_{accel/decel} = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}(1)(0.63)^2 \approx 0.2\text{m}$$

- Remaining distance for constant speed

$$d_{constant} = 7.5 - 2 \times 0.2 = 7.1 \text{ m}$$

- Time for constant speed travel:

$$t_{constant} = \frac{d_{constant}}{v} = \frac{7.1}{0.63} \approx 11.37 \text{ seconds}$$

- Door operation time:

Door open/close time (t_{doors}) = 5 seconds

- Passenger boarding time:

Passenger time ($t_{passenger}$) = 3 seconds

- Total time ride:

$$t_{ride} = t_{accel/decel} + t_{constant} + t_{doors} + t_{passenger}$$

$$t_{ride} = 1.26 + 11.27 + 5 + 3 \approx 20.53 \text{ seconds}$$

Once when the time of the ride is calculated it is possible to calculate the engine operating time:

- The motor operates only during:

- Acceleration and Deceleration: 1.26 seconds

- Constant Speed Travel: 11.27 seconds

- Total motor operating time:

$$t_{motor} = t_{accel/decel} + t_{constant}$$

$$t_{motor} = 1.26 + 11.27 \approx 12.53 \text{ seconds} (\approx 0.21 \text{ minutes})$$

After time of the engine usage per one ride is calculated the daily engine operation time can be calculated:

- For 160 rides/day:

$$\text{Daily engine operation time} = t_{motor} \times \text{rides/day}$$

$$\text{Daily engine operation time} = 12.53 \times 160 \approx 2004.8 \text{ (or 33.4 minutes)}$$

To calculate the motor operating time during the lifespan (use phase) of elevator cabins we need to multiply the daily motor operating time by the total number of days in the cabin's lifespan.

From previous calculations, daily motor operating time is approximately **33.4 minutes/day**. The lifespan of the cabins is declared as 20 years and it operates **365 days per year**.

- Engine operation time for both cabins:

$$\text{Total operating day} = 20 \times 365 = 7300 \text{ days}$$

$$t_{cabins} = 243820 \text{ minutes}$$

$$t_{cabins} = \frac{243820}{60} \approx 4063h$$

4. Energy usage calculations

Once engine power needed for movement of cabins is calculated together with operation time it is possible to calculate the energy (electricity) usage for each case. The electricity required for elevator operation is presented in the Tabelle 38 below, and it is calculated based on following equation:

$$E = P \times t$$

Where:

E is electricity usage in kWh

P is engine power

t is time of engine operation

Based on this formula energy consumption per trip is calculated and it's **0.0077439 kWh**. However this calculation does not include empty rides. Empty trips (or non-passenger trips) occur when the elevator travels to pick up a passenger or repositions itself for the next call. A realistic assumption for a 5-floor building is 40% empty trips, furthermore, it is suggested that empty rides use around 60% of the energy of the full ride [41]. Therefore, the energy of the empty ride would be **0.0046463 kWh**. The average energy consumption per total trip (including both passenger and empty trips) is calculated on following principle:

$$E_{total\ per\ trip} = (E_{passenger\ ride} \times (1 - \%_{empty\ rides})) + (E_{empty\ ride} \times \%_{empty\ rides})$$

Weighted averages ensure we correctly distribute energy consumption across the actual elevator use pattern [19]. The result is presented in Tabelle 38.

Tabelle 38: Energy usage

<i>Scenario</i>	<i>Per trip (kWh)</i>	<i>During whole use phase (kWh)</i>
Baseline	0.0065048894	7597.71
Hybrid		7597.71

From the table it can be seen that required energy is the same for each case. This is because of the counter weight system which influences that effective mass (effective force and engine power) is the same for all cases [19].

5. Climate change impact

To produce **1 kWh** of electricity in Germany **0.48 kg CO₂ eq** is emitted (17).

Tabelle 39: Climate change impact

<i>Scenario</i>	<i>Kg CO₂ eq per ride</i>	<i>Kg CO₂ eq use phase</i>
Baseline	0.00312235	3625.79
Hybrid		3625.79

6. Discussion

Constant Motor Power Due to the Counterweight System: The elevator's motor power remains the same for all cabin materials because the counterweight system is designed to balance the load. This means that during the steady-state, constant-speed phase, the net weight the motor must lift (cabin + load minus counterweight) is nearly identical across different materials. Consequently, the core power required for lifting is similar regardless of whether the cabin is made of steel, aluminum, or plywood. However, this is true for traction elevators and it would be different output for other elevator systems such as hydraulic and pneumatic systems which do not have a counterweight system.

7. Conclusion

In a counterweight traction elevator where the counterweight is set to the car plus a fixed share of the rated load, the counterweight cancels the influence of cabin mass on running demand; this is standard design practice in the literature and industry guidance [42]. Under the same speed, drive, and control settings, any small deviations arising from frictional effects or efficiency curves are within normal operational scatter and can be treated as negligible for a use-phase comparison—particularly because modern energy methodologies and field studies show that standby/idle typically accounts for a substantial portion of total lift energy, dwarfing minor variations in running energy [37] [43]. Consequently, cabin light-weighting does not deliver use-phase energy or CO₂ benefits in such counterweighted systems; any environmental advantages should be reported in manufacturing and end-of-life stages rather than in the operational electricity use.

1.6.1.17 Overall Environmental Advantage

The comparative life cycle results show that **System B (German production using Indonesian veneer)** consistently outperforms **System A (Indonesian production)** in terms of climate impact. Despite System B having slightly higher transport emissions (103.6 kg CO₂ eq vs. 77.8 kg CO₂ eq), this is outweighed by its significantly lower cradle-to-gate production emissions (**482 kg CO₂ eq vs. 594 kg CO₂ eq**), primarily due to more efficient manufacturing and lower electricity consumption.

When end-of-life credits (Module D) are included, the advantage of System B becomes more pronounced:

Tabelle 40: Overall Environmental performance: an overview

Scenario	System A (kg CO ₂ eq)	System B (kg CO ₂ eq)	% Reduction
----------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------

Energy Recovery	6.05E+02	3.89E+02	36%
Material Recovery	4.73E+02	2.58E+02	45%

This analysis confirms that **System B offers a 36–45% reduction in total climate change impact** (Tabelle 40), depending on the end-of-life scenario. The greatest advantages stem from:

- **Lower energy demand during production,**
- **Avoidance of transporting finished goods,**
- **Higher Module D credits** from material recovery.

These findings strongly support the environmental benefit of **localized, energy-efficient manufacturing**, and favor recovery pathways that prioritize recycling over incineration for maximizing climate benefits.

1.6.1.18 Uncertainties and Limitations

This study is based on representative data and standard LCA methods, but certain limitations should be noted. Transport emissions rely on assumed distances and average emission factors, which may not capture route-specific variations. Electricity consumption is based on measured and reported values, but grid mix fluctuations and process efficiency changes could affect results. End-of-life scenarios reflect idealized recovery rates and uniform regional conditions, which may differ in practice. Additionally, the assessment focuses solely on climate change impacts; other categories such as water use or resource depletion are not addressed here. Despite these limitations, the findings are robust for comparative decision-making and highlight key environmental drivers.

1.6.1.19 Hot-Spot Analysis

Hot-spot analysis in Life Cycle Assessment (LCA) is a method used to identify the stages, processes, or materials within a product system that contribute the most to environmental impacts. It helps prioritize areas for improvement by focusing on where interventions will have the greatest effect on reducing the overall footprint.

System A - Top Process-Level Contributors

1. Plywood production (ID) – 42.24%

- a. The single largest contributor, mainly due to:
1. **Electricity consumption:** 255.4 kg CO₂ eq (from fossil-intensive Indonesian grid).

2. Use of adhesives in manufacturing steps.

2. Adhesive mix – 37.11%

a. Composed of:

1. **Urea-formaldehyde resin: 25.98%**

2. **Melamine-formaldehyde resin: 7.94%**

3. Maize starch and minor additives: 2–3%

b. Adhesive production is highly carbon-intensive and forms the second-largest system hot-spot.

3. After-harvest transport (ID) – 16.52%

a. Mostly from truck transport:

1. 7.5–16 t lorries (14.59%)

2. Ship and other truck categories (combined 2%)

b. Reflects long and logically complex movement of timber within Indonesia before processing.

4. Planting and harvesting – 0.51%

a. Includes nursery operations, NPK fertilizer, diesel, and dolomite use.

b. Minimal compared to industrial processing and transport stages.

5. Plywood for packaging, acrylic filler, diesel for equipment – <3% total

a. Packaging and on-site logistics add marginal emissions.

Key Takeaways

- **Plywood production dominates due to electricity and adhesives, with over 40% contribution.**
- **Electricity and adhesives** are the two largest emission sources, jointly contributing ~67% of total emissions.

System B - Top Process-Level Contributors

1. Plywood production (DE) – 49.24%

- a. This is the single largest contributor, driven by energy use, adhesive production, and machinery.
- b. Within this, **electricity** (9.86%):
 - 1. Despite Germany's relatively low-carbon grid, electricity remains a major contributor due to high consumption during hot pressing and drying.
 - c. **Adhesive mix** (42.00%):
 - 1. **Urea-formaldehyde resin: 29.41%**
 - 2. **Melamine formaldehyde resin: 8.99%**
 - 3. These are highly carbon-intensive chemicals, heavily influencing the climate impact of System B.
 - d. **Diesel – 2.10%**
 - 1. Fuel for trucks and machinery used in logistics.
 - e. **Heat from light fuel oil (for boiler) – 2.90%**
 - 1. Thermal energy production in the German plant also adds to the climate footprint, especially during drying stages.
- 2. **Transport – 21.10%:**
 - a. Overseas and inland transport have a notable impact, even though the transported material (veneer) is lighter than finished plywood.
- 3. **Veneer production (ID) – 10.85%**
 - a. Includes after-harvest and pre-harvest transport, nursery operations, and planting.
 - b. Dominated by Indonesian transport and fuel-related inputs.

Key Takeaways

- **Plywood production stage (DE)** is the dominant phase (>49%), primarily due to energy and adhesive use.
- **Transport** (21%) is also a major contributor and could be optimized by logistics improvements or material efficiency.
- **Adhesives** are the biggest input-level hot-spot (especially urea and melamine resins).

- Electricity and thermal energy remain key contributors despite cleaner energy sources in Germany.
- Fuel (diesel, ship bunker, light fuel oil) remains a critical background contributor across both continents.

Hot-Spot Comparison of System A and System B

The hot-spot analysis reveals clear differences in the environmental profiles of the two systems. In **System A (Indonesian production)**, the dominant contributors are **electricity consumption** (25.5%) and **adhesive production** (37.1%), together accounting for over 62% of total emissions. This is driven by high energy demand (218.7 kWh/m³) and a fossil-fuel-intensive grid. Additionally, **after-harvest transport** contributes 16.5%, reflecting the complex, truck-heavy logistics within Indonesia.

In contrast, **System B (German production)** exhibits a more balanced profile. While **adhesive mix** remains the largest single contributor (42%), the **electricity share is significantly lower** (9.9%), due to lower energy use (72.4 kWh/m³) and a cleaner grid. Transport contributes 21%, higher than in System A, but is offset by more efficient production. Notably, System B has **lower total emissions in the production phase** despite additional veneer transport, highlighting the benefit of energy-efficient, regionally cleaner manufacturing processes.

Regarding **end-of-life (EoL)**, both systems follow identical scenarios, resulting in similar direct emissions (17.6 kg CO₂ eq for energy recovery, 27.5 kg CO₂ eq for material recovery). However, **System B benefits more from Module D credits**, especially under material recovery (-254 kg CO₂ eq), leading to a greater overall reduction in net impact. This highlights the combined advantage of efficient production and circular design strategies in System B.

Overall, **System A is more emission-intensive due to inefficient energy use and fragmented transport**, whereas **System B concentrates emissions in material inputs but benefits from process efficiency and cleaner energy**, making it the environmentally preferable option.

1.6.1.20 Conclusion

The comparative life cycle assessment demonstrates that **System B (German production based on Indonesian veneer)** consistently achieves a lower climate impact than **System A (Indonesian production)**. This advantage is primarily due to System B's significantly lower electricity consumption, more efficient manufacturing processes, and cleaner energy mix, despite its higher transport-related emissions. Moreover, System B benefits from greater

environmental credits at end-of-life under material recovery scenarios. Given its superior performance across key life cycle stages, **System B is selected as the reference system** for subsequent **application case assessments** in this study.

1.6.2 Phase 2: Substitution Potential of Albasia Plywood for Aluminum

1.6.2.1 Goal and Scope of Substitution Study

The primary goal of Phase 2 is to evaluate the environmental potential of substituting conventional aluminum components with Albasia plywood in selected lightweight applications. This comparative life cycle assessment supports the SuMatHrA project's mission to promote renewable, low-emission alternatives in industrial sectors where weight, strength, and sustainability are key concerns.

The study targets two main industries:

- **Automotive:** where interior panels, cabin structures, and decorative elements commonly use lightweight metals such as aluminum.
- **Carpentry and woodworking:** where high-end interior components and elevator panels are increasingly designed with sustainability in mind.

Aluminum is selected as the reference material due to its widespread use in both sectors. In some application cases, **Albasia plywood will be used in hybrid configurations**, combining it with complementary materials such as steel reinforcements, insulation layers, or metal brackets to meet specific performance or safety requirements. These hybrid setups will be modeled with the same cradle-to-grave approach and evaluated where functionally comparable to aluminum structures.

Three application scenarios are evaluated:

- **Non-structural vehicle interior components**
- **Wall and ceiling elements in elevator cabins**

The substitution is modeled based on **functional equivalence**, not mass. In cases where plywood requires increased thickness to meet mechanical performance, adjustments are made to reflect equal service function (e.g., rigidity, load-bearing capacity, or insulation value) [28] [44].

The scope is **cradle-to-grave**, including raw material extraction, processing, transport, use, and end-of-life treatment. Albasia plywood data are drawn from **System B (German production)** from Phase 1, as it best reflects optimized logistics and recovery scenarios

applicable in Europe. Aluminum data are sourced from industry-standard databases and literature.

The comparison focuses on climate change impacts (GWP100), modeled using OpenLCA with Ecoinvent 3.9.1 [30] [32]. This study supports material selection decisions for sustainable product design and may serve as the foundation for Environmental Product Declarations (EPDs) or further industry collaboration.

The planned case study on the **DLR U-Shift cargo** capsule wall has been excluded from this report after communication with partners from DLR. As this application is still at a purely conceptual stage, there is no established production process, no reliable reference structure, and no meaningful data on material flows. Any LCA results would therefore be speculative and lack comparability with market-ready applications. To ensure the study remains robust and decision-relevant, the focus is placed on vehicle interiors and elevator cabins, where substitution with Albasia plywood reflects realistic industrial scenarios.

1.6.2.2 Functional Unit and Reference Flow

The definition of both the reference aluminum structure and the Albasia-based hybrid substitution is based on input from project partners who conducted detailed **mechanical design, structural analysis, and material testing**. The partners determined the appropriate **material configurations and thicknesses** required for the hybrid structure to achieve **functional equivalence** with the conventional aluminum assembly. Their work included **finite element simulations, physical testing, and mechanical performance benchmarking**, ensuring that the comparison reflects real-world application feasibility. The mass values and component layouts used in this study are drawn directly from those validated configurations.

1.6.2.3 Vehicle application case

Reference Structure:

- **Material:** Primary Aluminum
- **Configuration:** Two compound elements forming one complete side component
- **Total mass:** 27.2 kg

Functional Unit (FU):

"Non-structural interior components used in a passenger vehicle, designed to provide shape stability, thermal separation, and basic mechanical resilience over a 15-year service life. The component is not subject to structural loads but must maintain dimensional and thermal performance during use"

To fulfill this functional unit, the **reference flow** (Albasia hybrid) is defined as follows:

- **Material Composition:**
 - Albasia Plywood: 14.88 kg
 - Steel Plate: 8.56 kg
- **Configuration:** 2 hybrid side wall elements
- **Total Mass:** 23.44 kg

System Boundaries: This study adopts a cradle-to-grave perspective. It includes all life cycle stages from raw material extraction and manufacturing through to hybridisation and the end-of-life treatment.

The End-of-Life (EoL) phase of the vehicle structure has been modeled through modules C2 to C4, encompassing transport to the treatment facility, waste processing, and final disposal [25]. Approximately 90% of waste plywood is directed to recycling while the remaining portion undergoes waste-to-energy (WtE) recovery; all structural steel is sent for recycling, and module C4 accounts for the disposal of ash and other residual materials.

Note on Material Development and Validation

For all application scenarios assessed in this study, the Albasia plywood-based hybrid structures were **developed and tested under laboratory conditions** as part of the SuMatHrA project. Project partners performed **mechanical simulations, structural testing, and physical prototyping** to determine the appropriate combination of materials (e.g., plywood and steel) required to achieve **functional equivalence** with conventional aluminum components. The resulting reference flows and design parameters used in the LCA model are directly based on these validated, laboratory-scale configurations. While the designs reflect practical feasibility, they do not yet represent mass-produced components.

1.6.2.4 Wall and ceiling elements in elevator cabins

A) TARGET (hybrid) — reference flow to deliver the FU

- **Side walls (8.301 m²):**
 - **0.5 mm** steel sheet - **32.64 kg** ($3.93 \text{ kg/m}^2 \times 8.301$)
 - Albasia plywood **4 mm** - **11.62 kg** ($1.40 \text{ kg/m}^2 \times 8.301$)
 - SMP adhesive for lamination (assumed 0.18 L/m^2 , $\rho \approx 1.35 \text{ kg/L}$) - **1.49 L (~2.01 kg)**

- **Rear wall (3.017 m²):**
 - Stainless steel sheet **0.8 mm V2A K220 - 19.07 kg**
- **Wall cladding (2.159 m², one side):**
 - Mirror/white glass **4 mm - 21.59 kg** (10.0 kg/m² × 2.159)
 - Albasia plywood **4 mm backer - 3.02 kg** (1.40 kg/m² × 2.159)
 - SMP adhesive for mirror (0.129 L/m², $\rho \approx 1.35 \text{ kg/L}$) - **0.278 L (~0.38 kg)**

B) ACTUAL (baseline to be substituted) — reference flow for the same FU

- **Side walls (8.301 m²):**
 - Sheet steel 1.5 mm
- **Rear wall (3.017 m²):**
 - Stainless steel sheet 0.8 = 19.07 kg
- **Wall cladding (2.159 m², one side):**
 - Mirror/white glass 4 mm - 21.59 kg
 - Carbon-steel sheet 0.5 mm backer - 8.49 kg
 - SMP adhesive for mirror - 0.278 L (~0.38 kg)

System Boundaries: This study adopts a cradle-to-grave perspective. It includes all life cycle stages from raw material extraction and manufacturing through to the end-of-life treatment.

The End-of-Life (EoL) phase of the elevator case includes module C1 for deinstallation, as well as modules C2 to C4 covering transport, waste processing, and final disposal. Glass mirror components are assumed to go directly to landfill, while most waste plywood is sent to recycling, and the remaining portion goes to waste-to-energy (WtE). All structural steel is directed to recycling, with module C4 accounting for the disposal of ash and other residuals.

For both, **vehicle structure** and **elevator structure**, the system is organized according to DIN EN 15804 [25] life cycle modules:

- **A1–A3 (Product Stage):** Raw material supply (nursery, plantation, harvesting), transport, and manufacturing of plywood

- **A4 (Transport):** Shipment from Indonesia to Europe (to Port of Antwerp) and further to Germany (Stuttgart)
- **A5 (Construction/Installation Stage):** Not included (installation impacts are assumed negligible or identical in both scenarios)
- **B1–B7 (Use Stage):** Use phase is modeled generically, assuming similar behavior and durability
- **C1–C4 (End-of-Life Stage):** Demolition/deconstruction, transport, recycling (C3), and incineration with energy recovery (C4)
- **D (Benefits and Loads Beyond the System Boundary):** Included for recycling and energy recovery credits

For **vehicle structure**, declared modules are:

- **A1-A3,**
- **C2-C4** and
- **Module D.**

While for the **elevator cabin** declared modules are:

- **A1-A3,**
- **A4,**
- **A5,**
- **B1,**
- **C1-C4** and
- **Module D.**

1.6.2.5 System Boundaries

Abbildung 114 and Abbildung 115 illustrate the life cycle processes for **vehicle structure** and **elevator structure**. Each diagram outlines the material flows, energy inputs, transport steps, and end-of-life pathways, structured according to EN 15804 modules [25]

System boundaries: vehicle structure

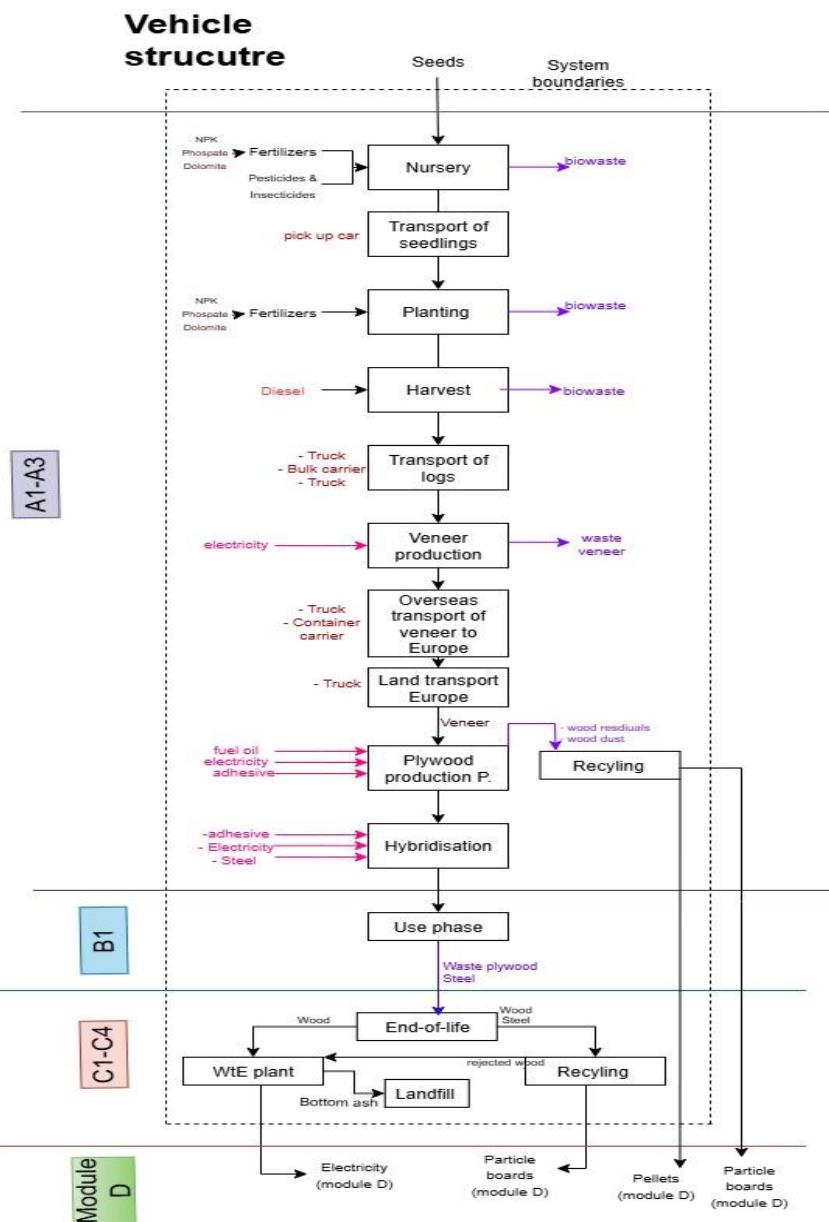


Abbildung 114: System boundaries and process flows for vehicle structure production

System boundaries: elevator structure

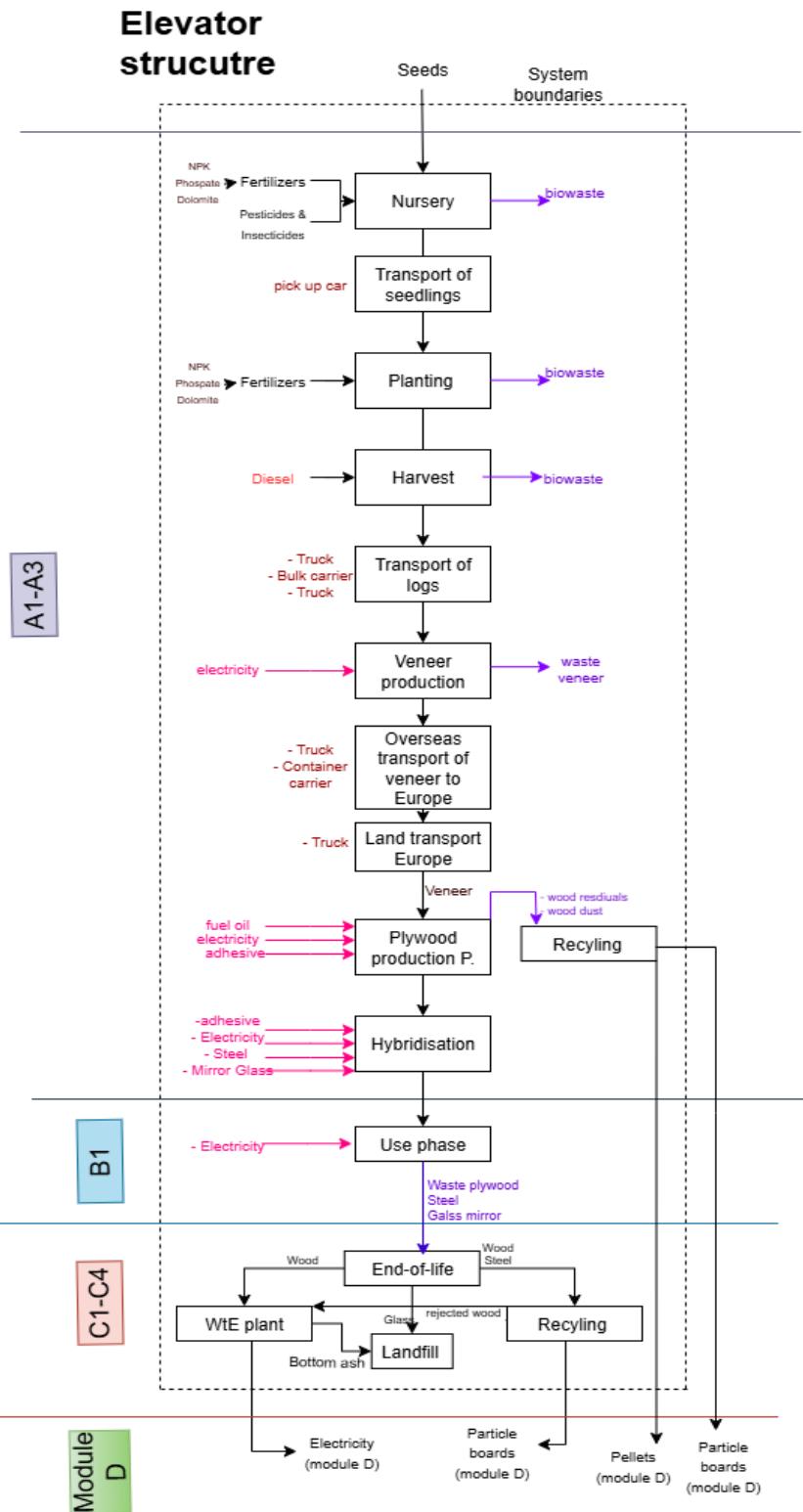


Abbildung 115: System boundaries and process flows for elevator structure production

1.6.2.6 Allocation

Vehicle structure

Wood waste generated during veneer production (e.g., bark, trimmings, offcuts) was combusted on-site to produce steam used internally for veneer drying and pressing. This internal energy loop was treated entirely within the system boundary, and no allocation was applied to the wood waste or the internally consumed steam.

Biogenic CO₂ was treated as neutral and was therefore neither reported as an input nor as an emission in the Global Warming Potential (GWP) impact category, following the 0/0 approach [26]. Non-CO₂ emissions (e.g., CH₄, N₂O) from biomass combustion were included in the GWP category.

In plywood production co-products were generated—such as sawdust used for pellet production and wood residues used in particle board manufacturing—environmental burdens were allocated among all outputs using a mass-based method in accordance with ISO 14044 and EN 15804 [25] [28].

The proportional share of impacts from the plywood production process was assigned to the main product (plywood) and to the co-products (Pellets and Particle boards).

In line with attributional LCA principles, no substitution or system expansion was applied within the core life cycle modules (A1–C3).

However, potential environmental benefits beyond the system boundary—such as the use of co-products in downstream systems and the energy or material recovery at end-of-life—are reported in Module D, as credits for the displacement of equivalent virgin materials or grid energy.

Elevator structure

Same allocation principles are applied as in vehicle structure.

1.6.3 Life Cycle Inventory (LCI)

The life cycle inventory for this study is based on a combination of secondary and primary data sources. For the plywood production, **System B** (German production) from **Phase 1** was selected as the representative scenario, reflecting the most accurate and up-to-date data available from earlier assessments.

Primary data for the remaining components—the vehicle structure and the elevator structure—were directly collected from project partners responsible for conducting the technical and mechanical testing of the materials. These datasets include detailed information on material

composition, manufacturing processes, and processing requirements, and are considered to have high data quality and relevance for the purposes of this LCA.

1.6.3.1 Vehicle Structure Production

In this section focus will be on detailed life cycle inventory (LCI) for vehicle structure production. In order not to repeat extensive data related to plywood production in Germany (this can be found in Phase 1 - System B) only assembling and hybridisation will be presented in Tabelle 41 below.

Tabelle 41: Material and energy inputs in vehicle structure production

Process Step	Input Material or Energy	Quantity per FU
Hybridisation	Steel	4.28E+00 kg
	Electricity	1.57E+01 kWh
	Adhesive	4.00E-01 kg
	Plywood	2.34E+01 kg

For the production of the **vehicle structure**—more precisely, the **Hybridisation** step—**no waste streams were identified** during this specific process stage. However, waste streams are present in **earlier stages** of the production chain that precede Hybridisation. These upstream waste flows have already been accounted for and are presented in **Phase 1, System B** of the LCI, under the respective **waste stream inventory**. This ensures that the overall system boundaries include relevant material losses and environmental burdens associated with earlier processing steps, even though the Hybridisation process itself operates as a closed-loop with no detectable waste outputs.

1.6.3.2 Elevator Structure Production

Same as in the previous section in this section focus will be on detailed life cycle inventory (LCI) for vehicle structure production. In order not to repeat extensive data related to plywood production in Germany (this can be found in Phase 1 - System B) only assembling and hybridisation will be presented in Tabelle 42 below.

Tabelle 42: Material and energy inputs in elevator structure production

Process Step	Input Material or Energy	Quantity per FU
Hybridisation	Steel	3.26E+01 kg
	Adhesive (SMP)	2.01E+00 kg

Glass mirror	2.16E+01 kg
Plywood	1.46E+01 kg

For the production of the **elevator structure** —more precisely, the **Hybridisation** step—**no waste streams were identified** during this specific process stage. However, waste streams present in **earlier stages** can be found in Phase 1 - System B chapter.

1.6.3.3 Transportation and Logistics

Transportation which is related to production of plywood is described in Phase 1 - System B section. In Tabelle 43 transportation related to vehicle structure production is presented and in Tabelle 44 for elevator structure.

Tabelle 43: Transportation and logistics in vehicle structure production

Process Step	Distance (km)	Weight (kg)	Type of transport
Transportation of finished plywood	1.20E+02	2.34E+01	Small truck (3.5–7 tons)

Tabelle 44: Transportation and logistics in elevator structure production

Process Step	Distance (km)	Weight (kg)	Type of transport
Transportation of finished plywood	1.20E+02	1.46E+01	Small truck (3.5–7 tons)

1.6.3.4 End-of-Life Modeling

The end-of-life (EoL) stage for vehicle and elevator structure is modeled based on standard treatment practices in Germany, where the product is assumed to be disposed of after its use phase.

Vehicle structure

EoL scenario for elevator cabin is defined as following:

- At the end of its useful life, the hybrid element is assumed to be dismantled and processed in **Germany**, following typical national waste treatment practices [45]. Once removed from its application, the element is separated into its two main components: **plywood** and **steel**. These materials are then transported to appropriate facilities for further treatment. The **steel** is fully recovered and sent into the recycling stream. Most of the **waste plywood** is also recovered, while a small portion—represented as a **refuse fraction**—is sent to a **waste-to-energy plant**. There, it is incinerated, and the

resulting residues (such as **bottom ash**, **fly ash**, and **scrubber sludge**) are safely disposed of according to German regulations. The scenario reflects a typical approach in Germany where **recycling is prioritized**, and any **non-recyclable materials are converted into energy**, supporting national circular economy goals. Module D accounts for the **potential environmental benefits** from the recovery of steel and plywood, which are reintroduced into the material cycle and credited as **avoided burdens** beyond the system boundary [25].

Elevator structure

EoL scenario for elevator cabin is defined as following:

- At end of life, the elevator **cabin kit** (side-wall panels, rear wall, and mirror panel) is manually dismantled (C1; negligible energy), sorted on site, and sent to treatment (C2) as follows: **metals** (carbon steel and stainless) go to a metal recycler at **30 km** by 40 t HGV; **combustible fractions** (Albasia plywood and SMP adhesive) go to **waste-to-energy (WtE)** at **25 km**; **inert fractions** (mirror glass and incineration ash) go to **inert landfill** at **15 km**. At treatment (C3), **metals are recycled with a 90% capture rate** (10% to landfill), **wood and adhesives are incinerated with energy recovery** (yielding bottom ash equal to 1% of wood mass and 0.5% of adhesive mass, disposed at C4), and **mirror glass is landfilled**. **Module D** reports the **scrap leaving the system boundary** (separately for carbon-steel and stainless grades) and any **exported energy from WtE** according to your database's EN 15804+A2 substitution rules [25].

1.6.4 Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

1.6.4.1 Impact Assessment Methodology

The study applies the same method (ReCiPe 2016 Midpoint (H)) [31] and approach as in **Phase 1**.

1.6.4.2 LCIA Results Summary

The climate change impact results (expressed as Global Warming Potential over 100 years, GWP100) were calculated for both production systems using the ReCiPe 2016 Midpoint (H) [31] method with data sourced from the Ecoinvent 3.9 database [30]. The results are presented below in Tabelle 45 and Tabelle 46 for vehicle and elevator structure, respectively.

Vehicle structure

Tabelle 45: the LCIA results vehicle structure

Product Stage	Kg CO ₂ eq	Note
---------------	-----------------------	------

A1–A3	6.95E+01	Cradle-to-gate
End-of-Life		
C2	1.41E-01	Transport
C3	8.13E-01	Processing
C4	4.50E-02	Disposal
Total A1-C4	7.04E+01	Cradle-to-grave
Module D	- 2.14E+01	Credits (benefits of energy recovery)
Net Value	- 4.90E+01	Credits deducted from total burden (A1-C4)

Elevator structure

Tabelle 46: The LCIA results elevator structure

Product Stage	Kg CO ₂ eq	Note
---------------	-----------------------	------

A1–A3	1.59E+02	Cradle-to-gate
A4	8.12E-01	Transport
A5	1.14E+00	Installation
B1	3.63E+03	Use phase (Electricity)
End-of-Life		

C1	5.70E-01	Deinstallation
C2	1.38E-01	Transport
C3	7.88E+00	Waste processing
C4	1.35E-01	Disposal
Total A1-C4	3.80E+03	Cradle-to-grave
Module D	- 7.60E+01	Credits (benefits of energy recovery)
Net Value	3.72E+03	Credits deducted from total burden (A1-C4)

1.6.5 Interpretation of Substitution Results

1.6.5.1 Vehicle structure

The results of the life cycle impact assessment reveal that the production stage (A1–A3) is the dominant contributor to climate change impacts for the vehicle structure. Manufacturing processes associated with plywood and steel are the primary drivers, supported by additional burdens from adhesive use and electricity required during the hybridisation step. Within the production system, plywood manufacturing shows a significant footprint due to energy-intensive veneer drying, resin application, and upstream forestry operations. Steel production, with its inherently carbon-intensive processes, adds substantially to the overall emissions profile.

The end-of-life stage (C2–C4) contributes only marginally to the total impacts. Transport of dismantled components and subsequent processing result in relatively low emissions compared to the production stage [25]. Disposal of minor waste fractions (e.g., ash from incinerated plywood) further adds a negligible share.

Module D plays a decisive role in shaping the net environmental outcome. Recycling of steel generates substantial credits by substituting virgin production, while energy recovery from plywood residues contributes additional avoided burdens. As a result, the net climate change impact of the vehicle structure is reduced significantly once these credits are considered.

Hot-spot analysis

A detailed hot spot analysis was performed to identify the life cycle stages and processes with the greatest influence on results:

Production (A1–A3): **~98.7%**

Transport (C2): **~0.2%**

Processing (C3): ~1.2%

This makes it very clear: the production phase is the overwhelming hot spot, with end-of-life stages contributing less than 2% combined. Disposal (C4): **~0.06%**.

When focus is set on A1-A3 and hot-spot analysis is applied, the following results are obtained (*Abbildung 116*):

- Plywood production (**~55–60% of A1–A3**)
- Steel (**~30–35% of A1–A3**)
- Adhesives (**~3–5% of A1–A3**)
- Electricity for hybridisation (**~2–4% of A1–A3**)

This breakdown confirms that plywood manufacturing is the single largest hot spot within A1–A3, followed by steel. Adhesives and hybridisation energy are minor but relevant.

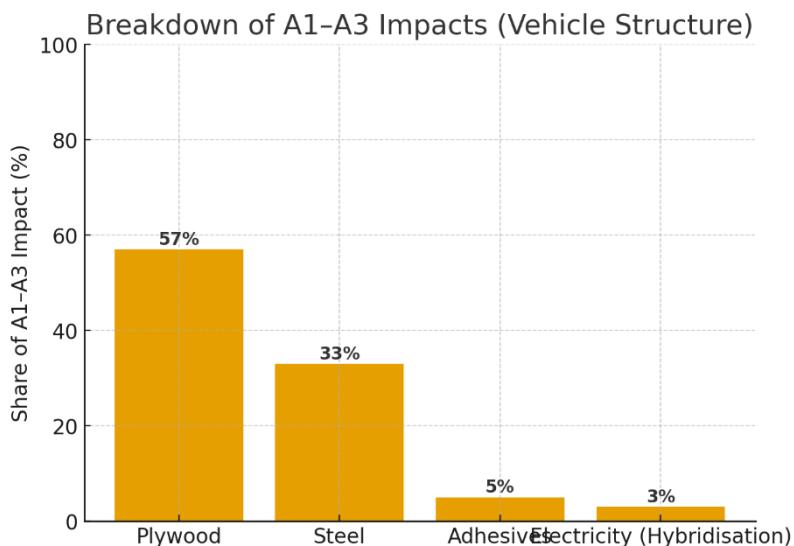


Abbildung 116: A1-A3 hot spot analysis

Comparison to reference structure

The reference structure selected for this study is an aluminium-based design, representing the conventional solution currently used in comparable applications. Aluminium is widely applied due to its low weight and favourable mechanical properties; however, its production is highly energy intensive and associated with substantial greenhouse gas emissions [46]. In contrast, the alternative hybrid structure combines plywood and steel, supported by a small share of adhesives, to demonstrate the potential of renewable and recyclable materials as substitutes for primary aluminium [47]. This comparison provides the basis for assessing whether material substitution can effectively reduce life cycle impacts while maintaining functional performance.

The following section presents the life cycle impact assessment results for both the aluminium reference and the hybrid plywood–steel structure, highlighting their respective contributions across production, end-of-life, and overall cradle-to-grave performance.

- **Reference structure**

According to inputs from The German Aerospace Center (DLR) reference structure is **primarily aluminum** with a total weight of **27.2 kg**. Since our LCA is conducted according to EN 15804 [25], which is a baseline for creation of the Environmental Product Declaration (EPD) in this study EPDs of aluminium are used for environmental comparison.

For this purpose three EPDs for primary aluminium production are chosen, one represents global production of aluminum [48], second represents French production (European) [49] and third represents Chinese production [50].

The results for A1-A3 in terms of climate change for **27.2 kg of primary aluminium** production are:

- Global production: **669 kg CO₂ eq**
- European production: **123 kg CO₂ eq**
- Chinese production: **870 kg CO₂ eq**

The comparison shows that the hybrid plywood–steel vehicle structure performs significantly better than aluminium in terms of production-related greenhouse gas emissions. For the same functional unit, the hybrid structure generates approximately **69.5 kg CO₂ eq**, while the aluminium reference ranges between **123 and 870 kg CO₂ eq**, depending on regional production routes. Even under the most favourable case for aluminium (European production at 123 kg CO₂ eq), the hybrid design still achieves a **reduction of ~44%**. In the global average and Chinese scenarios, the savings are even more pronounced, with reductions of approximately **90%** and **92%**, respectively.

1.6.5.2 Elevator structure

When excluding the operational electricity demand (this will be addressed further in a separate chapter), the environmental impacts of the elevator structure are primarily associated with the production stage (A1–A3). Within this phase, steel and glass mirror manufacturing emerge as the most significant contributors due to their energy-intensive processes and high embodied emissions. Plywood and adhesives add smaller but still relevant shares to the overall footprint.

The installation phase (A5) and deinstallation (C1) contribute only marginally to the total impacts. Similarly, transport (A4, C2) and waste processing (C3) are found to have a limited

influence, reflecting their relatively low energy and material requirements in comparison to material production. Disposal (C4) is almost negligible.

End-of-life treatment of the elevator structure provides credits in Module D, primarily through the recycling of metals and energy recovery from combustible fractions. These credits partly offset the burdens from production, highlighting the importance of effective material recovery strategies and circular economy practices.

In summary, when the use phase is excluded, the life cycle profile of the elevator structure is driven mainly by the production of material inputs, particularly steel and glass mirrors. End-of-life recycling delivers meaningful benefits, though these cannot fully counterbalance the initial production burdens.

Hot-spot analysis

A detailed hot spot analysis was performed to identify the life cycle stages and processes with the greatest influence on results (excluding B1 use phase which will be addressed later in details):

- A1–A3 (Production): **~93.7%**
- A4 (Transport): **~0.5%**
- A5 (Installation): **~0.7%**
- C1 (Deinstallation): **~0.3%**
- C2 (Transport): **~0.1%**
- C3 (Waste processing): **~4.6%**
- C4 (Disposal): **~0.1%**

When focus is set on A1–A3 and hot-spot analysis is applied, the following results are obtained:

- Steel: **~52%**
- Glass mirror: **~34%**
- Plywood: **~10%**
- Adhesives: **~4%**

Within the production stage (A1–A3), the impacts of the elevator structure are primarily driven by steel and glass mirror manufacturing, which together account for more than 85% of the

total footprint. Steel is the single largest contributor due to its high embodied emissions and significant material mass [51], while glass mirrors also represent a substantial share because of energy-intensive processing steps such as melting and finishing [52]. Plywood has a smaller role in the production profile, reflecting its lower emission factor per kilogram, and adhesives add only a minor contribution despite their relatively high carbon intensity per unit mass. Overall, the results demonstrate that production impacts are dominated by the non-renewable and energy-intensive material components, highlighting opportunities for improvement through material substitution, recycled content, or efficiency gains in steel and glass production [25].

Comparison to reference structure

For the elevator structure, a reference configuration has been defined based on input data provided by the partner project Alfred Kiess. In the context of this study, this reference design will be referred to as the *Baseline scenario*. To estimate its environmental performance, Environmental Product Declarations (EPDs) have been applied as building blocks, ensuring that the modelling is grounded in transparent and standardised life cycle data. This baseline scenario serves as the point of comparison against the hybrid elevator structure developed within the present project, enabling a consistent evaluation of potential improvements and trade-offs across key life cycle stages.

- **Reference structure**

The reference elevator cabin, defined within the partner project Alfred Kiess, is based on conventional material use dominated by steel and stainless steel components. The cabin walls (side panels) are manufactured from 1.5 mm thick steel sheet, covering a surface area of approximately 8.3 m² and representing the largest single material input. The wall cladding consists of mirror or white glass laminated onto 0.5 mm steel sheet, adding another 2.15 m² of surface area. The rear cabin wall is constructed from 0.8 mm stainless steel (V2A) sheets with a linen K220 finish, corresponding to roughly 3.0 m².

The total mass of the reference cabin structure amounts to **146.9 kg**, which reflects a traditional all-metal design with limited use of lightweight or renewable materials. This configuration serves as the *Baseline scenario* for comparative assessment against the hybrid structure developed in the present study.

The environmental impact of elevator cabin - Baseline scenario:

- A1–A3 (production): **Total: 282 kg CO₂e**
 - Steel sheet 1.5 mm: **203 kg CO₂e (~72%)**

- Stainless steel 0.8 mm: **39 kg CO₂e (~13.8%)**
 - Mirror/white glass 4 mm: **21 kg CO₂e (~7.5%)**
 - Steel sheet 0.5 mm: **18 kg CO₂e (~6.4%)**
 - SMP adhesive: **2 kg CO₂e (~0.7%)**
- A4–A5 (upstream to installation)
 - A4 Transport (150 km): **1.366 kg CO₂e**
 - A5 Installation: **1.14 kg CO₂e**
- **End-of-life (C1–C4):**
 - C1 De-installation: **0.57 kg CO₂e**
 - C2 Transport: **0.242 kg CO₂e**
 - C3 Waste processing: **2.718 kg CO₂e**
 - C4 Disposal: **0.171 kg CO₂e**
- **Totals and credits**
 - Cradle-to-grave (A1–C4): **≈ 288.21 kg CO₂e**
 - Module D (recycling/energy recovery credit): **–169.37 kg CO₂e**
 - Net with Module D: **≈ 118.84 kg CO₂e**

The baseline elevator cabin's footprint is overwhelmingly driven by **production (A1–A3)**, with **steel sheet (1.5 mm) alone contributing ~72% of cradle-to-gate impacts** and stainless steel a further ~14%. Glass, thin steel sheet and adhesives are minor contributors. Downstream stages (transport, installation, and end-of-life) collectively contribute **<2.2%** of the cradle-to-grave burden. **Module D** yields a large credit (**≈ –169 kg CO₂e**), cutting the **A1–C4** total by ~59% to a **net ~119 kg CO₂e**, but the dominance of production—especially thick steel sheet—remains the key hotspot.

- **Description of the Hybrid Structure**

The alternative elevator cabin design represents a lightweight hybrid solution in which parts of the conventional steel construction are replaced by renewable albasia plywood panels. The side cabin walls consist of 0.5 mm steel sheet combined with 8 mm albasia, significantly

reducing the share of heavy metals while maintaining structural performance. The rear wall is composed of 0.8 mm stainless steel (V2A linen K220), while the wall cladding integrates mirrors or white glass mounted on 4 mm albasia plywood instead of thinner steel layers.

This material substitution strategy reduces the total cabin weight to 87.3 kg, corresponding to a **weight saving of approximately 68%** compared to the reference all-metal baseline. The hybrid structure thus illustrates the potential of combining renewable materials with thin metal layers to achieve both structural integrity and a substantially lower environmental footprint.

Use Phase - B1:

In order to understand the production and end-of-life phase and compare it with the baseline scenario, use phase (B1) is assessed and compared separately. Detailed calculations related to electricity demand for use phase and life-span scenario for elevator structure can be found in Appendix. In the case study focus was on counterweight elevators, which are primarily Traction Elevators, the most common type used in mid-to-high-rise buildings. Well known for their speed, efficiency, and smooth ride quality [53] [54].

Based on usage scenario (Appendix) it's calculated that for use phase (20 years) the energy demand is **7597.71 kWh** for both scenarios. The reason why both case scenarios require the same energy input is the counterweight system.

The counterweight is designed to balance the mass of the empty cabin plus a fixed share of the rated load, typically 40–50% [19]. As a result, the motor only needs to overcome the difference between the cabin load and the counterweight, rather than lifting the full cabin mass. This design principle effectively neutralises the influence of cabin weight differences on operational energy demand. Even though the hybrid cabin is significantly lighter than the baseline, the counterweight is adjusted accordingly, and the resulting effective motor power requirement remains identical. Minor deviations due to frictional effects or efficiency curves are within normal operational variation and are generally considered negligible. Therefore, light-weighting of the cabin does not deliver measurable savings in the use phase; any environmental benefits from material substitution are realised instead in the production and end-of-life stages rather than in operational electricity use.

Finally, same energy input means same climate change impact for both scenarios: **3625.79 kg CO₂ eq**

In summary, although the hybrid cabin achieves a weight reduction of around **68% compared to the baseline**, this advantage is entirely neutralised by the counterweight system, resulting in no measurable reduction of electricity demand during the use phase.

1.7 Zusammenfassung

1.7.1 Aufzugskabine

1.7.1.1 Technische Aspekte

Zu Projektbeginn bestand das Ziel darin, durch die Integration von Albasia bestehende Anwendungen und Produkte gezielt weiterzuentwickeln oder vollständig zu ersetzen, um eine breite Marktakzeptanz zu erreichen. Dafür wurden drei Anwendungsfälle ausgearbeitet, die sich an bereits intern genutzten Lösungen orientieren und gleichzeitig Potenzial für zukünftige Einsatzmöglichkeiten bieten.

1. Anwendungsfall 1: Dekorative Wandverkleidung
2. Anwendungsfall 2: Wandelemente aus Albasia mit Blech
3. Anwendungsfall 3: Handlauf aus Formholzteilen mit Albasia

Die Anwendungsfälle wurden bewusst möglichst allgemein konstruiert, da sich die Systeme der verschiedenen Kabinenhersteller zwar ähneln, aber dennoch in Details unterscheiden. Ziel war es daher, die erarbeiteten Ergebnisse später auf möglichst viele am Markt verfügbare Systeme übertragen zu können.

Da Albasia als Material zu Projektbeginn noch wenig bekannt war, wurden in enger Zusammenarbeit mit dem DLR zahlreiche bilaterale Gespräche und Tests durchgeführt, um seine Eigenschaften und Potenziale zu ermitteln. Auf dieser Grundlage wurde die Konstruktion in einem dynamischen Prozess immer wieder angepasst und weiterentwickelt.

Die bisherigen Erkenntnisse mündeten schließlich in den Bau eines Demonstrators: einer Aufzugskabine, in die alle drei Anwendungsfälle integriert wurden. Die Ergebnisse sind zwar vielversprechend, können in dieser Form jedoch noch nicht direkt im Markt umgesetzt werden. Dies liegt einerseits an den herstellerspezifischen Unterschieden der Systeme, andererseits an zusätzlichen internen Anforderungen, die über die in der DIN definierten Standards hinausgehen.

Derzeit befinden wir uns mit einem regionalen Hersteller und Partner in Gesprächen, um die bisherigen Entwicklungen zu konkretisieren und auf einen spezifischen Aufzugstyp anzuwenden. Der nächste Schritt besteht darin, die Schnittstellen zu den angrenzenden Bauteilen zu klären und die zusätzlichen Anforderungen des Kunden zu berücksichtigen. Anschließend ist geplant, eine „echte“ Kabine mit den entwickelten Wandlamellen zu realisieren.

1.7.1.2 Environmental

This part of the report (LCA) evaluated the environmental performance of Albasia plywood across two main dimensions: (1) comparative production routes in Indonesia and Germany, and (2) the substitution potential of Albasia plywood-based hybrid structures in vehicles and elevator cabins. Together, these assessments provide robust insights into the role of Albasia plywood as a renewable lightweight material and its contribution to climate change mitigation.

Main Conclusions

(1) Comparative Production (Phase 1)

- **System B (German production using Indonesian veneer)** consistently outperforms **System A (Indonesian production)** across the life cycle.
 - Cradle-to-gate impacts are **~19% lower** for System B (482 vs. 594 kg CO₂e per m³).
 - After including transport, installation, and end-of-life, System B delivers a **36–45% lower net climate footprint** than System A, depending on whether energy recovery or material recycling is applied at end-of-life.
- The main driver of System A's higher burden is **electricity use in Indonesian plants**, which is three times higher than in Germany and relies heavily on a coal-intensive grid.

Hot-spot analysis identifies:

- Electricity and adhesives as the top contributors in Indonesian production (~67% combined).
- Adhesives and transport as dominant contributors in German production (~63% combined).
- **End-of-life treatment:** Recycling pathways provide significantly higher credits (~254 kg CO₂e) than energy recovery (~112 kg CO₂e), highlighting the importance of circular design.

(2) Substitution Potential (Phase 2)

Elevator cabins:

In the elevator cabin case, substituting thick steel sheets with plywood results in a **68% reduction in weight** (from 146.9 kg to 87.3 kg). However, the **use phase energy demand remains unchanged** due to the counterweight principle, which balances the cabin mass and cancels out the benefits of lightweighting. As a result, both the baseline and hybrid cabins consume approximately 7,600 kWh over a 20-year lifespan, equal to around 3,626 kg CO₂e.

The **environmental benefits are therefore realized only during the production and end-of-life stages**, not during operation. Hot-spot analysis further shows that steel (~52%) and glass mirrors (~34%) dominate the overall footprint, while plywood contributes a smaller share of around 10%.

1.7.2 PKW

1.7.2.1 Technische Aspekte

Der Einsatz von Albasiaholz in strukturellen Fahrzeugbauteilen bietet eine Reihe von Vorteilen, die insbesondere im Kontext nachhaltiger Materialentwicklung und funktionaler Leichtbaustrategien von Bedeutung sein können. Als schnell wachsender, nachwachsender Rohstoff mit geringer Dichte und guter mechanischer Anpassbarkeit stellt Albasiaholz eine interessante Alternative zu konventionellen Materialien dar.

Ein wesentlicher Vorteil liegt in der Gewichtsreduktion, die durch die geringe Rohdichte des Holzes ermöglicht wird. Gerade in strukturellen Bereichen, die zur Energieabsorption im Crashfall dienen, kann dies zu einer deutlichen Verbesserung der Fahrzeuggesamtmasse beitragen. Gleichzeitig zeigt Albasiaholz ein günstiges mechanisches Verhalten, insbesondere bei Crushing-Anwendungen, bei denen es darauf ankommt, kinetische Energie kontrolliert aufzunehmen. Durch gezielte Verdichtung und Lagenorientierung lassen sich die mechanischen Eigenschaften des Holzes an spezifische Anforderungen anpassen.

Darüber hinaus bietet Albasiaholz hohe Gestaltungsfreiheit, z.B. in der Kombination mit anderen Werkstoffen. Es lässt sich thermisch formen, mechanisch bearbeiten und mit anderen Werkstoffen kombinieren, was die Entwicklung hybrider Materialsysteme ermöglicht. In Kombination mit metallischen Decklagen oder als Füllmaterial in Hohlprofilen kann Albasiaholz zur Verbesserung der Energieabsorption und zur funktionalen Differenzierung innerhalb der Fahrzeugstruktur beitragen.

Auch unter klimatischen Belastungen zeigt Albasiaholz – bei entsprechender Verarbeitung und Konditionierung – ein robustes Verhalten. Untersuchungen zu Quell- und Schwindverhalten, zur Feuchtigkeitsaufnahme sowie zu Klimabeständigkeit belegen, dass das Material für den Einsatz in automobilen Umgebungen ertüchtigt werden kann. Die Möglichkeit, die Materialeigenschaften durch Verdichtung gezielt zu beeinflussen, eröffnet zusätzliche Spielräume in der Auslegung von Strukturbau Teilen.

Nicht zuletzt ist Albasiaholz aus ökologischer Sicht besonders attraktiv. Es stammt aus schnell wachsenden Plantagen, die zur Regenerierung degraderter Flächen beitragen, bindet CO₂ während seines Wachstums und benötigt im Vergleich zu metallischen Werkstoffen deutlich weniger Energie in der Herstellung. Damit kann es einen Beitrag zur Reduktion des ökologischen Fußabdrucks von Fahrzeugen leisten.

Insgesamt zeigt sich, dass Albasiaholz ein vielseitiger Werkstoff mit hohem Potenzial für den Einsatz in strukturellen Fahrzeugkomponenten ist. Seine Kombination aus Leichtbaupotenzial, mechanischer Anpassbarkeit und ökologischer Vorteilhaftigkeit macht ihn zu einem wertvollen Beitrag in der Forschung zur nachhaltigen Mobilität.

1.7.2.2 Environmental

(2) Substitution Potential (Phase 2)

1.7.3 Nutzfahrzeuge

1.7.3.1 Technische Aspekte

Im Anwendungsfall Nutzfahrzeugaufbauten wurde Albasia als Kernwerkstoff für Sandwichmaterialien untersucht, die in den Wänden der Güter- und Frischekapsel des Konzeptfahrzeugs U-Shift zum Einsatz kommen sollten. Dazu wurde im Rahmen einer begleitenden studentischen Arbeit am DLR ein umfassendes Anforderungsprofil an die Güterkapsel in Holzbauweise erstellt. Daraus leiten sich die Anforderungen an die Wand, wie beispielsweise mechanische Belastungen aus der Gesamtstruktur sowie notwendige Anforderungen an die Ladungssicherung ab. Zusätzlich wurden Möglichkeiten der Eckverbindungen von Wandsegmenten erarbeitet. Aus den Konzepten und Anforderungen wurde eine Sandwichbauweise definiert, bei der der Kern aus Formholzteilen aus Albasia-Furnier besteht und die Decklagen aus Buchensperrholz und Aluminiumblech. Die Formholzteile wurden in enger Zusammenarbeit mit Projektpartner Kiess ausgelegt und hergestellt. Dafür wurden Pressformen für ein dreilagiges Albasia-Formholzteil konstruiert und damit die Formholz-Hutprofile hergestellt. Die Formholz-Hutprofile wurden aneinander geleimt um ein Wandsegment aufzubauen. Die Formholz-Hutprofile wurden anschließend mit Buche-Sperrholzplatten und Aluminiumblech beplankt. Die Eckverbindung erfolgte über gefräste Sperrholzplanken. Der Demonstrator zeigt, dass die Wandsegmente in Holzbauweise aufgebaut werden können. Die Untersuchungen zu Fügeelementen in Albasia-Platten hat gezeigt, dass aufgrund der Mikrostruktur von Albasia Fügelemente wie Schrauben oder Gewindemuffen keinen ausreichend Halt im Holz haben. Daher ist insbesondere für die

Ladungssicherung zusätzliche Elemente in den Wandsegmenten erforderlich. Durch die Geometrie der Formholzteile können jedoch an den entsprechenden Positionen Verstärkungselemente eingebracht werden, in die Fügeelemente für Ladungssicherung befestigt werden können. Allerdings erweist sich die Herstellung der Wandsegmente als aufwändig, da die Formholz-Hutprofile einzeln in einem Pressprozess hergestellt werden müssen und anschließend zu flächigen Segmenten verleimt werden müssen. In einem geplanten Forschungsprojekt mit Beteiligung des DLR ist geplant, einen industriellen Herstellungsprozess für Formholzteile zu entwickeln.

Für eine Anwendung als Frischekapsel ist die thermische Isolation der Wandsegmente eine wichtige Anforderung. Die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten hat gezeigt, dass mit einem hybriden Material aus Albasia-Formholzteilen im Kern sowie Deckmaterialien aus Buchen-Sperrholz und Aluminium ein geforderter Wärmedurchgangskoeffizient von etwa 0,5 W/(m²K) erreicht werden kann wenn die Materialstärke des Wandsegments mindestens 80 mm beträgt und die Hohlräume der Formholzteile mit Dämmmaterial, bspw. Holzwolle, gefüllt werden.

1.7.3.2 Environmental

For vehicle interior panels, the plywood–steel hybrid achieves a **44% reduction in climate impacts compared to European aluminum** and up to **90% compared to global or Chinese aluminum production**. Production remains the dominant hotspot, with plywood contributing 55–60% and steel 30–35% of the total burden. At the end of life, **recycling of steel and energy recovery from plywood provide substantial credits (−21.4 kg CO₂e per FU)**, reducing the overall net impact by more than two-thirds.

Recommendations:

For production and supply chains

- **Prioritize energy-efficient manufacturing:** Investments in efficient German-style facilities or upgrades to Indonesian plants are essential. Transitioning away from coal-based electricity grids in Indonesia would drastically reduce impacts.
- **Adhesive innovation:** Develop and adopt low-carbon adhesives (bio-based or reduced-formaldehyde resins), as current resins are among the largest contributors to climate impact.
- **Material efficiency:** Further optimization of veneer recovery, reduction of offcuts, and improved yield during pressing and finishing can reduce burdens at source.

(2) For product design and application

- **Vehicles:** Albasia plywood–steel hybrids should be promoted as a viable alternative to aluminum, especially in non-structural components. Scaling this approach could achieve substantial reductions in GHG emissions in the mobility sector.
- **Elevators:** Hybrid plywood cabins should be positioned as a sustainable alternative to all-steel designs. While no use-phase benefit exists (due to the counterweight system), reductions in material production emissions and end-of-life credits still offer significant advantages. Potential benefits in use phase could be examined in different elevator systems which do not include counterweight systems.
- **Design for disassembly:** Ensuring that plywood–steel hybrids can be easily separated at end-of-life will maximize recycling rates and environmental credits.

(3) For circular economy strategies

- **Maximize recycling over incineration:** Recycling consistently provides more than double the avoided emissions of energy recovery. Policy and industry should therefore prioritize closed-loop recovery pathways.
- **Integrate recovery infrastructure:** Partnerships with particleboard producers and steel recyclers can ensure consistent material uptake and substitution of virgin resources.

(4) For research and development

- **Expand environmental categories:** Future assessments should include water use, toxicity, land use, and resource depletion to provide a comprehensive sustainability profile.
- **Real-world performance studies:** Laboratory-scale hybrid prototypes should be followed by pilot production and field testing to validate LCA assumptions.
- **Alternative elevator technologies:** Explore non-counterweighted systems (hydraulic, pneumatic) where lightweight cabins could reduce operational energy demand.

1.8 Ausblick

The overall findings confirm that **Albasia plywood is a strong candidate for climate-friendly lightweight design**, especially in applications where reduced mass translates into lower operational energy. While counterweighted elevator systems cancel out such benefits in the use phase, plywood hybrids still provide meaningful reductions in production and end-of-life impacts. In vehicles and other transport applications, the substitution potential is

particularly strong, offering drastic reductions in greenhouse gas emissions compared to aluminum.

Albasia plywood thus represents a promising renewable resource for Europe's transition to low-carbon materials, provided that production is optimized, adhesives are improved, and recycling strategies are fully integrated.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Großteil der eingesetzten Ressourcen umfasst die erforderlichen Personalkosten der eingesetzten Mitarbeiter. Umfassende Arbeiten in der Konzeption, Konstruktion, Charakterisierung des Leichtholzes Albasia und Simulation und besonders der versuchstechnischen Absicherung waren erforderlich, um die Projektziel zu erreichen. Größere Sachausgaben waren erforderlich für die Beschaffung Herstellung der Schwellereinleger mit Kern aus Albasia und Stahlblech und der Herstellung von Demonstratoren.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Projektpartner arbeiteten mit großem Engagement an der Lösung der Forschungs- und Entwicklungsaufgaben. Dabei zeigte sich, dass bezüglich der ursprünglichen Projektplanung es vor allem im Anwendungsfall PKW zu einer Planungsänderung kam. Während in der ursprünglichen Planung lokalen Verstärkungsteile aus Formholz angedacht waren änderte sich der Anwendungsfall hin zu den crashbelasteten Schwellereinleger. Dadurch wurden ursprünglich geplante Sachmittel für Werkzeuge für Formholzteile in Personalmittel umgeplant. Aufgrund des erheblich höheren Aufwands in der Herstellung und insbesondere Prüfung der Formholzteile unter Crashbelastung kam es zu erheblichen Mehraufwänden, die in der ursprünglichen Planung nicht enthalten waren, so dass das Gesamtprojekt um 6 Monate verlängert werden musste.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Das Projekt führte für alle Projektpartner zu relevanten Fortschritten und zur Erreichung der individuell angestrebten Ergebnisse. Die Industriepartner profitieren in unterschiedlicher Weise. Nutzbare Ergebnisse sind: umfassende Kenntnisse der Werkstoffeigenschaften des Leichtholzes Albasia sowie dessen Leichtbaupotenzial, umfassende Kenntnisse in der Entwicklung und Herstellung von Formholzteilen, der Hybridisierung von Albasia mit anderen Materialien sowie den Herstellungsprozessen von hybriden Platten und vor allem dem Nachhaltigkeitspotenzial durch die Substitution von technischen Materialien im Fahrzeug- und Aufzugsbau durch Albasia-Leichtholz.

In einzelnen Bereichen wurden die Ziele deutlich übertroffen, so dass der durch das Projekt angestrebte Nutzen für die Partner eindeutig gegeben ist.

5. Fortschritte im Stand der Technik während der Projektlaufzeit

Den Zuwendungsempfängern sind während der Projektlaufzeit keine Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens von anderen Stellen bekannt geworden.

6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

- G. Bour, T. Feser und G. Piazza, „Characterization and Simulation of Lightweight Wood.,“ Masterarbeit, Ecole Centrale de Nantes, 2022.
- M. Christians, „Charakterisierung und Simulation von Leichtholz unter Druckbelastung,“ Masterarbeit, Hochschule Bochum, 2023.
- Hannover Messe 2023, Teilnahme auf dem Gemeinschaftsstand des Bundeswirtschaftsministeriums.
- Newsletter Technologietransferprogramm Leichtbau 02/2023 „Albasia-Holz für Elektroautos und Aufzüge nutzen“.
- Thomas Feser & Giovanni Piazza; Beispiele von Holzbasierten Bauweisen; WerkstoffPlus Auto – 14. Fachtagung für neue Fahrzeug- und Werkstoffkonzepte; Stuttgart; 20. Februar 2024.
- Heyner D, Feser T, Schulze M, Siefkes T, Beeh E, Kohl D. Development and testing of timber-metal-hybrid materials for the side sill reinforcement of a battery electric vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications.* 2025;239(4):816-827. doi:[10.1177/14644207251321315](https://doi.org/10.1177/14644207251321315)
- Feser, Thomas; SuMatHrA – Hybride Leichtbau-Materialsysteme auf Basis von Albasia; 11. Forum Leicht-„Bau“; Berlin; 27.August 2024.
- Heyner D., Feser T., Schulze M., Piazza G. Potential of lightweight wood ‘Albasia’ in refrigerated trailers and electric vehicles: Design and validation of a side wall and a side sill reinforcement; 2nd International Conference on Vehicle Body Engineering - VBE2025; Porto; 6.-7. November 2025.

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Skizze Wandaufbau Fall 1	4
Abbildung 2: Detail Wandpaneel unten im Bereich der Zierleiste	8
Abbildung 3: Kabinenstruktur aus gekanteten Blechlamellen - 0,5mm Stärke belegt mit Albasia	9
Abbildung 4: Querschnitt Schichtaufbau Wandlamellen	10
Abbildung 5: Isometrie des gesamten Handlaufs	11
Abbildung 6: Querschnitt Handlauf.....	12
Abbildung 7: Darstellung Handlaufhalter.....	12
Abbildung 8: Darstellung Handlauf - Umsetzung in Demonstrator.....	13
Abbildung 9: Konzepte einer holzbasierten Güterkapsel für das Konzeptfahrzeug U-Shift ..	14
Abbildung 10: Konzepte für den Querschnitt der Wände, aus [1]	17
Abbildung 11: Konzepte für die Verbindungselemente der Seiten- und Stirnwand, aus [1]..	17
Abbildung 12: Presswerkzeuge in verschiedenen Radien	21
Abbildung 13: Formholzherstellung Aufzugshandlauf - oben Variante 1, unten Variante 2..	24
Abbildung 14: CAD-Modell der Pressform und Formholzteil der Mittellage der Wandsegmente	25
Abbildung 15: Wandsegment als Demonstrator der Güterkapsel	26
Abbildung 16: links: Laumauftrag auf Furniere in der Industrieproduktion ; rechts: Etagenpresse mit Heizplatten	29
Abbildung 17: links: Ergebnis durch Wash-Out ; rechts: Leimspalter.....	31
Abbildung 18: links: Pressvorgang mit Phenolharzleim und Temperaturüberwachung im Kern der Platte um 90°C nicht zu übersteigen; rechts: Ergebnis der fertigen Platte Albasia d+d ohne Spalter und ohne Wash-Out.....	31
Abbildung 19: links Albasia d+d Sperrholzplatte mit Leimfilm verarbeitet eine Kante besäumt, eine Kante roh; rechts Albasia d+d Sperrholzplatte mit Leimfilm verarbeitet besäumte Sägekante, (offenporige, fasrige Kante deutlich zu sehen)	33
Abbildung 20: Etagenpresse mit beheizten Pressblechen zur Verarbeitung von Phenolharz	37
Abbildung 21: l. o.: Leimauftragswalze mit D4 Leim ; l. u.: Leimbild nach Leimauftrag ; m. o.: leimauftragswalze mit PU-Leim ; m. u.: „aufgeschäumter“ PU- Leim nach der Reaktion und Aushärtung ; r. o.: Leimauftrag Phenolharzleim ; r. u.: Leimbild Phenolharzleim	38
Abbildung 22: Auszug technisches Datenblatt prefere	39
Abbildung 23: Auszug technisches Datenblatt Gründig	40
Abbildung 24: Auszug technisches Datenblatt COSMO	41
Abbildung 25: Auszug technisches Datenblatt Surfactor	42

Abbildung 26: Schwellerböcke mit verschiedenen Furnieraufbauten und Furnierlagen innerhalb des Schwellers	43
Abbildung 27: Versuchsaufbau der quasistatischen Druckprüfungen an Würfelproben	44
Abbildung 28: Repräsentative Kraft-Weg Charakteristik der radialen Würfelproben aus unidirektionalem Albasia-Schichtholz	45
Abbildung 29: Repräsentative Kraft-Weg Charakteristik der tangentialen Würfelproben aus unidirektionalem Albasia-Schichtholz	46
Abbildung 30: Repräsentative Kraft-Weg Charakteristik der longitudinalen Würfelproben aus unidirektionalem Albasia-Schichtholz	47
Abbildung 31: Eingespannte Biegeprüfvorrichtung mit einem Holzprüfkörper während der Biegeprüfung	49
Abbildung 32: Mittlere Biegefestigkeiten inkl. Standardabweichung der Versuchsreihen aus der 3-Punkt-Biegeprüfung mit Couponproben	50
Abbildung 33: Varianten des Prüfaufbaus der Auszugsversuche punktförmiger Fügeelemente	51
Abbildung 34: Kraft-Weg Verlauf der Auszugsversuche mit Spanplattenschrauben an 15 mm dicken Plattenproben	52
Abbildung 35: Kraft-Weg Verlauf der Auszugsversuche mit Spanplattenschrauben an 30 mm dicken Plattenproben	52
Abbildung 36: Verbundmuffe Würth - Typ SKD M5 - Verbundmuffe Typ SKD mit Innensechskant und Bund (037625 12) online kaufen WÜRTH	54
Abbildung 37: Kraft-Weg Verlauf der Auszugsversuche mit Gewindemuffen an 15 mm dicken Plattenproben	55
Abbildung 38: Kraft-Weg Verlauf der Auszugsversuche mit Gewindemuffen an 30 mm dicken Plattenproben	55
<i>Abbildung 39: Versuchsaufbau der quasi-statischen Pfahltests an Plattenwerkstoffen (links). Probe nach durchgeführtem Versuch (rechts)</i>	57
Abbildung 40: Kraft-Weg Charakteristik der 30 mm Albasia-Sperrholz Proben mit Faserorientierung der Decklagen „Längs“ zur Kraftrichtung	58
Abbildung 41: Kraft-Weg Charakteristik der 30 mm Albasia-Sperrholz Proben mit Faserorientierung der Decklagen „Quer“ zur Kraftrichtung	59
Abbildung 42: Absorbierte Energie der 30 mm Albasia-Sperrholz Proben mit Faserorientierung der Decklagen „Längs“ zur Kraftrichtung	59
Abbildung 43: Absorbierte Energie der 30 mm Albasia-Sperrholz Proben mit Faserorientierung der Decklagen „Quer“ zur Kraftrichtung	60

Abbildung 44: Kraft-Weg Charakteristik der Albasia-Sperrholz Proben mit unterschiedlichen Dicken sowie Buchen Sperrholz mit 16 mm Plattenstärke. Hybride Albasia-Stahl Probe mit 30 mm Plattendicke.	63
Abbildung 45: Kraft-Weg Charakteristik der hybriden Albasia-Sperrholzproben mit 100 mm Plattendicke (rot) im Vergleich mit 30 mm Plattendicke (blau). Dargestellt sind jeweils die maximalen Kräfte sowie die absorbierten Energien.....	63
Abbildung 46: Stauchversagen der hybriden Albasia-Sperrholzprobe mit 30 mm Plattenstärke beplankt mit Stahlblech (links). Querschnitt der Probe nach dem Test zeigt die starke Verformung und Verdichtung des Albasia Holzkerns (rechts).....	64
Abbildung 47: Stauchversagen der hybriden Albasia-Sperrholzprobe mit 100 mm Plattenstärke Versuchsaufbau (links). Querschnitt der Probe nach dem Test zeigt die starke Verformung und Verdichtung des Albasia Holzkerns (rechts).....	64
Abbildung 48: Versuchsvorrichtung der Plattenbiegungsversuche. Prüfvorrichtung mit Rahmen und Stempel (rechts) und Prüfaufbau mit Platte.....	65
Abbildung 49: Kraft-Weg-Diagramme der Plattenbiegungsversuche mit Albasia als Trägermaterial.....	67
Abbildung 50: Prüfkörper Glas mit Blech und Glas mit Albasia (vor und nach dem Versuch)	69
Abbildung 51: Plattenbiegung/Bruchtest an Blech-Glas und Albasia-Glas Proben	70
Abbildung 52: Versuchsaufbau Brandtest	71
Abbildung 53: Brandversuche an Plattenproben	72
Abbildung 54: Prüfkörper nach Versuchsdurchführung	75
<i>Abbildung 55: Proben für die Bestimmung der Wärmeleiteigenschaften von Albasia-Hybridmaterialien. Sperrholzplatte und Ausschnitt aus dem Wandsegment mit Albasia-Formholz-Kern.....</i>	76
Abbildung 56: Temperaturverläufe auf beiden Seiten der Proben und Wärmeleitfähigkeit über Zeit für a) Albasia-Sperrholz und b) Albasia-Formholz	77
Abbildung 57: Honigwabenartige Mikrostruktur von Holz entlang der Holzfasern, entnommen aus [4].....	80
Abbildung 58: Verbundwerkstoffartige Makrostruktur von Holz mit Fasern, entnommen aus [4]	81
Abbildung 59: Probengeometrie und Versuchsvorrichtung für die Charakterisierung von Einzelfurnier unter Zugbelastung, aus [10].	84
Abbildung 60: Spannungs-Dehnungs-Kurve der Albasia-Furnierproben in 1-Richtung und 2-Richtung für reines Albasia (P1_010, P2_010) und beleimtes Albasia (G1_020, G2_007), aus [10].....	85

Abbildung 61: Zugfestigkeit vs. Holzdichte für Albasia-Furnierproben in 1-Richtung und 2-Richtung, aus [10]	86
Abbildung 62: Festigkeitsdehnung vs. Holzdichte für Albasia-Furnierproben in 1-Richtung und 2-Richtung, aus [10]	86
<i>Abbildung 63: Elastizitätsmodul vs. Holzdichte für Albasia-Furnierproben in 1-Richtung, aus [10].....</i>	86
Abbildung 64: Albasia-Sperrholzproben vor (links) und nach (Mitte) der Zugprüfung. Seitenansicht (rechts) zeigt den Schichtverbundaufbau	88
Abbildung 65: Spannungs-Dehnungs-Verläufe für Albasia-Sperrholzproben unter Zugbelastung, aus [10].....	89
Abbildung 66: Prüfaufbau HCCF-Vorrichtung aus [11]	91
Abbildung 67: Serienbilder UD-Laminat parallel zur Faser	91
Abbildung 68: Spannungs-Dehnungs-Diagramm des UD-Laminats parallel zur Faser mit Detailaufnahme der gültigen Proben, aus [11]	92
Abbildung 69: UD-Laminat \parallel Korrelation mech. Kennwerte zu Dichte, aus [11]	93
Abbildung 70: Serienbilder UD-Laminat senkrecht zur Faser, aus [11].....	94
Abbildung 71: Spannungs-Dehnungs-Diagramm UD-Laminat senkrecht zur Faser, aus [11]	94
Abbildung 72: UD-Laminat \perp Korrelation mech. Kennwerte zu Dichte, aus [11]	95
Abbildung 73: Serienbilder Sperrholz parallel zur Faser, aus [11] r	96
Abbildung 74: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Sperrholz parallel zur Faser, aus [11].....	97
Abbildung 75: Sperrholz \parallel Korrelation mech. Kennwerte zu Dichte, aus [11].....	98
Abbildung 76: Serienbilder Sperrholz senkrecht zur Faser, aus [11]	98
Abbildung 77: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Sperrholz senkrecht zur Faser, aus [11] ..	99
Abbildung 78: Sperrholz \perp Korrelation mech. Kennwerte zu Dichte, aus [11]	100
Abbildung 79: Serienbilder Vollholzwürfel parallel zur Faser, aus [11]	101
Abbildung 80: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Vollholzwürfel parallel zur Faser, aus [11]	102
Abbildung 81: Vollholzwürfel \parallel Korrelation mech. Kennwerte zu Dichte, aus [11]	102
Abbildung 82: Serienbilder Vollholzwürfel senkrecht zur Faser, aus [11]	103
Abbildung 83: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Vollholzwürfel senkrecht zur Faser, aus [11]	104
Abbildung 84: Vollholzwürfel \perp Korrelation mech. Kennwerte zu Dichte, aus [11]	104
Abbildung 85: Vergleich der Materialeigenschaften unterschiedlicher Leichthölzer in Faserrichtung, aus [11]	105
Abbildung 86: Vergleich der Materialeigenschaften unterschiedlicher Leichthölzer quer zur Faserrichtung, aus [11]	106

<i>Abbildung 87: Schema der Einzelementmodellierung für Zuglast in 1- und 2-Richtung, aus [10].....</i>	109
<i>Abbildung 88: Spannungs-Dehnungs-Kurven von Einzelementsimulationen in 1- und 2-Richtung für reines Albasia, aus [10].....</i>	111
<i>Abbildung 89: Spannungs-Dehnungs-Kurven von Einzelementsimulationen in 1- und 2-Richtung für beleimtes Albasia, aus [10]</i>	112
<i>Abbildung 90: Modellierung des Albasia-Sperrholzes in LS-Dyna mit *PART_COMPOSITE, aus [10].....</i>	113
<i>Abbildung 91: Spannungs-Dehnungs-Verläufe für die Einzelementsimulation des Sperrholzes, aus [10]</i>	115
<i>Abbildung 92: Schema des Simulationsmodell des Einzelements, aus [11]</i>	116
<i>Abbildung 93: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Simulation UD-Laminat parallel, aus [11]</i>	117
<i>Abbildung 94: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Simulation UD-Laminat senkrecht, aus [11]</i>	119
<i>Abbildung 95: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Simulation Sperrholz parallel, aus [11]</i>	121
<i>Abbildung 96: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Simulation Sperrholz senkrecht, aus [11]</i>	121
<i>Abbildung 97: Numerisches Simulationsmodell des Pfahltests an Albasia-Platten.....</i>	123
<i>Abbildung 98:Vergleich der Simulation der Pfahltests der 30 mm Albasia-Platte mit den experimentellen Daten</i>	125
<i>Abbildung 99: Neue Querschnittsgeometrien der numerischen Untersuchung. a) Variante 1; b) Variante 2; c) Variante 3</i>	127
<i>Abbildung 100: Numerisches Modell der Simulation der Schweller-Variante "Spitzer Winkel" mit Modell des Pfahls</i>	128
<i>Abbildung 101: Simulation der unterschiedlichen Querschnittsvarianten im Vergleich mit der Referenzstruktur (schwarz)</i>	129
<i>Abbildung 102: Versuchsaufbau der quasi-statischen Pfahltests am Referenzschwellereinleger (links). Aufnahme nach dem Test (rechts).</i>	131
<i>Abbildung 103: Kraft-Weg Charakteristik der Pfahltests des Referenz-Schwellers (rot) im Vergleich mit der Albasia-Hybrid Platte mit 100 mm (grün).</i>	133
<i>Abbildung 104: Querschnitt der Referenzstruktur a). Nutzung des maximal verfügbaren Bauraum b). Optimierter Querschnitt mit flachem Winkel c). Optimierter Querschnitt mit spitzem Winkel d).....</i>	134

Abbildung 105: Kraft-Weg Charakteristik der Pfahltests an der Referenzkurve (schwarz) mit den Albasia-hybrid Varianten mit unterschiedlichen Querschnitten. Block (rot), optimiert mit flachem Winkel (grün) und optimiert mit spitzem Winkel (blau).	136
Abbildung 106: Demonstrator des Hybriden Schwellereinlegers. Symbolisiert wird der Aufprall gegen Pfahl. Abbildung rechts zeigt den aufgesägten Schweller zur Darstellung der Verdichtung des Holzkerns.	136
<i>Abbildung 107: Definitionen des Furnierverbundaufbaus im Albasia-Holzkern.....</i>	137
<i>Abbildung 108: Kraft-Weg Charakteristik der unterschiedlichen Furnieraufbauvarianten im Vergleich zur Referenz. Gezeigt sind die Geometrievarianten "Block" (schwarz) als hybride Variante und reine Holzstruktur (gestrichelt), "optimiert, spitzer Winkel" (blau) sowie die Referenzstruktur (rot).....</i>	140
<i>Abbildung 109: Demonstrator Außenecke Blechlamellen.....</i>	142
<i>Abbildung 110: Demonstrator Detail Handlauf - Übergang Wandpaneel zu Zierleiste</i>	143
<i>Abbildung 111: Demonstrator - Ansicht Handlauf.....</i>	143
Abbildung 112: System boundaries and process flow for System A (Indonesian production)	149
Abbildung 113: System boundaries and process flow for System B (German production)..	150
Abbildung 114: System boundaries and process flows for vehicle structure production	183
Abbildung 115: System boundaries and process flows for elevator structure production...	184
<i>Abbildung 116: A1-A3 hot spot analysis.....</i>	191

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Teilvorhaben	1
Tabelle 2: Versuchsauswertung Pressversuche Formsperrholz	22
Tabelle 3: Zusammenfassung Dichtenänderung durch Pressvorgang.....	27
Tabelle 4: oben: Albasia-Schichtholz mit Buchendecklage; Mitte: Albasia-Schichtholz mit Birkendecklage; unten: Albasia-Schichtholz mit Pappeldecklage	34
Tabelle 5: Überblick über die Einstellung der Parameter beim Pressen der Furniere	48
Tabelle 6: Überblick der unterschiedlichen Probengeometrien durch die verschiedenen Probendicken.....	49
Tabelle 7: Ergebnisse der quasi-statischen Pfahltests an Albasia-Sperrholzproben.....	62
Tabelle 8: Mittelwerte der Wasseraufnahme pro Volumen und der Gewichtszunahme der Proben nach dem Klimawechseltest	74
Tabelle 9: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit von Alabasia-Sperrholz und Alabasia-Formholz – gemessene Ergebnisse.....	76
Tabelle 10: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit von Alabasia-Sperrholz und Alabasia-Formholz – Skalierte Ergebnisse auf 50 mm Materialstärke	78
Tabelle 11: Analytisches Modell für reine und beleimte Albasia-Furnierproben unter Zugbelastung in 1-Richtung	87
Tabelle 12: Analytisches Modell für reine und beleimte Albasia-Furnierproben unter Zugbelastung in 2-Richtung	87
Tabelle 13: Materialeigenschaften für Albasia-Sperrholzproben unter Zugbelastung, aus [10].	89
Tabelle 14: Analytische Berechnung der Materialparameter von Albasia UD-Laminat parallel und senkrecht zur Faser, aus [11].....	95
Tabelle 15: Analytische Berechnung Sperrholz parallel und senkrecht zur Faser, aus [11].....	100
Tabelle 16: Analytische Berechnung Vollholzwürfel parallel und senkrecht zur Faser.....	105
Tabelle 17: Verwendete LS-Dyna Materialkarten für die Simulation von Zug- und Druckbelastung	108
Tabelle 18: Physikalische Eingabeparameter für die Zugsimulation der Einzelfurnierlagen	110
Tabelle 19: Physikalische Eingabeparameter für die Zugsimulation der Sperrholzproben, aus [10].....	113
Tabelle 20: Maximale Kraft und Energieabsorption des Pfahltests an der Referenz-Schwellenstruktur im Vergleich zur 100 mm Albasia-hybrid Platte.	133
Tabelle 21: Vergleich der Kennwerte der Referenz des Schwellereinlegers mit den Albasia-hybrid Varianten mit unterschiedlichen Querschnitten. Änderungen in % beziehen sich auf die Referenz.	135

<i>Tabelle 22: Definition der Furnier- und Faserorientierung im Albasia-Holzkern der Schwellereinleger.....</i>	137
Tabelle 23: Description of process steps in A: ID production.....	151
Tabelle 24: Description of process steps in System B: DE production.....	152
Tabelle 25: Material and energy inputs in System A: ID production.....	154
Tabelle 26: Waste streams in System A: ID production.....	155
Tabelle 27: Material and energy inputs in System B: DE production	155
Tabelle 28: Waste streams in System B: DE production	156
Tabelle 29: Transportation and logistics in System B	157
Tabelle 30: Transportation and logistic in System A.....	158
Tabelle 31: The LCIA results for System A - ID production	160
Tabelle 32: The LCIA results for System B - DE production	161
Tabelle 33: The LIA result for for EoL phase	162
Tabelle 34: Avoided environmental impacts from the recycling and energy recovery	162
Tabelle 35: Total environmental impact of the system after subtracting the benefits gained from end-of-life recovery (recycling or energy recovery).....	162
Tabelle 36: Cabins and their weights	166
Tabelle 37:Counterweight	168
Tabelle 38: Energy usage	172
Tabelle 39: Climate change impact	172
Tabelle 40: Overall Environmental performance: an overview.....	173
Tabelle 41: Material and energy inputs in vehicle structure production.....	186
Tabelle 42: Material and energy inputs in elevator structure production	186
Tabelle 43: Transportation and logistics in vehicle structure production	187
Tabelle 44: Transportation and logistics in elevator structure production.....	187
Tabelle 45: the LCIA results vehicle structure	189
Tabelle 46: The LCIA results elevator structure.....	189

9. Literaturverzeichnis

- [1] T.-O. Geßwein, „Weiterentwicklung und Bewertung einer Güterkapsel in holzintnesiver Bauweise für das Fahrzeugkonzept U-Shift“.
- [2] U. Müller, T. Jost, C. Kurzböck und A. Stadlmann, „Crash simulation of wood and composite wood for future automotive engineering,“ *WOOD MATERIAL SCIENCE & ENGINEERING*, Bd. 15, Nr. 5, pp. 312-324, 2020.
- [3] Y. Murray, „Manual for LS-Dyna Wood Material Model 143,“ U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2007.
- [4] T. Maillot, V. Lapoujade, E. Gripon, T. Toson und J.-J. Pesque, „Comparative study of materials laws available in ls-dyna to improve the modeling of balsa wood.,“ in *13th International LS-Dyna Users Conference*, 2014.
- [5] V. Tagarielli, V. Deshpande, N. Fleck und a. C. Chen, „A constitutive model for transversely isotropic foams. and its application to the indentation of balsa wood,“ *International Journal of Mechanical Sciences*, Bd. 47, pp. 666-686, 2005.
- [6] K. Klein, J. Will und T. Seider, „Numerical simulation of wood filled impact limiter with ls-dyna,“ in *International Congress on FEM Technology with ANSYS CFX ICEM CFD Conference*, 2004.
- [7] G. Newaz, M. Mayeed und A. Rasul, „Characterization of balsa wood mechanical properties required for continuum damage mechanics analysis,“ *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Bd. 230, Nr. 1, pp. 206-218, 2016.
- [8] G. Baumann, S. H. U. Müller, C. Kurzböck und F. Feist, „Comparison of the two material models 58, 143 in ls dyna for modelling solid birch wood,“ in *12th European LS-Dyna Conference*, 2019.
- [9] G. Piazza, D. B. Heyner, E. Beeh und H. Friedrich, „Methodology to simulate veneer based structural components for static and crash load cases,“ in *MDA2020 - 3rd International Conference on Materials Design and Applications*, Porto, Portugal, 2020.
- [10] G. Bour, T. Feser und G. Piazza, „Characterization and Simulation of Lightweight Wood.,“ Masterarbeit, Ecole Centrale de Nantes, 2022.

- [11] M. Christians, „Charakterisierung und Simulation von Leichtholz unter Druckbelastung,“ Masterarbeit, Hochschule Bochum, 2023.
- [12] K. A. Feichtinger, „Test Methods and Performance of Structural Core Materials - 1. Static Properties,“ *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Bd. Nr. 8, pp. 334-357, 1989.
- [13] F. F. Kollmann und C. W.A., Principles of Wood Science and Technology, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1968.
- [14] M. C. Barbu, K. Buresova, E. M. Tudor und A. Petutschnigg, „Physical and Mechanical Properties of Paulownia tomentosa x elongata Sawn Wood from Spanish, Bulgarian and Serbian Plantations,“ *Forests*, Bde. %1 von %2Jg 13, Nr.10, p. 1543, 2022.
- [15] A. Da Silva und S. Kyriakides, „Compressive response and failure of balsa wood,“ *International Journal of Solids and Structures*, Bde. %1 von %2Jg. 44, 25-26, pp. 8685-8717, 2007.
- [16] R. J. Ross, Wood handbook: Wood as an engineering material, Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021.
- [17] „Holzbau mit Sengon - Das Potential eines Leichtholzes im Bausektor,“ November 2015. [Online]. Available: <https://fairventures.org/wp-content/uploads/2015/11/Holzbau-mit-Sengon.pdf>. [Zugriff am 28 September 2020].
- [18] „Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,“ in *Intergovernmental Panel on Climate Change, (IPCC)* , Cambridge University Press., 2021.
- [19] L. & P. R. Al-Sharif, „Energy models of geared and gearless elevators,“ *Building Services Engineering Research and Technology*, Bd. 26, Nr. 3, p. 221–239, 2005.
- [20] Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E., ... & Foley,, „A safe operating space for humanity,“ *Nature*, Bd. 461, Nr. (7263), p. 472–475, 2009.
- [21] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, „World Population Prospects: Highlights,“ United Nations, 2019.

- [22] European Commission, „A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe,“ Publications Office of the European Union, 2020.
- [23] P. Pacheco, L. German, J. van Gelder, K. Weinberger und M. Guariguata, „Avoiding deforestation in the context of biofuel feedstock expansion: An analysis of the effectiveness of market-based instruments,“ Center for International Forestry Research (CIFOR), Bogor, Indonesia, 2011.
- [24] Lippke, B., O'Neil, E., Harrison, R., Skog, K., Gustavsson, L., & Sathre, R., „Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: Knowns and unknowns,“ *Carbon Management*, Bd. 2, Nr. 3, p. 303–333, 2011.
- [25] (CEN), European Committee for Standardization, „Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products,“ CEN, 2019.
- [26] Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., ..., & Spielmann, M., „Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods,“ Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Schweiz, 2007.
- [27] International Organization for Standardization (ISO), „Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework,“ ISO, Genf, 2006.
- [28] International Organization for Standardization (ISO), „Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines,“ ISO, Genf, 2006.
- [29] Guinée, J. B. (Hrsg.), *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [30] E. Association, „Ecoinvent version 3.9.1 database,“ Ecoinvent Association, Zürich, 2022.
- [31] Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., ... & van Zelm, R., „ReCiPe2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level,“ *The International Journal of Life Cycle Assessment*, pp. 138-147, 2017.
- [32] GreenDelta, „OpenLCA (Version 1.10),“ GreenDelta, Berlin, 2020.

- [33] European Committee for Standardization (CEN), „Wood and wood-based products – Calculation of the biogenic carbon content of wood and conversion to carbon dioxide,“ CEN, Brüssel, 2014.
- [34] Unger, D., „Lifts and escalators: A user manual,“ Springer Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg, 2024.
- [35] G.W. Gibson, „Elevator Hoistway Equipment: Mechanical and Structural Design, Part I,“ *Elevator World*, p. 97–110, September 2008.
- [36] Lubomír Janovský, Elevator Mechanical Design, Elevator World Inc., 1999.
- [37] (ISO), Internationale Organisation für Normung, „ISO 25745-2:2015; Energieeffizienz von Aufzügen, Rolltreppen und Fahrsteigen – Teil 2: Energieberechnung und Klassifizierung für Aufzüge (Elevatoren),“ 2015.
- [38] Salmelin, S., Vatanen, S., & Tonteri, H. (n.d.), „Life Cycle Assessment of an Elevator,“ KONE Corporation R&D, VTT Technical Research Centre of Finland, Finland.
- [39] Xiaoyan Zhang, Muhammad Usman Zubair, „Extending the Useful Life of Elevators Through Appropriate Maintenance Strategies,“ *Journal of Building Engineering*, 2022.
- [40] Laith Al-Sharif, „Calculating the elevator round trip time for the most basic of cases (METE II),“ *Lift Report*, pp. 18-30, Oktober 2014.
- [41] Al-Sharif, Laith, „Lift and escalator motor sizing with calculations and examples,“ *Lift Report*, Januar-Februar 1999.
- [42] G. Barney, „Towards Low Carbon Lifts,“ Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE).
- [43] Carlos Patrão, André de Almeida, John Fong, Fernando Ferreira, „Elevators and escalators energy performance analysis,“ in *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 2010.
- [44] European Commission, Joint Research Centre (JRC), Institute for Environment and Sustainability, International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance, Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2010.

- [45] German Federal Environment Agency (UBA), „Waste management in Germany 2020: Facts and figures,“ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2020.
- [46] International Aluminium Institute (IAI), „Aluminium sector greenhouse gas pathways to 2050,“ International Aluminium Institute (IAI), London, 2021.
- [47] L. & S. R. Gustavsson, „Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials,“ *Building and Environment*, pp. 940-951, 2006.
- [48] Aluminum Association, „Environmental Product Declaration: Primary Aluminum Ingot (Declaration No. 4786092064.104.1),“ Aluminum Association, Washington, D.C., USA, 2014/2022.
- [49] A. Dunkerque, „Environmental Product Declaration: Aluminium Slabs,“ Aluminium Dunkerque Industries France, Dunkerque, Frankreich, 2024.
- [50] L. Guangdong Gaoli Aluminum Industry Co., „Environmental Product Declaration: Solid aluminum panels,“ Guangdong Gaoli Aluminum Industry Co., Ltd., Guangzhou, China, 2023.
- [51] World Steel Association, „Life cycle assessment of steel products,“ World Steel Association, Brüssel, Belgien, 2021.
- [52] J.-P. Birat, „Life-cycle assessment, resource efficiency and recycling,“ *Metals*, Bd. 5, Nr. 4, p. 1444–1466, 2015.
- [53] International Organization for Standardization (ISO), „Energy performance of lifts, escalators and moving walks — Part 2: Energy calculation and classification for lifts (elevators),“ ISO, Genf, Schweiz, 2015.
- [54] R. Peters, „Energy efficiency in elevators: A key component of sustainable buildings,“ *Elevator World*, Bd. 65, Nr. 3, pp. 72-78, 2017.