



**Fertigung und Prüfung von holzbasierten
Hexagonstrukturen für ein innovatives Bodenkonzept im
Rahmen des Projektes U-Shift II**

T3200

**Studiengang Maschinenbau
Fachrichtung Konstruktion und Entwicklung**

Duale Hochschule Baden-Württemberg

von

TIM WIESE UND SABRINA ASSENHEIMER

12.05.2021

Matrikelnummer, Kurs: 1785803, TMB18KE2

Matrikelnummer, Kurs: 4412795, TMB18KE2

Ausbildungsfirma: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Stuttgart

Erstbetreuer: Dr.-Ing. Ralf Bähnisch

Betreuer der Arbeit: David Heyner M. Sc.; Dip.-Ing. Giovanni Piazza

Kurzfassung

Am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) wird an Entwicklungen für eine nachhaltige Mobilität geforscht. Ein Ansatz der verfolgt wird, ist der gezielte Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen als Werkstoff im Bereich der tragenden Fahrzeugprimärstrukturen. Im Rahmen des Forschungsprojekts U-SHIFT II wurden für das Konzept einer holzbasierten Bodenstruktur der Güterkapsel eines modularen Fahrzeugprototypen Materialprüfungen von Probekörpern durchgeführt und ausgewertet.

Im nachfolgenden Bericht wird zunächst auf die theoretischen Grundlagen des Leichtbauwerkstoffs Holz, Sandwichkonstruktionen und das Konzept der Bodenstruktur eingegangen. Dann wird der Prozess der manuellen Probenherstellung beschrieben. Außerdem werden der Versuchsplan mit den geprüften Probenkonfigurationen und den experimentellen Randbedingungen der Druckversuche vorgestellt. Abschließend werden die Versuchsergebnisse analysiert und der Aufbau eines Demonstrators beschrieben. Die Analyse zeigt eine hohe Belastbarkeit der Strukturen. Jedoch existiert eine hohe Streuung der Ergebnisse, die auf den großen Einfluss der manuellen Fertigungsprozesse und damit auf die erreichbare Bauteilqualität zurückzuführen ist.

Abstract

At the institute of vehicle concepts of the German Aerospace Center, research in the field of sustainable mobility is being conducted. One approach that is being pursued, is the targeted use of renewable construction materials in the area of load-bearing vehicle structures. As part of the U-SHIFT II research project, material tests were carried out and evaluated on test specimens for the concept of a wood-based floor structure for the cargo capsule of a modular vehicle prototype.

In the following report, the theoretical basis of the lightweight construction material wood, sandwich constructions and the concept of the floor structure are discussed first. Then, the process of manual specimen fabrication is described. In addition, the experimental plan with the tested specimen configurations and the experimental boundary conditions of the compression tests are presented. Finally, the experimental results are analyzed and the setup of a demonstrator is described. The analysis shows a high load-bearing capacity of the structures. Although the high scatter of the results demonstrates the large influence of manual manufacturing processes on the achievable component quality.

Eidesstattliche Erklärung

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Projektarbeit mit dem Thema: „Fertigung und Prüfung von holzbasierten Hexagonstrukturen für ein innovatives Bodenkonzept im Rahmen des Projektes U-Shift II“ selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

Stuttgart, 12. Mai 2021
(Ort, Datum)

T. Wiese
(Unterschrift)

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Projektarbeit mit dem Thema: „Fertigung und Prüfung von holzbasierten Hexagonstrukturen für ein innovatives Bodenkonzept im Rahmen des Projektes U-Shift II“ selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

Stuttgart, 12. Mai 2021
(Ort, Datum)

J. Anli
(Unterschrift)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	5
2.1	Leichtbauwerkstoff Holz	5
2.1.1	Aufbau und Eigenschaften	5
2.1.2	Prinzip der Zugseile	8
2.1.3	Holz Furniere	10
2.2	Sandwichstrukturen	12
2.2.1	Aufbau	12
2.2.2	Funktionsweise	13
2.3	Konzept der Bodenstruktur	14
2.3.1	Auswahl des Konzepts	14
2.3.2	Simulative Optimierung	15
2.3.3	Experimentelle Validierung	16
2.3.4	Simulativer Querträgervergleich	17
2.3.5	Gesamtkonzept	18
3	Probenherstellung	19
4	Versuchsplan und Randbedingungen	22
4.1	Versuchsplan	22
4.2	Experimentelle Randbedingungen	24
5	Versuchsergebnisse	26
5.1	Gütekriterien und Anforderungen an die Proben	26
5.2	Versagensarten	27
5.3	Validierung der Simulation	29
5.4	Parametervariation der Mittelplatte bezüglich Lagenaufbau	30
5.5	Parametervariation der Mittelplatte bezüglich Lagenorientierung	33
5.6	Fehlerursachen und Lösungsstrategien	38
5.7	Fazit der Prüfversuche	40
6	Aufbau eines Demonstrators	41
7	Zusammenfassung und Ausblick	42
8	Literaturverzeichnis	44

A Anhang	46
A.1 Materialkennwerte Buchenholz	46
A.2 Probenkörper aus der Bachelorarbeit von M. Rudlaff	46
A.3 Versuchsergebnisse aus der Bachelorarbeit von M. Rudlaff	47
A.4 Technische Zeichnung der Probengeometrie	48
A.5 Technische Zeichnung des Werkzeugs	49
A.6 Versuchsplan	50
A.7 Graphische Versuchsauswertung	51
A.7.1 Kraft-Weg-Diagramm der Parametervariation des Lagenaufbaus der MP	52
A.7.2 Kraft-Weg-Diagramm der Parametervariation der Lagenorientierung der MP	53
A.7.3 Auswertung der Proben mit PN = 001 - 003 (MP: 1,8 mm = 0,6/0,6/0,6 mit 0°/90°/0°)	54
A.7.4 Auswertung der Proben mit PN = 004 - 006 (MP: 2,1 mm = 0,6/0,9/0,6 mit 0°/90°/0°)	55
A.7.5 Auswertung der Proben mit PN = 007 - 009 (MP: 2,4 mm = 0,9/0,6/0,9 mit 0°/90°/0°)	57
A.7.6 Auswertung der Proben mit PN = 010 - 012 (MP: 2,4 mm = 0,6/0,6/0,6/0,6 mit 0°/0°/0°/0°)	58
A.7.7 Auswertung der Proben mit PN = 013 - 015 (MP: 2,4 mm = 0,6/0,6/0,6/0,6 mit 0°/45°/-45°/0°)	59
A.7.8 Auswertung der Proben mit PN = 016 - 018 (MP: 1,2 mm = 0,6/0,6 mit 0°/0°)	60
A.8 Dokumentation der geprüften Proben	61

Abkürzungs-, Abbildungs-, Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer Aided Design
DHBW	Duale Hochschule Baden-Württemberg
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
FEM	Finite Elemente Methode
HP	Hutprofil
MP	Mittelplatte
MW	Mittelwert
PN	Probennummer
PU	Polyurethan
UPM	Universalprüfmaschine

Abbildungsverzeichnis

1	Prozentuale Anteile der CO ₂ -Emissionen in der Europäischen Union	1
2	„On-the-Road“-Modularisierung U-SHIFT II	2
3	Die drei Hauptachsen des Holzes	6
4	Prinzip der Zugseile	8
5	Schubbeanspruchung	9
6	Herstellungstechnik Flachmessern von Furnieren	10
7	Herstellungstechnik Rundschälern von Furnieren	10
8	Furnierbild bei Herstellung mittels a) Flachmessern u. b) Rundschälern	11
9	Sandwichstrukturen mit unterschiedlichen Kernschichtaufbauten	12
10	Erhöhung der Biegesteifigkeit durch den Sandwicheffekt	13
11	Sandwichaufbau der Bodenstruktur	14
12	Relevante Parameter für die Simulation	15
13	Querschnitte der Vergleichsquerbalken (von links nach rechts): Holzbalken, Holz-Doppel-T-Träger und Aluminium-Doppel-T-Träger	17
14	Gesamtkonzept der Bodenstruktur in Sandwichbauweise	18
15	Probengeometrie mit Beschriftung der Funktionsflächen	19
16	Prozessablauf zur Herstellung von holzbasierten Hexagonstrukturen	19
17	Herstellungsprozess eines holzbasierten Hexagonprofils (aus Furnierlagen)	20
18	Werkzeug zum Formpressen der Hutprofile	21
19	Prüfaufbau der Versuche	25
20	Mögliche Versagensarten des holzbasierten Hexagonprofils	28

21	Kraft-Weg-Diagramm der Proben mit PN = 001 - 003 (MP: 1,8 mm = 0,6/0,6/0,6 mit 0°/90°/0°)	29
22	Kraft-Weg-Diagramm der Proben mit PN = 004 - 006 (MP: 2,1 mm = 0,6/0,9/0,6 mit 0°/90°/0°)	31
23	Kraft-Weg-Diagramm der Proben mit PN = 007 - 009 (MP: 2,4 mm = 0,9/0,6/0,9 mit 0°/90°/0°)	32
24	Kraft-Weg-Diagramm der Proben mit PN = 010 - 012 (MP: 2,4 mm = 0,6/0,6/0,6/0,6 mit 0°/0°/0°/0°)	34
25	Kraft-Weg-Diagramm der Proben mit PN = 013 - 015 (MP: 2,4 mm = 0,6/0,6/0,6/0,6 mit 0°/45°/-45°/0°)	35
26	Kraft-Weg-Diagramm der Proben mit PN = 016 - 018 (MP: 1,2 mm = 0,6/0,6 mit 0°/0°)	36
27	Mittelwerte und Standardabweichungen der Maximalkräfte F_{\max} (links) und Steifigkeiten c (rechts)	38
28	Delamination der Seitenflächen	38
29	Delamination (links) und Falten (rechts) der Furnierlagen im Hutprofil	39
30	Demonstrator des Gesamtkonzepts	41
31	In der Bachelorarbeit von M. Rudlaff geprüfte Probekörper	46
32	Ergebnisse der liegenden Versuchsreihe	47
33	Ergebnisse der stehenden Versuchsreihe	47
34	Übersicht der gefertigten und geprüften Konfigurationen	50
35	Kraft-Weg-Diagramm der Parametervariation des Lagenaufbaus der MP	52
36	Kraft-Weg-Diagramm der Parametervariation der Lagenorientierung der MP	53
37	Auswertung der Proben mit PN = 001 - 003	54
38	Auswertung der Proben mit PN = 004 - 006	56
39	Auswertung der Proben mit PN = 007 - 009	57
40	Auswertung der Proben mit PN = 010 - 012	58
41	Auswertung der Proben mit PN = 013 - 015	59
42	Auswertung der Proben mit PN = 016 - 018	60
43	Grafische Dokumentation der geprüften Proben mit PN = 001 - 006	61
44	Grafische Dokumentation der geprüften Proben mit PN = 007 - 012	62
45	Grafische Dokumentation der geprüften Proben mit PN = 013 - 018	63

Tabellenverzeichnis

1	Materialkennwerte von Buchenholz	8
2	Parameterwerte nach der simulativen Optimierung	15
3	Aufbau der Probekörper aus der Bachelorarbeit von M. Rudlaff	17
4	Aufbau der Probekörper für die Validierung der Simulation und der Variation des Lagenaufbaus der Mittelplatte	23
5	Aufbau der Probekörper für die Variation der Lagenorientierung der Mittelplatte	24
6	Klassifizierung der Proben in Güteklassen	27
7	Relevante Auswerteparameter der Proben mit den PN = 001 - 003	30
8	Relevante Auswerteparameter der Proben mit den PN = 004 - 006	31
9	Relevante Auswerteparameter der Proben mit den PN = 007 - 009	32
10	Relevante Auswerteparameter der Proben mit den PN = 010 - 012	34
11	Relevante Auswerteparameter der Proben mit den PN = 013 - 015	35
12	Relevante Auswerteparameter der Proben mit den PN = 016 - 018	37
13	Materialkennwerte von Buchenholz (vollständig)	46
14	Vergleich der Versagensarten in Abhängigkeit des Probengewichtes und der Klebstoffmenge	51

Formelgrößen und Einheiten

Symbol	Einheit	Erläuterung
c	$\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	Steifigkeit
E	MPa	Elastizitätsmodul
F	N	Kraft
F_D	N	Druckkraft
F_{\max}	N	maximale aufgebrachte Druckkraft der UPM
F_{theo}	N	theoretisch berechnete Kraft
F_Z	N	Zugkraft
h_{HP}	mm	Wandstärke des Hutprofils
h_{MP}	mm	Wandstärke der Mittelplatte
s	mm	Weg
S	-	Sicherheitsfaktor
t	s	Zeit
α_F	°	Flankenwinkel
σ	-	Standardabweichung

1 Einleitung

Der menschengemachte Klimawandel wird in Zukunft zur größten Bedrohung weltweit. Die Auswirkungen auf unser Klima und unseren Planeten werden enorm groß sein und sind bereits heute in vielen Teilen der Welt spür- und messbar. Um dieser Bedrohung entgegenzuwirken, haben sich weltweit 196 Staaten bei dem Pariser Klimaabkommen im Dezember 2015 dazu verpflichtet, die globale Erderwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen. Konkret bedeutet das eine Senkung der Treibhausgase wie Kohlenstoffdioxid und Methan. Viele Länder und Staatengemeinschaften, darunter auch die Europäische Union, wollen die Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 erreichen. Ende 2020 wurde zudem ein Zwischenziel in der EU ausgehandelt, welches eine Senkung der CO₂-Emissionen von 55 % im Vergleich zu 1990 vereinbart. [1]

Wird ein Blick auf die Bereiche geworfen, in denen das meiste Kohlenstoffdioxid in der Europäischen Union emittiert wird, fällt auf, dass im Verkehrssektor 30 % der CO₂-Emissionen der EU entstehen [2]. Bereits heute ist in vielen Bereichen der EU eine Senkung der Treibhausgase zu erkennen. Im Verkehrssektor steigen hingegen die Emissionen aufgrund von wachsender Mobilität, Flexibilität und Warenverkehr [2]. Der Verkehrssektor setzt sich, wie in Abbildung 1 oben zu sehen, aus dem Eisenbahn-, Zivilluftfahrt-, Schifffahrts- und mit dem größten Anteil dem Straßenverkehr zusammen. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass neben dem Individualverkehr, der den größten Teil des Straßenverkehrs ausmacht, auch der Güterverkehr innerhalb der EU einen großen Anteil an den Emissionen trägt. Damit die Klimaziele der Europäischen Union und den weiteren Staaten des Pariser Klimaschutzabkommens eingehalten werden können, müssen bei steigender Mobilität der Gesellschaft neue Fahrzeugkonzepte hinsichtlich der Antriebstechnologie, der Herstellung und der Recyclebarkeit sowie neue Konzepte für die Art der Mobilität zeitnah entwickelt und verwirklicht werden.

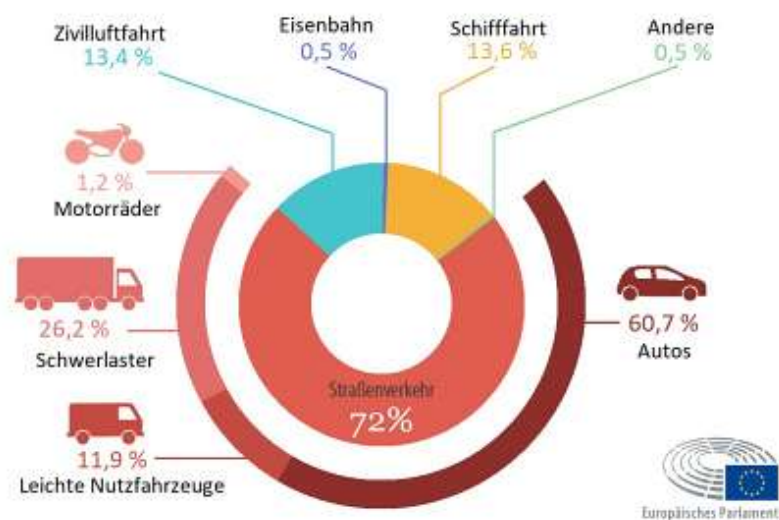


Abbildung 1: Prozentuale Anteile der CO₂-Emissionen in der Europäischen Union (vgl. [2])

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) entwickelt daher am Institut für Fahrzeugkonzepte das modulare, innovative Fahrzeugkonzept U-SHIFT II, welches einem grundlegend neuem Konzept von Mobilität unterliegt. Dieses Konzept basiert auf einem modularen Aufbau. Dabei wird das Fahrzeug in zwei Teile aufgeteilt: die Antriebseinheit - das Driveboard und die Transporteinheit - die Kapsel. Das Driveboard, dargestellt in Abbildung 2 a), enthält alle für den Antrieb notwendigen Fahrzeugkomponenten. Es wird elektrisch angetrieben und fährt vollständig autonom. Das Driveboard soll dauerhaft im Einsatz sein und nur zum Laden anhalten, was die Anzahl an benötigten Driveboards senkt. Damit wird der Großteil, der für ein Fahrzeug notwendigen Ressourcen, für mehrere Kapseln genutzt, was Ressourcen einspart. Durch die Standardisierung des Aufbaus des Driveboards in Form und Anschlüssen können eine Vielzahl an Kapseln aufgenommen werden.

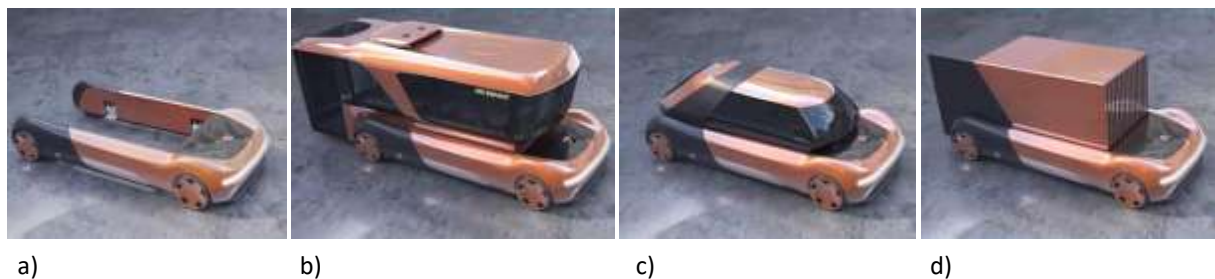


Abbildung 2: „On-the-Road“ Modularisierung U-SHIFT II (vgl. [3])

Die Abbildung 2 b) bis d) zeigen vier mögliche Konzepte für die Bauformen der Kapsel. Diese kann für den öffentlichen Nahverkehr genutzt werden, dargestellt in Bild b) oder für den Individualverkehr wie in Bild c). Zudem ist auch eine Nutzung im Warentransport möglich, wie in Bild d) dargestellt. Anwendungsbeispiele dafür wären im Lieferverkehr beispielsweise eine Packstation oder Güterkapsel, im Service Bereich eine Werkstatt-Kapsel oder „Dienste“-Kapsel für medizinische Anwendungen oder im Bereich von Wertstoffen mit Kapselkonzepten für Entsorgung oder Recycling. Die Kapseln beinhalten eine eingebaute Rampe, sodass sie am Boden beladen werden können. Später können die beladenen Kapseln vom Driveboard aufgenommen werden [3]. Ein großer Vorteil bei diesem System ist eine Modularisierung die dem „On-the-Road“-Konzept folgt. Das bedeutet, dass die Kapsel auf dem Boden steht und vom Driveboard direkt aufgenommen werden kann. Bisherige Konzepte basieren auf Baukasten oder Hutwechselsystemen, die eher Einzellösungen darstellen und bei der Beladung zusätzliche Konzepte benötigen.

Neben alternativen Antriebs- und Fahrzeugkonzepten müssen in Zukunft auch Produktion und verwendeten Materialien klimaneutral gewählt werden. Ein Ansatz der dabei zunehmend verfolgt wird, ist der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen. Dieser Trend beschränkt sich nicht nur auf Baugruppen mit Verkleidungs- oder Ablagefunktionen, sondern auch auf den Bereich der tragenden Fahrzeugprimärstrukturen und wird in der Forschung und Entwicklung vermehrt

vorangetrieben [4]. Im Rahmen des Projekts U-SHIFT II wird die Bodenstruktur einer Güterkapsel aus einer Holzstruktur entwickelt. Dabei wird eine Sandwichstruktur bestehend aus zwei Deckplatten und einer hexagonförmigen Profilstruktur als Kern verwendet. Dieser setzt sich aus zwei Hutprofilen und einer Mittelplatte zusammen. Damit werden durch die Zuladung auftretende Druckbelastungen in Zugkräfte umgewandelt und durch die in Faserrichtung belastete dünne Mittelplatte, welche als Zugseil wirkt, aufgenommen.

Der Leichtbauwerkstoff Holz besitzt ein großes Potenzial. Dies beginnt bei einer industriellen Verwendung, die dauerhaft nur in Kombination mit einer kontrollierten Aufforstung stattfinden kann. Dadurch werden bereits bei der Entstehung des Werkstoffes CO₂-Emissionen von den Wäldern aufgenommen und in Kohlenstoff und Sauerstoff gespalten. Der durch die Photosynthese freigesetzte Kohlenstoff wird dann im Baum bzw. Boden gespeichert. Nach der Rodung wird der Baum zum Werkstoff und anschließend zum Bauteil. Dieses kann am Ende des Bauteillebenszyklus downgecycelt, final thermisch verwertet oder kompostiert werden. Dadurch wird der Kohlenstoff in Form von CO₂ frei oder gelangt in den Boden, wo er wieder von Bäumen aufgenommen werden kann. Ein Kreislauf zwischen Aufforstung und Rodung würde einen konstanten und deutlich größeren gesunden Waldbestand entstehen lassen. Zudem ist Holz ein Rohstoff, der auch im sonst rohstoffarmen Deutschland produziert werden kann. Daraus folgen auch deutlich verkürzte Transportwege.

Ziel dieser Studienarbeit ist die Validierung und Optimierung der holzbasierten Hexagonstruktur für den Boden einer Güterkapsel für das Fahrzeugkonzept U-SHIFT II. Diese wurde in einer vorangestellten Bachelorarbeit von M. Rudlaff [5] bereits entwickelt und mithilfe der numerischen Simulation ausgelegt. Die experimentelle Überprüfung der Simulationsergebnisse lässt dann Rückschlüsse auf die Qualität der Simulation zu. Dadurch sollen zukünftige Simulationen mit dem Werkstoff Holz verbessert werden. Erste Versuche im Rahmen der Bachelorarbeit von M. Rudlaff [5] ergaben, dass die tatsächlichen ertragbaren Druckspannungen deutlich über den angenommenen Zulässigen liegen, sodass an dieser Stelle das vollständige Leichtbaupotenzial noch ausgeschöpft werden kann. So kann durch eine Variation des Lagenaufbaus der Furnierlagen eine Gewichtsreduktion erreicht werden. Darüber hinaus wird geprüft, ob andere Orientierungen der Fasern positive Auswirkungen auf die Festigkeit haben, sodass weitere Lagen eingespart werden können.

Für das Erreichen der angestrebten Ziele wird zu Beginn der Arbeit eine Literaturrecherche zu den Themen Holz als Leichtbauwerkstoff, Sandwichkonstruktionen und dem aktuellen Stand der Technik durchgeführt. Anschließend wird ein Versuchsplan erarbeitet. Es folgt die Versuchsphase, welche die Herstellung der Proben und die darauffolgenden Druckprüfversuche umfasst. Die Versuchsphase beginnt mit der Validierung der bereits vorgenommenen Simulation und beinhaltet Analysen zur Leichtbauoptimierung. Die gesammelten Daten werden danach

ausgewertet, aufbereitet und interpretiert. Ein weiteres Ziel der Arbeit ist neben der Fertigung und Prüfung der Proben auch der Aufbau eines Demonstrators.

2 Theoretische Grundlagen

Die theoretischen Grundlagen umfassen das Grundwissen zu den Themen Holz, Sandwichkonstruktionen und dem aktuellen Stand der Forschung. Bei dem Thema Holz werden der Aufbau und die Eigenschaften von Holz erläutert. Darüber hinaus werden das Prinzip der Zugseile in der Natur erklärt sowie auf die Herstellung von Furnierlagen eingegangen. Anschließend wird in Kapitel 2.2 der Aufbau und die Funktionsweise von Sandwichkonstruktionen vorgestellt. Daran anschließend wird der aktuelle Stand der Forschung aus der Bachelorarbeit von M. Rudlaff [5] zusammengefasst. Dies umfasst die Auswahl des Konzeptes der Bodenstruktur einer Güterkapsel des Fahrzeugkonzeptes U-SHIFT II sowie weitere Erläuterungen zur simulativen Optimierung, der ersten experimentellen Validierung, dem simulativen Querträgervergleich und die Erstellung eines Gesamtkonzeptes zum Schluss.

2.1 Leichtbauwerkstoff Holz

Aluminium ist neben Stahl einer der am meisten verwendeten Leichtbauwerkstoffe [6]. Jedoch hat die Förderung bis hin zu fertig verarbeitbarem Aluminium eine große negative Auswirkung auf die Umwelt [7]. Wasserverschmutzungen, ein Verlust der Biodiversität, Bodenkontamination, Entwaldung und Acid Mine Drainage, sprich der Kontakt von schwefelhaltigen Mineralien mit Sauerstoff, sind einige Folgen entlang der Lieferkette von Aluminium [7]. Zudem werden große Energiemengen benötigt. 3 % der globalen Elektrizität fließt in die Herstellung von Aluminium [7]. Bei einer genaueren Betrachtung, in welchen Bereichen das Aluminium eingesetzt wird, sticht der Verkehrssektor mit 48 % heraus. Eine Möglichkeit diese Bilanz zu verbessern, ist die Materialsubstitution durch beispielsweise Holzstrukturen im Fahrzeugbau. Der Werkstoff Holz ist ein nachwachsender und recyclebarer Werkstoff. Um die weltweiten Klimaziele zu erreichen, ist der Einsatz von nachhaltig lokal gewonnenem Holz vorteilhaft. Im folgenden Kapitel wird dieser vorgestellt und auf die Herstellung von Furnieren eingegangen.

2.1.1 Aufbau und Eigenschaften

Holz ist ein biologischer Werkstoff der sich hauptsächlich aus Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff zusammensetzt. Diese bilden zusammen mit kleinen Mengen mineralischen Bestandteilen und Stickstoff die Grundsubstanzen Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Aus diesen drei organischen Molekülen sind, neben kleinen Mengen von Wasser, Zucker und Stärke, Hölzer aufgebaut. Bei Cellulose handelt es sich um ein Fasermaterial, welches das Grundgerüst für die röhrenförmigen Zellen bildet, während Hemicellulose und Lignin für die Festigkeit der Zelle und die Verklebung der Zellen untereinander verantwortlich sind. Jede Baumart unterscheidet sich durch den Aufbau und Anzahl der Zellen, sodass unterschiedliche Eigenschaften zwischen den Hölzern entstehen. Im Allgemeinen wird zwischen Laub- und Nadelhölzern unterschieden. Für den weiteren Teil dieser Arbeit wird hauptsächlich der Laubbaum, insbesondere die Buche

näher betrachtet, da dieser bereits in der vorangegangenen Bachelorarbeit von M. Rudlaff [5] als geeigneter Werkstoff für die holzbasierte Bodenstruktur ermittelt wurde. [8]; [9]

Ein Holzstamm besteht aus mehreren Schichten. Im Innersten ist das Kernholz. Dies besteht aus abgestorbenen Holzzellen und ist besonders widerstandsfähig. Weiter außen folgt das Splintholz, welches aus lebenden röhrenförmigen Holzzellen besteht. Im Splintholz werden Nährstoffe gespeichert. Zudem transportiert es Wasser bis in die Krone. Nach dem Splintholz folgt weiter das Kambium. Dabei handelt es sich um eine Zwischenschicht, die Wasser nach innen abgibt und den Sauerstofftransport fördert. Im Frühjahr wächst diese Schicht an und bildet große Zellen. Dadurch wächst der Baum in der Breite. Im Herbst kommt das Wachstum zum Erliegen. Durch diesen Prozess entstehen Jahresringe, an denen das Alter des Baumes abgezählt werden kann. Die letzte Schicht ist die Borke bzw. umgangssprachlich die Rinde. Sie besteht aus abgestorbenen Zellen und schützt den Baum gegen äußere Einflüsse. [8]

Bei Holz handelt es sich um ein inhomogenes, orthotropes Materialsystem, welches mit drei Hauptachsen, wie in Abbildung 3 eingezeichnet, beschrieben werden kann. Die Längsachse zeigt dabei parallel in Richtung der Fasern. Die Radialachse steht normal und die Tangentialrichtung liegt tangential zu den Jahresringen. Die Eigenschaften des Holzes sind abhängig von der Faserrichtung. So ist beispielsweise die Festigkeit und Steifigkeit entlang der Längsachse höher als in Radial- oder Tangentialrichtung [5].

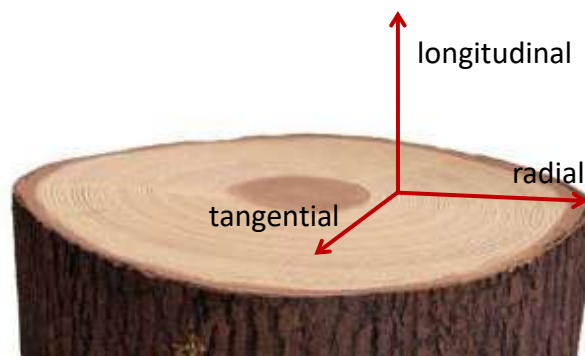


Abbildung 3: Die drei Hauptachsen des Holzes [10]

Die Eigenschaften von Holz lassen sich in drei Hauptkategorien einteilen. Die physikalischen Eigenschaften bestehen aus dem Verhalten gegenüber Feuchte, der Dichte sowie thermische, elektrische und akustische Eigenschaften. Zu den physikalischen Eigenschaften zählen auch die elastomechanischen Eigenschaften und Festigkeitseigenschaften. Diese umfassen Werte für den E-Modul, den Schubmodul sowie die Zug-, Druck-, Biege-, Scher- und Dauerfestigkeit. Die zweite Hauptkategorie beinhaltet die biologischen Eigenschaften. Diese thematisieren die Beständigkeit gegenüber Mikroorganismen. Die letzte der drei Kategorien ist das chemische Verhalten von Holz, wie der Einfluss des pH-Wertes auf Holz und Holzinhaltstoffe sowie das Verkleben. In Tabelle 1 sind die relevanten Materialkennwerte von Buchenholz aufgelistet. Eine

vollständige Tabelle befindet sich im Anhang A.1. [11]

Die wesentlichsten Einflussfaktoren auf die Materialkennwerte und Eigenschaften von Holz sind neben dem strukturellen Aufbau des Stammes auch der Standort, die Umweltbedingungen sowie die Vorgeschichten des Baumes wie Klima-, Schädlings- oder Pilzbeanspruchungen. Darüber hinaus beeinflusst die Holzfeuchtigkeit alle Materialeigenschaften. Steigt diese an sinkt die Festigkeit ab, wohingegen die Wärmeleitfähigkeit steigt und das Holz anfälliger gegenüber holz-zerstörenden Pilzen wird. Der Wassergehalt von Holz kann in drei Grenzzustände eingeteilt werden. Darrtrocken wird Holz bezeichnet, wenn die Holzfeuchte 0 % beträgt. Steigt der Wassergehalt bis das gesamte Mikrosystem der Zellwand vollständig mit Wasser gefüllt ist, wird von Fasersättigung gesprochen [11]. In diesem Zustand beträgt die Holzfeuchte abhängig von der Holzart ungefähr 28 %. Steigt der Wassergehalt darüber hinaus auf das Maximum an, bis das gesamte Mikro- und Makrosystem des Holzes mit Wasser gefüllt ist, wird von der Wassersättigung gesprochen. Abhängig vom Wassergehalt ändert sich die Gesamtdichte des Holzes. [11]

Die Darrdichte ist eine besondere physikalische Eigenschaft, da sie großen Einfluss auf verschiedene Materialkennwerte hat. Mit höherer Darrdichte steigt auch die Festigkeit während die Quellung sowie die Wärmeleitfähigkeit sinkt.

Tritt eine Dimensionsänderung bei einer Feuchteänderung auf, wird bei einem wachsenden Volumen von Quellen und bei sinkendem Volumen von Schwinden gesprochen. Die Volumenänderung wird durch kapillare Zugspannungen oberhalb der Fasersättigung verursacht [11]. Das Quell- und Schwindverhalten ist abhängig von der Faserrichtung. In Radialrichtung tritt das Phänomen 10- bis 20-mal stärker und in Tangentialrichtung 15 bis 30 mal stärker auf als in Faserrichtung. Wird das Quell- bzw. Schwindverhalten verhindert, beispielsweise durch äußere Kräfte oder Platzmangel, führt dies zu inneren Spannungen. Diese führen bei Überschreitung der zulässigen Spannung zu plastischen Verformungen. Zum Spannungsabbau reißt dann das Material ein. [11]

Bei dem Werkstoff Holz handelt es sich um ein Fasermaterial. Diese können aufgrund des Faserparadoxon nach A.A. Griffith [12] höhere Zugspannungen ertragen als das gleiche Material in anderer Form. Dies resultiert daraus, dass die fehlerfreie Länge größer ist als im kompakten Werkstoff. Buchenholz hat eine Zugfestigkeit in Längsrichtung von bis zu 135 MPa. Wird diese überschritten, beginnt das belastete Bauteil zu reißen, was deutlich hörbar ist und das Holz versagt schlagartig.

Tabelle 1: Materialkennwerte von Buchenholz

Materialkennwerte		Wert	Einheit
Darrdichte [13]		0,56	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Elastizitätsmodul [14]		14000,0	MPa
Biegefestigkeit [13]		59,0	MPa
Zugfestigkeit [5]	min	100,0	MPa
	max	135,0	MPa
Druckfestigkeit [13]	längs	24,5	MPa
	radial	3,7	MPa

2.1.2 Prinzip der Zugseile

Die holzbasierten Hexagonstrukturen, welche im Projekt U-SHIFT II für die Bodenstruktur einer Güterkapsel verwendet werden, basiert auf dem Prinzip von Zugseilen der Natur. Das Prinzip von Zugseilen beruht darauf eine Druckbeanspruchung, die für ein Bauteil bereits bei niedrigeren Spannungen zum Versagen führt, in eine Zugspannung umzuwandeln, da Zugspannungen im Allgemeinen erst bei höheren Lastniveaus zum Versagen führen. Wie in Abbildung 4 zu sehen wird die Druckkraft F_D , welche auf die dunkelgrüne Schale aufgetragen ist, durch Seile, hier hellgrün dargestellt, aufgenommen. Die Seile werden aufgrund F_D gespannt und mit einer Zugkraft F_Z belastet.

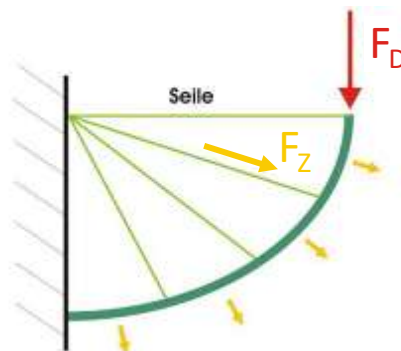


Abbildung 4: Prinzip der Zugseile (nach [15], S. 54)

Der Ursprung dieses Prinzips liegt in der Natur verankert und kommt dort in der Tier- und Pflanzenwelt vermehrt zum Einsatz. Wird in einer Leichtbaukonstruktion dieses Prinzip angewandt, so kann die Konstruktion deutlich hinsichtlich des Gewichtes optimiert werden. Daher wird bei dem Prinzip der Zugseile auch von der Krone des Leichtbaus gesprochen [15]. Zugseile erlauben eine homogene Spannungsverteilung sowie optimale Querschnittsauslastung und benötigen kein zusätzliches Material zum Schutz vor Ausknickung, wie es bei einer Druckbelastung erforderlich ist ([15], S. 16). Ein ideales Seil überträgt ausschließlich Zugkräfte. Dadurch können an den Lasteinleitungspunkten und Lastausleitungspunkten keine Momente oder Querkräfte

aufgenommen werden. Dies führt dazu, dass das Seil sich immer in Hauptspannungsrichtung ausrichtet. Ein Seil lässt sich mechanisch durch die Dehnsteifigkeit, die Zugfestigkeit und die Reißlänge bestimmen. Das Zerreißen des Seiles stellt die einzig mögliche Versagensart dar. [15]

Ein mögliches Beispiel für die Anwendung in der Natur ist der Stiel eines Bananenblattes. Dieses ist stark vereinfacht so aufgebaut, wie in Abbildung 5 zu sehen. Häufig wird dieses Prinzip auch mit Faserstrukturen realisiert. Die Anwendung von Zugseilen in der Technik ermöglicht eine genaueres Aufstellen eines Versagenskriteriums. Mit dem Einsatz von Zugseilen kann das Bauteilversagen durch große Verformungen vorher erkannt werden. Die Konstruktion von Leichtbaufachwerken auf Basis von vorgekrümmten Druckbögen und Zugseilen ist patentiert.

Eine Schubbeanspruchung entsteht, wenn das Material aufgrund von Scherkräften auf einer Gleitlinie oder Gleitebene aufeinander abgleitet. Dadurch entstehen im Material Schubspannungen, welche das Abgleiten verhindern und der Beanspruchung entgegenwirken. Biologische Materialien reagieren sehr empfindlich gegenüber Schubbelastungen zwischen den Fasern. Zugseile werden in der Natur zur Erhöhung der Scherfestigkeit eingesetzt. Sie sind entlang der durch den Schub entstehenden Zugspannung ausgerichtet. Dadurch haben sie eine unterstützende Wirkung und werden als Verstärkungsseile bezeichnet. [15]

Ein Beispiel für Verstärkungsseile in der Natur ist das Blatt einer Pflanze, wie in Abbildung 5 skizziert. Dies muss hohen Belastungen, die durch starken Wind hervorgerufen werden, standhalten, obwohl es nur über den Stiel mit der Pflanze verbunden ist. Um den Witterungen standzuhalten, ist das Blatt mit vielen Verstrebungen (Zugseilen) versehen, die zu einer hohen Stabilität beitragen. Die Blattvenen stehen dabei im 45° -Winkel zur Mittelrippe. Bei starkem Wind treten Kräfte entlang der Mittelrippe, wie in Abbildung 5 skizziert, auf. Das Blatt wird somit auf Schub beansprucht. Das Blatt kompensiert diese Beanspruchung mittels einer Kraftumleitung durch die Venen, die als Zugseile wirken. Somit werden die äußeren einwirkenden Kräfte in Zugkräfte umgewandelt und entlang des Stiels abgeleitet. ([15], S. 64 f.)

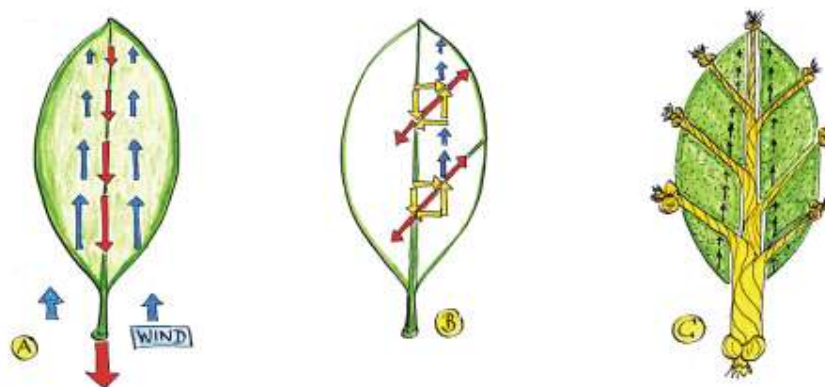


Abbildung 5: Schubbeanspruchung ([15], S. 65)

2.1.3 Holzfurniere

Holzfurniere werden aus gerade gewachsenen Baumstämmen hergestellt. Furniere können beispielsweise für Möbelstücke oder Verkleidungen im Fahrzeug verwendet werden. Zur Herstellung verschiedener Bauteilformen werden diese auch aneinander gefügt und in Form gepresst. Zur Gewinnung der Furniere werden Baumstämme zunächst entrindet und im Dampfbad gekocht. Dadurch wird das Holz geschmeidig und ist leichter verarbeitbar [16]. Nach der Vorbearbeitung können dann Holzfurniere auf verschiedene Arten hergestellt werden. Die zwei am weitesten verbreiteten Verfahren sind das Flachmessern und das Rundschälen. Beim Flachmessern wird, wie in Abbildung 6 links dargestellt, der Baumstamm zunächst halbiert und an den beiden Halbstämmen jeweils eine plane Oberfläche erzeugt. Anschließend werden durch paralleles oder senkrecht Messern Furniere vom Stamm abgetrennt [17]. Dabei bleibt das Messer feststehend und der Holzstamm wird mit einer linearen Bewegung hin und her bewegt. Dadurch können Furniere mit Dicken von 0,2 mm bis 5,0 mm erreicht werden. Die Standard-Furnierdicke liegt bei 0,6 mm [16].

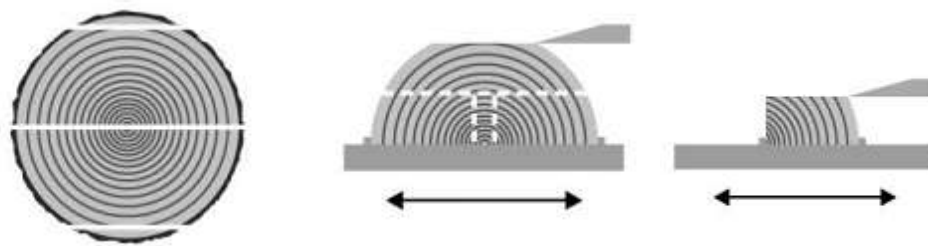


Abbildung 6: Herstellungstechnik Flachmessern von Furnieren (nach [18])

Beim Rundschälen wird der Stamm in einer Schälmaschine eingespannt und in Rotation versetzt. Dicke Stämme werden hierfür zwischen zwei Spitzen eingespannt. Dünne Stämme hingegen werden mit Hilfe von drei stammparallelen Antriebswalzen gespannt und angetrieben. Das feststehende Messer nimmt dabei Furnierlagen von 0,25 mm bis 8,0 mm Dicke ab. Um ein besseres Ergebnis erzielen zu können, wird zusätzlich ein Druckbalken von außen gegen das Schälmesser gedrückt, sodass die abgeschälte Furnierlage dazwischen liegt. Dadurch werden Spannungen, welche durch den Schneidevorgang auftreten, kompensiert [17].

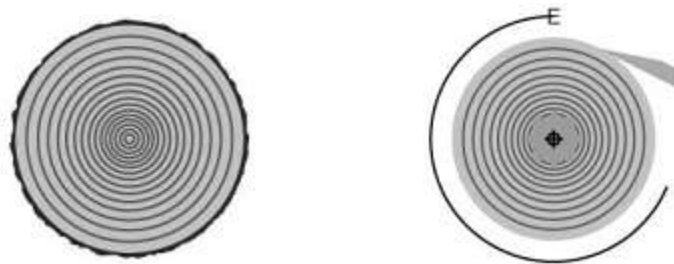


Abbildung 7: Herstellungstechnik Rundschälen von Furnieren (nach [18])

Je nach Herstellungsverfahren der Furniere ergibt sich ein anderes Furnierbild. Die Furniere die beim Flachmessern entstehen, zeigen bei der Stammaußenseite eine Fladerzeichnung auf

den Furnieren, wie in Abbildung 8 links skizziert [18]. Dies wird durch das Anschneiden der Jahresringe in sehr flachem Winkel erzeugt. Wird das Furnier näher am Stamm abgetrennt, verlaufen die Linien der Jahresringe des Baumes parallel. Das Furnierbild eines rund geschälten Furniers, dargestellt in Abbildung 8 rechts, ist hingegen sehr wild und unregelmäßig. [18]

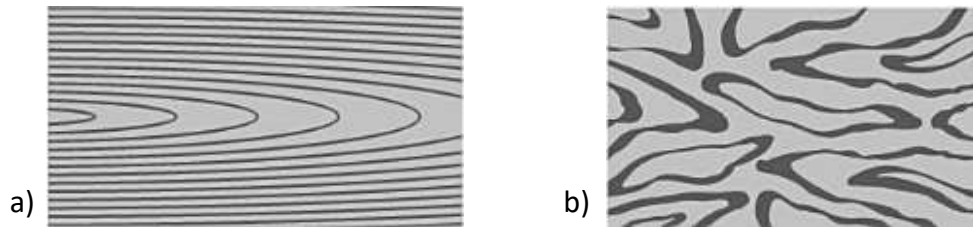


Abbildung 8: Furnierbild bei Herstellung mittels a) Flachmessern u. b) Rundschälern (nach [18])

Nach dem Schälen Herstellung werden die Furniere getrocknet und gleichzeitig gebügelt. Die Trocknungstemperatur und -dauer ist abhängig von der Holzart. Zu trockene Furniere können bei der weiteren Verarbeitung reißen, während zu nasse Furniere schimmeln können [16].

Die Holzfurniere können durch Kleben zu Bauteilen zusammengefügt werden. Klebeverbindungen ertragen gut eine Beanspruchung auf Abscheren der gefügten Teile. Eine Zug- oder Biegebeanspruchung senkrecht auf die Klebefläche hingegen ist eher ungünstig [19]. Bei der Wahl des geeigneten Klebstoffes muss darauf geachtet werden, dass dieser eine höhere Festigkeit als die zu fügenden Teile, hier die Furniere, aufweist. Dadurch wird sichergestellt, dass Bauteilversagen nicht aufgrund des Klebers stattfindet, im Holz liegt. Die Eigenschaften des Klebstoffes müssen dabei den Umwelteinflüssen und Witterungsbedingungen, welchen dieser ausgesetzt wird, standhalten. [19]

2.2 Sandwichstrukturen

Eine effektive Leichtbaustrategie in der Fahrzeugtechnik ist der Formleichtbau. Das Grundprinzip basiert darauf, die Materialverteilung im Bauteilquerschnitt zu optimieren. Eine Möglichkeit, diese Strategie zu realisieren, ist der Einsatz von Sandwichstrukturen mit einem hohen Leichtbaupotenzial. Diese Verbundwerkstoff-Strukturen sind in der Regel aus drei Schichten aufgebaut: zwei außenliegende Decklagen und einer dazwischenliegenden Kernschicht. Durch eine zug- und schubfeste Verbindung über die gesamte Fläche der einzelnen Schichten kann eine gemeinsame Tragwirkung des Verbundes erzeugt werden. ([20], S. 70ff.; [21], S. 38f./S. 235ff.)

2.2.1 Aufbau

Die Decklagen werden meist aus relativ dünnwandigen, festen Platten gefertigt. Die Hauptfunktion der dehnsteifen Deckschichten ist die Kraftaufnahme der in Ebenenrichtung wirkenden Zug- und Druckkräfte. Als Werkstoffe können, je nach spezifischen Anforderungen des konkreten Anwendungsfalls, nahezu alle plattenförmigen Materialien verwendet werden. Daher werden neben Metallen, Kunststoffen und Verbundwerkstoffen auch keramische und holzbasierte Werkstoffe für die Decklagen eingesetzt. ([20], S. 531; [21], S. 235ff., [22])

Beim Aufbau der dickeren, druckfesten Kernstruktur kann zwischen homogenen und strukturierten Kernformen differenziert werden. Während homogene Kerne meist aus aufgeschäumten oder verpressten Materialien bestehen, weisen strukturierte Kerne beispielsweise eine waben-, wellen-, tubus- oder stegförmige Querschnittsstruktur auf. Durch die Kombination unterschiedlicher Kerngeometrien mit einer Vielzahl an Werkstoffen ergibt sich eine sehr große Vielfalt an konstruktiven Varianten für die Kernstruktur. Dabei ist die mittlere Dichte des Kerns deutlich geringer als die der Decklagen. Der Kern hat die Funktion die Decklagen auf Abstand zu halten und die wirkenden Scherbelastungen und Schubkräfte aufzunehmen und zu übertragen. Außerdem sollte er, mit einer stabilisierenden Unterstützungswirkung, zur Gesamtsteifigkeit der Verbundstruktur beitragen. In Abbildung 9 ist der prinzipielle Aufbau von Sandwichstrukturen mit unterschiedlichen Kernschichten dargestellt. ([20], S. 532ff.; [21], S. 235ff.; [22])

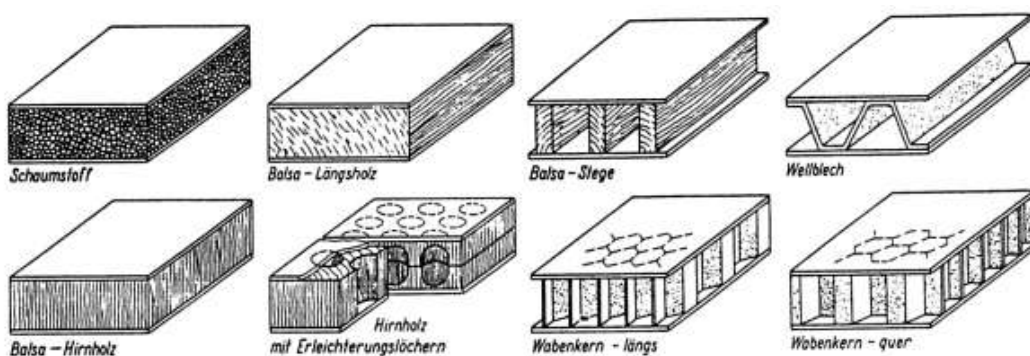

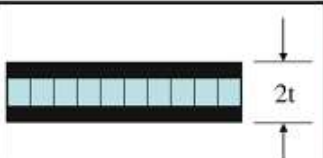
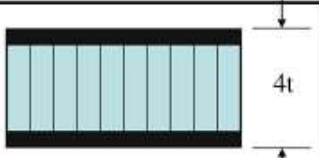


Abbildung 9: Sandwichstrukturen mit unterschiedlichen Kernschichtaufbauten [22]

2.2.2 Funktionsweise

Durch die vergrößerte Querschnittshöhe und Gesamtwandstärke, aufgrund des durch das Kernmaterial hervorgerufenen Abstands der beiden Decklagen, erhöht sich das wirksame Flächenträgheitsmoment des Bauteilquerschnitts. Damit vergrößert sich die Biegesteifigkeit der Gesamtstruktur ohne signifikanten Gewichtszuwachs verglichen mit einem massiven Vollprofil, welches vereinfacht nur aus Decklagen besteht. Wie in Abbildung 10 zu erkennen, hat der Sandwicheffekt einen großen Einfluss auf die relative Biegesteifigkeit bei einer geringen relativen Gewichtssteigerung. So kann beispielsweise mit einem „dicken“ Kern, der die vierfache Materialstärke verglichen mit einem massiven Bauteil aufweist, je nach Kern- und Deckschichtauswahl eine bis zu 37-fache Biegesteifigkeit bezogen auf das Massiv-Bauteil erreicht werden. Das Gewicht der Sandwichstruktur erhöht sich dabei verglichen mit dem Massiv-Bauteil je nach Kern- und Deckschichtauswahl um maximal 20 %. Ein Vergleich der unterschiedlichen Bauprinzipien des Kerns zeigt die Überlegenheit von strukturierten Kernen bei der Betrachtung des Verhältnisses Steifigkeit zu Gewicht. Außerdem kann die Last, je nach Art der Krafteinleitung, bei Sandwichstrukturen gleichmäßig über das Bauteil verteilt und die Energieabsorptionfähigkeit der Gesamtstruktur erhöht werden. Ein weiterer Vorteil der Sandwichbauweise ist ihre funktionsintegrierte akustische und thermische Dämmwirkung. ([20], S. 529ff.; [21], S. 238f.; [22]; [23], S. 68f.)

			
	Massives Bauteil	„Dünnere Kern“	„Dicker Kern“
Rel. Biegesteifigkeit $E \cdot J$	100%	Bis 700%*	Bis 3700%*
Rel. Gewicht	100%	103% – 108%*	106% – 120%*

* Abhängig von Kern- und Deckschichtauswahl

Abbildung 10: Erhöhung der Biegesteifigkeit durch den Sandwicheffekt ([20], S. 531)

Nachteilig bei Sandwichstrukturen ist der verhältnismäßig hohe Fertigungsaufwand. Außerdem sind bei Sandwichstrukturen die Reparaturmöglichkeiten im Schadensfall begrenzt und meist aufwändig. Bei Aufbauten mit geringen Anbindungsflächen infolge eines strukturierten Kerns ist die Funktion der Verbindung zwischen den Decklagen und Kernschichten für das Tragverhalten der Gesamtstruktur ausschlaggebend. Dabei ist als besonders kritisches Versagenskriterium die Delamination der Decklagen vom Kern anzusehen. Als Fügetechnik dieser Teilkomponenten kommen überwiegend Klebverfahren zum Einsatz. Bei homogenen Kernstrukturen kann die Verbindung durch großflächiges Verkleben oder Formsäumen realisiert werden. ([20], S. 534f.; [21], S. 237ff.; [22]; [23], S. 68f.)

2.3 Konzept der Bodenstruktur

Da diese Studienarbeit an die vorangegangenen Bachelorarbeit von M. Rudlaff [5] thematisch anknüpft, werden im Nachfolgenden der aktuelle Entwicklungsstand bezüglich dem Konzept der Bodenstruktur des Fahrzeugprototypen U-SHIFT II, sowie die wesentlichen Erkenntnisse aus dieser Arbeit zusammengefasst.

2.3.1 Auswahl des Konzepts

Zu Beginn der Bachelorarbeit von M. Rudlaff [5] erfolgte die Auswahl der am besten geeigneten Konzeptvariante für die Konstruktion der Bodenstruktur. Dazu wurden in einem Lastenheft alle relevanten Randbedingungen für den Aufbau der Bodenstruktur festgehalten ([5], A1). In einem weiteren Schritt wurden durch die Erstellung und Auswertung eines morphologischen Kastens unterschiedliche Lösungsansätze gesammelt. Diese unterscheiden sich durch das eingesetzte Material, die geometrische Struktur und die Ausrichtung. Anschließend ergab die Durchführung einer Nutzwertanalyse der unterschiedlichen Konstruktionsvarianten, dass eine aus dem Werkstoff Holz mit einer Hutprofilkonstruktion in Sandwichbauweise gefertigte Bodenstruktur, welche in Querrichtung ausgerichtet ist, das vielversprechendste Konzept darstellt. In Abbildung 11 ist der Aufbau dieses Strukturkonzepts schematisch dargestellt.

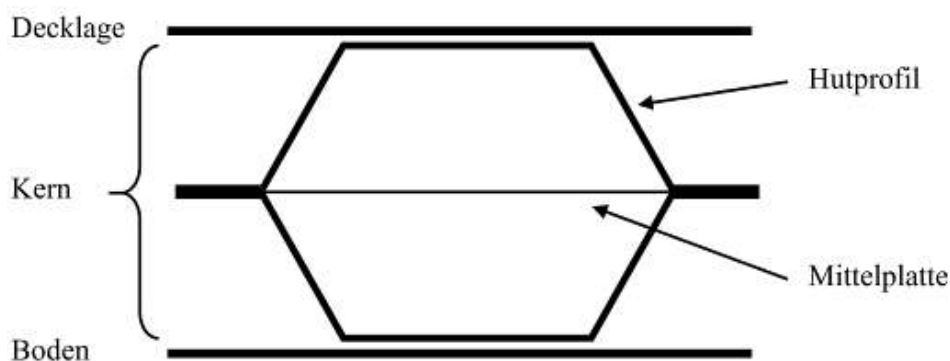


Abbildung 11: Sandwichaufbau der Bodenstruktur (in Anlehnung an [5], S. 10ff.)

Die Decklage und der Boden bestehen dabei aus einer einfachen Plattenkonstruktion. Zwei aneinandergefügte, symmetrische Hutprofile und eine Mittelplatte ergeben eine hexagonförmige Profilstruktur als Kern. Aufgrund der Zuladung des Fahrzeugs, treten auf der Decklage flächige Druckbelastungen auf. Dadurch verschieben sich die Fügestellen der beiden Hutprofile in horizontaler Richtung. Diese Translationsbewegung wird durch eine in Faserrichtung belastete dünne Mittelplatte, welche wie das in Kapitel 2.1.2 beschriebene Zugseil wirkt und die Zugkräfte aufnimmt, behindert. Mit dieser geschickten Geometrieordnung der Einzelkomponenten kann die Verhaltenscharakteristik des Werkstoffes Holz bei Belastungen optimal ausgenutzt werden. Aufgrund der hohen Zugfestigkeit, anisotropen Materialeigenschaften, dem Nachhaltigkeitsaspekt und guten Werkstoffverfügbarkeit wird das Hexagonkonzept als mehrlagiger Schichtaufbau aus Buchenholz Furnieren realisiert.

2.3.2 Simulative Optimierung

Mit einem iterativen Optimierungsverfahren wurden in der Bachelorarbeit von M. Rudlaff [5] unter Zuhilfenahme einer kommerziellen FEM-Simulationssoftware die geometrischen Abmessungen des Hexagonkonzepts hinsichtlich des Flankenwinkels α_F , der Wandstärke der Mittelplatte h_{MP} und der Wandstärke des Hutprofils h_{HP} ermittelt. In Abbildung 12 sind die im Optimierungsprozess betrachteten und variierten Parameter dargestellt. Dazu werden systematisch verschiedene Werte für die jeweiligen Parameter angenommen, während alle anderen Maße und Parameter innerhalb der jeweiligen Optimierungsschleife als konstant gesetzt wurden. Die Auswertung der durchgeführten Simulationen erfolgte über den Vergleich der auftretenden Translationen und maximalen Spannungen an definierten Referenzpositionen im Bereich der Deckfläche, Seitenflanken und Mittelplatte.

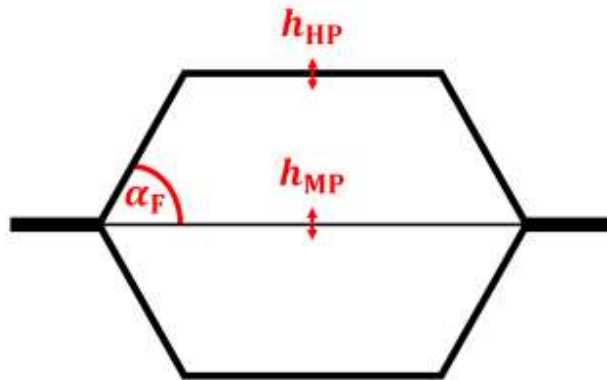


Abbildung 12: Relevante Parameter für die Simulation (in Anlehnung an [5], S. 19ff.)

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass mit steigendem Flankenwinkel α_F zwischen der Mittelplatte und dem Hutprofil die Spannungen im oberen Bereich und der Mitte sinken, in den Flanken jedoch steigen. Die Translation nimmt für größere Flankenwinkel ab. Eine Auswertung der Spannungsverhältnisse in der Mittelplatte und im Hutprofil zeigt, dass die Variante mit $\alpha_F = 45^\circ$ am besten die Druckbelastung in eine Zugbelastung wandelt. Im nächsten Schritt wurde die Wandstärke der Mittelplatte h_{MP} optimiert. Zwar verringern sich hier die Translationswerte mit steigender Wandstärke, jedoch zeigt eine Analyse der Spannungsverhältnisse, dass die Konfiguration mit $h_{MP} = 1,5$ mm am effizientesten das Konzept der Zugseile der Natur umsetzt. Die letzte Optimierungsschleife beleuchtete die Wandstärke des Hutprofils h_{HP} . Die Ergebnisse der Simulationen zeigen mit zunehmenden Werten für h_{HP} eine Reduktion der maximalen Spannungen und Translationen an den untersuchten Referenzpositionen. Das Optimum wird mit dem Wert $h_{HP} = 6,0$ mm erreicht. Die Tabelle 2 liefert eine Übersicht der Simulationsergebnisse aus dem numerischen Erstopoptimierungsprozess.

Tabelle 2: Parameterwerte nach der simulativen Optimierung

Flankenwinkel α_F	Wandstärke der Mittelplatte h_{MP}	Wandstärke des Hutprofils h_{HP}
45°	1,5 mm	6,0 mm

Abschließend wurde eine genauere Simulation des Konzepts mit einer feineren Netzauflösung durchgeführt. Dabei wurden auch die einzelnen Furnierlagen und die Anisotropie des Holzes berücksichtigt. Es zeigte sich, dass bei einer Verwendung eines Sicherheitsfaktors von $S = 1,3$ durchaus für die erste Grobauslegung auch eine vereinfachte Simulationsmethodik ohne Beachtung der Sperrlagen ausreichend ist. Diese theoretische Vorbetrachtung lieferte ausreichende Sicherheiten, damit erste Versuchskörper gefertigt und getestet werden konnten.

2.3.3 Experimentelle Validierung

Um die Probekörper herzustellen wurde im Rahmen der Bachelorarbeit von M. Rudlaff [5] ein Pressenwerkzeug angefertigt. In dieses wurden die einzelnen mit Holzleim benetzten Furnierholzplatten mit wechselnder Faserorientierung $[0^\circ/90^\circ]$ gelegt und in Form gepresst. In Abbildung 15 ist ein Koordinatensystem eingeführt. Furnierlagen mit einer Faserorientierung von 0° zur y-Achse werden als Zuglagen, Furnierlagen mit einer Faserorientierung von 90° zur y-Achse und damit 0° zur x-Achse werden als Sperrlagen bezeichnet. Aus fertigungstechnischen Gründen und den Abmaßen der verfügbaren Furniere, ist das Maß der Deckfläche in Richtung der y-Achse um 16 mm kürzer gewählt worden, als das der simulierten Geometrie. Für die ersten Prüfversuche wurden drei verschiedene Probekörper mit unterschiedlichem Lagenaufbau angefertigt. Im Anhang A.2 sind diese Proben abgebildet. Die Probekörper 1 und 2 wurden liegend auf Druck mit einer Universalprüfmaschine (UPM) geprüft. Die Versuchsergebnisse sind im Anhang A.3 festgehalten. Es ist ersichtlich, dass die im Versuch erreichten Druckkräfte die simulierten Werte übertreffen und so eine grundlegende Funktionalität der entwickelten Hexagonstruktur mit Mittelplatte zeigen [5]. Eine wichtige Beobachtung ist zudem, dass der Versagensfall des Bauteils schlagartig eintritt und mit dem Reißen der Mittelplatte beginnt. Dies validiert zwar die Funktion der Mittelplatte als Zugseil, zeigt jedoch zugleich auch eine momentane Überdimensionierung der Hutprofile im Verhältnis zur Mittelplatte auf. Hier besteht weiteres Leichtbaupotenzial, welches zum Beispiel mittels einer Verringerung der Sperrschichtdicke in den HP weiter ausgeschöpft werden kann. Die Probe 3 wurde stehend als Wabenstruktur auf Druck geprüft. Der Versuch zeigte eine deutlich höhere Kraftaufnahme und ein Versagen ohne direkten Spannungsverlust. Dies bestätigt somit die vielseitige Einsetzbarkeit des Konzepts auch in anderen Anordnungen mit anderen Anforderungen. Da die Studienarbeit auf den bereits durchgeführten Prüfungen basiert und der Fokus auf die Validierung und Optimierung von den verwendeten Probengeometrien gerichtet ist, zeigt die nachfolgenden Tabelle 3 eine Übersicht aller im Rahmen der Bachelorarbeit von M. Rudlaff [5] gefertigten und geprüften Probekörper.

Tabelle 3: Aufbau der Probekörper aus der Bachelorarbeit von M. Rudlaff [5]

Probekörper:	1	2	3
<i>Mittelplatte</i>			
Lagenaufbau (h_{MP}):	2,1 mm = 0,6/0,9/0,6	2,4 mm = 0,9/0,6/0,9	2,1 mm = 0,6/0,9/0,6
Lagenorientierung:	0°/90°/0°	0°/90°/0°	0°/90°/0°
<i>Hutprofil</i>			
Lagenaufbau (h_{HP}):	6 mm = 5 x (0,6/0,6)	6 mm = 4 x (0,6/0,9)	6 mm = 4 x (0,6/0,9)
Lagenorientierung:	[0/90] _n	[0/90] _s	[0/90] _s

2.3.4 Simulativer Querträgervergleich

Zur Validierung des Hexagonkonzepts als Querträgerkonstruktion ist dieses in der Bachelorarbeit von M. Rudlaff [5] simulativ mit drei weiteren Konzepten verglichen worden, deren Querschnittsprofile in Abbildung 13 verhältnismäßig dargestellt sind. Um eine Vergleichbarkeit nur in Abhängigkeit von der Geometrie sicherzustellen, sind für die unterschiedlichen Querbalkenkonzepte eine einheitliche Höhe, Länge und Gewicht definiert worden. Zwei der Konzepte bestehen aus dem Werkstoff Buchenholz, eins davon in Balkenform mit einem Rechteckquerschnitt, das andere als Doppel-T-Träger. Für den direkten Vergleich mit dem Leichtbauwerkstoff Aluminium ist ein weiterer Aluminium-Doppel-T-Träger als Referenz untersucht worden.

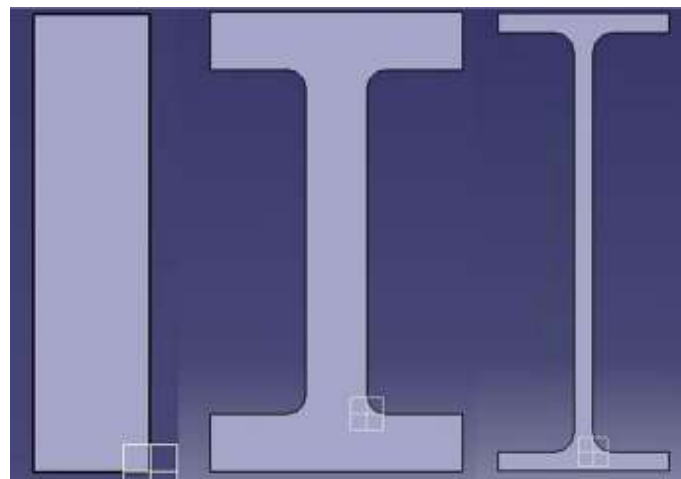


Abbildung 13: Querschnitte der Vergleichsquerbalken (von links nach rechts): Holzbalken, Holz-Doppel-T-Träger und Aluminium-Doppel-T-Träger ([5], S. 42)

Für den Vergleich der verschiedenen Konzepte wurden die Simulationen mit den gleichen Randbedingungen und Lasten durchgeführt. Im Anschluss wurden die durchgeführten Simulationen anhand der maximal auftretenden vertikalen Translation und wirkenden Spannungen ausgewertet und verglichen. Der einfache Holzbalken ist im direkten Vergleich mit dem Hexagonkonzept deutlich schlechter. Die geringste Spannung tritt im Doppel-T-Träger aus dem Werkstoff

Buchenholz auf. Diese geringere Materialbelastung wird jedoch durch eine erhöhte Translation ausgeglichen. Der Doppel-T-Träger aus Aluminium hat in der Simulation die geringste vertikale Translation in Kombination mit der höchsten Spannung erzielt. Ersteres lässt sich mit der höheren Biegesteifigkeit und letzteres mit dem höheren E-Modul erklären. Allgemein weisen die Doppel-T-Träger ein großes Flächenträgheitsmoment auf, dennoch sind sie besonders im Fall einer zu hohen und schlanken Ausführung aufgrund ihrer geringeren Torsionssteifigkeit und des dünnen Mittelstegs anfälliger gegenüber Knicklasten. Der simulative Vergleich mit anderen Querträgerkonzepte zeigte im Allgemeinen eine gute Funktion des Hexagonkonzepts, was eine vertiefte Bearbeitung der Thematik rechtfertigt.

2.3.5 Gesamtkonzept

Das letzte Kapitel der Bachelorarbeit von M. Rudlaff [5] behandelt die Konstruktion eines ersten Gesamtkonzepts der Bodenstruktur, welches besonders das Hexagonkonzept des Kerns einbindet. Dieses ist mit seinen Bestandteilen Kern, Decklagen und Boden in Abbildung 14 zu sehen. Randbedingungen sind dabei die Anforderungen aus dem Lastenheft. Der Aufbau der Decklagen- und Bodenstrukturen sollte modular und flexibel austauschbar konzipiert werden. Daher werden diese aus mehreren Einzelholzplatten gefertigt auf denen sich viel Raum für Anbindungspunkte an weitere Komponenten befindet. Durch den symmetrischen Aufbau der Bodenstruktur kann für die Decklagen und den Boden das gleiche Konstruktionsprinzip verwendet werden. Da der Boden jedoch zusätzlich eine Schutzwirkung vor Umwelteinflüssen, korrosiven Medien und Feuchtigkeit erfüllen sollte, wird die Struktur aus Holzplatten mit einer dünnen Kunststoffschicht überzogen. Die Anbindung an den Kern erfolgt über dreieckige Querbalken mit punktuellen Füge-techniken zwischen den Balken und den Seitenflanken der Hexagonstruktur. Diese verhindern so ein Verrutschen der Bodenstruktur in Längsrichtung, bewirken eine versteifende Wirkung und leiten die Hauptlasten in die im Kern sitzenden Hexagonstrukturen.

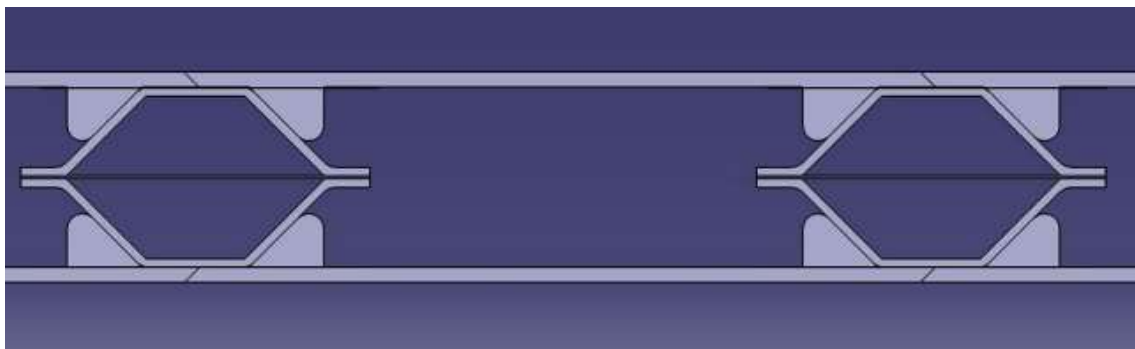


Abbildung 14: Gesamtkonzept der Bodenstruktur in Sandwichbauweise ([5], S. 47)

3 Probenherstellung

Die Probengeometrie besteht, wie in Abbildung 15 dargestellt, aus einer Mittelplatte (MP) und zwei Hutprofilen (HP). Die Abmaße der Probengeometrie kann dem Kapitel 2.3.2 und der technischen Zeichnung im Anhang A.4 entnommen werden.

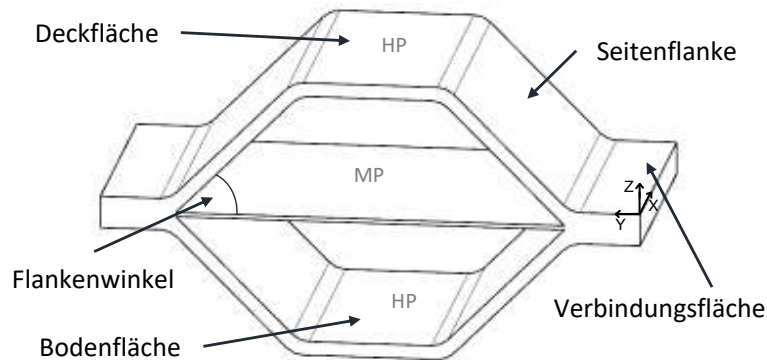


Abbildung 15: Probengeometrie mit Beschriftung der Funktionsflächen

Die Herstellung dieser Geometrie mit dem dazugehörigen Faseraufbau ist mit verleimten, in Form gepressten Furnierlagen realisierbar. Ein Fräsen aus dem Vollen, beispielsweise aus einer Multiplexplatte oder Holzbrettern, würde zwar die Abmaße des Hutprofils erreichen, jedoch ist damit keine Faserorientierung in Kraftflussrichtung möglich. Die Herstellung der Hutprofile und der Mittelplatte mittels Furnierlagen erfolgte als Prototypenbau für den Forschungszweck zunächst in Handarbeit. Für einen großindustriellen Einsatz müsste dieser Fertigungsprozess einen höheren Automatisierungsgrad erlangen. Dies könnte durch die Automatisierung des Klebevorganges und des Formpressens erreicht werden.

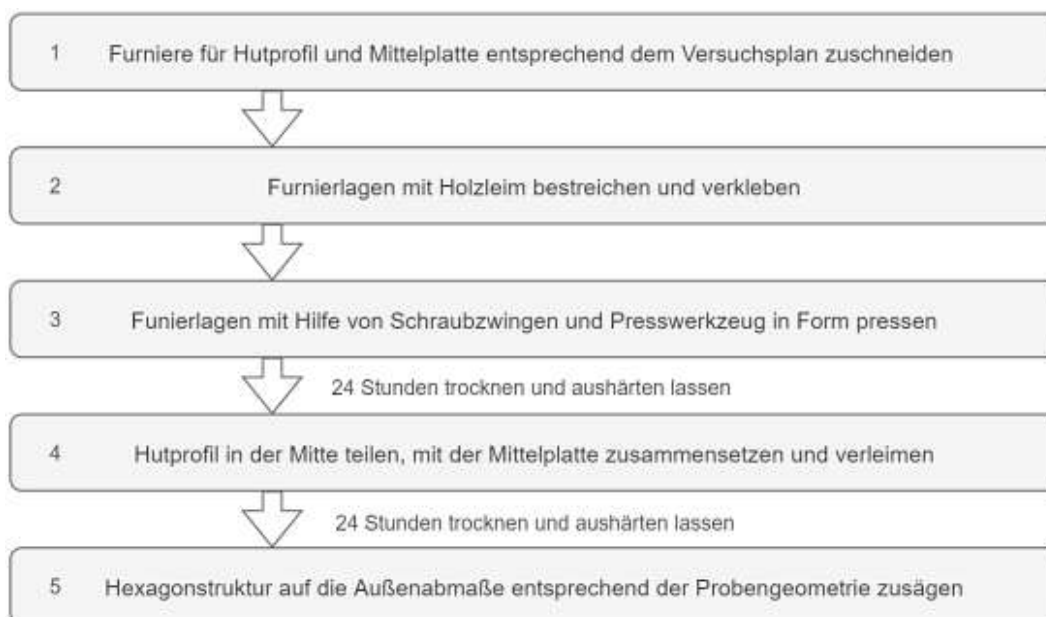


Abbildung 16: Prozessablauf zur Herstellung von holzbasierten Hexagonstrukturen

In Abbildung 16 ist der Herstellungsprozess der Hexagonstruktur in einem Flussdiagramm kurz zusammengefasst und wird nun im Folgenden genauer beschrieben. Darüber hinaus zeigt Abbildung 17 eine vollständige Dokumentation des Herstellvorgangs mit einzelnen Bildern der Prozessschritte.



Zuschneiden der Furnierlagen entsprechend des Versuchsplanes



Auftragen des Klebstoffs auf die Furnierlagen



Ablage des Furnierstapels in die Hutprofilform



Verpressen und Aushärten/Konsolidieren (24 h) der Hutprofile



Verpressen und Aushärten/Konsolidieren (24 h) der Mittelplatte



Halbieren der Hutprofile mit Hilfe einer Japansäge



Zusammenbau der Proben aus zwei Hutprofilen und einer Mittelplatte; Dauer Konsolidierung 24 h



Kürzen der Verbindungsfläche auf 30 mm



Ablängen und Zuschneiden beider Seitenflächen auf 120 mm

Abbildung 17: Herstellungsprozess eines holzbasierten Hexagonprofils (aus Furnierlagen)

Zu Beginn wurden die Furniere entsprechend dem Versuchsplan zugeschnitten. Dabei wurde auf die Faserorientierung geachtet. Anschließend wurden die Furniere mit Ponal Classic Weißleim [24] gleichmäßig bestrichen und verklebt. Die verwendete Klebstoffmenge schwankte bei den Hutprofilen zwischen 9,4 g und 13,5 g, je nach Fläche der zugeschnittenen Furniere. Beim

Verkleben wurden die Lagen des Hutprofils abwechselnd in der 0° und 90° Lagenorientierung gelegt. Bei der Mittelplatte lag die Klebstoffmenge bei konstant 5,0 g pro Lage und die Faserorientierung erfolgte nach dem Versuchsplan. Im dritten Schritt wurden die verleimten Furnierlagen in eine Form gelegt, ausgerichtet und gepresst. Das Presswerkzeug für die Hutprofile, zu sehen in Abbildung 18 links, besteht aus zusammengeschaubten, ausgefrästen Multiplexplatten. Zusätzlich wurde im Zuge dieser Arbeit eine 1 m lange Form gefertigt und verwendet, welche aus gefügten Multiplexplatten direkt ausgefräst wurde, dargestellt in Abbildung 18 rechts. Die Abmaße der langen Form sind im Anhang A.5 in einer technischen Zeichnung festgehalten.



Abbildung 18: Werkzeug zum Formpressen der Hutprofile

Die Mittelplatten wurden zwischen zwei Metallplatten gepresst. Alle Formen und Platten sind zur Furnierseite hin mit Teflonfolie beklebt. Dies verhindert das Verkleben des gepressten Bauteils mit der Form und erleichtert das Entnehmen. Mit Hilfe von Schraubzwingen wurde eine zusätzliche Presskraft aufgebaut und das Bauteil in der Form fixiert. Die Aushärtezeit betrug jeweils mindestens 24 Stunden. Danach wurde das Bauteil aus der Form entnommen. Zur weiteren Verarbeitung wurde das Hutprofil mit einer Japansäge halbiert. Anschließend wurden die zwei Hutprofile mit der entsprechenden Mittelplatte zusammengesetzt, verleimt und für weitere 24 Stunden getrocknet. Das Bauteil wurde zum Schluss auf die Abmaße zugesägt. Dafür wurde es zunächst im Schraubstock eingespannt und die Verbindungsflächen auf 30 mm gekürzt. Anschließend wurde das Bauteil in die Negativ-Hälfte der Pressform mit Schraubzwingen gespannt und auf die Breite von 120 mm zugesägt. Somit konnte ein starkes Aufschwingen, erzeugt durch den Sägevorgang, vermieden werden. Zum Schluss wurde die fertige Probe entgratet.

4 Versuchsplan und Randbedingungen

Den Kern dieser Arbeit bilden die Durchführung und Interpretation von Druckversuchen mit einem erweiterten Probenumfang im Vergleich zur Bachelorarbeit von M. Rudlaff [5]. Diese Versuche sollen zum einen die simulativen Ergebnisse der Bachelorarbeit validieren, zum anderen auch durch eine gezielte Parametervariation neue Erkenntnisse für den Optimierungsprozess der Bodenstruktur liefern. Die geprüften Parameterkonfigurationen sind daher in einem Versuchsplan im Anhang A.6 aufgeführt und werden bezüglich ihrer iterativen Bestimmung nun näher erläutert. Damit die durchgeführten Versuche reproduzierbar sind, müssen auch die experimentellen Randbedingungen genau definiert sein, sodass auf diese im Anschluss näher eingegangen wird.

4.1 Versuchsplan

Um eine statistische Sicherheit und möglichst geringe Streuung bei den Prüfungen zu erreichen, wurde im Voraus eine Prüfstrategie festgelegt. Diese verfolgte den Ansatz eine möglichst hohe Anzahl an Prüfkörpern je Parameterkonfiguration zu fertigen und zu prüfen, wobei dadurch eine geringere Variation in den untersuchten Parametern in Kauf genommen werden musste. Daher sind für die ersten Versuche mindestens drei Proben je Konfiguration angefertigt worden. Bei einer größeren Streuung der Versuchsergebnisse sollte dieser Wert gegebenenfalls auf einen größeren Probenumfang erhöht werden. Die Parameterwahl erfolgt in zwei Schritten und startet mit einer bewährten Referenzkonfiguration aus der Bachelorarbeit. Der Gesamtprozess durchläuft dabei zwei Teilschritte, welche jeweils aus Fertigungs- und Prüfphasen bestehen. Der erste Schritt umfasst die Prüfungen zur Validierung der Simulation und Parametervariation der Mittelplatte bezüglich dem Lagenaufbau. Die Ergebnisse dieser Druckversuche werden direkt im Anschluss ausgewertet und interpretiert. Im zweiten Schritt werden die Parameter der Mittelplatte bezüglich der Lagenorientierung variiert und die sich so ergebenden Varianten untersucht.

Im ersten Schritt sollte die in der Bachelorarbeit simulierte Konfiguration mit einem Probekörperumfang von drei Proben validiert werden. Dazu wurde eine Parameterkonfiguration gewählt, die der bereits simulierten Version [5] in der Realität am nächsten kommt. In der nachfolgenden Tabelle 4 sind diese Proben mit den Probennummern (PN) = 001 - 003 bezeichnet. Ausgehend von dieser Parameterkonfiguration sollte die Mittelplatte hinsichtlich des Lagenaufbaus und damit auch indirekt der Wandstärke optimiert werden. Dafür wurde der Lagenaufbau und die Lagenorientierung der Furnierlagen im Hutprofil einmalig festgelegt und lediglich die Furnierstärken und Reihenfolge der Lagen in der Mittelplatte variiert. Es werden dabei drei unterschiedliche Parametervariationen verglichen. Die relevanten Proben für diese Parametervariation sind mit den PN = 001 - 009 gekennzeichnet, sodass eine Doppelverwendung der Versuchsergebnisse der ersten drei Proben sowohl für die Validierung, als auch für die Parametervariation erfolgt. Tabelle 4 zeigt die in der ersten Iterationsschleife gefertigten und geprüften

Probekörper.

Tabelle 4: Aufbau der Probekörper für die Validierung der Simulation und der Variation des Lagenaufbaus der Mittelplatte

Probennummer (PN):	001 - 003	004 - 006	007 - 009
<i>Mittelplatte</i>			
Lagenaufbau (h_{MP}):	1,8 mm = 0,6/0,6/0,6	2,1 mm = 0,6/0,9/0,6	2,4 mm = 0,9/0,6/0,9
Lagenorientierung:	0°/90°/0°	0°/90°/0°	0°/90°/0°
<i>Hutprofil</i>			
Lagenaufbau (h_{HP}):	6 mm = 5 x (0,6/0,6)	6 mm = 5 x (0,6/0,6)	6 mm = 5 x (0,6/0,6)
Lagenorientierung:	[0/90] _n	[0/90] _n	[0/90] _n

Neben dem Lagenaufbau soll die Mittelplatte auch in Bezug auf die Lagenorientierung untersucht werden. Dafür wird ein doppelter Quervergleich von drei unterschiedlichen Parametervariationen durchgeführt. Der Probenumfang umfasst damit neun weitere Probekörper die mit den PN = 010 - 018 gekennzeichnet sind. In Tabelle 5 ist der Aufbau der verwendeten Probekörper für die Parametervariation bezüglich der Lagenorientierung der Mittelplatte dargestellt. Alle Varianten besitzen den gleichen Hutprofilaufbau. Die ersten beiden Parametervariationen (PN = 010 - 015) weisen jeweils vier Furnierlagen mit gleicher Stärke auf, sodass ein direkter Vergleich möglich ist. Der Unterschied zwischen diesen ist jedoch, dass in der zweiten Konfiguration (PN = 013 - 015) die beiden inneren Furnierlagen jeweils um ± 45 zur Bauteilquerachse, welche der y-Achse in Abbildung 15 entspricht, gedreht sind. Der Gesamtaufbau erfolgt im Hinblick auf die Furnierlagen immer symmetrisch zur Bauteilmittellebene, welche durch die Mittelplatte der Hexagonstruktur festgelegt ist. Dadurch kann ein Bauteilverzug aufgrund von Schwankungen der Luftfeuchtigkeit vermieden werden. Mit der um ± 45 gedrehten Konfiguration soll eine vektorielle Aufteilung der Funktionen als Sperr- oder Zuglage und eine zusätzliche Verstrebungswirkung über die Bauteildiagonale erreicht werden. Ein zusätzlicher Vergleich mit den PN = 007 - 009 soll bei einer gleichen Mittelplattenstärke von $h_{MP} = 2,4$ mm die Wirksamkeit der Sperrlage (Lagenorientierung von 90°) überprüfen. Bei der dritten Parametervariation (PN = 016 - 018) wird, wie bei der Ersten (PN = 010 - 012), auf den Einsatz von Sperrlagen in der Mittelplatte gänzlich verzichtet. Diese Proben bestehen ausschließlich aus Zuglagen und unterscheiden sich lediglich in der Anzahl an Lagen der Mittelplatte und damit in der Mittelplattenstärke. Da die umgebende Struktur eine versteifende Wirkung besitzt, soll damit geklärt werden, ob der Einsatz von Sperrlagen in der Mittelplatte überhaupt benötigt wird. Dazu können zusätzlich die Ergebnisse aus den Versuchen mit den PN = 001 - 003 herangezogen werden, da sich diese nur aufgrund der zusätzlichen Sperrlagen von den PN = 016 - 018 unterscheiden.

Tabelle 5: Aufbau der Probekörper für die Variation der Lagenorientierung der Mittelplatte

Probennummer (PN):	010 - 012	013 - 015	016 - 018
<i>Mittelplatte</i>			
Lagenaufbau (h_{MP}):	2,4 mm = 4 x 0,6	2,4 mm = 4 x 0,6	1,2 mm = 2 x 0,6
Lagenorientierung:	0°/0°/0°/0°	0°/45°/-45°/0°	0°/0°
<i>Hutprofil</i>			
Lagenaufbau (h_{HP}):	6 mm = 5 x (0,6/0,6)	6 mm = 5 x (0,6/0,6)	6 mm = 5 x (0,6/0,6)
Lagenorientierung:	[0/90] _n	[0/90] _n	[0/90] _n

4.2 Experimentelle Randbedingungen

Nachdem bereits die geometrischen und werkstoffspezifischen Daten der Probekörper detailliert beschrieben worden sind, müssen, um die Reproduzierbarkeit der durchgeführten Druckversuche zu gewährleisten, im Folgenden die verwendeten Versuchsparameter und Einstellungen an der Universalprüfmaschine (UPM) genau definiert werden.

Die Druckversuche werden mit einer lagegeregelten Steuerung durchgeführt. Dabei werden die Probekörper mit einer stetig ansteigenden Druckkraft zwischen zwei parallelen Druckplatten belastet. Die Proben werden dabei in der liegenden Konfiguration eingelegt, sodass die Hutprofilflächen parallel zu den Druckplatten der UPM sind. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 19 dargestellt. Auf die Deckfläche und über die Gegendruckplatte folglich auch auf die Bodenfläche wirkt im Versuch eine Druckbelastung. Die durch die UPM aufgebrachte Druckkraft wird durch das vertikale Verfahren der Druckplatten mit der konstanten Prüfgeschwindigkeit von 60 mm pro Minute solange erhöht, bis die Abbruchbedingung erreicht ist. Diese wird bei der Konfiguration der Prüfmaschine vor den Versuchen genau definiert und ist in diesem Fall erfüllt, wenn die Druckplatte eine maximale vertikale Translationsbewegung von 15 mm erreicht hat. Daraus folgt, dass die Prüfung eines Probekörpers nach 15 Sekunden abgeschlossen ist. Simultan mit Beginn und Ende der Druckprüfung ist eine Videoaufzeichnung gekoppelt. Das dabei erzeugte Videomaterial ist die Grundlage für eine genaue nachträgliche Versuchsauswertung, wobei durch die geschickte Wahl der Prüfgeschwindigkeit eine Sekunde im Video einem Millimeter in der Bauteilverformung entspricht.

Zur Dokumentation und Auswertung der Versuche, wird die von der UPM aufgebrachte Druckkraft zeitgleich mit der vertikalen Probenstauchung gemessen. Aus diesen Daten können für jede Probe repräsentative Kraft-Weg-Kurven erstellt werden. Es erfolgt dabei keine Normierung auf wirkende Spannungs- und Dehnungswerte, da sonst die Geometrieabhängigkeit nicht gegeben ist. Somit wird ein bauteilspezifisches und kein werkstoffspezifisches Ergebnis erzielt.

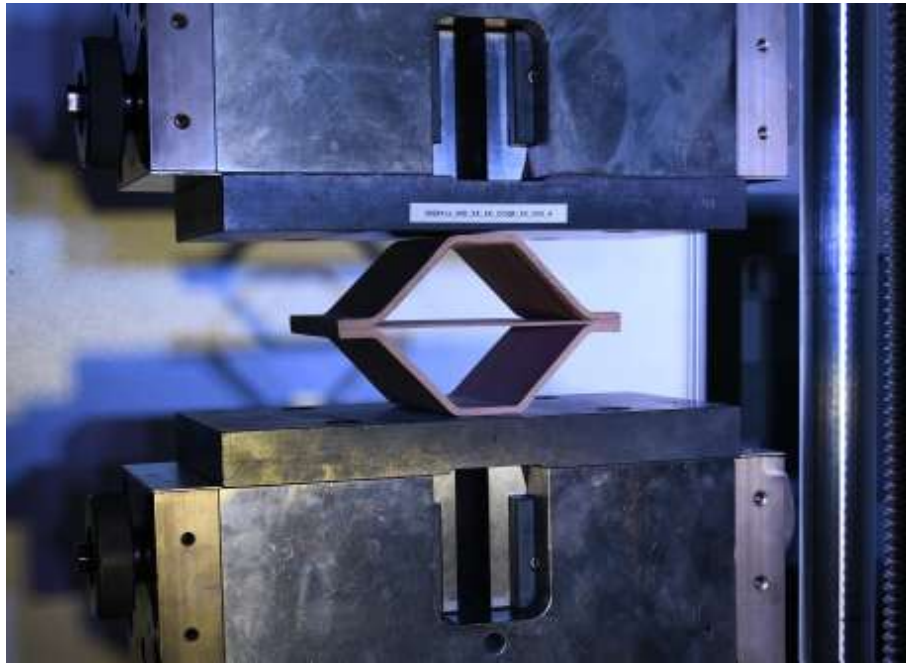


Abbildung 19: Prüfaufbau der Versuche

5 Versuchsergebnisse

Das nachfolgende Kapitel umfasst die Auswertung der durchgeführten Versuche. Dazu werden zunächst Gütekriterien und Anforderungen definiert, welche eine funktionierende, ideale Probe erfüllen sollte. Zudem wird auf die verschiedenen Versagensarten der Proben eingegangen. Mit der detaillierten Analyse des erzeugten Videomaterials in Kombination mit der graphischen Darstellung der gemessenen Kraft-Weg-Verläufe, werden die Versuche im Hinblick auf die Validierung der Simulation und Parametervariation qualitativ ausgewertet. Im Anschluss werden mögliche Ursachen für das beobachtete Bauteilverhalten beschrieben und Lösungsansätze für deren Behebung gesucht. Abschließend werden in einem Fazit die wesentlichen Erkenntnisse und daraus abgeleiteten Handlungsschritte erläutert. Die Probenbezeichnung wird nach dem folgenden Schema durchgeführt: 30261xx_WD_XX_XX_COQR_XX_XXX_PN. Dabei steht die Bezeichnung „30261xx“ für den Kostenträger des Projekts, „WD“ für den Probenwerkstoff Holz (engl. wood), „X“ sind Platzhalter, „CO“ weist auf die Druckversuche (engl. compression) hin, „Q“ steht für die quasistatischen Versuche, „R“ für Raumtemperatur (engl. room temperature) und „PN“ für die Probennummer. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird die Probenbezeichnung im Folgenden auf die Probennummer (PN) reduziert.

5.1 Gütekriterien und Anforderungen an die Proben

Zur besseren Beurteilung der Aussagekraft und der Qualität der Proben wurden drei Güteklassen, zusammengefasst in Tabelle 6, eingeführt. Bei der weiteren Auswertung werden diese Klassifizierungen hinzugezogen. Die Einteilung der Proben erfolgt weitestgehend nach der Bewertung, ob das Hauptkriterium der jeweiligen Klasse erfüllt ist. Bei Proben nahe den definierten Grenzen des Hauptkriteriums, wurde zudem das Nebenkriterium und die Versagensart berücksichtigt.

Die Güteklasse 1 umfasst Proben, die eine größere Kraft F_{\max} der UPM ausgehalten haben als das 1,5-fache der theoretisch auszuhaltenden Kraft $F_{\text{theo}} = 5520 \text{ N}$. Der Faktor 1,5 wurde dabei als Sicherheitsbeiwert gewählt. Diese Kraft wurde in der vorangestellten Bachelorarbeit von M. Rudlaff [5] auf Basis der Gewichtskraft resultierend aus der maximalen Zuladung der Kapsel und der Berücksichtigung der 3G-Senke bei Fahrzeugen bestimmt. Damit müssen alle Proben der Güteklasse 1 mehr als 8280 N ertragen können, ohne zu versagen. Mithilfe einer Näherungsgeraden für den linearen Bereich ist die Steifigkeit c ermittelt worden. Die Proben weisen in der Regel eine höhere Steifigkeit c als $3000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$ auf. Das typische Versagen dieser Klasse ist der Riss der Mittelplatte, jedoch ist dies nicht zwingend notwendig zur Klassifizierung in Güteklasse 1. Güteklasse 2 umfasst alle Proben, die mindestens die theoretisch auszuhaltende Kraft F_{theo} erreichen und deren Steifigkeit c zwischen $2000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$ und $3000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$ liegt. Meistens versagen diese Proben durch Abscheren der Lagen. Würden die Lagen nicht delaminieren, hätten diese Proben Potenzial eine höhere Kraft zu ertragen und somit in Güteklasse 1 zu fallen.

Die Proben dieser Klasse erreichen die theoretisch geforderte Kraft und sind daher verwendbar. Die Güteklasse 3 umfasst den Anteil an Proben, die nicht brauchbar sind. Diese Proben erreichen aufgrund Mängel in der Produktion oder der Konfiguration der Mittelplatte nicht F_{theo} , besitzen eine vergleichsweise niedrige Steifigkeit c und Versagen häufig aufgrund großflächiger Delaminationen.

Tabelle 6: Klassifizierung der Proben in Güteklassen

Güteklasse	1	2	3
Bewertung	Probe sehr gut	Probe i.O.	nicht brauchbar
Hauptkriterium	$F_{\text{max}} > 1,5 \cdot F_{\text{theo}}$	$1,5 \cdot F_{\text{theo}} > F_{\text{max}} \geq F_{\text{theo}}$	$F_{\text{max}} < F_{\text{theo}}$
Nebenkriterium	$c > 3000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$	$3000 \frac{\text{N}}{\text{mm}} > c \geq 2000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$	$c < 2000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$
Typische Versagensart	Riss in der MP	Abscheren der Lagen	Delamination
Probennummer (PN)	002, 005, 006, 007, 009, 011, 013, 015	003, 004, 004.1, 008, 012, 014	001, 010, 016, 017, 018

5.2 Versagensarten

Erfährt das Bauteil eine größere Belastung, als die für das Bauteil zulässige Belastung, kommt es zum Versagen. Die Art des Versagens hängt von dem gewählten Werkstoff, der Geometrie bzw. dem strukturellen Aufbau des Bauteils und der Belastungsart sowie dem Ort der Krafteinleitung ab. Dabei versagt jedes Bauteil meist nach typischen und vergleichbaren Mustern. Die holzbasierte Hexagonstruktur, die dieser Arbeit zu Grunde liegt, wird auf der Deckfläche gleichmäßig vertikal auf Druck beansprucht. Dabei wird das Bauteil in die Horizontale auseinander gedrückt. Es erfolgt eine Zugbeanspruchung der Mittelplatte. Dieser Kraftfluss entspricht dem Prinzip eines Zugseiles, welches in Kapitel 2.1.2 beschrieben wird. Die Fasern in Zugrichtung können einer höhere Zugbelastung standhalten als einer Druckbelastung. Dadurch kann die maximal ertragbare Druckspannung durch das Einsetzen der Mittelplatte verbessert werden. Als typische Versagensart wird das Reißen der Mittelplatte erwartet. Im Anhang A.8 befinden sich zu dokumentarischen Zwecken auf den Abbildungen 43 bis 45 Bilder der geprüften und zerstörten Proben.

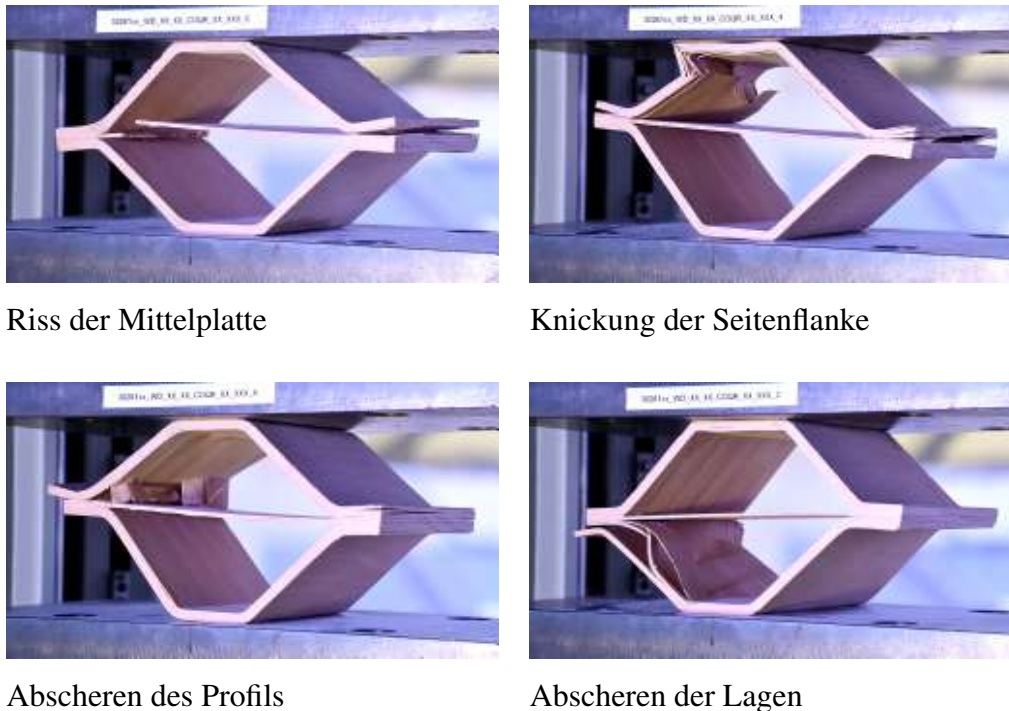


Abbildung 20: Mögliche Versagensarten des holzbasierten Hexagonprofils

Die bei den Druckversuchen aufgetretenen Versagensarten, lassen sich wie in Abbildung 20 dargestellt, in vier Kategorien einteilen. Bei den Proben 005, 006, 015, 016 und 017 kam es zu einem vollständigen Riss der Mittelplatte. Bei weiterer Belastung nach dem Reißen sind die Verbindungsflächen auseinandergeklafft. Außerdem wurden die Seitenflanken der Probe an dem Übergang zur den Verbindungsflächen stark zusammengepresst. Bei den Proben 001, 004, 007 und 011 sind die Seitenflanken des oberen oder unteren Hutprofils auf einer Seite nach innen oder außen geknickt. Dadurch wurde die jeweilige Hutprofilhälfte zusammengepresst und verlor die Druckstabilität. Zudem klafften auch bei dieser Versagensart die Verbindungsflächen des Hutprofils leicht auf. Es sind zwei weitere Versagensarten durch Abscheren möglich. Dabei wird zwischen Abscheren des Profils von der Mittelplatte und Abscheren der Lagen innerhalb des Hutprofils unterschieden. Das Abscheren des Profils ist bei den Proben 002 und 008 aufgetreten. Durch die steigende Druckbelastung schert das obere oder untere Hutprofil von der Mittellage ab. Es folgt ein Aufklaffen der Verbindungsflächen auf der gegenüberliegenden Seite. Bei den Proben 003, 004.1, 009, 010, 012, 013, 014 und 018 kann es zur Delamination der Lagen innerhalb des unteren oder oberen Hutprofils, was zum Abscheren der Lagen führt. Dadurch kam es zu einem Druckabfall und die Hexagonstruktur wurde zerdrückt. Bei Probe 004.1 ist anschließend die Mittelplatte gerissen.

5.3 Validierung der Simulation

Zur Validierung der Simulation aus der vorangehenden Bachelorarbeit von M. Rudlaff [5], deren Ergebnisse in Kapitel 2.3.2 zusammengefasst worden sind, wurden drei Proben mit PN = 001 - 003 gefertigt. Die Hexagonstruktur besteht aus zwei Hutprofilen mit je zehn 0,6 mm starken Buchenholz Furnieren, welche abwechselnd mit einer Lagenorientierung von $[0^\circ/90^\circ]$ gelegt wurden, sowie einer Mittelplatte aus drei 0,6 mm starken Furnieren, ebenfalls mit einer Lagenorientierung von $[0^\circ/90^\circ]$. Damit entspricht das Hutprofil der aus der Simulation vorgegebenen Wandstärke von $h_{HP} = 6,0$ mm. Die Wandstärke der Mittelplatte wurde aufgrund der verfügbaren Furniere nicht erreicht und liegt bei $h_{MP} = 1,8$ mm anstelle des simulierten Maßes $h_{MP} = 1,5$ mm. Außerdem gilt es zu beachten, dass die verwendeten Proben aus fertigungstechnischen Gründen, verglichen mit der simulierten Geometrie, eine um 16 mm verkürzte Deckfläche aufweisen.

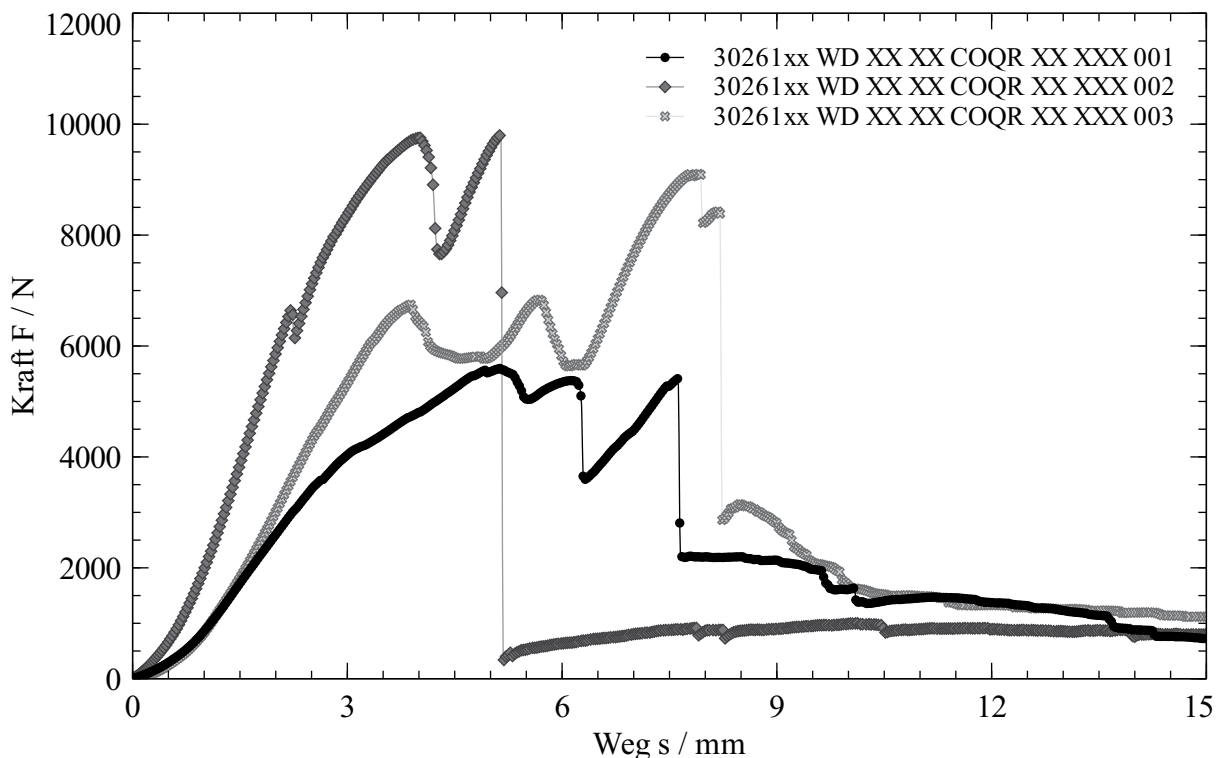


Abbildung 21: Kraft-Weg-Diagramm der Proben mit PN = 001 - 003 (MP: 1,8 mm = 0,6/0,6/0,6 mit $0^\circ/90^\circ/0^\circ$)

Die Ergebnisse der Prüfversuche mit den drei Probekörpern, welche in Abbildung 21 in einem Kraft-Weg-Diagramm dargestellt sind, weisen starke Streuungen hinsichtlich des Bauteilverhaltens auf. Alle Proben ertragen vor Eintritt des Bauteilversagens jedoch eine maximale Kraft F_{max} , welche größer als die nach [5] bestimmte theoretisch auszuhaltende Kraft F_{theo} ist. Das Bauteilverhalten der Proben an den einzelnen Peaks und Kurvenverläufen ist im Anhang in Abbildung 37 detailliert dokumentiert. Aufgrund der niedrigen Steifigkeit und der niedrigen ertragenen Kraft wurde Probe 001 nach Tabelle 6 als nicht brauchbar klassifiziert, wohingegen

die Proben mit der PN = 002 und PN = 003 als sehr gute und gute Proben der Güteklasse 1 und 2 deklariert wurden. Der Mittelwert (MW) der Steifigkeiten, entnommen aus Tabelle 7, ist aufgrund der starken Streuung nur bedingt aussagekräftig.

Tabelle 7: Relevante Auswerteparameter der Proben mit den PN = 001 - 003

PN	001	002	003	MW	σ
Maximalkraft F_{\max}	5595 N	9804 N	9109 N	8169 N	2256 N
Steifigkeit c	1740 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	3892 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	2254 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	2629 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	1124 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$
Versagensart	Knickung der Seiten- flanke	Abscheren des Profils	Abscheren der Lagen		
Güteklasse	3	1	2		

Werden diese Erkenntnisse mit den Ergebnissen der Simulation verglichen, so ist eine grundlegende Funktionsweise der Strukturen in Bezug auf die ertragene Kraft F_{\max} zu erkennen, jedoch ist nach Abbildung 37 bei keiner der drei Proben die erhoffte Versagensart eines Risses in der Mittelplatte nach Abbildung 20 eingetreten. Vielmehr erfolgte eine Delamination und ein Abscheren der Lagen innerhalb der Seitenflanken der Hutprofile, sodass zunächst von der manuellen Fertigung als Ursache ausgegangen werden kann.

5.4 Parametervariation der Mittelplatte bezüglich Lagenaufbau

Die nachfolgende Auswertung betrachtet Probekörper, welche einen unterschiedlichen Lagenaufbau in der Mittelplatte aufweisen. Dafür wurden lediglich die Furnierstärken und Reihenfolge der Lagen in der Mittelplatte variiert. Der Aufbau der drei verwendeten Konfigurationen kann der Tabelle 4 aus dem Versuchsplan entnommen werden. Neben den einzelnen Kraft-Weg-Diagrammen für jede Probenkonfiguration, wie in Abbildung 21, 22 und 23 dargestellt, sind im Anhang aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit und zu Vergleichszwecken in Abbildung 35 alle Kraft-Weg-Diagramme der für die Parametervariation der Mittelplatte bezüglich des Lagenaufbaus relevanten Proben mit den PN = 001 - 009 abgebildet. Die detaillierte Auswertung des während der Prüfversuche aufgezeichneten Videomaterials ist für jede Probenkonfiguration auch im Anhang enthalten. Für die Proben mit PN = 001 - 003 ist diese in Abbildung 37, für PN = 004 - 006 in Abbildung 38 und für PN = 007 - 009 in Abbildung 39 dargestellt. Die erreichte Maximalkraft F_{\max} , die Steifigkeit c , die Versagensart und Güteklasse der Proben kann den Tabellen 7, 8 und 9 entnommen werden. Da aufgrund der hohen Ergebnisstreuung ein direkter quantitativer Vergleich und damit eine eindeutige Aussage über die beste Konfiguration der Mittelplatte nicht möglich ist, sind die Proben in Güteklassen eingeteilt worden. Diese Klassifizierung ist Tabelle 6 zu entnehmen.

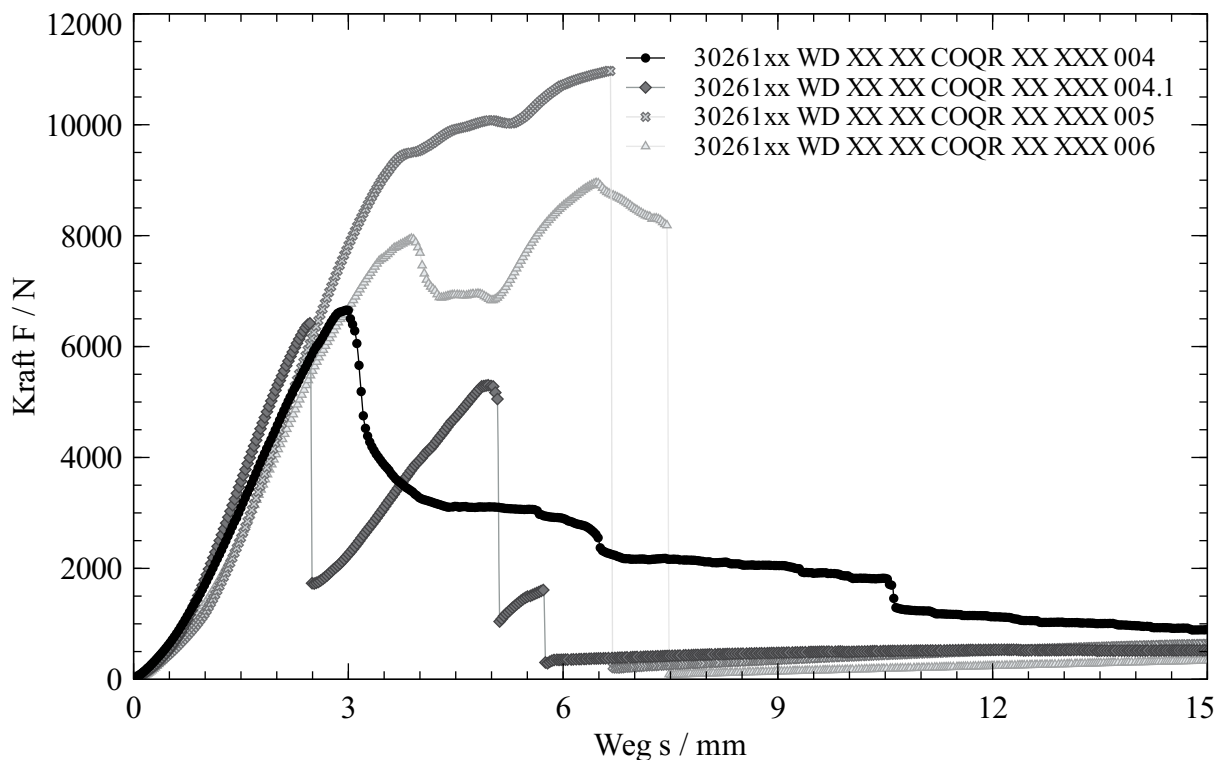


Abbildung 22: Kraft-Weg-Diagramm der Proben mit PN = 004 - 006 (MP: 2,1 mm = 0,6/0,9/0,6 mit 0°/90°/0°)

Wie in Abbildung 22 zu erkennen, erreicht die Probe 005 ihr maximales Kraftniveau F_{\max} bei ca. 10,9 kN und versagt nach einem Riss der Mittelplatte. Sie zeigt damit auf, welches Potenzial in der Konstruktion der Hexagonstrukturen bei idealer Fertigung steckt.

Tabelle 8: Relevante Auswerteparameter der Proben mit den PN = 004 - 006

PN	004	004.1	005	006	MW	σ
Maximalkraft F_{\max}	6661 N	6425 N	10977 N	8952 N	8254 N	2144 N
Steifigkeit c	2835 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	3449 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	3481 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	2977 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	3185 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	328 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$
Versagensart	Knickung der Sei- tenflanke	Abscheren des La- gen	Riss der Mittel- platte	Riss der Mittel- platte		
Güteklasse	2	2	1	1		

Das Bauteilverhalten der Proben mit der PN = 001 - 003 streut, wie in Abbildung 21 zu erkennen, von allen drei Konfigurationen am meisten. Diese Behauptung lässt sich auch anhand der stark unterschiedlichen Steifigkeiten in Tabelle 7 und der Zuordnung der drei Proben in alle drei Güteklassen nach Tabelle 6 untermauern. Anders verhalten sich dagegen die Proben mit

der PN = 004 - 006. Wie in Abbildung 22 und Tabelle 8 zu erkennen, liegen die Steigungen der Graphen bzw. die Steifigkeiten der Proben im Bereich zwischen Güteklasse 1 und 2. Der Unterschied ergibt sich aus der großen Varianz der erreichten Maximalkraft F_{\max} . Die Proben mit den PN = 007 - 009 und der gleichzeitig dicksten Mittelplatte befinden sich nach Tabelle 6 alle in den oberen beiden Güteklassen. Damit ist sowohl die Steifigkeit nach Tabelle 9, als auch die erreichte F_{\max} in Ordnung.

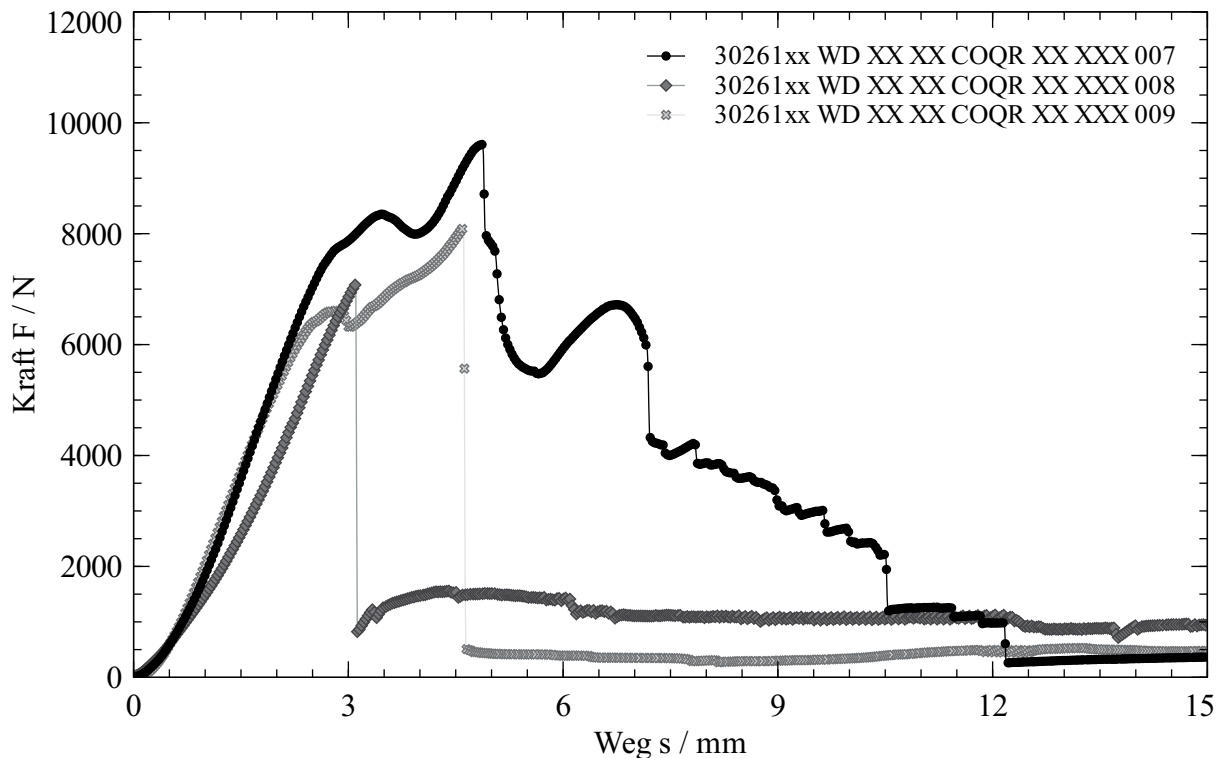


Abbildung 23: Kraft-Weg-Diagramm der Proben mit PN = 007 - 009 (MP: 2,4 mm = 0,9/0,6/0,9 mit 0°/90°/0°)

Tabelle 9: Relevante Auswerteparameter der Proben mit den PN = 007 - 009

PN	007	008	009	MW	σ
Maximalkraft F_{\max}	9608 N	7077 N	8111 N	8265 N	1273 N
Steifigkeit c	$3578 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$	$2883 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$	$3206 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$	$3222 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$	$348 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$
Versagensart	Knickung der Seiten- flanke	Abscheren des Profils	Abscheren der Lagen		
Güteklasse	1	2	1		

Durch die starke Streuung im Probenumfang mit PN = 001 - 003 und fertigungstechnischen Ungenauigkeiten im Probenumfang mit PN = 007 - 009, die zu einem verfrühten Versagen des Bauteils führen, ist es schwer eine Aussage über den optimalen Lagenaufbau zu treffen. Alle

drei Probenkonfigurationen weisen, trotz starker Variation der Wandstärke der Mittelplatte und damit auch der Kraftverteilung in Zug- und Sperrrichtungen, ähnliche Ergebnisse auf. Es lassen sich keine Tendenzen im Hinblick auf die maximal ertragbare Kraft ableiten und die Vergrößerung des Probenumfangs zur Reduzierung statistischer Ungenauigkeiten und die Beseitigung von fertigungstechnischen Mängeln wird empfohlen. Im Hinblick auf die Steifigkeitswerte, welche in den Probenumfängen mit PN = 004 - 006 und PN = 007 - 009 nicht stark streuen, ist kein signifikanter Unterschied zwischen den jeweiligen Mittelwerten (MW) zu erkennen.

5.5 Parametervariation der Mittelplatte bezüglich Lagenorientierung

In der nachfolgenden Auswertung werden Probekörper mit einer unterschiedlichen Lagenorientierung in der Mittelplatte betrachtet. Dafür wurde lediglich die Lagenorientierung und Anzahl der Lagen in der Mittelplatte variiert. Zusätzlich zu den Proben mit PN = 001 - 003 und PN = 007 - 009, werden nun drei weitere Konfigurationen mit den PN = 010 - 018, deren detaillierter Aufbau aus der Tabelle 5 entnommen werden können, betrachtet. Neben den einzelnen Kraft-Weg-Diagrammen für jede Probenkonfiguration, wie in Abbildung 21, 23, 24, 25 und 26 dargestellt, sind im Anhang aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit und zu Vergleichszwecken in Abbildung 36 alle Kraft-Weg-Diagramme der für die Parametervariation der Mittelplatte bezüglich der Lagenorientierung relevanten Proben mit den PN = 007 - 018 abgebildet. Die detaillierte Auswertung des während der Prüfversuche aufgezeichneten Videomaterials ist für jede Probenkonfiguration auch im Anhang enthalten. Für die Proben mit PN = 001 - 003 ist diese in Abbildung 37, für PN = 007 - 009 in Abbildung 39, für PN = 010 - 012 in Abbildung 40, für PN = 013 - 015 in Abbildung 41 und für PN = 016 - 018 in Abbildung 42 dargestellt. Die erreichte Maximalkraft F_{\max} , die Steifigkeit c , die Versagensart und Güteklasse der Proben kann den Tabellen 7, 9, 10, 11 und 12 entnommen werden. Die Klassifizierung der Proben in Güteklassen ist Tabelle 6 zu entnehmen.

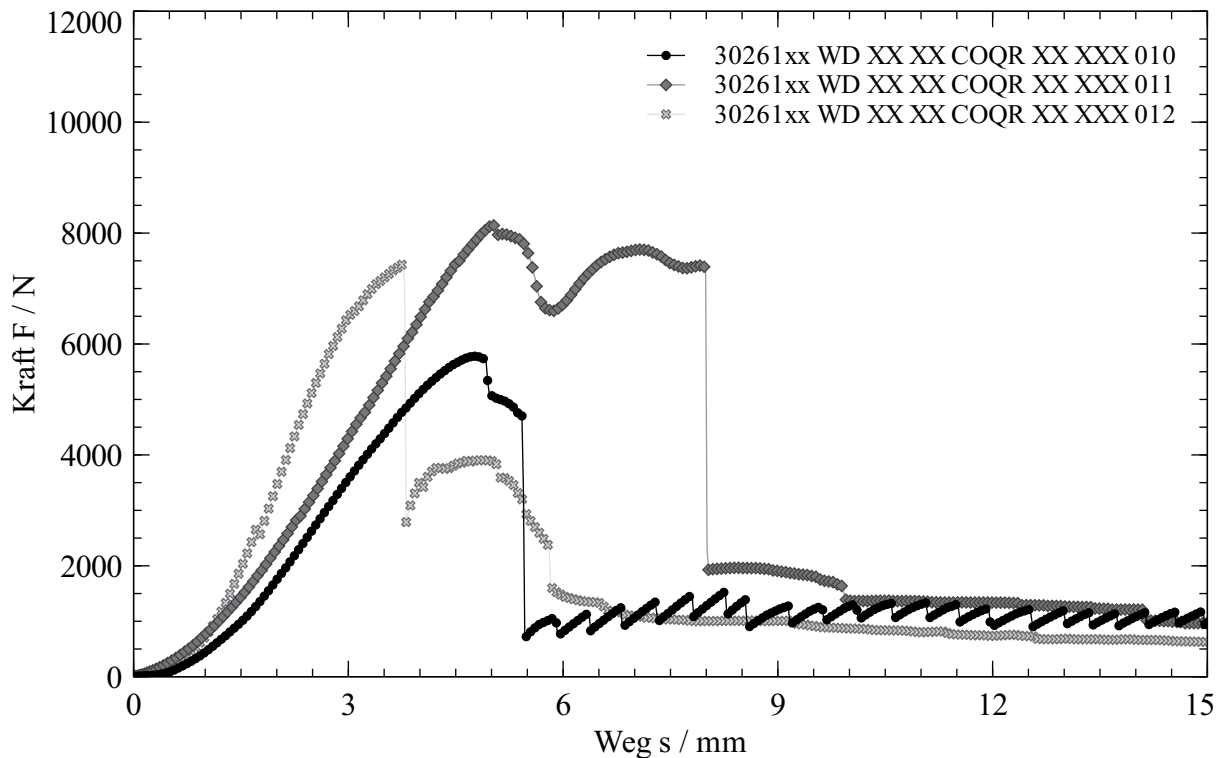


Abbildung 24: Kraft-Weg-Diagramm der Proben mit PN = 010 - 012 (MP: 2,4 mm = 0,6/0,6/0,6/0,6 mit 0°/0°/0°/0°)

Das Bauteilverhalten der Proben mit der PN = 010 - 012 streut, wie in Abbildung 24 zu erkennen, in der maximal erreichten Kraft und der Steifigkeit stark. Diese Behauptung lässt sich auch anhand der stark unterschiedlichen Steifigkeiten in Tabelle 10 und der Zuordnung der drei Proben in alle drei Güteklassen nach Tabelle 6 untermauern. Die Proben mit der PN = 013 - 015 verhalten sich wie in Abbildung 25 und Tabelle 11 zu erkennen dagegen anders. Hier ist die Steifigkeit aller Proben im Bereich der Güteklasse 2. Nur in der erreichten Maximalkraft F_{\max} und den Versagensarten unterschieden sich die Probekörper. Die Proben mit den PN = 016 - 018 und der gleichzeitig dünnsten Mittelplatte befinden sich nach Tabelle 6 alle in der untersten Güteklasse 3. Damit ist sowohl die Steifigkeit nach Tabelle 12, als auch die erreichte Maximalkraft F_{\max} für alle Probekörper dieser Konfiguration unter den Anforderungen geblieben.

Tabelle 10: Relevante Auswerteparameter der Proben mit den PN = 010 - 012

PN	010	011	012	MW	σ
Maximalkraft F_{\max}	5780 N	8161 N	7438 N	7126 N	1221 N
Steifigkeit c	1813 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	2013 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	3401 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	2409 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	865 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$
Versagensart	Abscheren der Lagen	Knickung der Seiten- flanke	Abscheren der Lagen		
Güteklasse	3	1	2		

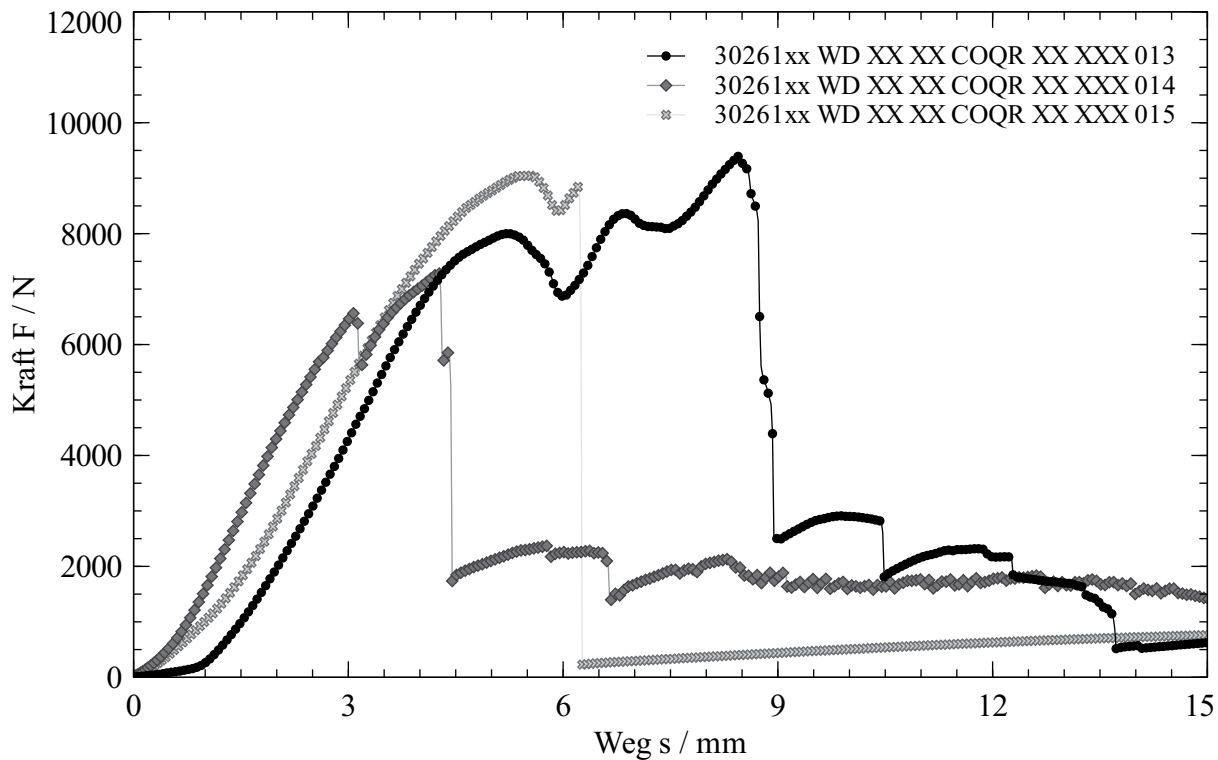


Abbildung 25: Kraft-Weg-Diagramm der Proben mit PN = 013 - 015 (MP: 2,4 mm = 0,6/0,6/0,6/0,6 mit 0°/45°/-45°/0°)

Tabelle 11: Relevante Auswerteparameter der Proben mit den PN = 013 - 015

PN	013	014	015	MW	σ
Maximalkraft F_{\max}	9394 N	7282 N	9045 N	8574 N	1132 N
Steifigkeit c	2322 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	2737 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	2451 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	2503 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	212 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$
Versagensart	Abscheren der Lagen	Abscheren der Lagen	Riss der Mit- telplatte		
Güteklasse	1	2	1		

Die Probenumfänge mit PN = 007 - 009, 010 - 012 und 013 - 015 haben alle dieselbe Mittelplattenstärke von $h_{\text{MP}} = 2,4$ mm, jedoch Unterschiede in Lagenaufbau und -orientierung. Damit kann die am besten geeignete Lagenorientierung unabhängig von der Dicke der Mittelplatte ermittelt werden. Der Probenumfang mit PN = 007 - 009 besitzt eine Mittelplatte aus drei Furnierlagen in 0°/90°/0° Lagenorientierung. Die Probenumfänge mit PN = 010 - 012 und PN = 013 - 015 weisen jeweils eine Mittelplatte bestehend aus vier Furnierlagen auf. Dabei wird zwischen der Lagenorientierung 0°/0°/0°/0° und 0°/45°/-45°/0° unterschieden. Aufgrund der starken Streuung der Proben innerhalb eines Probenumfangs können nur Tendenzen abgeleitet werden. Es lässt sich die Tendenz erkennen, dass die maximal ertragene Kraft F_{\max} und die

Steigung c bei dem Probenumfang mit PN = 010 - 012 am niedrigsten ist. Daraus lässt sich folgern, dass das Vorhandensein einer Sperrlage oder zumindest einer anteiligen „45°-Sperrlage“ die maximale Belastbarkeit der Probe steigert.

Werden nun die beiden Probenumfänge mit PN = 007 - 009 mit den PN = 013 - 015 verglichen, fällt auf, dass die Versuchsergebnisse beider Konfigurationen nahe beieinander liegen. Die Durchschnittswerte der Maximalkraft F_{\max} liegen bei den Proben mit den PN = 007 - 009 bei 8265 N und bei PN = 013 - 015 bei 8574 N. Damit könnten die Proben, welche aus vier Furnierlagen bestehen minimal weniger Kraft ertragen. Diese Werte sind jedoch nur bedingt aussagekräftig und müssten daher mit einem größeren Probenumfang verifiziert werden. Werden die anteiligen Wandstärken der Mittelplattenfurniere in Zug- und Sperrichtung berechnet, ergibt sich für die Proben mit PN = 007 - 009 eine Stärke von 1,8 mm in Zug- und 0,6 mm in Sperrichtung. Bei den Proben mit den PN = 013 - 015 wird die Stärke der 45°-Furniere mit gleichen Anteilen auf beide Belastungsrichtungen aufgeteilt. Dadurch wird ebenfalls eine Stärke von 1,8 mm in Zug- und 0,6 mm in Sperrichtung erreicht. Damit kann die Ähnlichkeit der Ergebnisse erklärt werden. Die leichte Erhöhung des Probenumfangs mit PN = 013 - 015 ist somit vermutlich auf die statistische Streuung zurückzuführen.

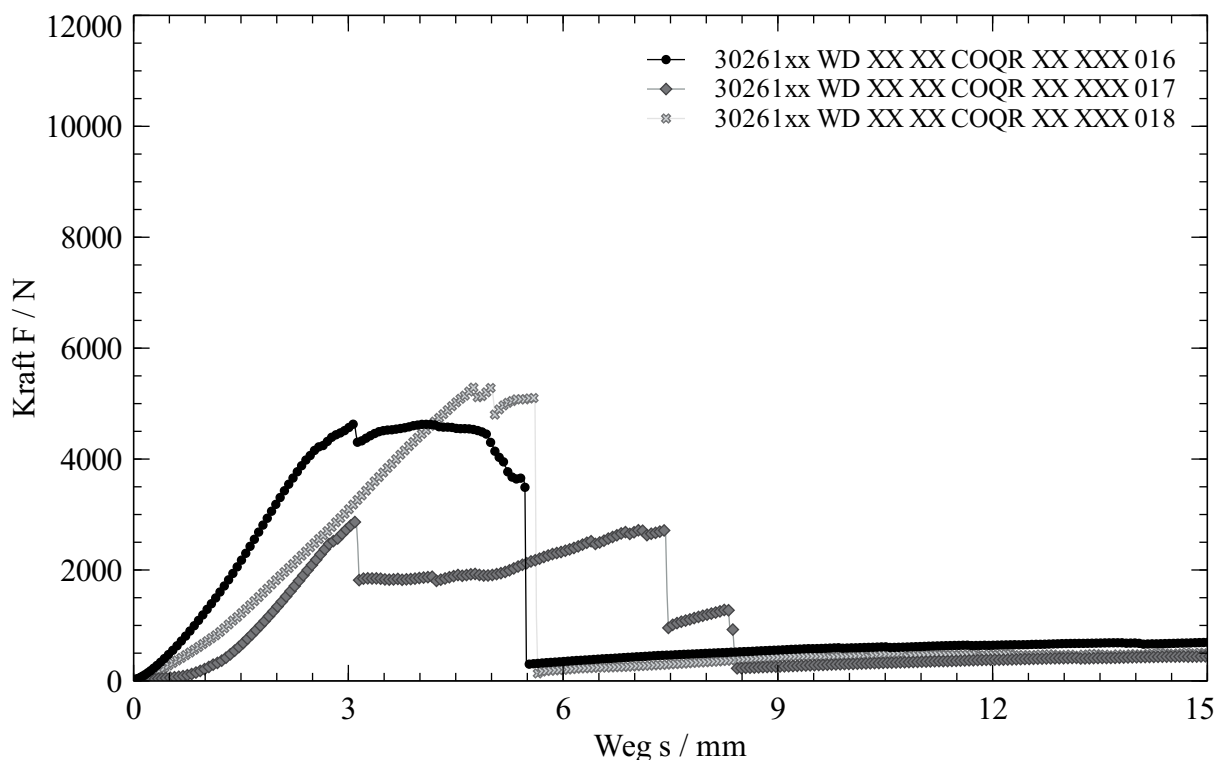


Abbildung 26: Kraft-Weg-Diagramm der Proben mit PN = 016 - 018 (MP: 1,2 mm = 0,6/0,6 mit 0°/0°)

In einem weiteren Probenumfang mit den PN = 016 - 018 wurde geprüft, ob das Weglassen der Sperrlage und die damit verbundene Gewichtseinsparung sinnvoll ist. Die Ergebnisse dieses

Probenumfangs werden dafür mit den Ergebnissen des Probenumfangs mit PN = 001 - 003 verglichen. Diese Konfiguration unterscheidet sich im Aufbau nur durch eine zusätzliche, 0,6 mm dicke Sperrlage in der Mittelplatte. Wie bereits in Abbildung 26 zu sehen erreichen keine der Proben mit den PN = 016 - 018 die mindestens geforderte auszuhaltende Kraft. Der Mittelwerte der erreichten Steifigkeit, ablesbar in Tabelle 12, sind ebenfalls die niedrigsten Werte aller geprüfter Konfigurationen. Tendenziell weist diese Probenkonfiguration im Rahmen der gesamten Prüfversuche die schlechtesten Resultate auf, weshalb auch alle Proben der Güteklasse 3 zugeordnet werden können. Im direkten Vergleich mit den PN = 001 - 003 sind diese als deutlich weniger belastbar einzustufen. Diese Verschlechterung kann auf die dünnere Mittelplatte und das Fehlen der Sperrlage zurückgeführt werden. Dabei tragen beide Ursachen zur Minderung der Bauteilbelastbarkeit bei. Im Vergleich der Probenumfänge mit den PN = 010 - 012, PN = 007 - 009 und PN = 013 - 015 führte bei konstanter Stärke der Mittelplatte das Weglassen der Sperrlage zu etwas niedrigeren maximal ertragbaren Kräften. Der Ergebnisunterschied der Proben mit PN = 016 - 018 ohne Sperrlage, verglichen mit den PN = 001 - 003 mit Sperrlage zeigt hingegen ein viel deutlicheres Ergebnis. So beträgt der Mittelwert der Maximalkraft F_{\max} der Proben mit PN = 016 - 018 nur ca. die Hälfte des vergleichbaren Wertes der Proben mit den PN = 001 - 003. Daher spielt hier die Stärke der 0,6 mm dünnere Mittelplatte eine entscheidene Rolle. Daraus folgt, dass durch das Weglassen der Sperrlage kein zusätzliches Leichtbaupotenzial ausgeschöpft werden kann. Zudem besteht sogar die Gefahr bei Ausführungen mit einer zu dünnen Mittellage, dass diese Hexagonstrukturen den geforderten Belastungen nicht standhalten können. Daher ist die Verwendung von Sperrlagen bevorzugt einzusetzen.

Tabelle 12: Relevante Auswerteparameter der Proben mit den PN = 016 - 018

PN	016	017	018	MW	σ
Maximalkraft F_{\max}	4646 N	2887 N	5305 N	4279 N	1250 N
Steifigkeit c	2095 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	1559 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	1238 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	1631 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$	433 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$
Versagensart	Riss der Mittelplatte	Riss der Mittelplatte	Abscheren der Lagen		
Güteklasse	3	3	3		

Die Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen σ der Maximalkräfte F_{\max} und Steifigkeiten c aller Proben wurden zum Schluss der Auswertung noch einmal in Abbildung 27 dargestellt. Die Proben mit den PN = 001 - 006 weisen verglichen mit den PN = 007 - 018 in Bezug auf die Mittelwerte der Maximalkraft F_{\max} eine größere Standardabweichung auf. Die Mittelwerte der Steifigkeiten c streuen dagegen bei den Proben mit den PN = 001 - 003 und PN = 010 - 012 am stärksten. Die Proben mit den PN = 013 - 015 weisen die niedrigste Streuung im Hinblick auf die Mittelwerte der Maximalkraft F_{\max} und Steifigkeit c auf und sind daher für weiter Vergleiche verwendbar.

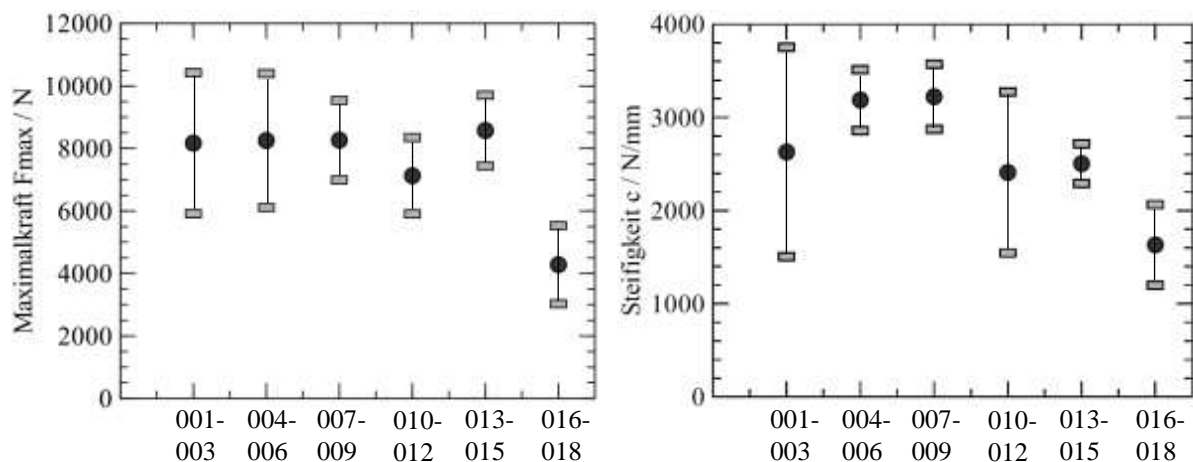


Abbildung 27: Mittelwerte und Standardabweichungen der Maximalkräfte F_{max} (links) und Steifigkeiten c (rechts)

5.6 Fehlerursachen und Lösungsstrategien

Die Analyse der Proben ergab eine hohe Streuung der Ergebnisse. Die Ursachen der starken Streuungen liegen vermutlich an den Materialeigenschaften, die bei einem organischen Material stark variieren können und der manuellen Fertigung. Im Folgenden werden mögliche Fehlerursachen erläutert und Lösungsansätze diskutiert.

Ein großes Problem in der Fertigung der Proben stellt das Pressen der Furniere in die gewünschte Form dar. Problematisch ist dabei, dass bei der Verbindungsfläche, welche laut Probengeometrie im Anhang A.4 30 mm lang sein sollte, wie in Abbildung 28 zu erkennen, bereits die ersten Lagen delaminieren. Zusätzlich schwingen die stark delaminierten Lagen beim Sägen auf und fördern damit die Delamination weiter. Ursache dieses Problems ist die kurze Pressfläche der Werkzeugform, welche nach A.5 ebenfalls 30 mm beträgt und somit kein Überstand existiert. Die einfachste Lösung dieses Problems wäre eine Vergrößerung der Breite der Formschienen des Presswerkzeuges. Darüber hinaus wäre es hilfreich Furniere mit einer größeren Breite zu verwenden. In Kombination mit einer breiteren Form kann somit die Verbindungsfläche ohne Delamination vergrößert werden. Zudem schwingen die Lagen beim Sägen weniger stark und es entsteht kein zusätzlicher Delaminationsprozess.



Abbildung 28: Delamination der Seitenflächen

Ein weiterer Parameter, welcher einen großen Einfluss auf das Bauteilverhalten hat, ist die Klebstoffmenge. Wird zu wenig Klebstoff verwendet delaminieren die Lagen nach dem Trocknen, wie in Abbildung 29 links zu sehen. Die Versagensarten Abscherung des Profils bzw. der Lagen können daher unter anderem auf die Verwendung einer zu geringen Menge an Klebstoff zurückgeführt werden. Bei der Verwendung einer zu großen Menge an Klebstoff hingegen kommt es zum „Schwimmen“ und abgleiten der Lagen. Außerdem quellen die Furnierlagen in diesem Fall. Werden im Anschluss die Lagen in eine Form gepresst kann es zu einem Rutschen, Quetschen und Verformen der Lagen kommen, sodass diese nicht mehr aufeinander liegen und sich, wie in Abbildung 29 rechts dargestellt, Hohlräume bilden. Daher ist es notwendig, die optimale Klebstoffmenge zu verwenden und möglichst gleichmäßig aufzutragen. Probleme bei der Klebstoffabmessung haben viele Ursachen. Ein Beispiel dafür ist das verwendete Zwischengefäß zum Abwiegen der Klebstoffmenge, wobei beim Abkratzen des Klebstoffes Reste an Gefäß und Spachtel übrigbleiben. Mögliche Lösungen wären den Klebstoff direkt auf dem Furnier abzuwiegen oder zu der abgewogenen Menge einen kleinen Aufschlag hinzuzugeben. Eine weitere Ungenauigkeit bei der Klebstoffmenge liegt an der Berechnung. Diese wurde für die ideale Fläche des Furniers vorgenommen. Jedoch handelt es sich bei Holzfurnier um ein organisches Material, welches auf der gesamten Länge in der Breite stark variiert, sodass die zugeschnittenen Rechtecke im Flächeninhalt stark schwanken. Eine Möglichkeit dem entgegenzuwirken ist das Sortieren der Rechtecke vor dem Kleben nach Größe, sodass ein Bauteil immer aus möglichst gleich großen Furnieren besteht. Damit müsste für jedes Bauteil die Klebstoffmenge einzeln berechnet werden, jedoch nicht für jede einzelne Lage.



Abbildung 29: Delamination (links) und Falten (rechts) der Furnierlagen im Hutprofil

Der Pressvorgang stellt eine weitere mögliche Ursache der starken Streuung dar. Das Pressen erfolgt punktuell über Schraubzwingen. Das größte Problem dabei ist, dass nicht sicher gestellt werden kann, ob alle Stellen den notwendigen Pressdruck erfahren. Zudem hängt die Anzugskraft stark vom Arbeiter ab und kann mitunter zu niedrig ausfallen. Darüber hinaus erfolgt das Einbringen der Presskraft durch eine Schraubbewegung. Schwimmende Lagen oder verklebte Bauteile gleiten ab und verziehen sich. Idealerweise könnten die oben genannten Probleme durch eine flächige Verpressung gelöst werden. Die Realisierung dieser Lösung sollte in einer anschließenden Arbeit vor Beginn der Fertigung geprüft werden. Als kurzfristige Lösung gegen das Schwimmen könnte beispielsweise eine systematische Anzugstrategie dienen. Dabei werden die Schraubzwingen in der Pressform zu Beginn erst in der Mitte der Form und anschließend

von innen nach außen befestigt. Dadurch können die schwimmenden Lagen in Richtung der Seitenflanken ausgleiten, ohne dass Falten entstehen. Bei der Zusammensetzung der Mittelplatte mit den Hutprofilen können die gegenüberliegenden Schraubzwingen gleichzeitig stückweise angezogen werden. Anschließend wird das jeweils andere Paar an Schraubzwingen um denselben Betrag angezogen.

Die ideale Gesamtlösung für alle bereits vorgestellten Ursachen wäre eine automatisierte Fertigung. Dies könnte mit Leimverteilmaschinen, hydraulischen Formpressen und Sägevorrichtungen realisiert werden. Da es sich bei diesem und anschließenden Arbeiten jedoch noch um Prototypenbau und Kleinserien in der Forschung handelt, sollten die Lösungsansätze für die manuelle Fertigung weiter verfolgt und umgesetzt werden.

5.7 Fazit der Prüfversuche

Als Fazit der durchgeführten Druckversuche können einige neue Erkenntnisse festgehalten werden, welche eine Grundlage für weitere Arbeiten bieten können. Da aktuell aufgrund der fertigungstechnisch bedingten hohen Streuung keine konkrete Aussage über die best mögliche Mittelplattenkonfiguration getroffen werden kann, sollten die vielversprechendsten Proben mit den PN= 001 - 003, PN = 007 - 009 und PN = 013 - 015 weiterverfolgt werden. Dazu könnte von jeder der drei Konfiguration unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.6 beschriebenen Lösungsansätze, zwei weitere Proben angefertigt und geprüft werden. Die Auswertung von diesen Versuchen könnte die Wirksamkeit dieser Ansätze bestätigen und im Idealfall zu besseren Ergebnissen führen, sodass konkrete Aussagen über die beste Konfiguration gemacht werden können. Eine wichtige Erkenntnis aus Kapitel 5.5 ist, dass der Einsatz einer Sperrlage in der Mittelplatte essenziell ist. Wie diese Sperrlage im Detail aus Furnieren umgesetzt wird, muss jedoch weiter untersucht werden. Das Konzept der doppelten Sperrlage mit zwei inneren Furnierlagen, die jeweils um $\pm 45^\circ$ zur Bauteilquerachse gedreht sind, wie die Proben mit den PN = 013 - 015 kann dabei ein interessanter Punkt werden, da diese Probenkonfiguration den höchsten Mittelwert der erreichten Maximalkraft bei der kleinsten Standardabweichung der Maximalkraft und Steifigkeit aller geprüften Proben erreicht hat. Wenn die optimale Mittelplattenkonfiguration gefunden worden ist, können in einer weiteren Iterationsschleife der Aufbau der Hutprofile optimiert werden. Da die Lagenorientierung durch den Wechsel von $[0/90]_n$ -Furnierschichten bereits definiert ist, bleiben als zu betrachtende Parameter die Wandstärke und der Lagenaufbau übrig. Interessant wäre der Vergleich von Hutprofilen mit $h_{HP} = 4,8 \text{ mm} = 4 \times (0,6/0,6)$ und Hutprofilen mit $h_{HP} = 5,4 \text{ mm} = 3 \times (0,9/0,9)$. Neben den geometrischen Parameter sollte der Fokus auch auf die Untersuchung von unterschiedlichen Klebstoffen gelegt werden. Dafür könnte beispielsweise die Funktionalität eines wasserfesten Holzleims oder eines Klebstoffs auf Polyurethan-Basis (PU) untersucht und verglichen werden.

6 Aufbau eines Demonstrators

Zum Abschluss der Studienarbeit ist basierend auf der Konstruktion des in Kapitel 2.3.5 beschriebenen Gesamtkonzepts, ein Demonstrator mit den Abmaßen $L \times B \times H$ von 40 cm x 40 cm x 14,8 cm aufgebaut worden. In Abbildung 30 ist der Aufbau des Demonstrators dargestellt. Die Herstellung des Kerns entspricht dem in Kapitel 3 beschriebenen Prozess und unterscheidet sich nur durch die vergrößerte Bauteillänge. Dazu wurde die große Werkzeugform zweimal für die Herstellung der benötigten Hutprofile bespannt. Da der Demonstrator nur zur Veranschaulichung des Konzepts dient und dieser nicht mit der Universalprüfmaschine belastet werden soll, wurde als Mittelplatte vereinfacht eine Sperrholzplatte mit einer Dicke von 3 mm verwendet. Um die in Kapitel 2.3.1 beschriebene Sandwichbauweise zu vervollständigen, wurden die beiden hexagonförmigen Kerne zwischen eine Decklage und eine Bodenplatte integriert. Für die Decklage und Bodenplatte wurden Multiplexplatten verwendet. Anschließend wurden die zuvor gefertigten Hexagonstrukturen längs zwischen Decklage und Bodenplatte gelegt und mit diesen direkt verleimt. Vereinfacht wurde dabei von einer Verwendung der dreieckigen Querbalken mit punktuellen Fügetechniken zwischen den Balken und den Seitenflanken der Hexagonstrukturen abgesehen und durch eine flächige Leimverbindung der Strukturen mit der Deck- und Bodenfläche ersetzt.



Abbildung 30: Demonstrator des Gesamtkonzepts

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden für das Konzept einer hexagonförmigen, holzbasierten Bodenstruktur einer Güterkapsel Materialprüfungen von Probekörpern durchgeführt und ausgewertet. Dafür wurde neben den theoretischen Grundlagen des Werkstoffs Holz und von Sandwichstrukturen, auch das Konzept der Bodenstruktur beschrieben. Anschließend wurde die Versuchsphase erläutert, welche neben dem Prozess der manuellen Probenherstellung auch die Durchführung von Druckversuchen beinhaltet. Dafür wurde ein Versuchsplan mit den zu prüfenden Probenkonfigurationen und die experimentellen Randbedingungen der Druckversuche erarbeitet. Im Anschluss wurden die Versuchsergebnisse analysiert und Trends abgeleitet. Abschließend wurde ein Demonstrator zur besseren Visualisierung des Konzepts aufgebaut.

Die Analyse der Versuchsergebnisse aus dem Kapitel 5 zeigt grundsätzlich die hohe Belastbarkeit der Strukturen, jedoch auch eine hohe Streuung der Ergebnisse und den großen Einfluss des manuellen Fertigungsprozesses auf die erreichbare Bauteilqualität. Verbesserungen des Fertigungsprozesses können insbesondere im Hinblick auf die Vergrößerung der Breite der Formschienen, die Optimierung der Klebstoffmenge und durch das Aufbringen einer definierten und über die Fläche konstanten Presskraft realisiert werden. Mit der Verbesserung dieser Punkte, sollten dem Abscheren des Profils bzw. der Lagen entgegengewirkt werden, sodass überwiegend die Versagensart des Reißens der Mittelplatte auftritt. Die Ergebnisse der Simulationen konnten bestätigt werden. Die Probenumfänge zur Optimierung des Lagenaufbaus lieferten aufgrund der zu starken Streuung keine direkt verwertbaren Daten liefern. Darüber hinaus wurde die Erkenntnis gewonnen, dass bei einer konstanten Wandstärke der Mittellage die Kombination aus einer Sperrlage und einer möglichst großen Furnierstärke in Zugrichtung die belastbarsten Hutprofile ergeben. Dies konnte optimal mit einer diagonal angeordneten Sperrlage realisiert werden. Das Weglassen von Sperrlagen in der Mittelplatte sogar zur Verschlechterung der Ergebnisse, sofern die Wandstärke der Mittelplatte nicht verringert wird.

Als Fortsetzung dieser Arbeit können weitere Fertigungs- und Prüfphasen durchgeführt werden. Dabei sollte zunächst, wie in Kapitel 5.6 bereits vorgeschlagen, der Fokus besonders auf die Optimierung des Fertigungsprozesses gelegt werden. Außerdem ist es auch denkbar den Probenumfang, für eine höhere statistische Sicherheit und geringe Streuung des Bauteilverhaltens bei den Prüfversuchen, zu vergrößern. Wenn unter Berücksichtigung dieser Maßnahmen ein Optimum der Mittelplattenkonfigurationen gefunden worden ist, kann in einer weiteren Iterationsschleife mit einer Parametervariation des Lagenaufbaus und der Wandstärke der Hutprofile, deren optimale Konfiguration ermittelt werden. Ein weiterer zu untersuchender Parameter wäre der Einsatz von unterschiedlichen Klebstoffen. Interessant wäre auch das Verhalten der Bauteile in einer feuchten Umgebung mithilfe von einem Klimaschrank auf einen möglichen Bauteilverzug zu untersuchen. Da es sich bei den verwendeten Buchenholzfurnieren um einen organischen

Werkstoff handelt, wäre für den realen Einsatz des Bodenkonzepts neben den quasi-statischen Druckversuchen eine Überprüfung auf Dauerfestigkeit sinnvoll. In diesem Zuge sollten auch, um das Gesamtkonzept zu validieren, Proben mit einem ähnlichen Aufbau wie der Demonstrator geprüft werden. Außerdem sollte die Decklage des Demonstrators mit einer schützenden Kunststoffschicht oder einem Aluminiumblech überzogen werden. Abschließend wäre eine Entwicklung von Knoten- und Abschlusskonzepten der Bodenstruktur wünschenswert, sodass ein einfaches Verbinden der Hexagonstrukturen möglich ist. Damit könnte ein modulares Baukastensystem für die Bodenstruktur entstehen.

Im Projekt U-SHIFT II wird aus den Ergebnissen dieser Arbeit und weiteren Verbesserungen aus nachfolgenden Arbeiten anschließend eine vollständige Bodenstruktur aufgebaut. In weiteren Projekten ist der Einsatz der Werkstoffes Holz in tragenden Fahrzeugstrukturen zu erforschen, um neue Konzepte zu finden und eine nachhaltige Zukunft gestalten zu können.

8 Literaturverzeichnis

- [1] *Fünf Jahre Pariser Klimaabkommen*. Bundeszentrale für politische Bildung. 11. Dez. 2020. URL: <https://www.bpb.de/politik/hintergrund-aktuell/322749/fuenf-jahre-pariser-klimaabkommen> (besucht am 13.02.2021).
- [2] Miriam Dalli. *CO2-Emissionen von Autos: Zahlen und Fakten (Infografik)*. Europäisches Parlament. 18. Apr. 2019. URL: <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissionen-von-autos-zahlen-und-fakten-infografik> (besucht am 13.02.2021).
- [3] Jürgen Weimer. *U-Shift - Modular Automatisiert Urban Disruptiv Elektrisch*. Präsentation. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, März 2019. URL: https://verkehrsforschung.dlr.de/public/documents/2019/Presentation_U-Shift_EN.pdf (besucht am 13.02.2021).
- [4] Horst E. Friedrich und Stephan A. Schmid. *AELFA. Strukturanalyse von Automobilkomponenten für zukünftige elektrifizierte Fahrzeugantriebe*. Endbericht. Stuttgart: Institut für Fahrzeugkonzepte - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 2011.
- [5] Moritz Rudlaff. "Holzbasierte Bodenstruktur für eine Güterkapsel für das Fahrzeugkonzept U-Shift". Bachelorarbeit. Universität Stuttgart, 2020.
- [6] e-mobil BW GmbH Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie. *Leichtbau in Mobilität und Fertigung - Chancen für Baden-Württemberg*. 2012. URL: <https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Publicationen/Studien/Leichtbaustudie.pdf> (besucht am 04.05.2021).
- [7] Tobias Kind und Katalina Engel. *Rohstoffboom zwischen Gewinnen und Verlusten. Deutschlands ökologischer Fußabdruck durch Stahl und Aluminium*. WWF Deutschland, Okt. 2018. ISBN: 978-3-946211-20-4.
- [8] Claudia Heidenfelder und Tobias Aufmkolk. *RohstoffHolz*. Planet Wissen. 29. Okt. 2019. URL: <https://www.planet-wissen.de/natur/pflanzen/baeume/pwierohstoffholz100.html> (besucht am 10.03.2021).
- [9] Woodkings GmbH. *Holzeigenschaften*. 2021. URL: <https://www.massivum.de/wissenswertes/holzeigenschaften> (besucht am 10.03.2021).
- [10] Deko Shop Bielefeld GmbH. *Dekobaumstamm 13 x 30 cm*. 2021. URL: <https://dekoshop-bielefeld.de/Deko-Baumstamm-13-x-30-cm> (besucht am 21.02.2021).
- [11] Peter Niemz. *Physik des Holzes*. ETH - Eidgenössische Technische Hochschule Zürich - Institut für Baustoffe, Jan. 2005.

- [12] Elke Dietrich. *Werkstoffkunde 1 - Skript zur Vorlesung*. Vorlesungsunterlagen. Stuttgart: Duale Hochschule Baden-Württemberg, 2019.
- [13] Forest Products Laboratory. *Wood Handbook. Wood as an Engineering Material*. Madison, Wisconsin: Centennial Edition, Apr. 2010. URL: https://www.fpl.fs.fed.us/documents/fplgtr/fpl_gtr190.pdf (besucht am 11.03.2021).
- [14] Gabriele Ehmcke und Dietger Grosser. *Das Holz der Eiche ? Eigenschaften und Verwendung*. URL: https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/forsttechnik-holz/dateien/w75_das_holz_der_eiche-eigenschaften_und_verwendung_bf_gesch.pdf (besucht am 05.05.2021).
- [15] Roland Kappel. *Zugseile in der Natur*. Dissertation. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH; Technik und Umwelt, 2007.
- [16] Initiative Furnier + Natur e.V. *Furnier-Herstellung. Vom Baum zum Furnier*. 2021. URL: <https://www.furnier.de/furnier/furnier-herstellung.html> (besucht am 06.03.2021).
- [17] Dietz, Hrsg. *Bearbeitung nicht metallischer Werkstoffe. Furnier Schälén/Messern* 7 (2015).
- [18] Roser AG. *Wie wird Furnier hergestellt? Messertechniken*. 2021. URL: <https://www.roserswiss.com/furniere/furnierproduktion/wie-wird-furnier-hergestellt> (besucht am 05.03.2021).
- [19] Josef Dillinger et al. *Fachkunde Metall*. 56. Aufl. Europa Lehrmittel, 2010. ISBN: 978-3-8085-1156-5.
- [20] Horst E. Friedrich, Hrsg. *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. ISBN: 978-3-658-12294-2.
- [21] Bernd Klein und Thomas Gänsicke. *Leichtbau-Konstruktion. Dimensionierung, Strukturen, Werkstoffe und Gestaltung*. 11. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019. ISBN: 978-3-658-26845-9.
- [22] Herbert Funke. *Sandwichbauweise - Berechnung und Auslegung von Sandwichstrukturen*. Vorlesungsunterlagen. Dortmund: Fachhochschule Dortmund, 2012.
- [23] Frank Henning und Elvira Moeller. *Handbuch Leichtbau - Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2020. ISBN: 978-2-446-45638-9.
- [24] Henkel AG & Co. KGaA. *Ponal Classic*. 2021. URL: <https://www.ponal.de/produkte-old/weissleim/weissleim-detailansicht/c/holzklebstoff-weissleim-pvac-1/product/7/b/184/> (besucht am 20.03.2021).
- [25] Konrad Götz. *Die innere Optimierung der Bäume als Vorbild für technische Faserverbunde eine lokale Approximation*. Dissertation. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH; Technik und Umwelt, 2000.

A Anhang

A.1 Materialkennwerte Buchenholz

Tabelle 13: Materialkennwerte von Buchenholz (vollständig)

Materialkennwerte		Wert	Einheit
Darrdichte [13]		0,56	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Elastizitätsmodul [14]		14000,0	MPa
Biegefestigkeit [13]		59,0	MPa
Zugfestigkeit [5]	min	100,0	MPa
	max	135,0	MPa
Druckfestigkeit [13]	längs	24,5	MPa
	radial	3,7	MPa
Scherfestigkeit [13]	längs	8,9	MPa
Radiale Scherfestigkeit [25]	radial	12,4	MPa
Tangentiale Scherfestigkeit [25]	radial	15,5	MPa
	tangential	9,6	MPa
Schubfestigkeit [13]	radial	5,0	MPa
Wasseraufnahmekoeffizient [11]	längs	0,044	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}}}$
	radial	0,005	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}}}$
	tangential	0,004	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}}}$
Wärmeleitfähigkeit [11]	längs	0,4	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$
	tangential	0,2	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$
Wärmekapazität [11]		1300	$\frac{\text{J}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

A.2 Probenkörper aus der Bachelorarbeit von M. Rudlaff



Abbildung 31: In der Bachelorarbeit geprüfte Probekörper ([5], S. 33)

A.3 Versuchsergebnisse aus der Bachelorarbeit von M. Rudlaff

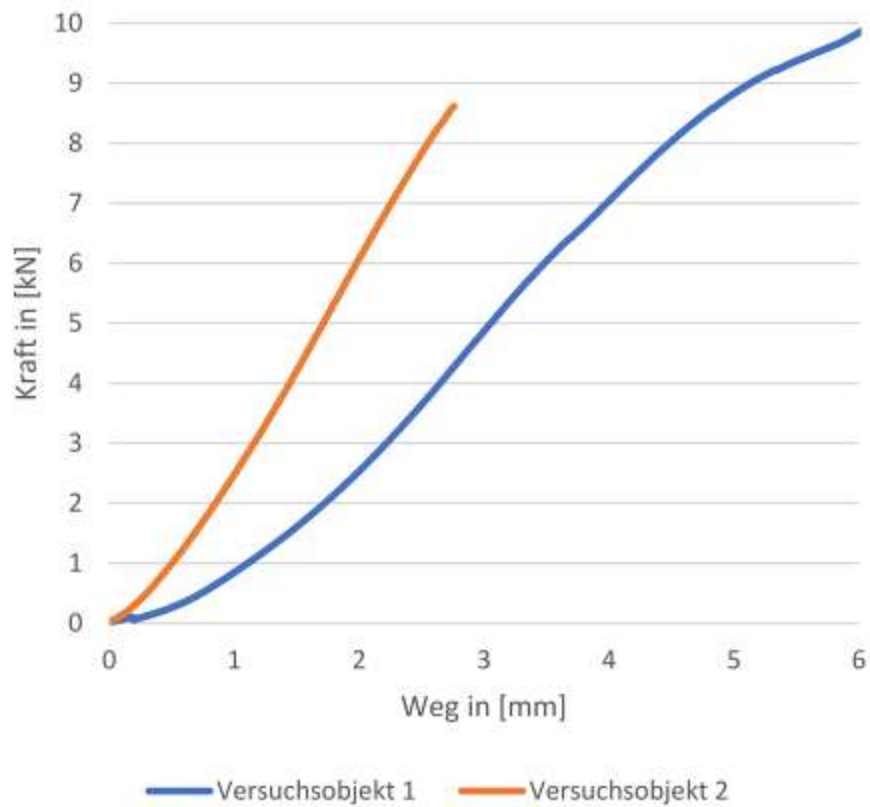


Abbildung 32: Ergebnisse der liegenden Versuchsreihe ([5], S. 36)

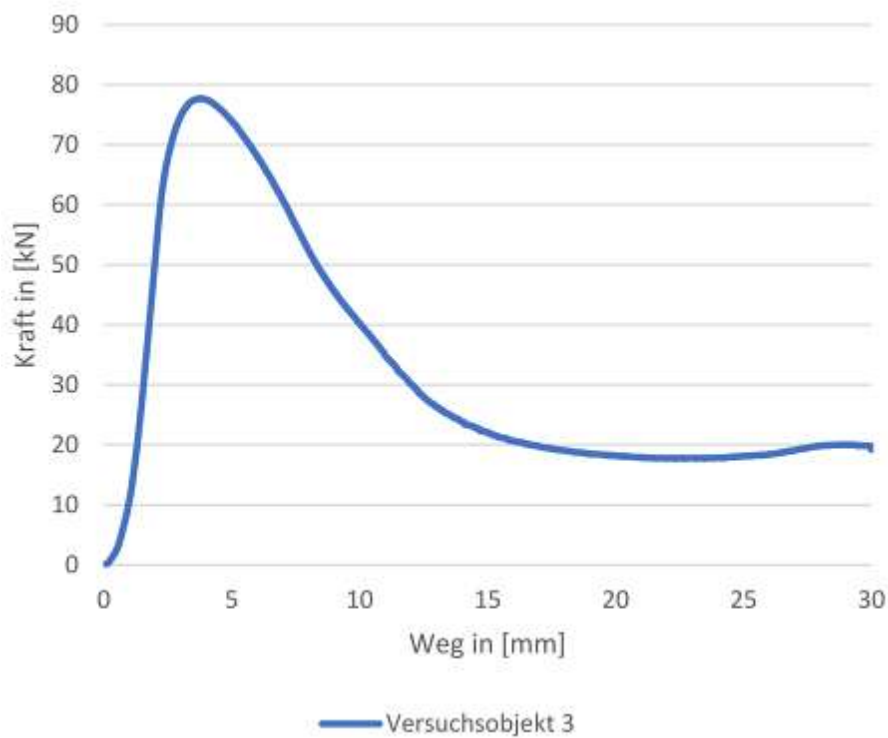
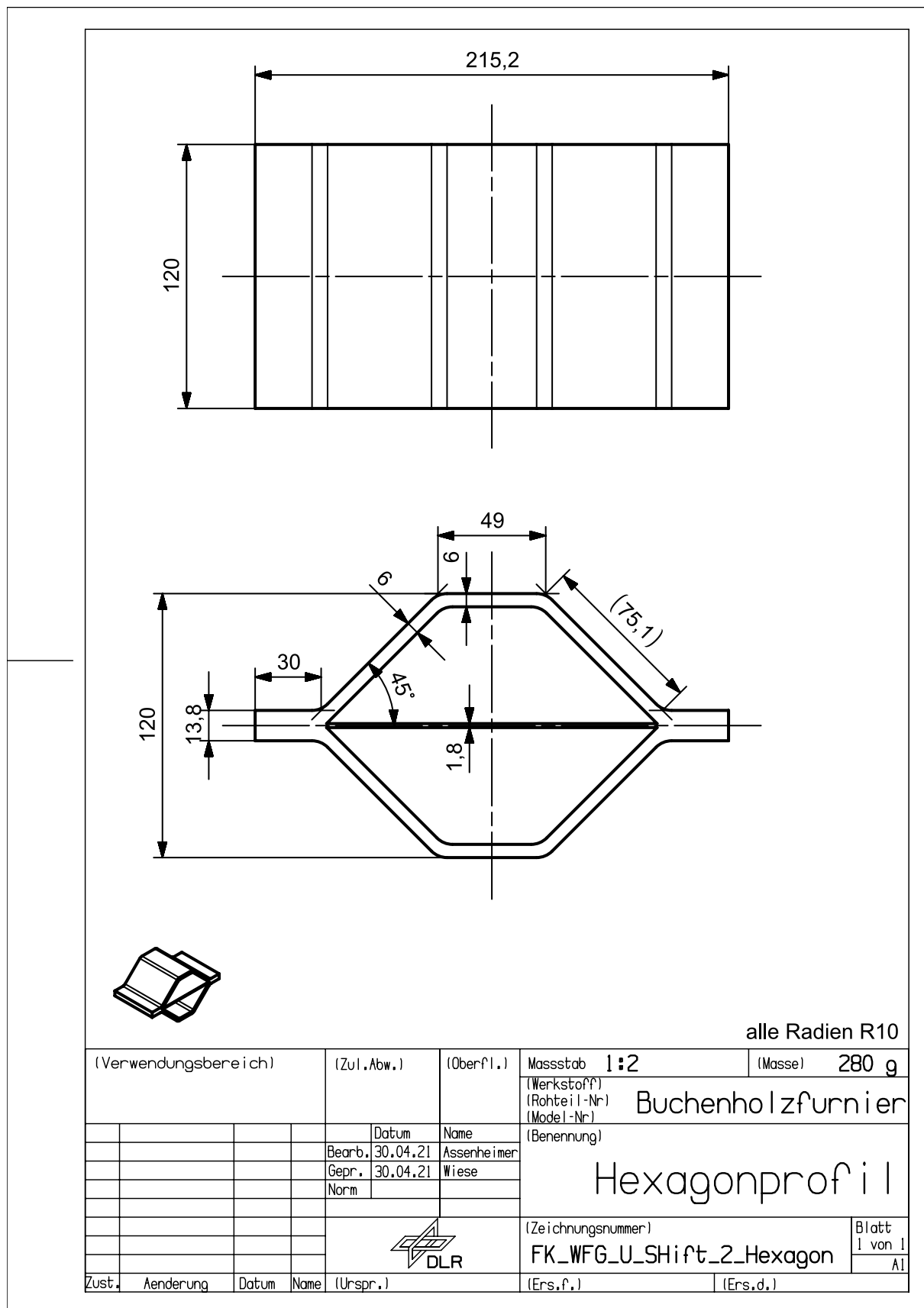
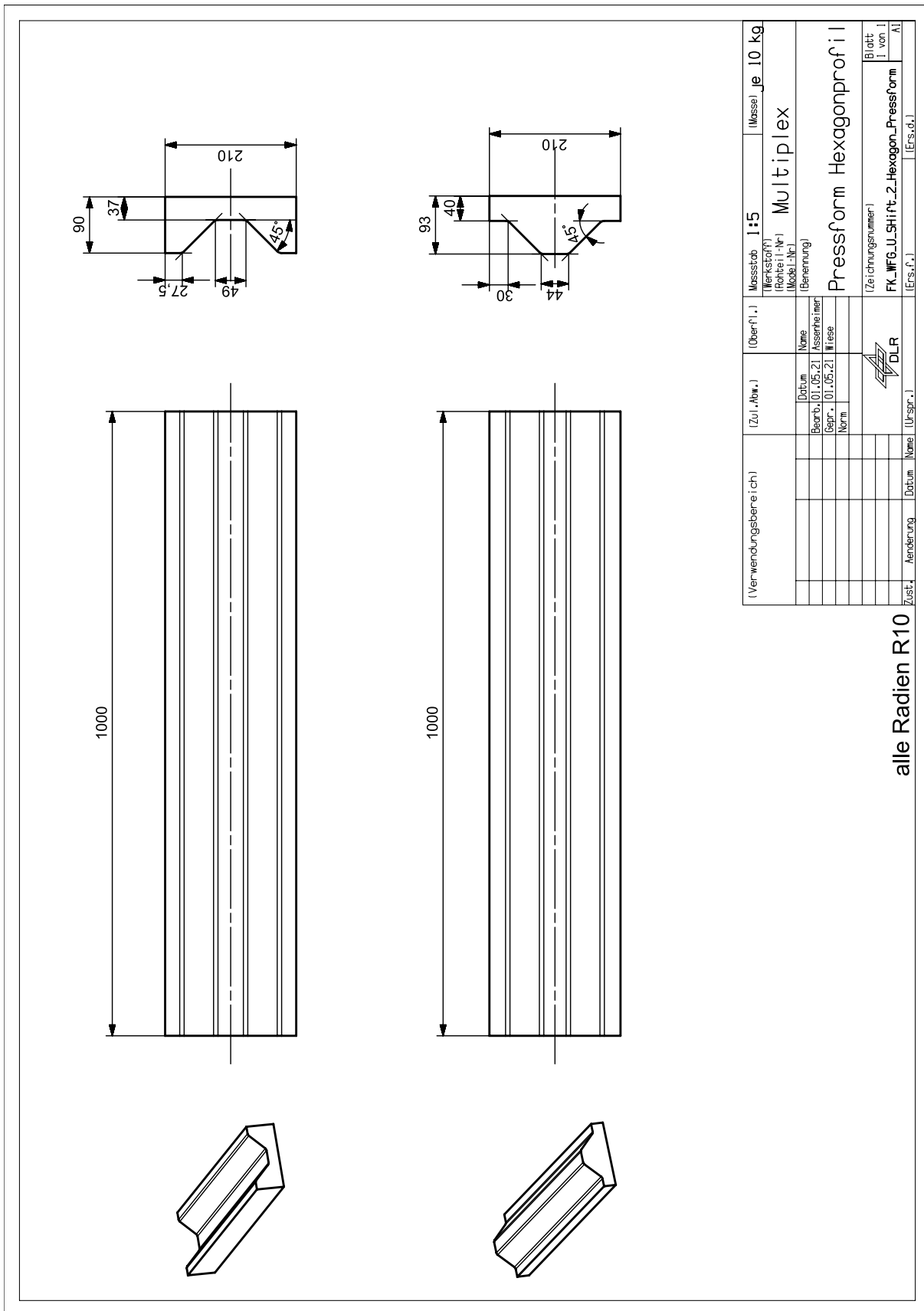


Abbildung 33: Ergebnisse der stehenden Versuchsreihe ([5], S. 39)

A.4 Technische Zeichnung der Probengeometrie



A.5 Technische Zeichnung des Werkzeugs



A.6 Versuchsplan

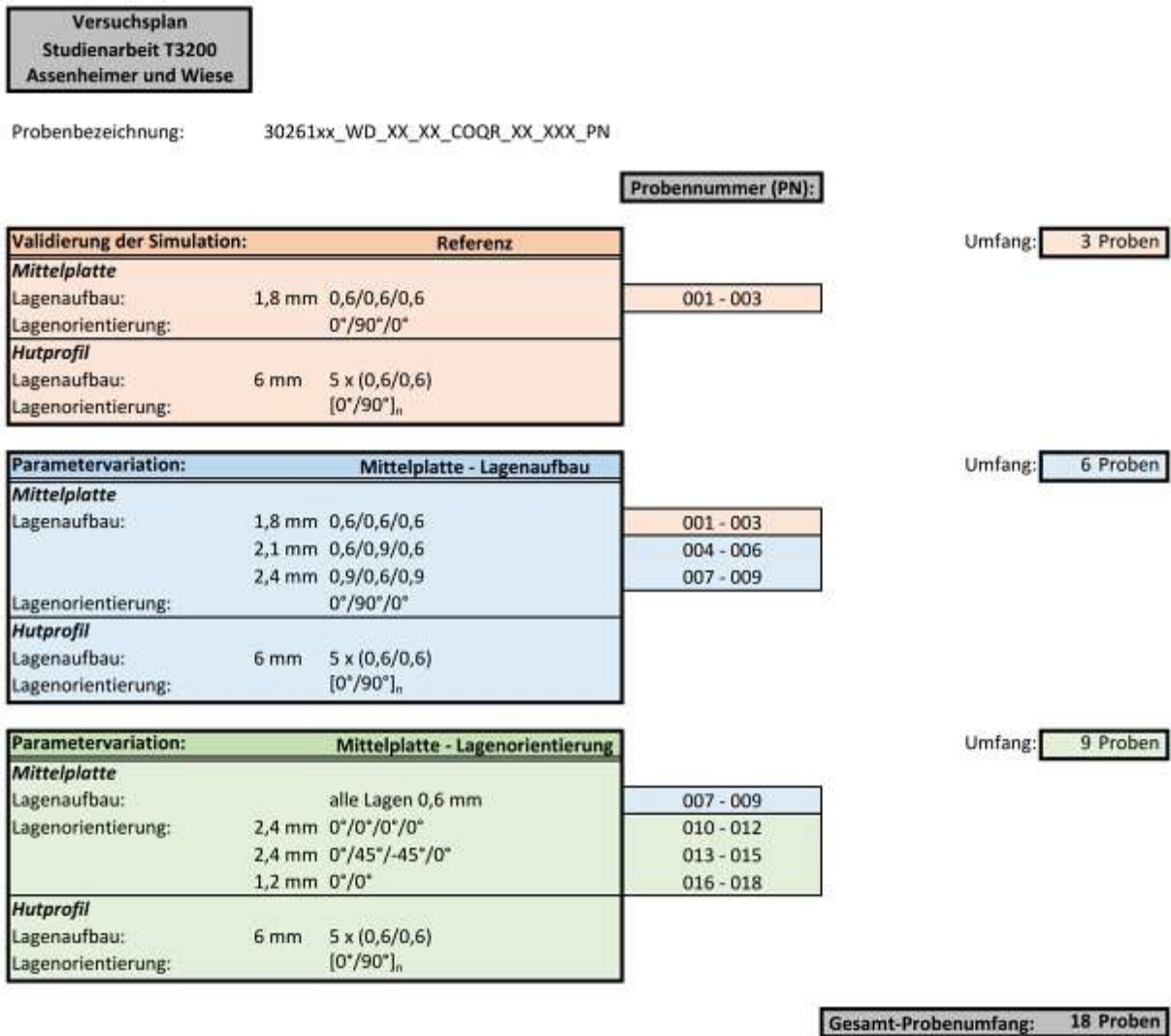


Abbildung 34: Übersicht der gefertigten und geprüften Konfigurationen

A.7 Graphische Versuchsauswertung

Tabelle 14: Vergleich der Versagensarten in Abhängigkeit des Probengewichtes und der Klebstoffmenge

PN	Proben- gewicht	Klebstoffmenge je Lage	Versagensart
001	269,75 g	10 g	Knicken der Seitenflanke
002	278,74 g	10 g	Abscheren des Profils
003	288,12 g	10 g	Abscheren der Lagen
004	283,16 g	10 g	Knicken der Seitenflanke
004.1	270,77 g	9,4 g	Abscheren der Lagen
005	282,67 g	10 g	Riss der Mittelplatte
006	273,18 g	10 g	Riss der Mittelplatte
007	301,21 g	10 g	Knicken der Seitenflanke
008	296,04 g	10 g	Abscheren des Profils
009	271,93 g	10 g	Abscheren der Lagen
010	307,00 g	10 g	Abscheren der Lagen
011	316,20 g	13 g	Knicken der Seitenflanke
012	302,89 g	13 g	Abscheren der Lagen
013	312,86 g	13 g	Abscheren der Lagen
014	297,00 g	13 g	Abscheren der Lagen
015	295,74 g	13 g	Riss der Mittelplatte
016	290,55 g	13 g	Riss der Mittelplatte
017	280,87 g	13 g	Riss der Mittelplatte
018	289,27 g	13 g	Abscheren der Lagen

A.7.1 Kraft-Weg-Diagramm der Parametervariation des Lagenaufbaus der MP

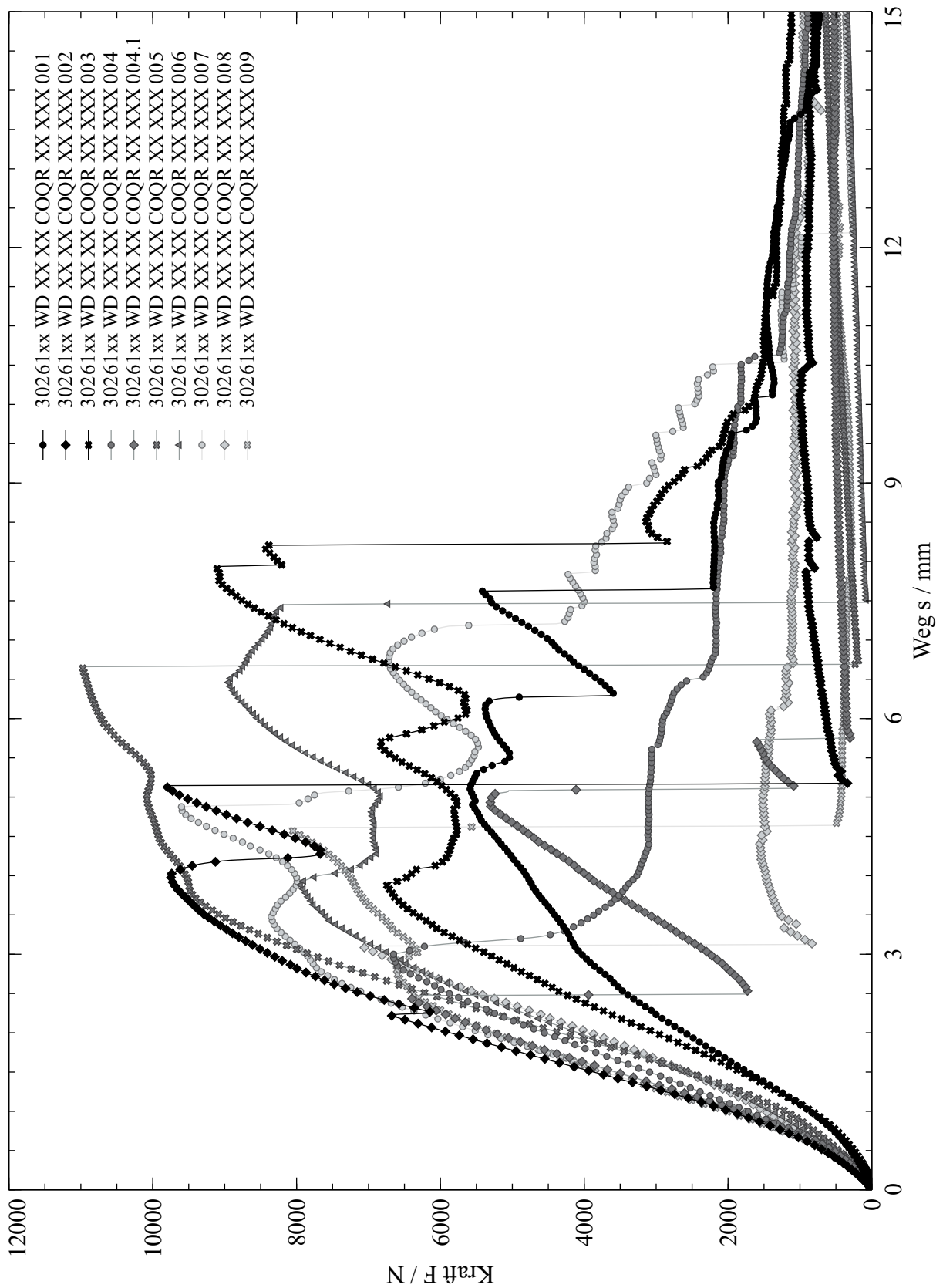


Abbildung 35: Kraft-Weg-Diagramm der Parametervariation des Lagenaufbaus der MP

A.7.2 Kraft-Weg-Diagramm der Parametervariation der Lagenorientierung der MP

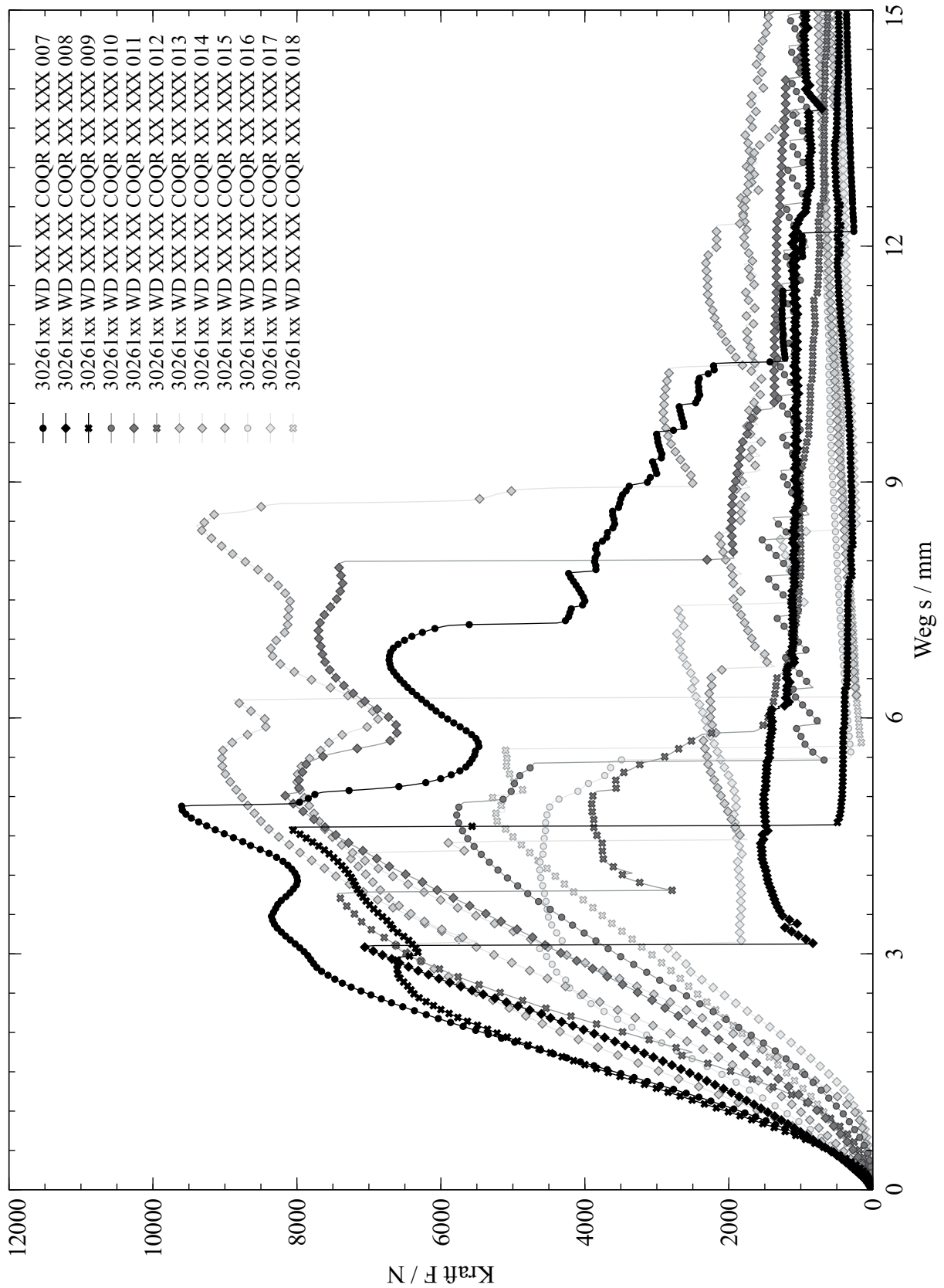
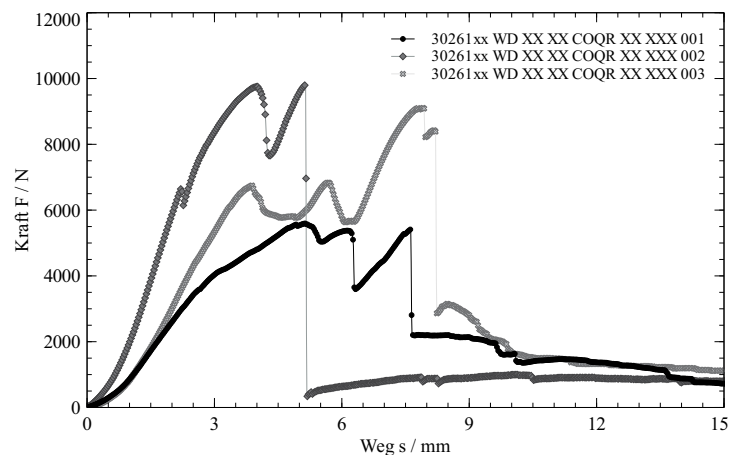


Abbildung 36: Kraft-Weg-Diagramm der Parametervariation der Lagenorientierung der MP

A.7.3 Auswertung der Proben mit PN = 001 - 003 (MP: 1,8 mm = 0,6/0,6/0,6 mit 0°/90°/0°)



PN = 001

$$F_{\max}(5,1s) = 5595,04 \text{ N}$$



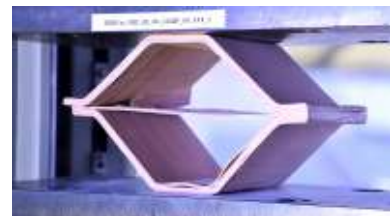
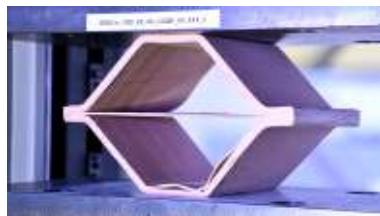
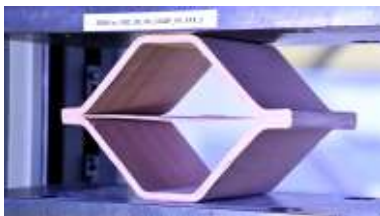
ab $t = 5s$: erste Delamination in der Seitenflanke des oberen HP

$t = 6s$: Vergrößerung der Deckfläche oben

$t = 8s$: Einknicken der Seitenflanke

PN = 002

$$F_{\max}(5,1s) = 9803,98 \text{ N}$$



$t = 1s - 3s$: Ausrichtung der MP in Zugbeanspruchungsrichtung

$t = 4s$: Delamination im unteren HP (Bodenfläche und Seitenflanke)

ab $t = 5s$: Abscherung des oberen HP von der MP im Bereich der Verbindungsfläche

PN = 003

$$F_{\max}(7,9s) = 9109,20 \text{ N}$$

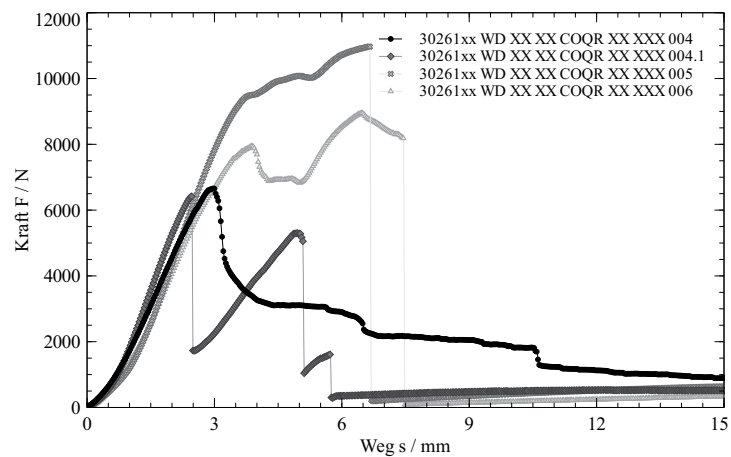


$t = 4s - 7s$: Vergrößerung der Deckfläche

ab $t = 8s$: Delamination/Abscheren der Lagen innerhalb der Seitenflanken des unteren HP

Abbildung 37: Auswertung der Proben mit PN = 001 - 003

A.7.4 Auswertung der Proben mit PN = 004 - 006 (MP: 2,1 mm = 0,6/0,9/0,6 mit 0°/90°/0°)



PN = 004

$$F_{\max}(3s) = 6661,48 \text{ N}$$



- t = 3s: Durchbiegung der oberen Seitenflanke
- ab t = 3s: Delamination und Einknicken der Seitenflanke
- t = 6,5s: Aufklaffen der Verbindungsfläche rechts

PN = 004.1

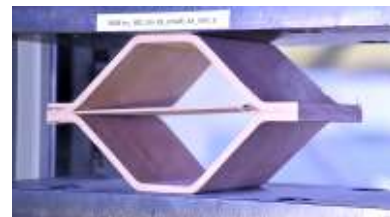
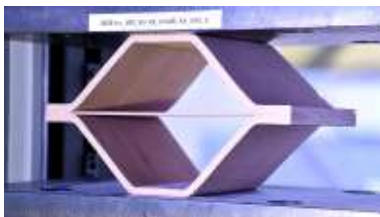
$$F_{\max}(2,5s) = 6424,53 \text{ N}$$



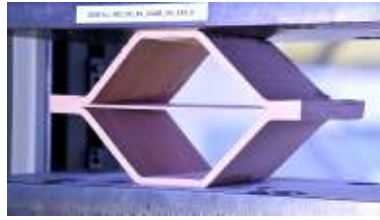
- t = 2,5s: Delamination der unteren Seitenflanke im HP
- t = 2,5s - 5s: Neuausrichtung der MP in Zugbeanspruchungsrichtung
- t = 5s: Riss in der MP

PN = 005

$$F_{\max}(6,7s) = 10977,04 \text{ N}$$



- ab t = 3s: Vergrößerung der Deckfläche
- t = 5,5s: Staubbildung
- t = 6,7s: Riss in der MP

PN = 006 $F_{\max}(6,5s) = 8952,00 \text{ N}$ 

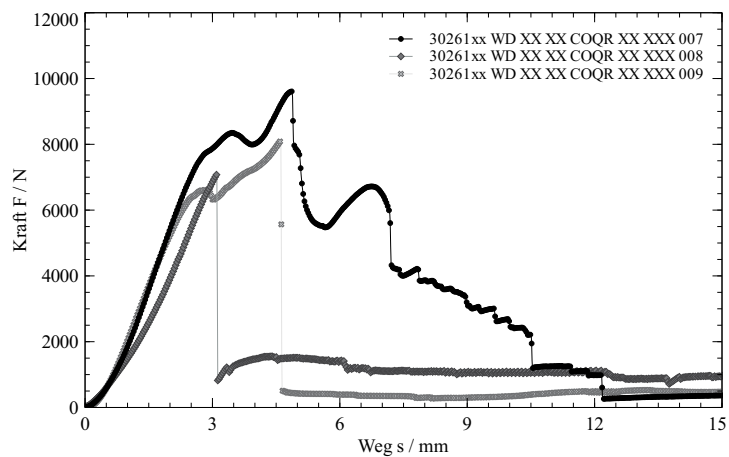
t = 4s: Seitenflanke auf MP gedrückt

t = 6,5s - 7,5s: Vergrößerung der Bodenfläche

t = 7,5s: Riss in der MP

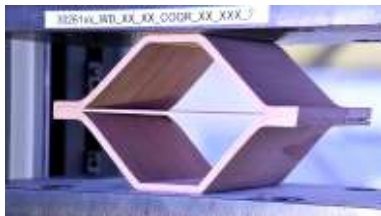
Abbildung 38: Auswertung der Proben mit PN = 004 - 006

A.7.5 Auswertung der Proben mit PN = 007 - 009 (MP: 2,4 mm = 0,9/0,6/0,9 mit 0°/90°/0°)



PN = 007

$$F_{\max}(4,9s) = 9608,16 \text{ N}$$



t = 3s - 5s: Vergrößerung der Bodenfläche

t = 5s: plötzliches Einknicken der Seitenflanke oben

t = 5s- 12s: stufenweiser Energieabbau

PN = 008

$$F_{\max}(3s) = 7076,65 \text{ N}$$



t = ab 3s: Abscherung des HP von der Verbindungsfläche

PN = 009

$$F_{\max}(4,6s) = 8110,78 \text{ N}$$

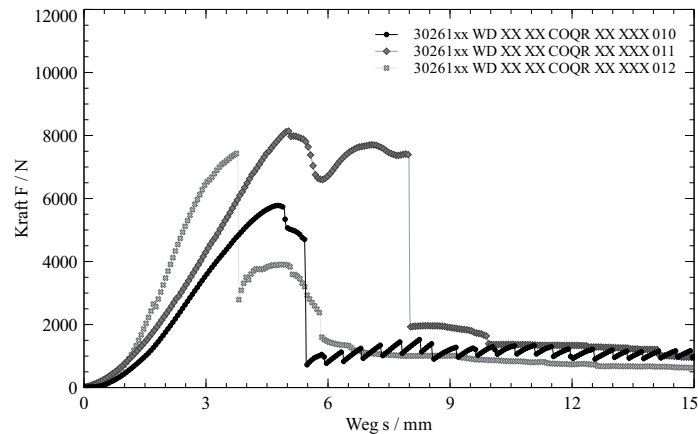


t = 3s - 5s: Vergrößerung der Deckfläche

ab t = 4,5s: Abscherung innerhalb des unteren HP auf einer Sperrlage

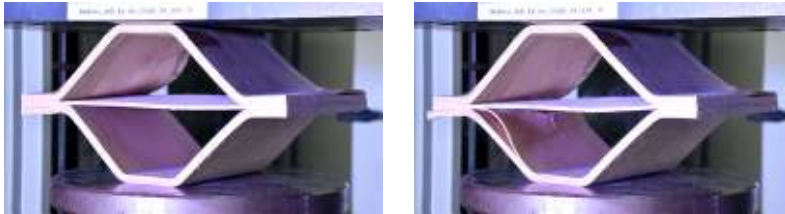
Abbildung 39: Auswertung der Proben mit PN = 007 - 009

A.7.6 Auswertung der Proben mit PN = 010 - 012 (MP: 2,4 mm = 0,6/0,6/0,6/0,6 mit 0°/0°/0°/0°)



PN = 010

$$F_{\max}(4,7s) = 5779,99 \text{ N}$$



t = 5s: Einknicken der Seitenflanke

ab t = 5,6s: Abscherung des unteren HP von der MP im Bereich der Verbindungsfläche

PN = 011

$$F_{\max}(5s) = 8160,86 \text{ N}$$



ab t = 1s: Ausrichtung der MP in Zugbeanspruchungsrichtung

ab t = 5s: Eindellen der Seitenflanke

t = 8s: Einknicken der Seitenflanke

PN = 012

$$F_{\max}(3,75s) = 7437,79 \text{ N}$$



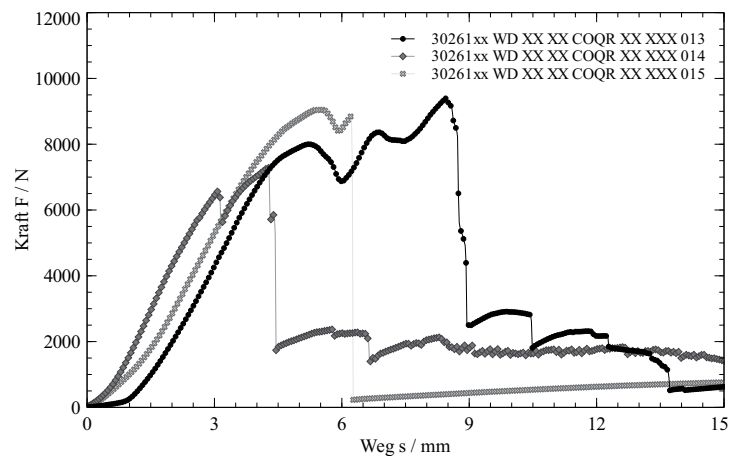
ab t = 1s: Ausrichtung der MP in Zugbeanspruchungsrichtung

ab t = 3s: Delamination und Abscheren der Lagen innerhalb einer Seitenflanke des unteren HP

t = 4s: Brechen der Seitenflanke im Bereich der Verbindungsfläche

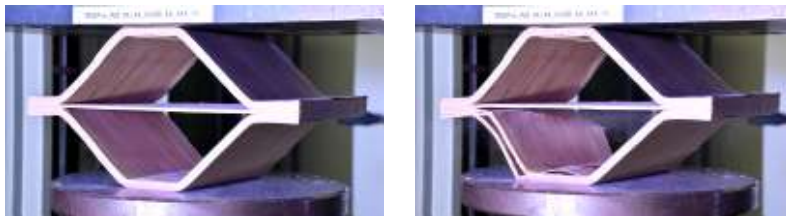
Abbildung 40: Auswertung der Proben mit PN = 010 - 012

A.7.7 Auswertung der Proben mit PN = 013 - 015 (MP: 2,4 mm = 0,6/0,6/0,6/0,6 mit 0°/45°/-45°/0°)



PN = 013

$$F_{\max}(8,5s) = 9393,61 \text{ N}$$

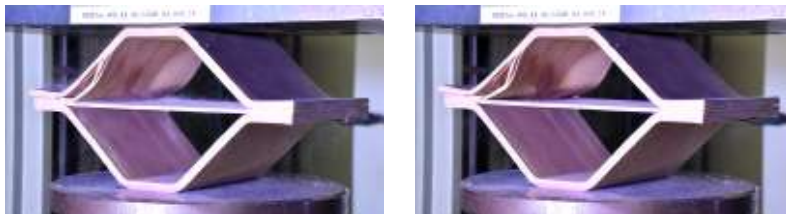


ab $t = 5s$: Vergrößerung der Bodenfläche

$t = 9s$: Delamination und Riss der Seitenflanke im unteren HP

PN = 014

$$F_{\max}(4,25s) = 7281,83 \text{ N}$$

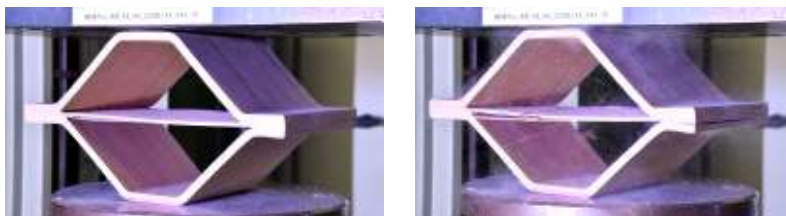


$t = 4,5s$: Abscheren der Lagen innerhalb einer Seitenflanke des oberen HP

$t = 6s$: Einknicken der delaminierten Seitenflanke

PN = 015

$$F_{\max}(5,5s) = 9045,13 \text{ N}$$

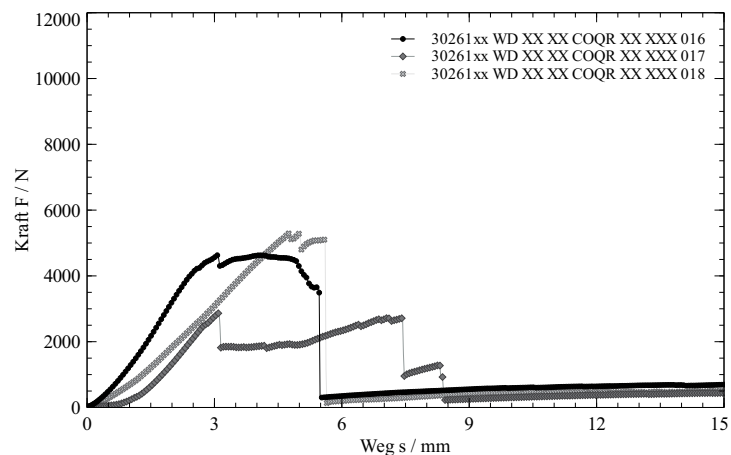


ab $t = 1s$: Ausrichtung der MP in Zugbeanspruchungsrichtung

$t = 5,5s$: Riss in der MP

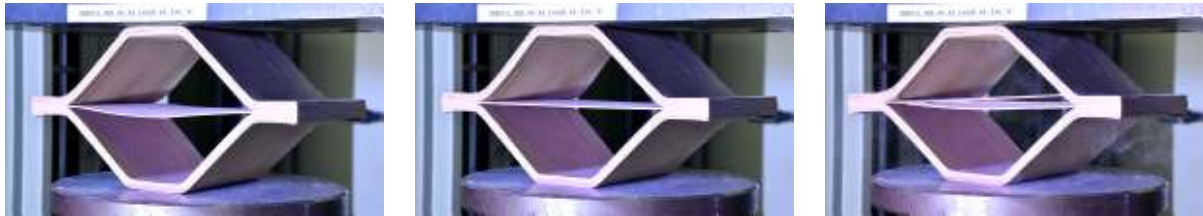
Abbildung 41: Auswertung der Proben mit PN = 013 - 015

A.7.8 Auswertung der Proben mit PN = 016 - 018 (MP: 1,2 mm = 0,6/0,6 mit 0°/0°)



PN = 016

$$F_{\max}(3,1s) = 4645,82 \text{ N}$$



ab $t = 1s$: Ausrichtung der MP in Zugbeanspruchungsrichtung

ab $t = 3s$: Eindrücken der Seitenflanke auf die MP

$t = 5,5s$: Riss in der MP

PN = 017

$$F_{\max}(3,1s) = 2886,56 \text{ N}$$



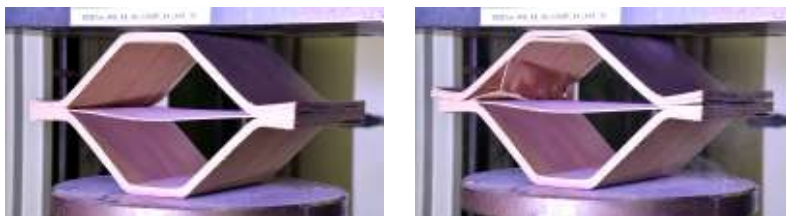
$t = 1s - 3s$: Ausrichtung der MP in Zugbeanspruchungsrichtung

$t = 3s$: Delamination des HP im Bereich der Verbindungsfläche

$t = 8s$: mehrere Risse in der MP in Faserrichtung

PN = 018

$$F_{\max}(5s) = 5304,81 \text{ N}$$



$t = 1s - 4s$: Ausrichtung der MP in Zugbeanspruchungsrichtung

ab $t = 5s$: Delamination und Abscheren der untersten Lagen innerhalb der Seitenflanken des oberen HP und anschließendes Abscheren des HP von der Verbindungsfläche

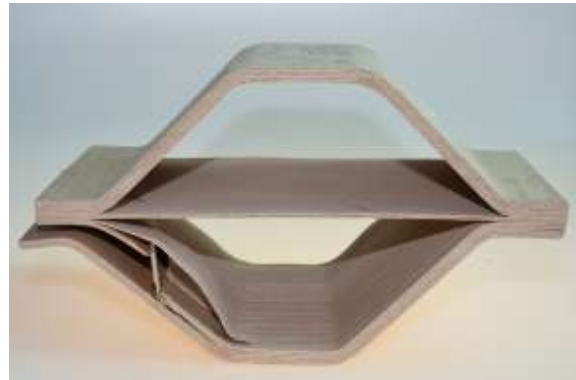
Abbildung 42: Auswertung der Proben mit PN = 016 - 018

A.8 Dokumentation der geprüften Proben

Probenbezeichnung: 30261xx_WD_XX_XX_COQR_XX_XXX_PN



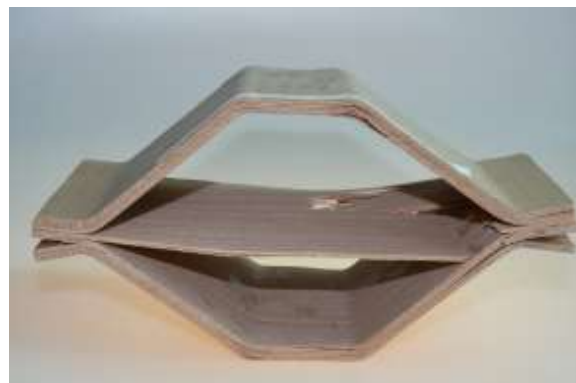
PN = 001



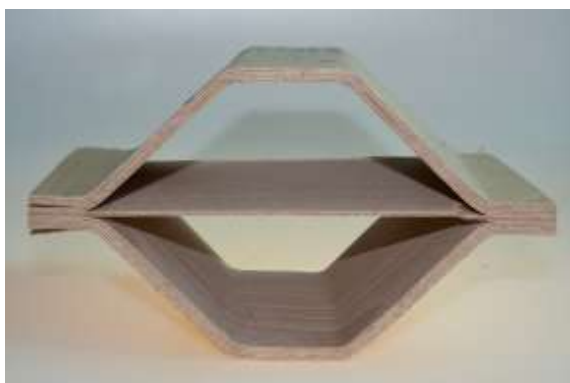
PN = 002



PN = 003



PN = 004



PN = 005



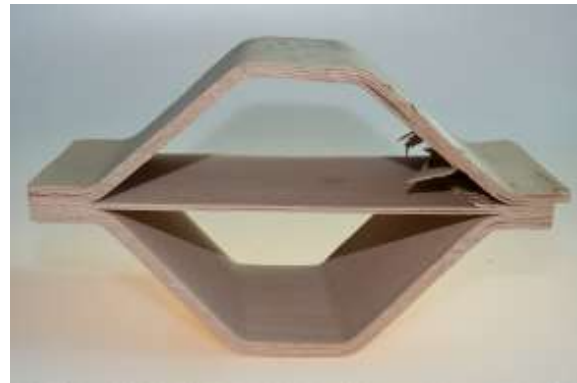
PN = 006

Abbildung 43: Grafische Dokumentation der geprüften Proben mit PN = 001 - 006

Probenbezeichnung: 30261xx_WD_XX_XX_COQR_XX_XXX_PN



PN = 007



PN = 008



PN = 009



PN = 010



PN = 011



PN = 012

Abbildung 44: Grafische Dokumentation der geprüften Proben mit PN = 007 - 012

Probenbezeichnung: 30261xx_WD_XX_XX_COQR_XX_XXX_PN



PN = 013



PN = 014



PN = 015



PN = 016



PN = 017



PN = 018

Abbildung 45: Grafische Dokumentation der geprüften Proben mit PN = 013 - 018