

BBSR-
Online-Publikation
36/2024

Entwicklung von neuen Baustoffen aus schnell wachsenden Pflanzen wie Miscanthus und Paulownia für Primärkonstruktionen

von

Prof. Dr.-Ing. Mathias Wirths
Dr.-Ing. Katja Marx
Prof. Dr. Ralf Pude
Prof. Dr.-Ing. Marzia Traverso
Dr. Roland Meyer
Dr. Ruben Richrath
Percy-Bodo v. Oheimb-Loup

Entwicklung von neuen Baustoffen aus schnell wachsenden Pflanzen wie Miscanthus und Paulownia für Primärkonstruktionen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-22.12

Projektlaufzeit: 09.2022 bis 03.2024

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Dr. Jan Weckendorf
jan.weckendorf@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Alanus Hochschule, Alfter / Universität Siegen
Materialkundelabor des Departments Architektur
Prof. Dr.-Ing. Mathias Wirths (Projektleitung)
Dr.-Ing. Katja Marx
Percy-Bodo v. Oheimb-Loup

Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität Bonn
Professur für Nachwachsende Rohstoffe
Prof. Dr. Ralf Pude

RWTH Aachen
Institut für Nachhaltiges Bauen
Prof. Dr.-Ing. Marzia Traverso,
Dr. Roland Meyer

Creavis, Evonik Industries AG, Marl
Dr. Ruben Richrath

Stand

Januar 2024

Gestaltung

Universität Siegen, Alanus Hochschule
Mathias Wirths
Katja Marx
Chris Erik Kühn
Percy-Bodo v. Oheimb-Loup

Bildnachweis

Titelbild: C. Kühn

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Wirths, Mathias; Marx, Katja; Pude, Ralf; Traverso, Marzia; Meyer, Roland; Richrath, Ruben; v. Oheimb-Loup, Percy-Bodo, 2024:
Entwicklung von neuen Baustoffen aus schnell wachsenden Pflanzen wie Miscanthus und Paulownia für Primärkonstruktionen.
BBSR-Online-Publikation 36/2024, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	7
1 Einleitung	8
1.1 Themenfeld	8
1.2 Botanische Materialeigenschaften	9
1.2.1 Rohstoff Miscanthus	9
1.2.2 Rohstoff Paulownia	10
1.3 Problemstellung und Forschungsstand	11
1.3.1 Dekarbonisierung und klimaresilienter Pflanzenanbau	11
1.3.2 Stand der Forschung/Baupraxis	12
1.3.3 Forschungslücke/Entwicklungsbedarf	13
1.4 Zielsetzung	14
1.4.1 Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu	15
2 Forschungsaufbau	16
2.1 Projektteam und Organisation	16
2.2 Methodischer Ansatz und Arbeitspakete	17
2.2.1 Übertragung der iterativen Entwurfsmethodik auf die Forschung	17
2.4.2 Arbeitspakete und Meilensteine	18
3 Projektverlauf	20
3.1 Verklebung und Bindemittleinsatz	20
3.1.1 Vorbereitung des Rohmaterials	20
3.1.2 Verklebung	21
3.2 Erstellung von Prüfobjekten zur Biegesteifigkeit im Labormaßstab	24
3.3 Knochenleim und Wasserlöslichkeit	29
3.4 Erstellung von Prüfobjekten für Druckstäbe im Labormaßstab	30
3.5 Untersuchungen zu Bindemitteln für Miscanthus durch Creavis	35
3.6 Erstellen und Testen von Prüfobjekten für Biegefestigkeit in praxisnaher Größe	37
3.6.1 Erstellen der Prüfkörper	37
3.6.2 Testen der Prüfkörper	40
3.6.3 Ergebnisse	42
3.7 Betrachtungen zur Nachhaltigkeit durch den Projektpartner INAB	48
3.7.1 Nachhaltigkeitsbewertung	48
3.7.2 Sozialbewertung	49
3.7.3 Ökobilanz	50
3.7.4 Überlegungen zu Prozeßschritten	51
3.7.5 Weitere zu erwartende Einflussaspekte	55
3.8 Überlegungen zu Verbindungen	56
3.8.1 Verbindungen von Miscanthuswerkstoffen analog zu traditionellen Holzverbindungen	57
3.8.2 Werkstoffspezifische Verbindungen für Balken aus Miscanthuswerkstoffen	60
3.8.3 Einsatz von Kompositverbindungen bei Miscanthuswerkstoffen	63
3.8.4 Modellstudie	66
4 Schlussbetrachtung	68
4.1 Zusammenfassung und Resümee	68

4.2 Zukünftige Forschungsbereiche und Ausblick	70
4.3 Danksagung	72
Literaturverzeichnis	73
Abbildungsverzeichnis	77
Tabellenverzeichnis	80

Kurzfassung

Das Bauen mit Nachwachsenden Rohstoffen ist ein wichtiger Beitrag zur Reduktion der CO₂ Emissionen im Bausektor. Das schnell wachsende Schilfgewächs *Miscanthus x giganteus* steht im Fokus der hier dargelegten Überlegungen zu neuen holzwerkstoffähnlichen Materialien für Primärkonstruktionen. Die Pflanze erbringt während der Wachstumsphase zahlreiche ökosystemare Dienstleistungen und hat jährlich einen hohen Trockenmasseertrag. Die Hauptverwendungen sind derzeit die als Energiepflanze oder Einstreu. Als Baumaterial könnte zum einen das der Atmosphäre durch den Wachstumsprozess entzogene CO₂ langfristig gespeichert werden, zum anderen die Holzwirtschaft mit einer zusätzlichen Rohstoffquelle versorgt werden. Größte Herausforderung für die Nutzung als Werkstoff ist die Realisierung einer kraftschlüssigen Verbindung der Halme, da diese eine sehr glatte Oberfläche aufweisen.

Im hier vorliegenden Forschungsbericht werden Verfahren zur Bearbeitung des Rohmaterials entwickelt und die Verklebung zu stabförmigen Tragelementen mit verschiedenen Bindemitteln erprobt.

Es wird belegt, dass stabförmige Träger aus *Miscanthus* hinsichtlich ihres Verformungsverhaltens unter Biegebelastung mit handelsüblichem Bauholz gleichwertig sind. Kompositwerkstoffe aus *Miscanthus* und dem ebenso sehr schnell wachsenden Laubholz *Paulownia* erweisen sich als Biegeträger im Rahmen dieses Projektes als wenig performant.

Die Feststellung der grundsätzlichen Eignung von *Miscanthus* als Material für Primärkonstruktionen eröffnet zahlreiche weitere Forschungsfelder entlang der Prozesskette vom Rohstoff bis zum Einsatz in der baulichen Praxis.

Beispielsweise sind erste Überlegungen über mögliche Verbindungen und Konstruktionsweisen, die besonders auf den Herstellungsprozess des neuen Werkstoffes abgestimmt werden, nun hinsichtlich einer vertiefenden Betrachtung lohnenswert.

Abstract

Building with renewable raw materials is an important contribution to the reduction of CO₂ emissions in the construction sector. The fast-growing reed plant *Miscanthus x giganteus* is the focus of the considerations presented here on new wood-based materials for primary constructions. The plant provides numerous ecosystem services during the growth phase and has a high annual dry matter yield. The main uses are currently as an energy crop or litter. As a building material, the CO₂ removed from the atmosphere during the growth process could be stored in the long term and the timber industry could be supplied with an additional source of raw materials. The greatest challenge for its use as a material is the realisation of a force-fit connection between the stalks, as they have a very smooth surface.

In this research report, methods for processing the raw material are developed and the bonding to rod-shaped load-bearing elements with various binding agents is tested.

It is proven that rod-shaped beams made of *Miscanthus* are equivalent to commercially available construction timber in terms of their deformation behavior under bending load. Composite materials made from *Miscanthus* and the equally fast-growing hardwood *Paulownia* proved to be less effective as bending beams in this project.

Establishing the fundamental suitability of *Miscanthus* as a material for primary constructions opens up numerous other fields of research along the process chain from the raw material to its use in building practice. For example, initial considerations about possible connections and construction methods, which are particularly adapted to the manufacturing process of the new material, are now worthwhile in terms of in-depth consideration.

1 Einleitung

1.1 Themenfeld

Der rasant fortschreitende Klimawandel erfordert eine alle Wirtschaftszweige umfassende, übergreifende Strategie hin zu mehr Nachhaltigkeit. „Die Umweltauswirkungen und die Ressourcenintensität der Produkte müssen erheblich reduziert werden“¹ [Übersetz. d. Verf.] (Peters & Svanström, 2016, p. 2). Insbesondere der Bausektor stellt in diesem Zusammenhang ein großes Optimierungspotenzial dar, da allein dieser Sektor neben einem immensen Materialverbrauch weltweit für ca. 37 % der weltweiten Treibhausgasemissionen, wovon 8 % der Zementherstellung zuzuschreiben sind, verantwortlich ist (IBAU; UNEP, 2022). Die Politik in Europa ist sich der dramatischen Entwicklung in Anbetracht der global verstärkt auftretenden Auswirkungen auf das bereits heute veränderte Klima bewusst und versucht, durch ambitionierte Reduktionsziele bezüglich der CO₂-Emissionen den Klimawandel zu begrenzen. So weist die EU für 2050 das Ziel aus, der erste treibhausgasneutrale Kontinent zu werden. Deutschland fixiert dieses Ziel der Treibhausgasneutralität bereits für 2045 (EU, 2024; Bundesregierung 2024). Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass ohne eine ökologische Optimierung im Baubereich die politischen Ziele nicht erfüllbar sind. Es sind neue Strategien und insbesondere neue regenerative Werkstoffe erforderlich, die neben weiteren Effizienzmaßnahmen zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen in diesem Sektor führen.

Abb. 1
Miscanthushalme



Foto: C. Wirths

Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist die Entwicklung von Werkstoffen aus schnell wachsenden Pflanzen, die somit zu CO₂-Speichern werden und damit einen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten. Als

¹ „The environmental impact and resource intensity of products must be considerably reduced.“

besonders aussichtsreich für die Entwicklung von biobasierten performanten Werkstoffen haben sich in vorausgegangenen Forschungsvorhaben Miscanthus x giganteus (Abb. 1) und Paulownia gezeigt. Hierbei sollen stabförmige Werkstoffe aus Miscanthus für Anwendungsbereiche, in denen derzeit Vollholzprodukte zum Einsatz kommen (z.B. Balken, Stützen), entwickelt werden. Es wird ebenso untersucht, wie die Leistungsfähigkeit von Verbundbaustoffen aus Miscanthus und Paulownia als konstruktive Baustoffe einzuschätzen ist.

1.2 Botanische Materialeigenschaften

Mit den folgenden Abschnitten werden die botanischen Eigenschaften der ausgewählten Pflanzen genauer beschrieben. Aufgrund des schnellen Wachstums wird deutlich, dass es sich bei beiden Pflanzen um effiziente CO₂ Speicher handelt.

1.2.1 Rohstoff Miscanthus

„Miscanthus (Chinaschilf) ist ein mehrjähriges rhizomatisches C4-Gras, welches sein Hauptverbreitungsgebiet im ostasiatischen Raum hat (Chung & Kim, 2012). Die Gattung Miscanthus hat ihren Ursprung in den tropischen und subtropischen Klimaten Ostasiens, seine insgesamt 11 bzw. 12 Arten sind über ein weites Klimaspektrum vorzufinden (Greef & Deuter, 1993). Der sterile Klon Miscanthus x giganteus (Greef et al.), eine natürliche Hybride aus Miscanthus sinensis und Miscanthus sacchariflorus, ist der einzige Genotyp der aktuell in Europa und den Vereinigten Staaten kommerziell genutzt wird (Kiesel & Lewandowski, 2017). Wegen seiner Robustheit und Anpassungsfähigkeit ist der Anbau von Miscanthus an unterschiedlichen Standorten in verschiedenen Klimazonen bei gleichzeitig hohen Trockenmasseerträgen möglich (Hastings et al., 2009; Lewandowski et al., 2016; Ramirez-Almeyda et al., 2017). Unter geeigneten Wachstums- und Anbaubedingungen sind in Europa Biomasseerträge von jährlich bis zu 25 t Trockenmasse pro Hektar möglich (Lewandowski et al., 2000). Damit zählt Miscanthus heute zu den am vielversprechendsten Biomassepflanzen für die Entwicklung einer sozial-ökologisch verträglichen Bioökonomie (European Commission, 2018; van der Weijde et al., 2017). In den Arbeiten von Cossel et al. (2020) und Moll et al. (2020) werden einige der vielfältigen Umwandlungs- und Verwertungswege der Miscanthus-Biomasse aufgezeigt, welche diese Entwicklungsperspektive weiter unterstützen. Trotz dieser Aussichten spiegelt sich das Potential in der europäischen Anbaufläche aktuell nicht wider, lediglich 20000 Hektar werden in Europa angebaut, hiervon befinden sich 4000 Hektar in Deutschland (Lewandowski, 2016). Nach Sherrington et al. (2008) liegt dies u. a. an der geringen Bekanntheit, dem mangelnden Wissen vieler Landwirte über diese relativ neue Kulturpflanze und den Unsicherheiten bezüglich der finanziellen Erträge des Anbaus aufgrund des jungen, sich noch entwickelnden Marktes. Darüber hinaus gelten die hohen Etablierungskosten und die langfristige Verpflichtung infolge der meist 20-jährigen Nutzungsdauer als Haupthindernisse für die Einführung von Miscanthus (Witzel & Finger, 2016). Letztlich wird auch die Höhe der finanziellen Unterstützung, z. B. durch Subventionen über die Rentabilität von Miscanthus entscheiden, welche besonders im Ländervergleich sehr heterogen ausfallen können (Emmerling & Pude, 2017; Witzel & Finger, 2016). Die Aufnahme von Miscanthus als Greening-Maßnahme in Europa im Januar 2018 (European Commission, 2018) kann als ein erster Schritt zur Förderung von Miscanthus, insbesondere auf marginalen Flächen mit geringeren Ertrags- und Erfolgsaussichten verstanden werden (Cossel et al., 2020). Nach den Autoren sei es jedoch entscheidend, die durch den Anbau von Miscanthus erbrachten zahlreichen Ökosystemleistung zu quantifizieren und monetär zu entlohnen. Die Etablierung von Miscanthus, die bis zu 70 % der geschätzten Gesamtkosten ausmacht, gilt als der größte Kostenfaktor während der gesamten Lebens- bzw. Nutzungsdauer des Bestandes (Xue et al., 2013). Hierzu zählen v. a. die Einzelkosten für Pflanzgut, Bodenvorbereitung, Düngung, Unkrautbekämpfung sowie die initiale Bewässerung des Bestandes während der ersten Wachstumsperiode (Ge et al., 2016; Lewandowski et al., 2000). Die Rhizom- oder Setzlings-pflanzung erfolgt im Frühjahr mit einer Dichte von einer Pflanze pro Quadratmeter (Himken et al., 1997). Je nach Standortbedingungen müssen die Etablierungsmethoden angepasst werden

(Moll et al., 2020). Im Anschluss an die Bestandsetablierung wird erwartet, dass sich der Ertrag der Sorte nach 2-3 Jahren stabilisiert und im Laufe der Nutzungsdauer von bis zu 25 Jahren in etwa konstant bleibt (Lewandowski et al., 2016). Die maximale Trockenmasseproduktion wird im Spätsommer erreicht, dennoch wird die Biomasse normalerweise erst im Februar/März geerntet, da zu diesem Zeitpunkt der höchste Trockensubstanzgehalt der Pflanzen erreicht ist (Himken et al., 1997). Das Erntefenster ist meist kurz: Zum einen muss die Ernte vor dem Beginn des Wiederaustriebs im April erfolgen, zum anderen sollte der Erntezeitpunkt so spät wie möglich gewählt werden, damit sowohl der Feuchtegehalt als auch der Nährstoffgehalt des Ernteguts möglichst gering sind (Lewandowski et al., 2000). Dies ist nach Bussemaker et al. (2017) nicht nur entscheidend für die Biomassequalität, sondern führt auch zu einer allgemeinen Verringerung der Trocknungs- und Transportkosten. Bei der Ernte werden die Triebe bodennah mechanisch abgeschnitten und im Folgejahr wachsen die Triebe Ende April/Anfang Mai aus den Rhizomen nach. Die Ernte kann in verschiedenen Formen erfolgen, abhängig davon für welche Anwendung die Biomasse vorgesehen ist (Moll et al., 2020).“ (Morbe, 2022, Rheinische Universität Bonn)

1.2.2 Rohstoff Paulownia

„Bei der Paulownia-Pflanze handelt es sich um einen Laubbaum aus der Familie der Scrophulariaceae (China, 1998). Die Bäume werden 12 bis 15, teilweise bis zu 25 m hoch und bilden eine breite Krone mit gegenständigen Blättern (siehe Abbildung 4) und kleinen geflügelten Samen aus (Hecker & Weisgerber, 2014). Der Blütenstand kann als aufrechter und bis zu 35 cm langer Thyrsus beschrieben werden, duftet und wird von Bienen bestäubt. Ab einem Alter von 8-10 Jahren bilden die Bäume Früchte aus (Mosandl & Stimm, 2015), in denen Kapseln mit jeweils etwa 3.200 Samen vorhanden sind. Deutsche Namen des Paulownia-Baumes sind zum Beispiel der Blauglockenbaum, der Kiri-Baum oder die Kaiser-Paulownie. Es sind sieben Paulownia-Arten bekannt: *P. catalpifolia*, *P. elongata*, *P. fargesii*, *P. fortunei*, *P. kawakamii*, *P. taiwaniana* und *P. tomentosa* (China, 1998). Das ursprüngliche Verbreitungsgebiet der Paulownia-Bäume ist in großen Teilen Chinas zu finden (ZHU et al., 1986) und erstreckt sich vor allem über die Provinzen Liaoning, Shanxi, Henan, Shaanxi, Gansu, Sichuan, Hubei und Jiangxi (Stimm, et al., 2015). Allgemein sind die Paulownia-Bäume sehr lichtliebend und gelten als Pionierart, sie benötigen einen vollsonnigen Standort (Mosandl & Stimm, 2015). Daher kommen sie natürlicherweise nur in offenen Laub- und Mischwäldern und besonders nach Störungen in Waldflächen vor und sind wenig konkurrenzfähig gegenüber mittel- und spätsukzessionalen Arten (Stimm, et al., 2015). Bei den Wachstumsbedingungen zeigt die Paulownia einige Besonderheiten auf. So können die Bäume beispielsweise sehr große Temperaturschwankungen tolerieren. Die Temperaturspanne erstreckt sich von -20 bis +40 °C, wobei es dabei durchaus Unterschiede zwischen den verschiedenen Paulownia-Arten geben kann (ZHU et al., 1986). Die mittlere optimale Tagestemperatur für das Pflanzenwachstum der Paulownia-Bäume liegt bei etwa 24 bis 29 °C (ZHU et al., 1986). Die Bäume haben einerseits große Blattflächen mit hoher Transpirationsrate (ZHU et al., 1986), was eine gute Wasserversorgung notwendig macht, andererseits besitzen sie ein gut ausgebildetes und tiefgründiges Wurzelsystem (ZHU, et al., 1986). Die Paulownien können daher Niederschlagsmengen von 500 mm bis etwa 2000 – 3000 mm tolerieren. Aufgrund dieser hohen Toleranzen für Temperatur- und Niederschlagsschwankungen könnte die Baumart besser als die meisten heimischen Baumarten mit den Folgen des Klimawandels, wie beispielsweise den Anstieg von Temperaturextremen (IPCC, 2021) zurechtkommen.“ (Pfungsten, 2022; Rheinische Universität Bonn)

Der Schwerpunkt dieses Forschungsprojektes liegt bei dem Rohstoff *Miscanthus x giganteus* (Riesen-Chinaschilf). Er wird regional angebaut, die im Rahmen des Projektes verarbeiteten Pflanzen stammen aus dem Rheinland (Abb. 2). Gemäß eigener Erfahrungen des Projektteams kann festgehalten werden, dass im Standard-Ernteverfahren der Ertrag bisher als Einstreu oder als Energiepflanze verwendet wird und dabei die Halme stark zerkleinert werden (Ernte durch Maishäcksler). Zur Erhöhung der Festigkeiten von holzwerkstoffähnlichen Materialien sind längere Späne von ca. 20cm und mehr wünschenswert.

Abb. 2
Miscanthusfeld in Lindlar



Quelle: M. Wirths

Abb. 3
Paulowniaplantage am Campus
Klein-Altendorf, Universität Bonn



Untersucht man einen geernteten Miscanthushalm, erkennt man, dass dieser einen äußerst stabilen einjährigen Trieb und einen leichten Parenchymkern aufweist. Eine Verwendung als Stabtragwerk bietet sich an, ebenso aber auch die Herstellung leichter Faserplatten mit Parenchymanteilen. Diese Parenchymanteile haben eine sehr gute Dämmwirkung, die Natur liefert hier eine hervorragende Vorlage, es ist eine Art natürliches Polyesterol (Hermanns, et al., 2017, p. 58 ff.). Das ultraleichte Holz der Paulownia (Abb. 3) mit einer Rohdichte von $0,30 \text{ g/cm}^3$ (vgl. Holz vom Fach, o. J.. *Holz vom Fach*. [Online], [Zugriff am 11. März 2024]) ist für den Einsatz gering belasteter tragender Stabelemente aber auch aussteifender Flächenelemente geeignet.

1.3 Problemstellung und Forschungsstand

1.3.1 Dekarbonisierung und klimaresilienter Pflanzenanbau

Das hohe CO_2 Einsparpotential bei der Verwendung von nachhaltig angebauten Baustoffen wie Holz ist bekannt (vgl. Hafner & Özdemir, 2023). Gerade im Zuge der klimatischen Veränderungen müssen jedoch vermehrt Pflanzen in den wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Fokus genommen werden, die nicht nur durch ihren Anbau oder ihr Anbausystem eine ökosystemare Dienstleistung erbringen, sondern auch resistenter gegenüber klimatischen Veränderungen und deren nachgelagerten Problemen (Borkenkäfer bei Nadelbäumen, Trockenstress) sein können. 2022 ist der Holzpreis aufgrund von massiven Aufkäufen in Europa durch die USA und China stark gestiegen (vgl. Statistik, o. J.. *Preisentwicklung-der-erzeugerpreise-fuer-holz*. [Online], [Zugriff am 11. März 2024]). Auch mittelfristig ist zu erwarten, dass der aktuell einheimische Rohstoff Holz wesentlich weniger zur Verfügung steht, weil der angestrebte Waldumbau erst langsam beginnt. „Im Klimawandelszenario gibt es einen Ausfall der Produktion durch immer häufigere Kalamitäten, v.a. bei Fichtenbeständen. In der Modellierung wird angenommen, dass sich der Ertrag von Fichtenholz bis zu 30% im Jahr 2050 gegenüber dem Referenzszenario mindert“ (vgl. Umweltbundesamt, o.J.. *Angepasster Waldumbau*. [Online], [Zugriff am 11. März 2024]). Hier bieten konstruktiv einsetzbare Baustoffe auf Basis von Miscanthus und Paulownia eine wichtige Alternative, welche nicht in Konkurrenz mit der heimischen Forstwirtschaft gesehen wird, sondern helfen kann, den heimischen Standort der Bau- und Möbelindustrie mit zusätzlichen CO_2 sparenden Ressourcen zu versorgen und Arbeitsplätze in der Bauindustrie zu sichern.

1.3.2 Stand der Forschung/Baupraxis

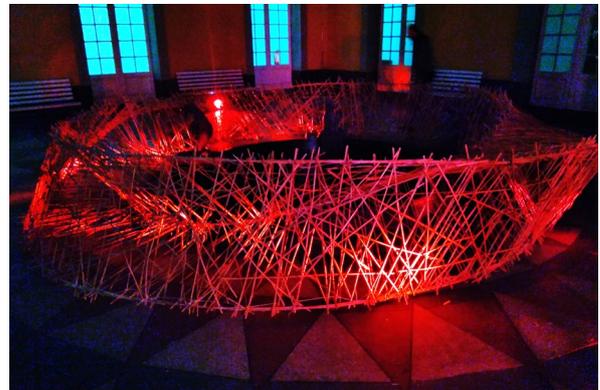
Für die Weiterverarbeitung als Baumaterial sind insbesondere die Pflanzengruppen der grasartigen, krautigen und verholzenden schnellwachsenden Pflanzen, zu denen Miscanthus und Paulownia zu zählen sind, interessant. Leichtbauwerkstoffe aus diesen Pflanzengruppen stehen aktuell im Fokus der Forschung. In Projektkooperation von Prof. Dr. Ralf Pude (Professur Nachwachsende Rohstoffe der Universität Bonn) mit der Fachrichtung Architektur der Alanus Hochschule (Prof. Dr. Mathias Wirths) im EFRE Projekt (AZ0500036) „Kompetenzschwerpunkt Biobasierte Produkte“ wurde die Bandbreite der Anwendungsgebiete um zuvor genannte Pflanzengruppen erweitert. Ein Ergebnis der aktuellen Forschung der Antragsteller ist die grundsätzliche Tauglichkeit von Miscanthus und Paulownia als Konstruktionsmaterial. Erstmals fanden in situ Belastungstests an einer Fachwerkkonstruktion aus Miscanthusbündeln statt (Abb.4). Mit Kunstprojekten wie beispielsweise die räumliche Intervention „Möbius Schleife aus Miscanthus“ (Abb. 5) auf der Nacht der Wissenschaft der Universität Bonn im Frühjahr 2018 wurde das ästhetische Potential des Materials erprobt.

Abb. 4
In situ Belastung Fachwerkträger aus Miscanthusbündeln



Quelle: M. Wirths

Abb. 5
„Möbius Schleife aus Miscanthus“ Kunstprojekt, Prof. Willem-Jan Beeren und Prof. Dr.-Ing. Mathias Wirths



Als Demonstrator wurde ein zahlreich veröffentlichtes Kleinstgebäude „workbox“ (Abb. 6+7) im Unternehmerpark Kottenforst, Meckenheim realisiert (vgl. Klaasen & Schulz, 2021). Nelis und Mai (Universität Göttingen) weisen ebenso darauf hin, dass Paulownia vielversprechend für die Anwendung als Mittellage in Tischlerplatten sei (vgl. Nelis & Mai, 2019). Eine Kombination beider Pflanzen lässt gute Ergebnisse hinsichtlich Leichtigkeit, Dämmwirkung und Festigkeit erwarten. Bei der Herstellung von holzwerkstoffähnlichen Produkten aus Miscanthus ist es zur Steigerung der Akzeptanz des Endproduktes geboten Halmsegmente, in einer Größe zu verarbeiten, die Maserung und Struktur der Miscanthusstengel erkennen lässt. Es entsteht dann eine ästhetisch ansprechende Oberfläche, vergleichbar mit Werkstoffen auf Bambusbasis.

Abb. 6
Workbox



Quelle: M. Wirths

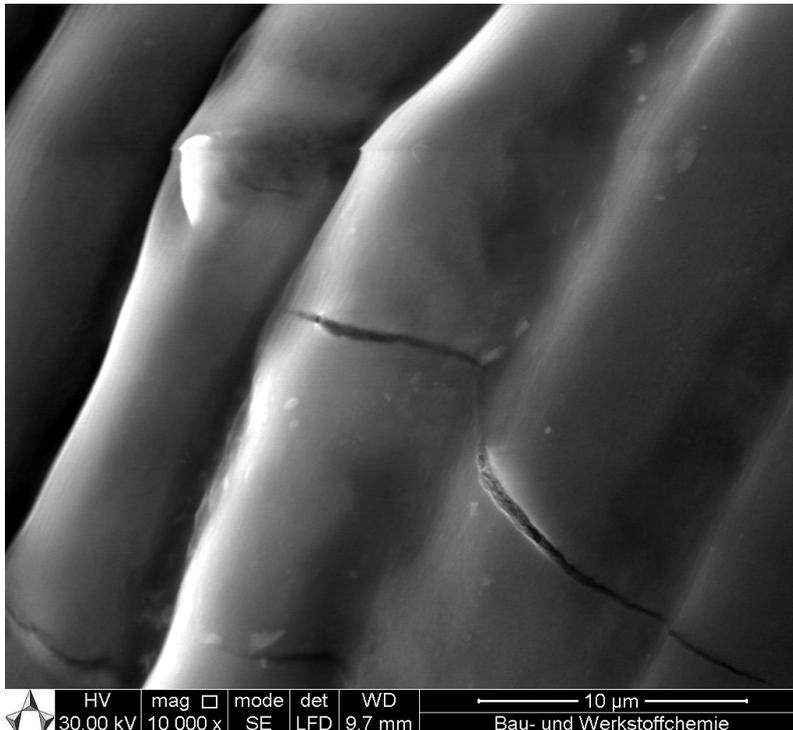
Abb. 7
Demonstrationsgebäude „workbox“ aus Miscanthus und Paulownia im Bauprozess



1.3.3 Forschungslücke/Entwicklungsbedarf

Schwachstelle der derzeitigen Entwicklung von „vollholzähnlichen“ Materialien aus Miscanthus unter Verwendung von Halmsegmenten in der oben beschriebenen Größe ist der mangelhafte mechanische Verbund dieser Elemente untereinander bei der Verwendung von umweltfreundlichen Bindemitteln (z.B. Kaseinleim). Dies wurde durch Untersuchungen der Alanus Hochschule im Forschungsprojekt „Biobasierte Produkte“ (EFRE AZ0500036) festgestellt. Ursache ist die äußerst glatte wachsartige Oberfläche der Miscanthushalme (Abb. 8).

Abb. 8
Oberfläche Miscanthus im Rasterelektronenmikroskop



Quelle: Dr. C. Pritzel, Bau- und Werkstoffchemie der Universität Siegen

Dies wurde bereits in der vorausgegangenen Forschung erkannt und es wurden Methoden zur Aufräuhung der Werkstoffoberfläche entwickelt. Eine mit rotierenden Keramikbürsten ausgestattete Maschine „Miscanthusbiber“ (Abb. 9 + 10) kann die glatte Oberfläche mechanisch bearbeiten. Mit Auszugversuchen von in Buche Würfeln eingeleimten Halmen konnte eine verbesserte Haftung nachgewiesen werden. Ein Einsatz im praxisnahen Maßstab wurde in dem EFRE-Projekt (AZ0500036) nicht mehr realisiert. Im Forschungsprojekt „biobaudigital“ mit den Schwerpunkten BIM und Einsatz von Plattenwerkstoffen aus NaWaRo, gefördert durch das Bauministerium NRW (Innovatives Bauen NRW, AZ.: 35.05.04.01-IB-2021-001) konnten jedoch erste Erfahrungen mit dem Verkleben der durch den Miscanthusbiber bearbeiteten Ausgangsmaterialien gewonnen werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse soll untersucht werden, ob die theoretisch erzielte Verbesserung der Haftungseigenschaften ausreichend ist, um einen praxistauglichen mechanischen Verbund herzustellen, der wiederum die Grundlage für die Produktion prototypischer Bauelemente darstellt. Die Kombination aus der Optimierung der Haftfähigkeit der Miscanthusstengel, der Verklebete Methode sowie der Auswahl der Bindemittel lässt erwarten, dass bei verbesserten Oberflächeneigenschaften Miscanthusspäne von ca. 20 cm Länge zu mechanisch kompetitiven Werkstoffen verklebt werden können. Hierbei erscheint die Optimierung der Haftfähigkeit der Miscanthusstengel, der Verklebemethode sowie die Auswahl der Bindemittel ausschlaggebend. Als Verbundwerkstoff mit Paulownia können weitere mechanische und bauphysikalische Eigenschaften des Werkstoffes verbessert werden. Für Baustoffe aus den genannten Pflanzen gibt es noch keine bauaufsichtliche Zulassung für konstruktive Anwendungen.

Abb. 9
"Miscanthusbiber"



Quelle: M. Wirths

Abb. 10
Im EFRE-Projekt (AZ0500036) entwickelte Maschine zur Aufräuhung der
Miscanthusoberfläche



1. 4 Zielsetzung

Ziel des hier beschriebenen Projektes ist es, innerhalb von 18 Monaten stabförmige (holzwerkstoffähnliche) Werkstoffe aus Miscanthus und der Kombination mit Paulownia mit nachfolgenden Eigenschaften herzustellen: Vergleichbare mechanische Eigenschaften mit herkömmlichem Bauholz, schneller nachwachsend, mit einer guten Prognose für eine bessere Ökobilanz im Vergleich zu herkömmlichen Holzwerkstoffen.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Forschung lag auf der Verarbeitung des Rohstoffs Miscanthus und das Erreichen von Festigkeitswerten, die mit Bauholz vergleichbar sind. Es wurde im Projekt darüber hinaus die

Kombination von Miscanthus und Paulownia betrachtet. Es bietet sich an, bei Biegeträgern, in der geringer belasteten Mittelzone Paulownia und in den stärker belasteten Randbereichen Miscanthus zu verwenden.

1.4.1 Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu

Vorrangig ist die Fragestellung zu untersuchen, ob eine mechanisch zufriedenstellende Verklebung von Miscanthushalmen unter Verwendung umweltfreundlicher Bindemittel erreicht werden kann.

Es schließen sich folgende Fragen an:

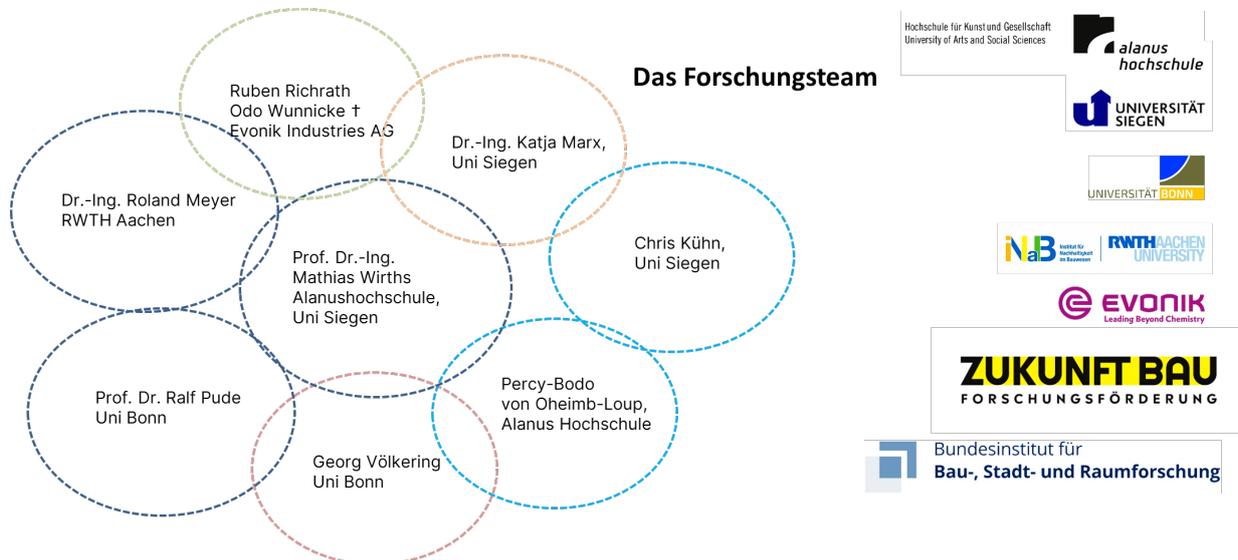
- Wie kann ein im Labor erfolgreicher Herstellungsprozess in der Praxis umgesetzt werden?
- Können mit den neu entwickelten Werkstoffen modulare Systembauweisen realisiert werden?
- Kann durch Modifizierung von marktüblichen Bindemitteln eine Verbesserung der Haftung und somit der mechanischen Eigenschaften erreicht werden?
- Wie ist die Nachhaltigkeitsleistung dieses neuen Werkstoffes im Vergleich zu herkömmlichen biogenen und nicht biogenen Werkstoffen zu beurteilen?
- Welche Kriterien verbessern eine mögliche Markteinführung?

2 Forschungsaufbau

2.1 Projektteam und Organisation

Die Antragstellung für dieses Verbundprojekt (Abb. 11) erfolgte durch die Alanus Hochschule für Kunst und Gesellschaft gGmbH (Fachbereich Architektur, Prof. Dr.-Ing. Architekt Mathias Wirths). Beteiligt sind die Universität Siegen (Department Architektur, Fachgebiet Materialkunde, Prof. Dr.-Ing. Architekt Mathias Wirths), die Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn (Prof. Dr. Ralf Pude, Professur Nachwachsende Rohstoffe (INRES)), die RWTH Aachen (Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen, Prof. Dr.-Ing. Marzia Traverso) und die Creavis (strategische Innovationsabteilung der Evonik Industries AG, Dr. Odo Wunnicke, Dr. Ruben Richrath).

Abb. 11
Organigramm Forschungsteam und Förderer



Quelle: K. Marx

Die an diesem Antrag beteiligten Hochschulen arbeiten seit Jahren im Bereich Nachwachsende Rohstoffe. Die Professur für Nachwachsende Rohstoffe (Prof. Dr. Ralf Pude) am Campus Klein-Altendorf (CKA) der Universität Bonn liegt im Kernbereich bei der angewandten Forschung und Entwicklung von Produkten aus Nachwachsenden Rohstoffen. Der Campus Klein-Altendorf unterstützt das Projekt durch die Lieferung von Material, der Möglichkeit die Laboreinrichtungen des CKA für das Projekt zu nutzen und den fachlichen kollegialen Austausch. Jegliche im Projekt verwendeten Miscanthushalme wurden am CKA angebaut, geerntet und vorgetrocknet. Hierbei ist zu erwähnen, dass die übliche Ernte eines Miscanthusfeldes durch einen Maishäcksler erfolgt. Die so gewonnenen Miscanthushäcksel sind aber für die Herstellung von Werkstoffen mit langen Fasern nicht geeignet. Somit wurden die in diesem Projekt verwendeten Miscanthusstengel mit Balkenmähern oder teilweise „händisch“ mit Freischneidern geerntet.

In einem vorherigen Verbundforschungsprojekt zu biobasierten Produkten konnte in Zusammenarbeit von Prof. Wirths (Alanushochschule, Universität Siegen) mit Prof. R. Pude (Universität Bonn) erfolgreich das Anwendungsspektrum biobasierter Bauprodukte aus Miscanthus und Paulownia erweitert werden. Die Universität Bonn kann durch auf einen sehr hohen Erfahrungsschatz beim Anbau und der Entwicklung von Produkten aus Miscanthus zurückgreifen.

Die Schwerpunktsetzung innerhalb der Kooperationspartner wurde für das vorliegende Projekt entsprechend der Themengebiete folgendermaßen zugeteilt.

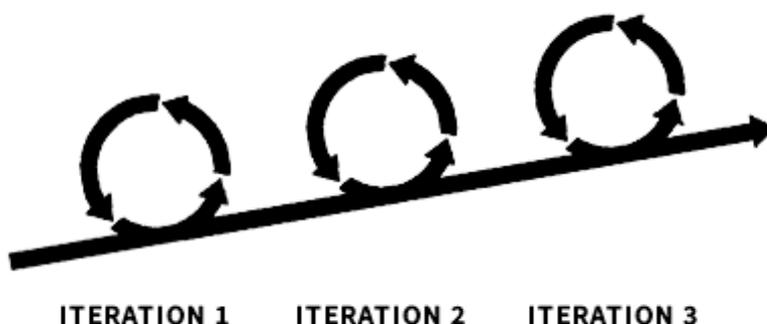
- Fachbereich Architektur, Fachgebiet Bautechnologie (AH): Bearbeiten des Ausgangsmaterials, Planen, Entwickeln und Gestalten von Verbindungen für Tragelemente aus Miscanthus, Herstellen von Demonstratoren, Testen der prototypischen Demonstratoren. Projektkoordination,
- Materialkundelabor des Departments Architektur der Universität Siegen (US): Bearbeiten des Ausgangsmaterials, Planen, Entwickeln und Gestalten von Tragelementen aus Miscanthus, Herstellen von Demonstratoren, Testen der prototypischen Demonstratoren, Verkleben von Prototypen mit Heiß- und Vakuumpressen, Untersuchungen von Festigkeiten mit Dreipunkt-Biegezugmaschine, Druckprüfungen, Berichtswesen und Dokumentation
- Professur Nachwachsende Rohstoffe (INRES) (UB): Beratung bei der Auswahl der Pflanzen, Lieferung von Pflanzenmaterial, begleitende Untersuchungen in den Laboren der Universität Bonn.
- Institut für Nachhaltiges Bauen (RWTH): Beratung bei der Zusammenstellung der Materialien. Hinweise zur Optimierung des Herstellungsprozesses hinsichtlich möglich umweltfreundlicher Verfahren und Endprodukte. Erste Vorüberlegungen zu einer Ökobilanz.

2.2 Methodischer Ansatz und Arbeitspakete

2.2.1 Übertragung der iterativen Entwurfsmethodik auf die Forschung

Verortet an einer Architekturfakultät gleicht die Forschungsmethodik der Arbeitsweise von Architektinnen und Architekten beim Entwurf. Die Prozessabfolge ist hierbei nicht linear und konsekutiv, sondern vielmehr parallel, zirkulär und iterativ (Abb.12). Damit soll zum Ausdruck gebracht werden, dass nicht einzelne Aspekte Schritt für Schritt abgearbeitet werden, man erhält ein Ergebnis und wendet sich dann einem weiteren Problem zu. Es ist vielmehr nötig, Probleme parallel zu bearbeiten. Ergebnisse aus Problemlösungen können im Prozessablauf viel weiter vorne gelegene Lösungen beeinflussen, genauso gut auch erst viel später zu generierende Problemstellungen, wie auch die Lösungen der benachbarten parallel verlaufenden Prozesse. Beispielsweise haben neue Erkenntnisse in der Fertigung und Verarbeitung ganzer Halme dazu geführt, dass gegen Ende dieses Forschungsprojektes, die Idee der Verarbeitung ganzer Halme, die gegen Ende eines der Vorgängerprojekten für konstruktive Anwendungen nicht performant erschien, noch einmal aufgegriffen und getestet wurde (Kap. 3.6).

Abb. 12
Methodischer Ansatz - Iteration



Quelle: V. Centelles Schlegel, Universität Siegen

Die Bearbeitung von Forschungsfragen in einem Verbundprojekt kommt der Arbeitsweise von Architektinnen und Architekten nahe, da im Bauprozess diese Berufsgruppe häufig die Aufgabe hat, das Wissen verschiedener am Bau beteiligter Fachleute zu koordinieren und zu einem gemeinsamen Werk zusammenzuführen. Dabei sind die einzelnen Fachdisziplinen natürlich in ihrer jeweiligen Teilkompetenz der koordinierenden Stelle fachlich überlegen. Antworten auf die Herausforderungen der Gesellschaft wie z.B. die Dekarbonisierung im Bausektor können wahrscheinlich auch nur im Verbund mehrerer Fachdisziplinen gefunden werden. Nachfolgende Stichworte sind Arbeitsschritte, die für dieses Forschungsprojekt von Bedeutung sind:

- Experimentelle Versuchsreihen für Verklebung und Überprüfung der mechanischen Eigenschaften an Laborproben (Zug, Druck, E-Modul)
- Iterativer Entwurfsprozess zur Planung und Gestaltung von prototypischen Bauelementen
- Herstellung von prototypischen Bauelementen im Maßstab 1/1
- Belastungstests
- Iterativer Entwurfsprozess zur Planung und Gestaltung von Demonstratoren (Tragsysteme, Tinyhouse)
- Herstellung der Demonstratoren
- In situ Belastungen von Tragsystemen (z.B. Fachwerkträger)
- Evaluation des Planungs- und Bauprozesses
- Monitoring der Demonstratoren
- Untersuchung des Klebeverhaltens von Prüfkörpern
- Vergleichende Betrachtung des Herstellungsprozesses von tragenden Elementen aus Miscanthus im Vergleich zu Bauholz,
- Hinweise zur Optimierung des Herstellungsprozesses hinsichtlich Nachhaltigkeitsaspekten.

2.4.2 Arbeitspakete und Meilensteine

Bearbeitet wurden im 1. Arbeitspaket die Beschaffung und Vorbereitung des Materials, wie weiter oben im Text beschrieben. Hierbei gab es zwischenzeitlich kleinere Engpässe in der Verarbeitung des Miscanthus, weil die Maschine zum Aufrauen der Halme eine geringe Durchlaufzeit aufwies und permanent händisch durch nur eine Person bestückt werden konnte. Dieser Bearbeitungsschritt nahm etwas mehr Zeit in Anspruch als vorher gedacht. Im Zuge dessen kam es zur Entwicklung des zweiten Gerätes zum Aufspießen der Halme („Miscanthustiger“), welches die Verarbeitung beschleunigte, wodurch Zeit aufgeholt werden konnte und das Projekt anschließend wieder im Zeitrahmen weiterlief.

Nach Vorbereitung des Miscanthus-Gesamtvolumens konnten die Versuche für kleinere Probestücke systematisch aufgebaut werden. In diesem Schritt wurde das Klebeverhalten hinsichtlich verschiedener Leime ausprobiert und auch der Einsatz von Halmen und Blättern variiert, um eine homogenere Schichtung zu erlangen. Beim Beschicken der Pressen war nun auch das Arbeiten zu mehreren Personen möglich, welches sich für den zeitlichen Ablauf als förderlich zeigte. Die Kosten lagen in diesem ersten Meilenstein unterhalb der Ausgabengrenze der Aufwendungen.

Im 2. Arbeitspaket wurden Prototypen von Stützen und Balken erstellt. Man entschied sich dazu, die Herstellung auf Grundlage zuvor hergestellter plattenförmiger Objekte aufzubauen, welche in Streifen geschnitten zu Balken verleimt wurden. Die Erkenntnisse der Prototypen werden in die Herstellung von Balken und damit die Hochskalierung auf bautechnische Maße übertragen und im weiteren Verlauf prototypische Tragelemente basierend auf Verleimung mit Knochenleim als auch basierend auf Verleimung mit Epoxidharz untersucht.

Die vom Projektpartner INAB beschriebenen Ansätze zur Ökobilanzierung stellen die Vorbereitung des 3. Arbeitspaketes dar.

Ursprünglich sollten nur biobasierte Bindemittel zum Einsatz kommen. Die weitere Untersuchung der Eigenschaften der Bindemittel mit Unterstützung der Creavis (Evonik Industries AG) hat eine Anpassung des Projektverlaufs hinsichtlich der zusätzlichen Betrachtung herkömmlicher nicht biogener Bindemittel ergeben.

Das im 4. Arbeitspaket anvisierte Testen von Prototypen wurde durchgeführt und die experimentellen Untersuchungen zu Festigkeiten konnten planmäßig abgeschlossen werden.

Bezüglich der Überlegungen zu neuen Konstruktionsverfahren, wie sie für das 5. Arbeitspaket angedacht waren, zeigt der Abschnitt 3.8 des vorliegenden Berichtes verschiedene Verbindungsmöglichkeiten für den Anwendungsfall auf.

Die beschriebenen Arbeitspakete schließen jeweils mit einem Meilenstein ab.

Der erste Meilenstein ist die Materialbeschaffung mit der Fragestellung, ob es gelingt Material in ausreichender Qualität und Menge zu beschaffen und für eine Verklebung vorzubereiten. Der zweite Meilenstein beschäftigt sich damit, ob es überhaupt gelingt aus Miscanthus-Spänen kantholz-ähnliche Tragelemente wie Balken und Stützen herzustellen. Es stellt sich hier also die Frage, des geeigneten Verbundes der Späne. Der dritte Meilenstein ist der Abschluss der Voruntersuchungen zur Ökobilanz, schließlich sollen im besonders bedeutsamen vierten Meilenstein Prototypen von Tragelementen hergestellt werden, die eine mit Bauholz vergleichbare Festigkeit aufweisen. Der fünfte Meilenstein sind Ergebnisse zur Frage, wie mit den neuen Materialien konstruiert werden kann.

Die mit den Meilensteinen verbundenen Erfolgsindikatoren und deren Erreichungsgrad werden im Kapitel 4.1 beschrieben.

3 Projektverlauf

3.1 Verklebung und Bindemittleinsatz

3.1.1 Vorbereitung des Rohmaterials

Um eine Verklebung von Miscanthusbestandteilen zu ermöglichen, wurde es für notwendig angesehen, durch Aufspießen der Halme sowohl die Oberfläche für das Benetzen durch Bindemittel zu vergrößern als auch die wachsartige Oberfläche des Cortex aufzurauen (Abb. 13). Im Materialkundelabor des Departments Architektur an der Universität Siegen sowie durch Mitarbeiter der Alanus Hochschule für Kunst und Gesellschaft am Forschungsstandort Klein-Altendorf der Universität Bonn wurden Experimente zu unterschiedlichen Methoden der Aufbereitung und Verklebungen des Rohstoffs Miscanthus durchgeführt.

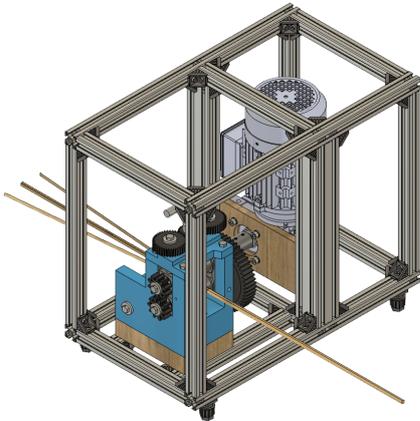
Abb. 13
Unterschiedliche Verarbeitungsstufen von Miscanthus x giganteus



Quelle C. Wirths

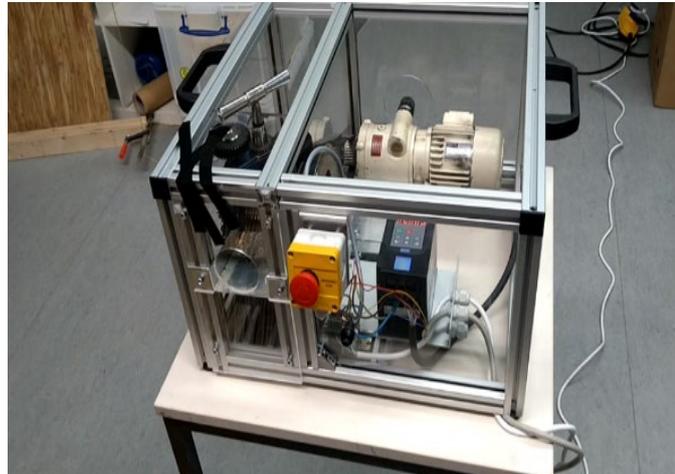
Das Material wurde von der Uni Bonn, respektive dem Forschungsstandort Klein-Altendorf zur Verfügung gestellt. Für die Bearbeitung des Materials war es notwendig, spezielle Maschinen zu entwickeln, die den Rohstoff Miscanthus aufspalten und die Oberfläche aufrauen. Eine Maschine („Miscanthusbiber“ Abb. 14) zum Schälen der Miscanthushalme entstand bereits im vorangehenden Projekt (EFRE Biobasierte Produkte // AZ 0500036), eine weitere wurde im Rahmen dieses Projektes entwickelt. Hierbei wurden Rollenpressen aus dem Kunstschmiedebedarf in mehreren Schritten modifiziert, um den Prozess des Aufspießens zu verbessern (Abb. 15). Auf diese Weise konnte die Oberfläche der Halme weiter vergrößert werden, was zu einer Optimierung des Zusammenhalts der Halme im Prozess der Verklebung führte.

Abb. 14
Entwurf Miscanthusaufspleißer
„Miscanthustiger“



Quelle: P. von Oheimb-Loup

Abb. 15
Inbetriebnahme Miscanthusaufspleißer

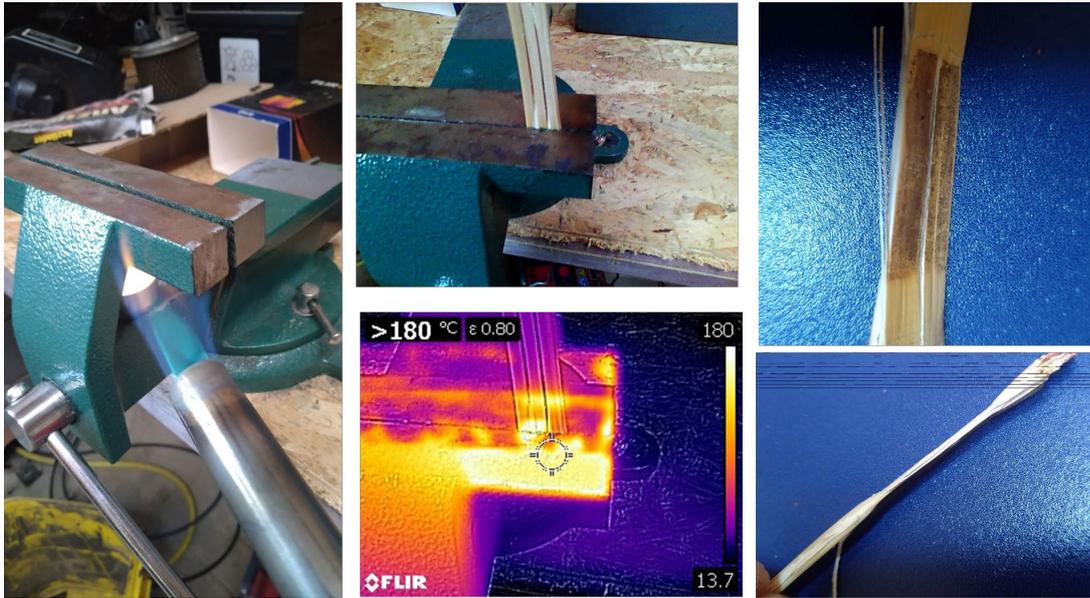


Quelle: M. Wirths

3.1.2 Verklebung

Bezüglich der Verklebung wurden im Materialkundelabor des Departments Architektur der Universität Siegen neben der Anwendung von Weißleim auch Versuche mit Kasein- und Knochenleim durchgeführt, vor allem, um einen Werkstoff zu entwickeln, dessen Verleimung biobasiert ist. Dies würde sich sowohl positiv auf die Ökobilanz bei der Herstellung des Produktes als auch bei einer möglichen Kaskadennutzung und späterer Entsorgung auswirken. Kaseinleim gilt als wasser- und hitzebeständig (vgl. Lexikon der Chemie, o.J.. [Online], [Zugriff am 11. März 2024]). Der Kaseinleim wurde in zahlreichen Klebeversuchen mit einer Vakuumpresse bei 96% Vakuum in Verbindung mit Miscanthus im Materialkundelabor der Universität Siegen verarbeitet. Die Materiaproben wiesen jedoch nicht den gewünschten Verbund auf. Einige Proben zeigten eine Neigung zur Fäulnisbildung. Trotz der in der Literatur beschriebenen Hitzebeständigkeit von abgebundenem Kaseinleim ergab ein Versuch der Heißverleimung kein zufriedenstellendes Ergebnis. Abbildung 16 zeigt aber, dass das Parenchym der Miscanthushalme unter hohem Druck und Hitze zusammenhaftet. Grundsätzlich erschien eine Heißverleimung für Miscanthus vorteilhaft zu sein. Knochenleim lässt sich heiß verarbeiten. Es wurde vermutet, dass bei der Verwendung von Knochenleim durch Hitzeeinwirkung der Verbund der Fasern (Abb. 17) verbessert wird (vgl. Gutbier, et al., 1922). Daher wurden Versuche mit einer beheizbaren Presse (Abb. 18) und verschiedenen Temperaturen von 100°C bis 140°C bei 300bar durchgeführt (vgl. Katzer, 2017). Es erwies sich als positiv, das Knochenleimgranulat direkt ohne vorheriges Auflösen in heißem Wasser in mehreren Schichten über die Miscanthusspäne zu streuen. Die Presszeit betrug ca. 90 Minuten.

Abb. 16
Experimente hinsichtlich des Verhaltens von Miscanthushalmen bei Druck und Hitze



Quelle: M. Wirths

Abb. 17
Ausgangsprodukt



Quelle: C. Kühn

Abb. 18
Mit Miscanthus beschickte Heißpresse



Die Abbildungen 19 und 20 zeigen die ersten Resultate einer Heißverleimung von Miscanthusspänen mit Weißleim und mit Knochenleim, welche zuvor mit dem „Miscanthustiger“ produziert wurden.

Abb. 19
Platte mit Weißleim als Bindemittel



Quelle: M. Wirths

Abb. 20
Platte mit Knochenleim als Bindemittel

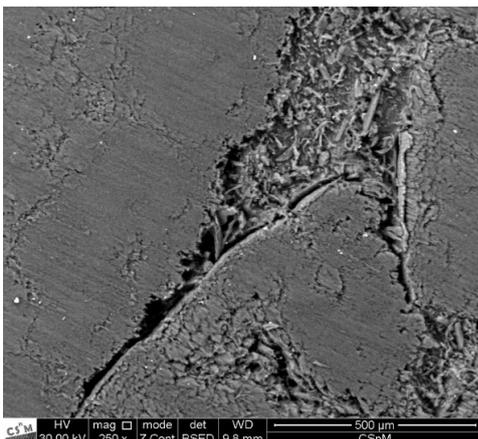


„Im Konstruktiven Holzbau werden heute ausschließlich härtbare Kunstharzklebstoffe verwendet. Dabei wird zwischen folgenden drei Klebstofffamilien für die Flächenverklebung und Keilzinkungen unterschieden: Phenoplast- und Aminoplastklebstoffe nach DIN EN 301:2013-12, feuchtevernetzende Einkomponentenklebstoffe auf Polyurethanbasis nach DIN EN 15425:2017-05, Emulsion-Polymer-Isocyanat-Klebstoffe nach DIN EN 16254:2016-12“ (Winter & Peter, 2021: 94 ff.).

Weißleim ist ein Bindemittel auf Polyvinylacetat-Basis. Da dieses Bindemittel zwar wenig Emissionen aufweist aber weder komplett biobasiert noch als Leim für konstruktive Holzprodukte vorgesehen ist, wurde es im Projektverlauf nicht weiterverfolgt. Nach Experimenten mit Kasein- und Knochenleim erfolgte zunächst eine Konzentration der Forschung auf letzteren.²

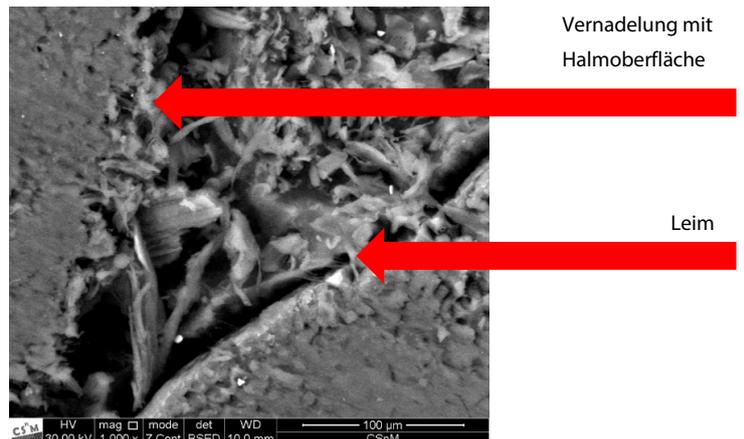
Im Rasterelektronenmikroskop (Abb. 21 + 22) ist eine Vernadelung der Halmoberfläche mit dem Knochenleim zu erkennen.

Abb. 21
Aufnahme verleimter Miscanthushalmfragmente im REM



Quelle: C. Pritzel, Universität Siegen

Abb. 22
Vergrößerte Darstellung der Vernadelung



² Klebstoffe für den Baubereich, die nicht genormt sind, findet man auf den Seiten des DIBT, Berlin.

3.2 Erstellung von Prüfobjekten zur Biegesteifigkeit im Labormaßstab

Auf Grund des gewählten Versuchsaufbaus sowie der zur Verfügung stehenden Werkzeuge und Maschinen entstanden in diesem Zwischenschritt plattenförmige Objekte, die als Grundlage für die Weiterverarbeitung zu Biegeträgern genutzt werden konnten (Abb. 23 + 24). Durchschnittlich wurde für die Herstellung der heiß gepressten Platten 30% Gewichtsanteile an Knochenleim verarbeitet. Die Presszeit bei 140° C der Proben zur E-Modul-Bestimmung betrug 90 Minuten.

Abb. 23
Platte mit Knochenleim als Bindemittel



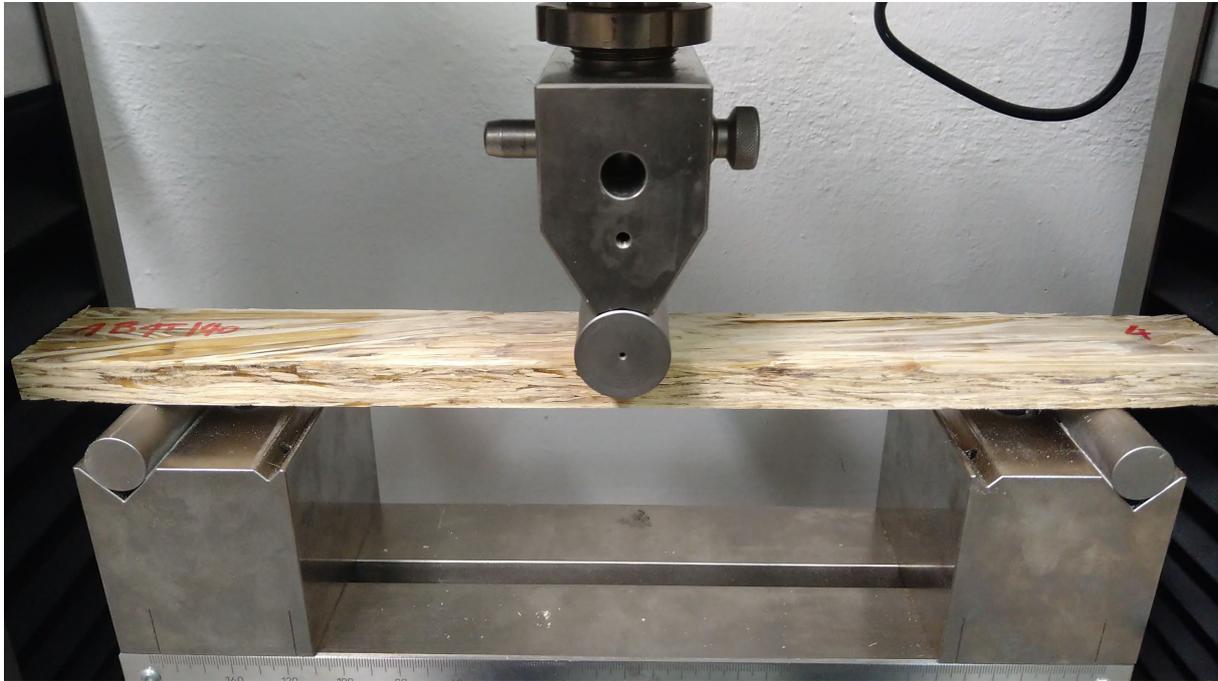
Abb. 24
Plattenstreifen für den Drei-
Punkt-Biegeversuch



Quelle: M. Wirths

Das Erstellen von Prüfobjekten erfolgte in Anlehnung an DIN 310 für die Bestimmung des E-Moduls von Holzwerkstoffplatten mit jeweils vier Proben aus einer gepressten Platte. Mithilfe einer 20KN Prüfmaschine der Firma Hess (Abb. 25) wurde eine Probe bis zum Bruch belastet. Bei den weiteren Proben wurde die Verformung bei 10% und 40% der Bruchlast ermittelt. Darauf erfolgte die Berechnung des E-Moduls gemäß DIN 310.

Abb. 25
Drei-Punkt-Biegeversuch, Prüfmaschine Fa. Hess



Quelle: M. Wirths

Die E-Modul Bestimmungen der mit Knochenleim verklebten Probekörper sind mit einem Mittelwert von 14700 N/mm² erheblich biegefestere als beispielsweise das gebräuchliche Nadelholz der Sortierklasse S10 nach DIN 4074-1 mit einem Wert von 11000 N/mm² (Tab. 1). Damit wurde der Nachweis erbracht, dass Materialien aus Miscanthus Festigkeiten von konstruktiven Holzwerkstoffen aufweisen können.

Tabelle 1
Darstellung der ermittelten E-Moduli

Messung	Werkstück						Aufbau	Messdaten					Auswertung	
	b [mm]	l ₂ [mm]	t [mm]	l [cm ³]	W [cm ³]	l ₁ [mm]		F _{max} [N]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	a _{Fmax} [mm]	a ₁ [mm]	a ₂ [mm]	E _m [N/mm ²]
2	50,5	400	11	0,560129	1,018417	226	1210	121	484		0,720	1,860	13670,9176	
3	50,5	400	11,8	0,691443	1,171937	226	1210	121	484		0,440	1,260	15396,4536	
4	50,5	400	11,7	0,674012	1,152158	226	1210	121	484		0,530	1,390	15059,9849	
6														
7														
8														

Quelle: Materialkundelabor, Universität Siegen

Im nächsten Schritt wurden Plattenstreifen zu Biegeträgern im Labormaßstab verleimt (Abb. 26). Als Bindemittel diente hierbei 1K PU-Leim (Jowat- Faser PUR 686.60).

Neben komplett aus Miscanthus gefertigten Trägern (Abb. 27) wurde auch ein Kompositmaterial aus Miscanthus, in den stärker belasteten Randbereichen, und Paulownia, in dem weniger beanspruchten mittleren Bereich des Biegeträgers, entwickelt (Abb. 28). Die Proben wurden hinsichtlich des Verformungsverhaltens mit einer Probe aus Nadelholz mit jeweils gleichen Abmessungen verglichen (Abb. 29).

Abb. 26
Verleimen der Knochenleimstreifen zu einem Biegeträger in Labormaßstab



Quelle: M. Wirths

Abb. 27
Biegeträger aus Miscanthus



Abb. 28
Biegeträger aus Paulownia (mittig) und Miscanthus (außen)



Abb. 29
Ansicht der drei Biegeträger



Quelle: M. Wirths

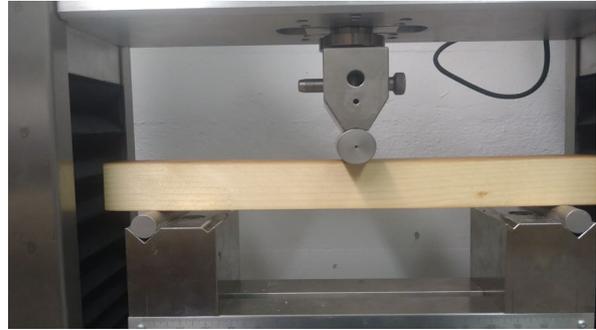
Die Proben mit jeweils gleichen Abmessungen wurden hinsichtlich des Verformungsverhaltens mit einer Probe aus Nadelholz verglichen. Es wurde ermittelt, welche Kraft für eine Verformung von 3 mm benötigt wird. Dabei hat sich herausgestellt, dass der Träger aus Miscanthus (Abb. 30) mit einer erforderlichen Kraft von

6.696N wesentlich steifer war als der Träger aus Nadelholz mit einer erforderlichen Kraft von 3.904 N für 3mm Verformung (Abb. 31)

Abb. 30
Biegeträger aus Miscanthus



Abb. 31
Biegeträger aus Nadelholz



Quelle: Materialkundelabor, Universität Siegen

Das Kompositmaterial mit Paulownia in der Mitte und Miscanthus außen (Abb. 32) zeigte sich mit 1876 N im Verformungsverhalten wesentlich weniger performant als erwartet. Es wurde auch hier angestrebt, eine mit Vollholz vergleichbare Festigkeit zu erreichen. Dies gelang nicht. Versuche mit Paulownia wurden daher zunächst nicht mehr durchgeführt. Gegen Ende des Projektes wurde die Idee eines Verbundwerkstoffes noch einmal aufgegriffen (vgl. hierzu Kap. 3.6). Die Ergebnisse finden sich im Graphen der Abbildung 33 wieder.

Abb. 32
Biegeträger Kompositmaterial, Miscanthus und Paulownia

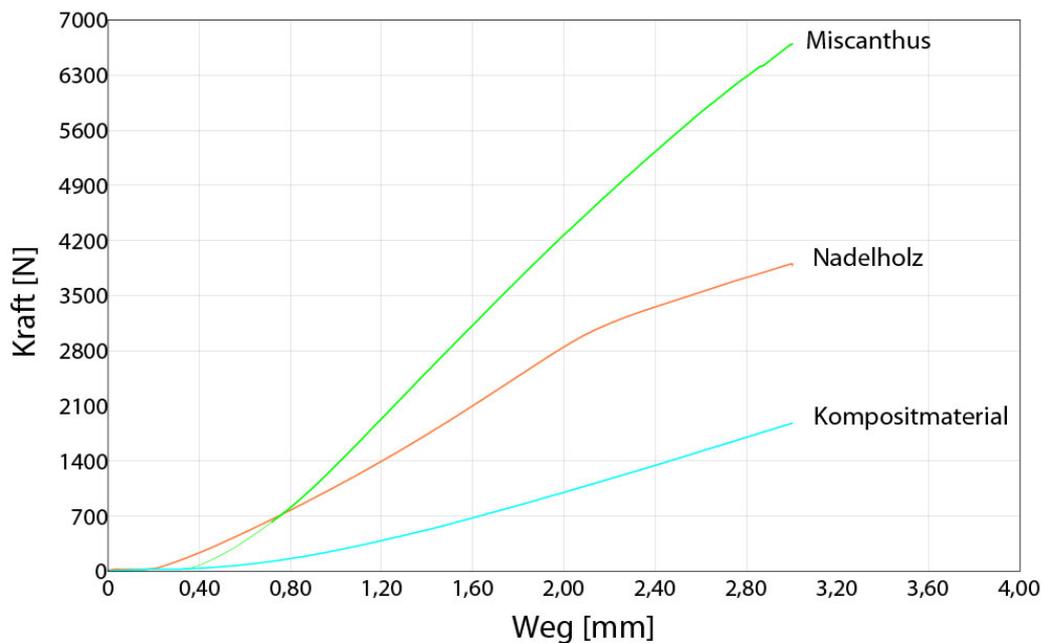


Quelle: Materialkundelabor, Universität Siegen

In Abbildung 33 werden die Testergebnisse durch drei Graphen dargestellt. Hierbei bildet Grün den Miscanthusbalken ab, Rot das Nadelholz und Blau das Kompositmaterial.

Abb. 33
Kraftaufwand für eine Verformung von 3mm

UNIVERSITÄT SIEGEN		Werkstoff - Analyse	Prüfbericht
			Druckversuch mit Kraft- und/oder Wegvorgabe
Artikel Nr. :	Biegevergleich		Kraftbereich : 7000,00 N
Prüfer :	Wirths		Wegbereich : 4,00 mm
Datum :	10.03.2023		Geschwindigkeit : 2,00 mm/min
Auftrag :			Abbruch bei ? % von F_{\dagger} : 90,00 %
Herkunft :			Endpunkt 1 : 3,00 mm
			Endpunkt 2 : 20000,00 N
			Messpunkt 1 : 3,00 mm
			Messpunkt 2 : 20000,00 N
			Belastungszeit : 1,00 s
			Vorlast : 2,00 N
			Zyklen : 1,00



Nr	F_{\dagger} N	S_{\dagger} mm	$M_{\text{æ}}$ N	$M_{\text{ç}}$ mm	Kennung
1	3904,75	3,00	3904,75	0,00	NH
2	6696,96	3,00	6696,96	0,00	Miscanthus
3	1876,86	3,00	1876,86	0,00	
Mittelwert	4159,52	3,00	4159,52	0,00	
Std.Abw.	2420,13	0,00	2420,13	0,00	

Quelle: Materialkundelabor, Universität Siegen

3.3 Knochenleim und Wasserlöslichkeit

Die mit dem vollständig biobasierten Knochenleim gebundenen Proben zeichnen sich durch hohe Festigkeit aus, sind aber nicht wasserfest verleimt. Ein natürliches Additiv zur Verbesserung der Wasserfestigkeit (Sponsel, 1987: 394) von Knochenleimverbindungen ist Kaliumaluminiumsulfat, Trivialname Alaun (Gutbier, et al., 1922). Um dies im Kontext der bisher entwickelten Werkstoffe zu überprüfen, wurde bei der Herstellung einer Versuchsplatte in der Heißpresse eine Hälfte der Platte mit Alaun versetztem Knochenleim verklebt, die andere Hälfte ohne Alaun.

In Anlehnung an DIN EN 301: „Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen“ sowie DIN EN 302-1: „Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren: Teil 2 Bestimmung der Delaminierungsbeständigkeit“ wurde durch Mitarbeiter der Alanus Hochschule in den Laborräumen der Universität Bonn am Campus Klein-Altendorf ein Prüfversuch entwickelt.

Alle Versuchskörper haben identische Maße und werden vor und nach dem Versuch gewogen. Die Versuchskörper werden für 24 Stunden bei Temperaturen von 20 Grad bzw. 55 Grad komplett in Wasser eingelegt (Abb. 34). Nach der Wässerung werden die Versuchskörper auf 12% Restfeuchte rückgetrocknet und sollen nachfolgend einer Bruchfestigkeitsprüfung unterzogen werden. Die ermittelten Werte sollen mit nicht gewässerten Prüfkörpern verglichen werden. Unabhängig von der Temperierung waren bereits nach wenigen Stunden deutliche Auflösungserscheinungen bei den Miscanthus-Knochenleim Verklebungen zu erkennen. Nach Ablauf der 24 Stunden waren die Auflösungserscheinungen bei den mit Miscanthus-Knochenleim-Alaun Verklebungen deutlich geringer ausgeprägt. Alle Prüfkörper waren aber nach 24 Stunden Wässerung und einer nachfolgenden Rücktrocknung zu instabil für eine weitere Untersuchung.

Abb. 34
Überprüfung der Knochenleimproben mit und ohne zugesetztem Alaun hinsichtlich der Wasserlöslichkeit



Quelle: Percy-Bodo v. Oheimb-Loup

Damit ist die Frage der Wasserlöslichkeit des auf Knochenleim basierenden Werkstoffes noch nicht zufriedenstellend gelöst. Hier sollten weitere Parameter untersucht werden, wie z.B. die Art den Leim aufzubringen und mit Alaun zu vermischen (derzeit noch trocken), die Verwendung anderer Additive, oder anderer Mischungen des Ausgangsmaterials.

3.4 Erstellung von Prüfobjekten für Druckstäbe im Labormaßstab

Abb. 35

Verschiedene Druckstäbe aus Miscanthus



Quelle: M. Wirths

Bei studentischen Arbeiten (Abb. 35), die zum Ziel hatten, kleine stützenähnliche Tragelemente mit einer Grundfläche von 3cm x 3cm und einer Höhe von 45cm herzustellen, wurde die Wahl des Bindemittels den Studierenden freigestellt. Die Abmessungen der Prüfkörper wurden in Abhängigkeit zu den Randbedingungen der zur Zeit der Testreihe zur Verfügung stehenden Prüfmaschine gewählt (Hess MBV Z20 Universalprüfmaschine, Abb. 36). Die maximale Kraftaufnahme beträgt 20 KN.

Aufgrund der geringen Reglementierungen bei der Aufgabenstellung entstand eine große Bandbreite unterschiedlich verklebter Miscanthusstützen – u.a. Bindemittel Gips (Abb. 37+38), Montagekleber PU (Abb. 39+40), Epoxidharz (Abb. 41+42) - die in Verbindung mit dem Forschungsvorhaben bis zum Bruch belastet wurden. Durch die Verwendung dieser individuellen Prüfkörper wurden keine statistisch relevanten Ergebnisse erzielt. Dennoch sind die Erkenntnisse insofern sehr interessant, da die epoxydharz-gebundenen Stützen die größten Lasten tragen konnten und sich diese Beobachtung mit den Untersuchungen unseres Industriepartners Evonik Industries AG (siehe unten) deckt.

Die meisten hergestellten Prüfkörper wiesen (in leichter Abweichung zur Aufgabenstellung) eine Grundfläche von 3,1cm x 3,1cm auf. Die rechnerische Belastbarkeit eines vergleichbaren Holzstabes (3,1cm x 3,1cm x 45,0cm) der Güteklasse S7 (geringe Qualität) würde bei Berücksichtigung der Schlankheit und der Knickgefährdung ca. 7.840N betragen.

Die im Biege-Druck-Verfahren bis zum Bruch belasteten Prüfkörper zeigten eine Bandbreite der Maximallast von ca. 1.120 N bis 19.500 N (Tab. 2).

Tabelle 2
Biege-Druck-Versuche bis zum Bruch

Nr.	Bindemittel	Abmessung	max. Kraft (N)
1	Dispersions-Acrylkleber	450 mm (l) x 32,3 mm (t) x 29,5 mm (b)	11825,71
2	Lehmputz	450 mm (l) x 35,3 mm (Ø)	1838,87
3	Epoxidharz	450 mm (l) x 23,6 mm (t) x 29,3 mm (b)	17321,1
4	Dispersions-Acrylkleber mit Miscanthusstaub	450 mm (l) x 32,1 mm (t) x 32,6 mm (b)	6251,21
5	Weißleim (schnell abbindend)	450 mm (l) x 29,7 mm (t) x 26,9 mm (b)	3782,5
6	Epoxidharz	450 mm (l) x 30,1 mm (t) x 29,5 mm (b)	17589,71
7	Epoxidharz	450 mm (l) x 28,2 mm (t) x 29,2 mm (b)	19541,93
8	Modellgips und Kunststoffdispersion	450 mm (l) x 33,0 mm (t) x 31,3 mm (b)	7728,02
9	Weißleim mit Pappe als Haftbrücke	450 mm (l) x 22,9 mm (t) x 30,5 mm (b)	6323,15
10	Heißkleber (Klebepistole)	450 mm (l) x 27,4 mm (Ø)	1511,54
11	Weißleim (schnell abbindend)	450 mm (l) x 31,2 mm (t) x 31,7 mm (b)	5247,95
12	Lehm	450 mm (l) x 32,9 mm (t) x 31,5 mm (b)	1591,13
13	Lehm	480 mm (l) x 29,6 mm (Ø)	1119,08
14	Kaseinleim	480 mm (l) x 57,5 mm (t) x 48,5 mm (b)	3224,25
15	Weißleim	480 mm (l) x 49,6 mm (t) x 49,0 mm (b)	6659,52
16	Weißleim	480 mm (l) x 27,1 mm (t) x 29,2 mm (b)	6380,18
17	PU Kleber	450 mm (l) x 30,6 mm (t) x 31,5 mm (b)	15039,6
18	Methylzellulose	450 mm (l) x 39,2 mm (t) x 31,1 mm (b)	2852,65

Quelle: Materialkundelabor, Universität Siegen

Da nicht nur die Bindemittel, sondern auch der Anteil von Bindemittel zu Miscanthus sowie der Verarbeitungsgrad von Miscanthus stark variiert, ist eine direkte Vergleichbarkeit nicht gegeben. Dennoch ist die Tendenz zu erkennen, dass Polyurethan und Epoxidharz eine signifikante Verbesserung der Tragfähigkeit ergeben. Stützen mit diesen Bindemitteln bewegen sich alle hinsichtlich der o.g. Bandbreite der Tragfähigkeit am oberen Rand der Werte.

Abb. 36
Biege-Druck-Prüfung eines Probekörpers



Abb. 37
Stütze mit Bindemittel Modellgips, Ergebnis Maximallast 7.728,05 N

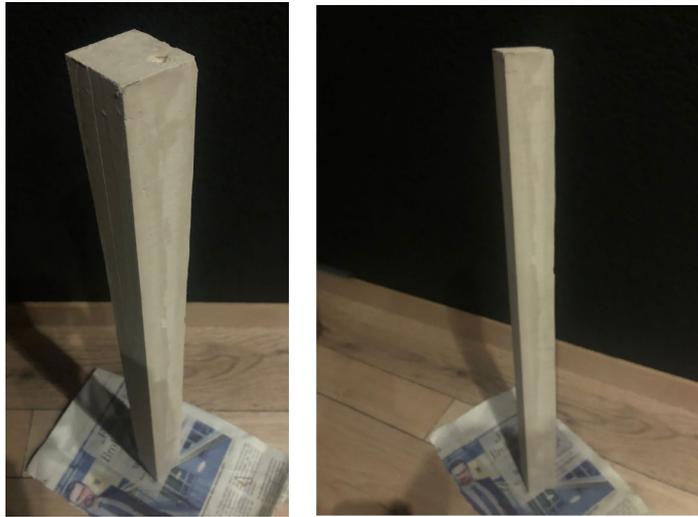
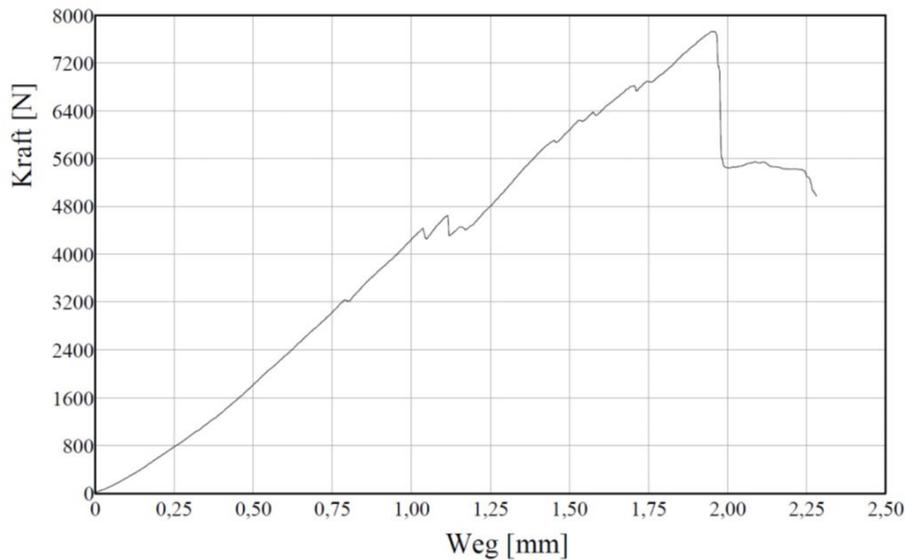


Abb. 38
Ergebnis Stützen-Druck-Versuch, Bindemittel Modellgips

Artikel Nr. : Fuchs, Hof, Broukina, Freund Probe 1	Kraftbereich : 8000,00 N
Prüfer : Latsch, Weber	Wegbereich : 2,50 mm
Datum : 16.06.2023	Geschwindigkeit : 5,00 mm/min
Auftrag :	Abbruch bei ? % von F_M : 60,00 %
Herkunft : Materialkundelabor- Prof. Dr.- Ing. Math	Vorlast : 2,00 N
	Endpunkt : 40,00 mm



Nr	F_M N	S_B mm	Kennung
1	7728,02	2,28	

Quelle: Materialkundelabor, Universität Siegen

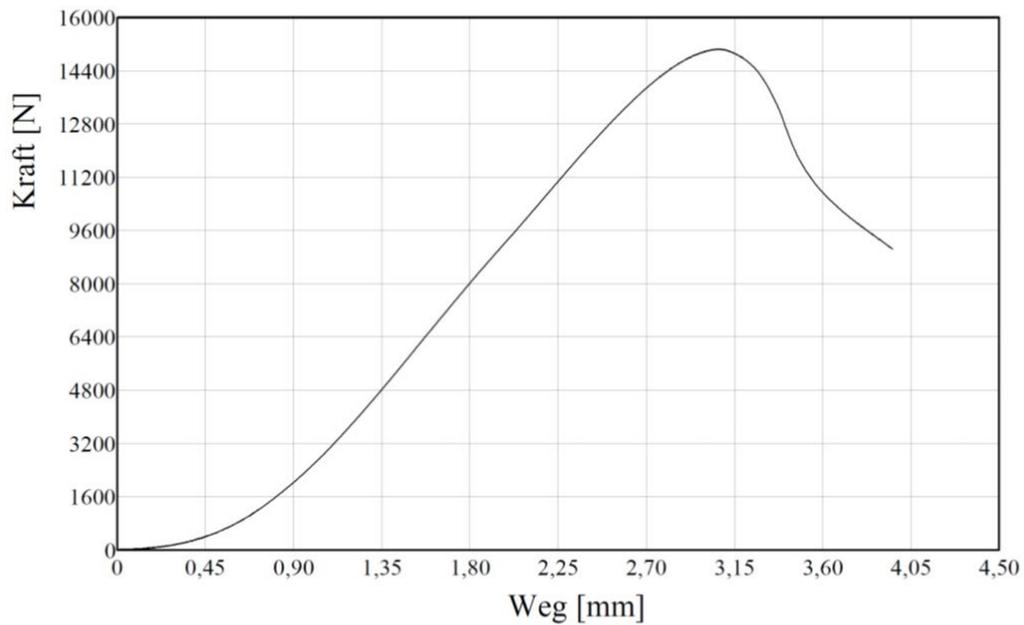
Abb. 39
Stütze mit Bindemittel Montagekleber (PU), Maximallast 15.039,60 N



Abb. 40
Ergebnis Stützen-Druck-Versuch, Bindemittel Montagekleber

Artikel Nr. : Hein Tsakiri, Mertens Probe 2
 Prüfer : Latsch, Weber
 Datum : 27.06.2023
 Auftrag :
 Herkunft : Materialkundelabor- Prof. Dr.- Ing. Math

Kraftbereich : 16000,00 N
 Wegbereich : 4,50 mm
 Geschwindigkeit : 5,00 mm/min
 Abbruch bei ? % von F_M : 60,00 %
 Vorlast : 2,00 N
 Endpunkt : 40,00 mm



Nr	F_M N	S_B mm	Kennung
1	15039,60	3,96	

Quelle: Materialkundelabor, Universität Siegen

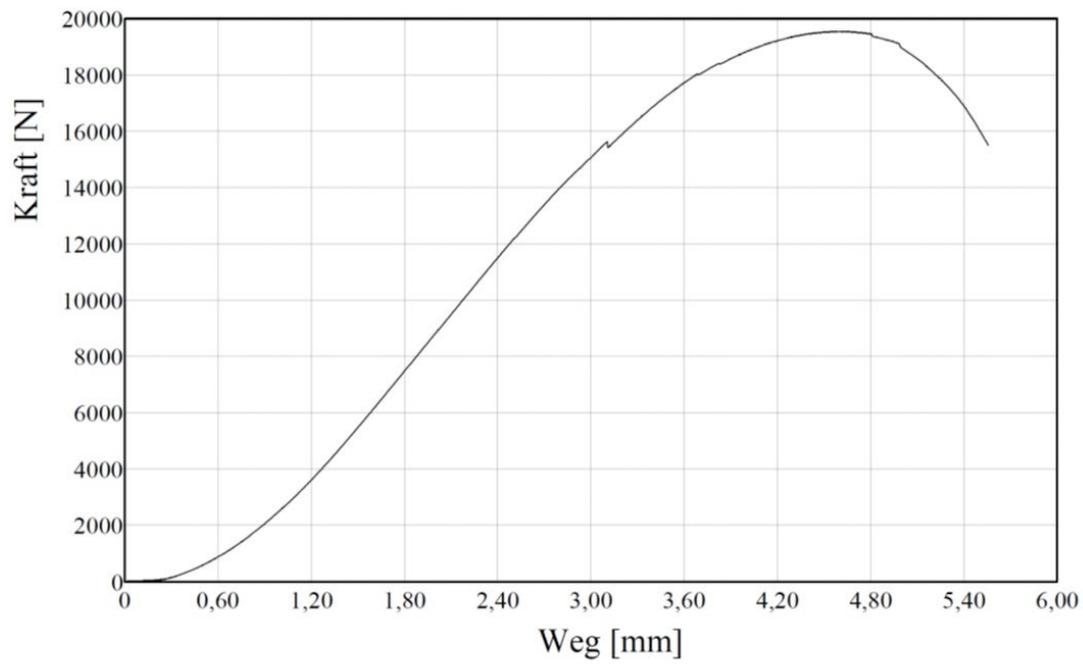
Abb. 41
Stütze mit Bindemittel Epoxidharz, Maximallast: 19.541,93 N



Abb. 42
Ergebnis Stützen-Druck-Versuch, Bindemittel Epoxidharz

Artikel Nr. : Diderle, Alzahr, Birinci, Mustafa Probe
 Prüfer : Latsch, Weber
 Datum : 16.06.2023
 Auftrag :
 Herkunft : Materialkundelabor- Prof. Dr.- Ing. Math

Kraftbereich : 20000,00 N
 Wegbereich : 6,00 mm
 Geschwindigkeit : 5,00 mm/min
 Abbruch bei ? % von F_M : 60,00 %
 Vorlast : 2,00 N
 Endpunkt : 40,00 mm



Nr	F_M N	S_B mm	Kennung
1	19541,93	5,56	

Quelle: Materialkundelabor, Universität Siegen

3.5 Untersuchungen zu Bindemitteln für Miscanthus durch Creavis

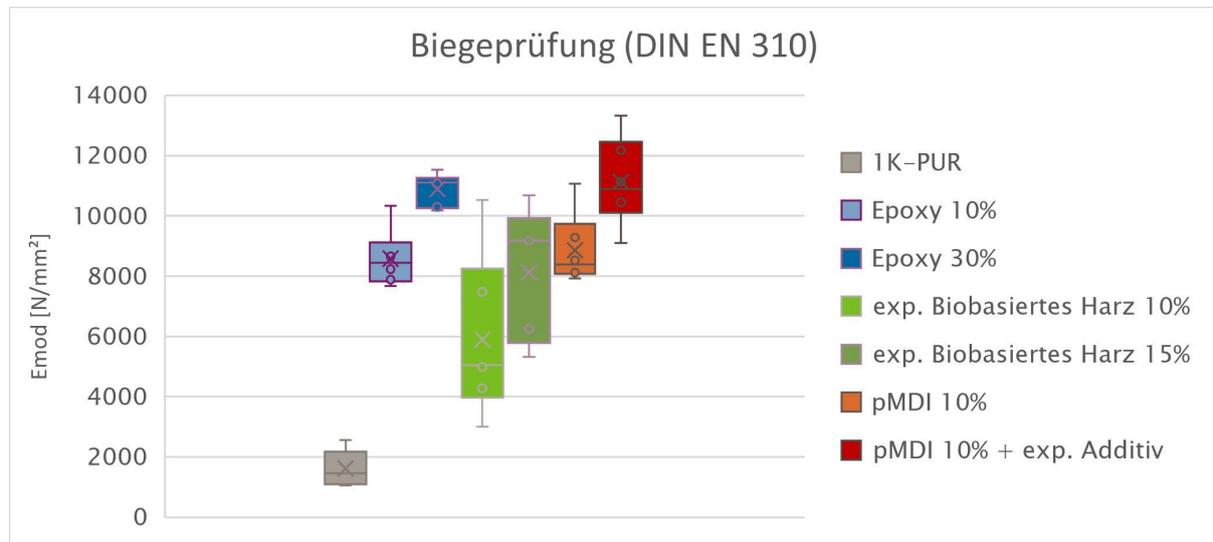
Creavis, die strategische Innovationsabteilung der Evonik Industries AG, beteiligt sich im hier beschriebenen Forschungsprojekt auf zwei Arten. Zum einen unterstützt die Creavis mit ihrem Industrie-Knowhow, z.B. zur Reaktivität und Anwendung verschiedener Klebstoffe oder zu Industrie-relevanten Normschriften. Zum anderen führt die Creavis Experimente im eigenen Labor durch. Ziel der Experimente ist es, geeignete Klebstofffamilien zu identifizieren, welche sich grundsätzlich für die Herstellung von Miscanthus-Leim-Balken eignen.

Zur Identifizierung geeigneter Klebstoffe, wurden zunächst verschiedene Klebeverfahren erprobt. Als geeignet erwies sich ein Verfahren, indem zunächst die Miscanthusstäbe vorgepresst und dann erst mit Klebstoff beaufschlagt und unter Druck verleimt werden. Zur Pressung wurde eine hydraulische Presse verwendet. Klebstoffmengen und Temperatur müssen je nach Klebstofffamilie unterschiedlich eingestellt werden.

Mit dem optimierten Verfahren (Abb. 43) wurden anschließend vier verschiedene Klebstofffamilien getestet:

- 1K-PUR (Einkomponenten Polyurethanklebstoff, handelsübliche Klebstoffe sind noch größtenteils petrochemisch basiert, bekannt z.B. aus dem strukturellen Holzleimbau, bioattributierte Qualitäten erreichen zunehmend den Markt)
- Epoxy (handsübliche Klebstoffe sind üblicherweise größtenteils petrochemisch basiert, bioattributierte Qualitäten könnten in den nächsten Jahren auf den Markt kommen, bekannt aus Faserverbundwerkstoffen, z.B. für Rotorblätter)
- pMDI (polymeres Methylendiphenyldiisocyanat, in der Regel petrochemisch basiert, jedoch sind seit kurzem bioattributierte ISCC PLUS-zertifizierte Qualitäten verfügbar, bekannt aus der OSB-Produktion)
- exp. Biobasiertes Harz (experimentelles Produkt mit hohem Anteil biobasierten Kohlenstoffs)

Abb. 43
Diagramm Bindemitteluntersuchung Creavis



Quelle: Evonik Industries AG, Creavis

Die Testmethode ist angelehnt an DIN EN 310. Zur Vorbereitung von drei Prüfkörpern wurden 60 g vorbereitete Miscanthushalme (ohne Parenchym, geviertelt) einer Länge von 160 mm in eine Pressform der Grundfläche 160x165 mm gelegt, mit Kleber beaufschlagt und ein Pressstempel aufgesetzt. Die Pressung wurde mit den in Tabelle 2 angegebenen Parametern mit einer hydraulischen Presse durchgeführt. Nach erfolgter Pressung wurden die Platten für eine Woche bei 18 – 22 °C und 60 – 70% Luftfeuchtigkeit gelagert

und anschließend Prüfkörper mit der Grundfläche 160 x 40 mm ausgeschnitten. Die beiden Außenbereiche der Miscanthusplatte parallel zur Faserrichtung im Abstand von 20 mm zu den Kanten wurden dabei abgetrennt und verworfen. Die Dicke der Prüfkörper betrug etwa 4 mm. Der E-Modul wurde wie in DIN EN 310 beschrieben mittels Dreipunktbiegeversuch bestimmt. Für einen der in Abb. 43 gezeigten Boxplots, wurden jeweils 6 Probekörper getestet.

Tabelle 3
Testmatrix

	Temperatur	Druck	Pressdauer
1k Pur	20°	1,2 N / mm ²	120 Min
Epoxy	90°	1,2 N / mm ²	120 Min
Experimenteller biobasierter Harz	140°	1,2 N / mm ²	60 Min
pMDI	20°	1,2 N / mm ²	120 Min

Quelle: Evonik Industries AG, Creavis

Das Miscanthusleimsystem scheint sich eher wie ein Kompositwerkstoff und weniger wie ein Leimbinder zu verhalten. Dementsprechend ergibt der relativ elastische 1K-PUR Leim ein deutlich geringeres Elastizitätsmodul als die übrigen drei Matrixharze. Alle drei Harze sind potentiell für ein zukünftiges Miscanthus-basiertes Produkt geeignet. Wichtige nächste Schritte, z.B. im Rahmen eines Folgeprojektes, sind einen der drei Leime nach den Kriterien Nachhaltigkeit, Performance, Verarbeitbarkeit und Kosten auszuwählen und mit der Hilfe von Spezialadditiven für Miscanthus zu optimieren. Dass Spezialadditive grundsätzlich in der Lage sind, die Klebung weiter zu verbessern, wurde mit der Zugabe eines experimentellen Additivs zu pMDI des Projektpartners Evonik in einem ersten Versuch demonstriert.

3.6 Erstellen und Testen von Prüfobjekten für Biegefestigkeit in praxisnaher Größe

Abb. 44
Prüfobjekte



Quelle: M. Wirths

3.6.1 Erstellen der Prüfkörper

Für das Erstellen von Prüfkörpern in nahezu baupraktischen Dimensionen (Abb. 44) wurden sowohl biogene als auch synthetische Bindemittel verwendet. Erfahrungen mit Epoxidharz als Kleber für Druckstäbe (vgl. Kap. 3.4), besonders aber die Untersuchungen der Creavis (vgl. Kap. 3.5) haben Epoxidharz als aussichtsreiches Bindemittel für konstruktive Anwendungen qualifiziert. Besondere Relevanz ergab sich durch die Möglichkeit sowohl auf der Seite des Harzes als auch auf der des Härterers mittelfristig einen hohen Biocontent realisieren zu können. Standard DGEBA Harz (vgl. Hexion Sicherheitsdatenblatt: EPIKOTE™ Resin 828), Epodil 750 Verdünner (vgl. Evonik Sicherheitsdatenblatt Epodil 750, Version vom 09.12.2022) und AH 598 Härter (vgl. Evonik Sicherheitsdatenblatt: Amine Hardener 598, Version vom: 26.01.2022) wurden dem Projektteam durch die Evonik Industries AG für das Erstellen der Prüfobjekte zu Verfügung gestellt. Die Verbesserung der Klebeleistung (vgl. Kap. 3.5) und mögliche Substitution petrochemischer Bestandteile durch biobasierte bei PMDI-Bindemitteln wurde erst im Januar 2024 festgestellt und konnte daher im Rahmen dieses Projektes nicht mehr untersucht werden.

Es wurden 6 Biegeträger aus Miscanthus und Paulownia mit 110 cm Länge, 14,5 cm Höhe und variierender Breite hergestellt. Aufgrund der aktuellen maschinellen Ausstattung des Materialkundelabors der Universität Siegen (die Heißpresse hat eine Fläche von 120 cm x 80 cm), sind größere Dimensionen derzeit nur mit unverhältnismäßigem Aufwand herzustellen. Für den Vergleich mit Bauholz wurden 6 Träger aus KVH Sortierklasse S10 gemäß DIN 4074-1 mit jeweils den gleichen Abmessungen gefertigt.

Erster Schritt bei der Herstellung der Miscanthusträger war die Fertigung von Platten mit dem Bindemittel Epoxidharz oder Knochenleim in der Heißpresse bei jeweils 300 bar auf einer Fläche von ca. 1m² und ca. 90

Minuten Presszeit. Die Temperatur bei Knochenleim betrug 140°C, die bei Epoxidharz im ersten Versuch 120°C, danach 90°C. Der Masseanteil von Bindemitteln beträgt bei den knochenleimgebundenen Platten ca. 30%, bei den epoxidharzgebundenen ca. 20%.

Abb. 45
Ausgangsmaterial für eine Platte (ca. 3kg Miscanthus)



Quelle: M. Wirths

Die Plattenstreifen wurden anschließend zu einem Balken verklebt. Hierbei wurden die Miscanthusfasern (Abb. 45) hauptsächlich in Längsrichtung angeordnet, für die Aufnahme von Querkräften allerdings auch zwei Plattenstreifen mit quer angeordneten Fasern (Abb. 46). Bei der Verklebung der epoxidharzgebundenen Plattenstreifen wurde ebenfalls Epoxidharz als Bindemittel eingesetzt. Die Verklebung erfolgte bei 90 °C. Um die Vernetzung mit Epoxidharz zu verbessern, wurde bei einigen Proben während des Klebevorganges zusätzlich ein Vakuum angelegt.

Ebenso wurde mit Hilfe des Vakuumsackes (Abb. 47) eine Probe nur aus aufgerauten Halmen hergestellt, um zu testen, ob mit dieser Fertigungsmethode das aufwändige Aufspießen zu Spänen und Verkleben zu Plattenstreifen umgangen werden kann.

Die Idee eines Kompositmaterials aus Miscanthus und Paulownia wurde auch noch einmal aufgegriffen (Abb. 48). Hier erfolgte das Verkleben der Schichten, ebenso wie bei den knochenleimgebundenen Plattenstreifen mit PU-Leim unter Druck aber ohne Vakuum und ohne Hitze.

Abb. 46

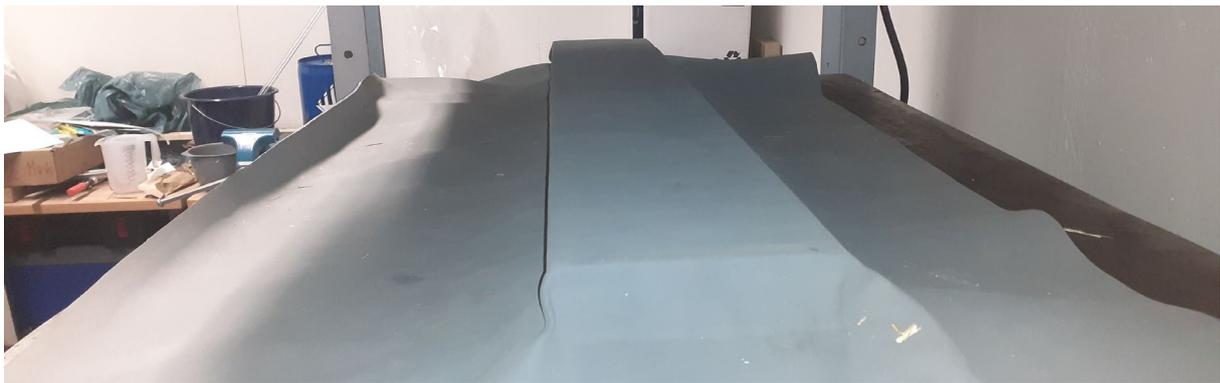
Plattenstreifen für einen Balken, zu erkennen sind die längs und quer ausgerichteten Fasern.



Quelle: M. Wirths

Abb. 47

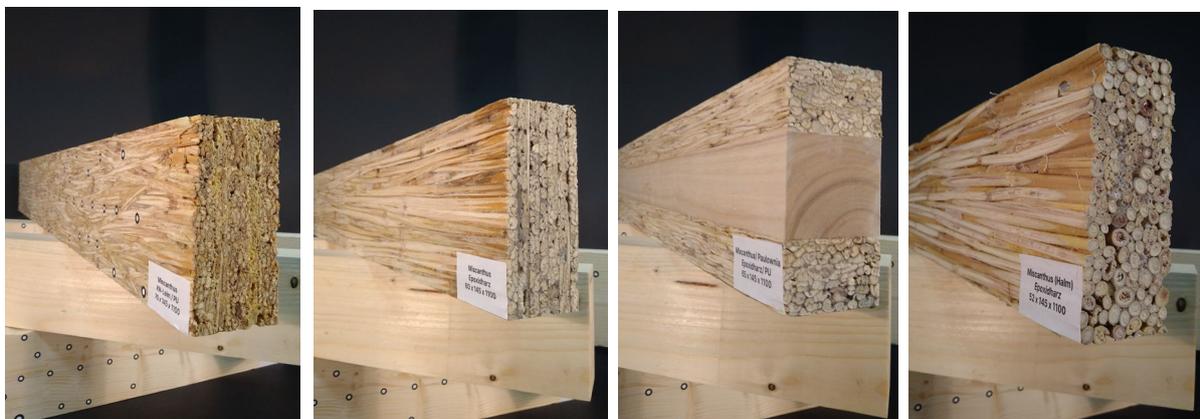
Balken im Vakuumsack vor dem Schließen der Heißpresse



Quelle: C. Kühn

Abb. 48

V. li. n. re.: Träger knochenleimgebundene Plattenstreifen mit PU verklebt, Träger komplett epoxidharzgebunden, Träger mittig aus Paulownia und epoxidharzgebundenem Miscanthus in den Randbereichen, komplett epoxidharzgebundener Träger aus ganzen Halmen



Quelle: M. Wirths

Nachfolgende Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der Abmessungen der hergestellten Prüfkörper.

Tabelle 4
Abmessungen von Prüfkörpern

Nr.	Bezeichnung	Länge (m)	Breite (m)	Höhe (m)	Volumen (m ³)	Gewicht (kg)	Dichte (kg/m ³)
1	KVH 75 x 145 x 1100	1,1	0,075	0,145	0,0119625	5,215	435
2	Miscanthus KN-Leim / PU 75 x 145 x 1100	1,1	0,075	0,145	0,0119625	7,44	621
3	KVH 70 x 145 x 1100	1,1	0,07	0,145	0,011165	4,565	408
4	Miscanthus KN-Leim / PU 70 x 145 x 1100	1,1	0,07	0,145	0,011165	7,195	644
5	Miscanthus Epoxidharz 70 x 145 x 1100	1,1	0,07	0,145	0,011165	5,245	469
6	KVH 65 x 145 x 1100	1,1	0,065	0,145	0,0103675	4,7	453
7	Paulownia 65 x 145 x 1100	1,1	0,065	0,145	0,0103675	3,01	290
8	Miscanthus / Paulownia Epoxidharz/ PU 65 x 145 x 1100	1,1	0,065	0,1445	0,01033175	4,785	463
9	KVH 60 x 145 x 1100	1,1	0,06	0,145	0,00957	4,275	446
10	Miscanthus Epoxidharz 60 x 145 x 1100	1,1	0,06	0,145	0,00957	4,852	507
11	KVH 52 x 145 x 1100	1,1	0,052	0,145	0,008294	3,515	423
12	Miscanthus (Halm) Epoxidharz 52 x 145 x 1100	1,1	0,052	0,145	0,008294	3,09	372

3.6.2 Testen der Prüfkörper

Da die Prüfmaschine des Materialkundelabors des Departments Architektur der Universität Siegen nicht für die Größe der erstellten Prüfkörper ausgelegt ist, erfolgte das Testen am Lehrstuhl für Umformtechnik der

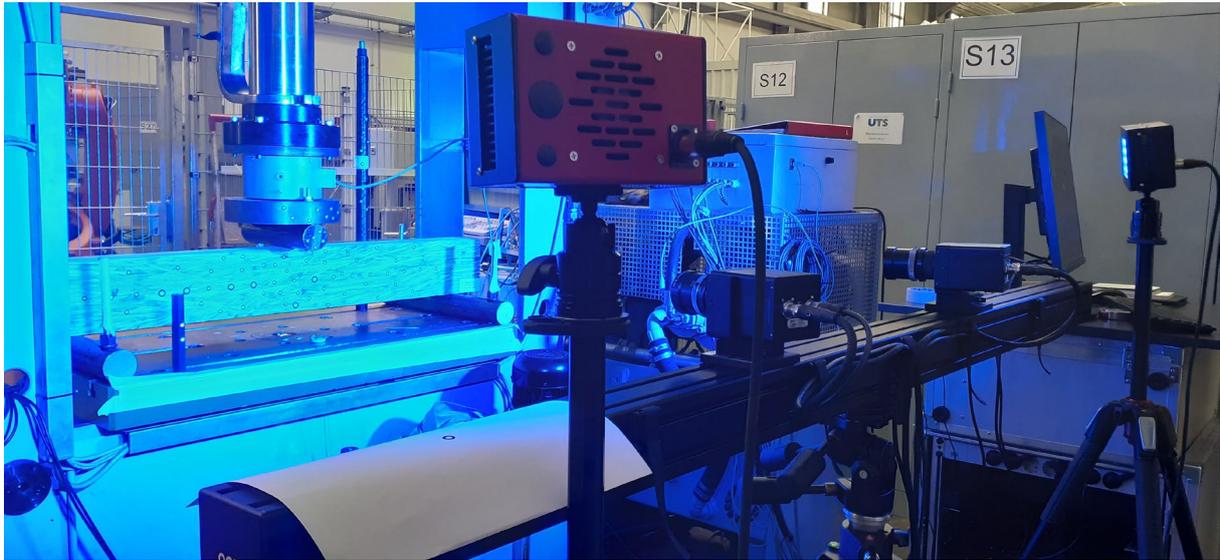
Universität Siegen (Prof. Dr.- Ing. Bernd Engel) unter Leitung von Dr.-Ing. Rainer Steinheimer unter Mitwirkung von M.Sc. Michael Geueke und M.Sc. Maximilian Schmidt. Vor der Durchführung des Biegeversuches mussten die Maschinen eingerichtet werden (Abb. 49). Um einen einfachen Vergleich der entwickelten Materialien mit handelsüblichem Bauholz zu erreichen, wurden die Balken aus den neuen Materialien ebenso wie gleichformatige Konstruktionsvollholz- (KVH) Balken der Sortierklasse S10 mittig belastet. Die Spannweite betrug 930mm. Mit dem optischen 3D-Messsystem GOM Aramis SRX für die Erfassung von Dehnungen und Bewegungen wurden die Verformungen aufgezeichnet (Abb. 50). Die vor der Belastung angebrachten Messpunkte, machten den Verlauf der Verformung nachvollziehbar sichtbar (Abb. 51). Für eine erste Überprüfung der Verformung wurden die erhobenen Messdaten reduziert. Die Datenreihen wurden durch M.Sc. Maximilian Schmidt von der Software des Messsystems in allgemein lesbare Exceldatenreihen transferiert.

Abb. 49

V. li. N. re. M. Sc. Maximilian Schmidt, Dr.-Ing. Rainer Steinheimer, Prof. Dr.-Ing. Mathias Wirths bei der Vorbereitung der Biegeversuche im Labor des Lehrstuhls für Umformtechnik von Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

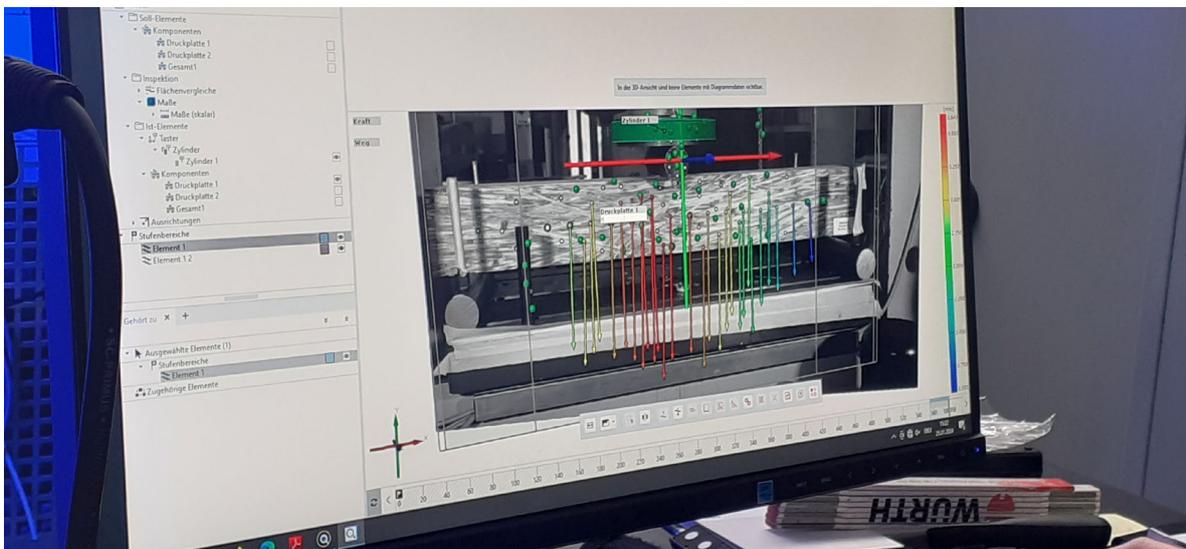


Abb. 50
Versuchsaufbau mit dem GOM Aramis SRX Meßsystem



Quelle: C. Kühn

Abb. 51
Verfolgung der Verformung mit Hilfe der angebrachten Messpunkte



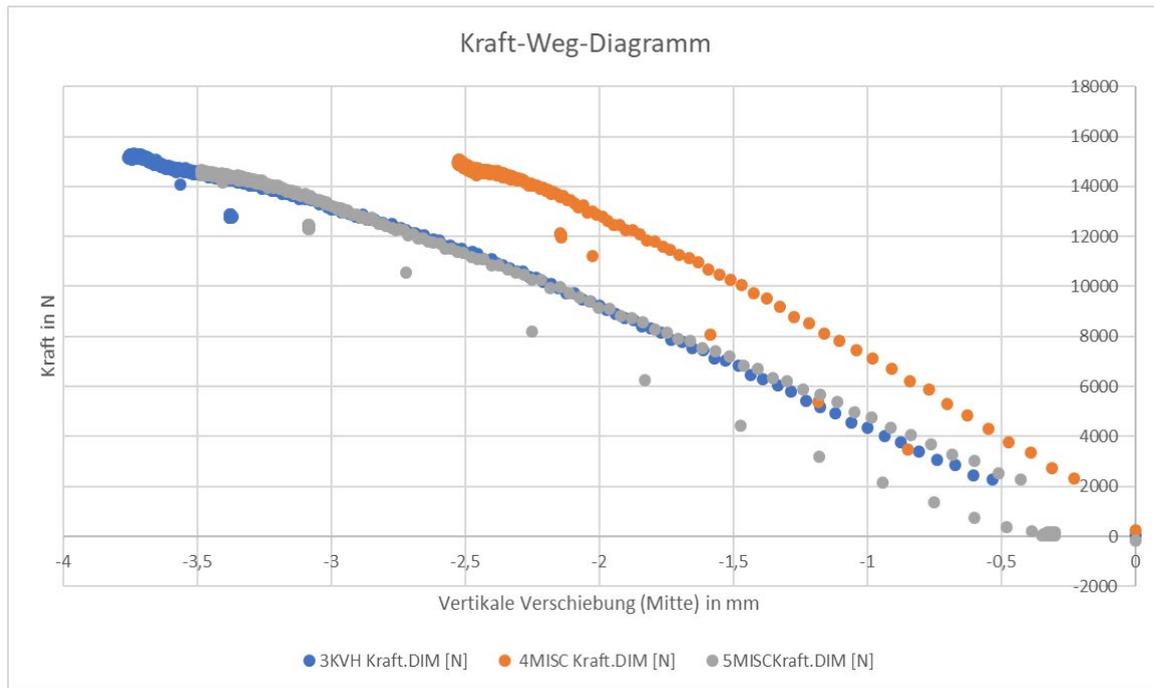
Quelle: C. Kühn

3.6.3 Ergebnisse

Nachfolgende Diagramme zeigen die Belastung der Probekörper und die dabei erfolgte vertikale Verschiebung eines Messpunktes auf mittlerer Querschnittshöhe und in der Mitte des Balkens. Die Last wurde in der Regel nicht bis zum Bruch aufgebracht, sondern auf ca. 15 kN begrenzt, um im elastischen Bereich zu bleiben (ein Vorversuch mit einem Kantholz ähnlicher Abmessungen hatte eine Bruchlast von ca. 36 kN ergeben).

In untenstehender Abbildung (Abb. 52) sieht man den Vergleich von KVH-Balken (blau), epoxidharzgebundenem Miscanthusbalken (grau) und knochenleimgebundenem Miscanthusbalken (orange). Es handelt sich um Balken mit den Abmessungen 1100 mm x 70 mm x 145 mm (LxBxH). Es ist zu erkennen, dass der knochenleimgebundene Miscanthusbalken etwas steifer als die nahezu gleichwertigen anderen beiden Balken ist. Für 2,5 mm vertikale Verformung sind für den knochenleimgebundenen Balken ca. 15.000 N erforderlich, für die beiden Vergleichsbalken ca. 11.500 N.

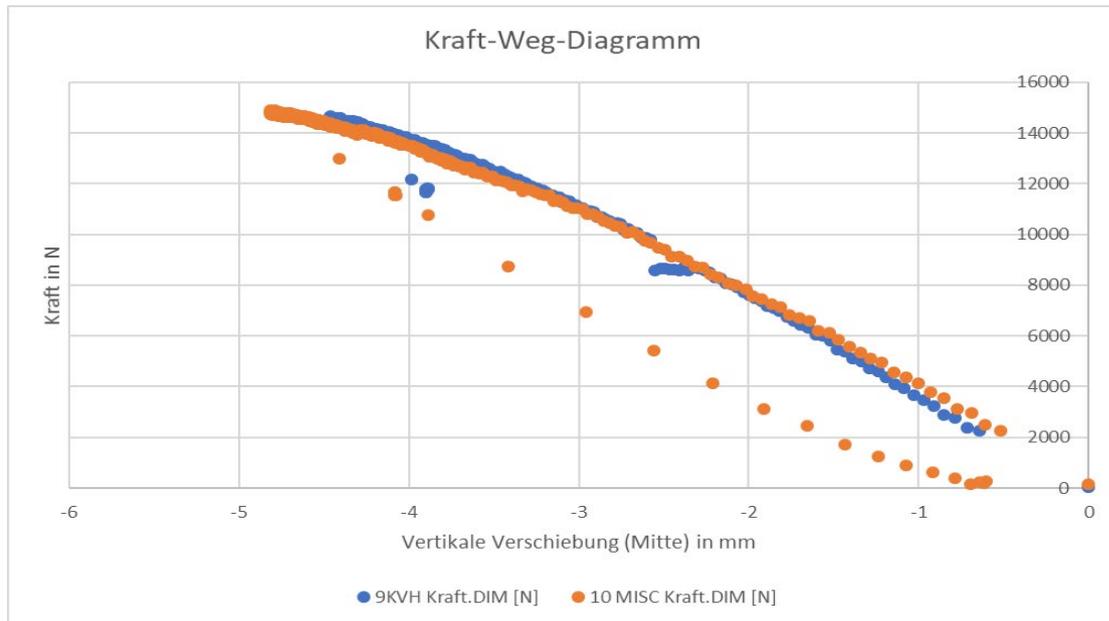
Abb. 52
Vergleich von KVH-Balken (blau), epoxidharzgebundenem Miscanthusbalken (grau) und knochenleimgebundenem Miscanthusbalken (orange)



Quelle: M. Wirths

Die nachfolgende Graphik (Abb. 53) zeigt im Kraft-Wege-Vergleich von KVH-Balken (blau) und unter Vakuum epoxidharzgebundenem Miscanthusbalken (orange) mit den Abmessungen 1100 mm x 60 mm x 145 mm (LxBxH), dass die Kurven fast deckungsgleich sind.

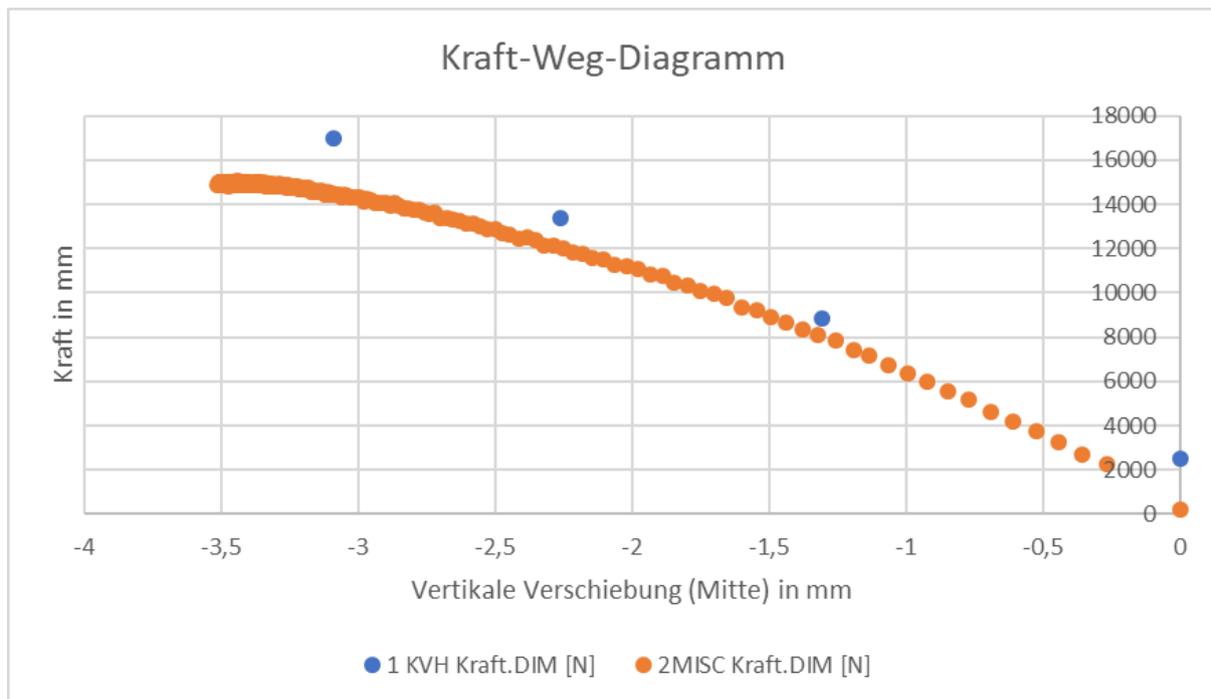
Abb. 53
Vergleich von KVH-Balken (blau), epoxidharzgebundenem Miscanthusbalken (orange)



Quelle: M. Wirths

Nachfolgendes Diagramm (Abb. 54) zeigt den Vergleich von KVH-Balken (blau) und knochenleimgebundenem Miscanthusbalken (orange). Die Abmessungen sind 1100 mm x 75 mm x 145 mm (LxBxH). Leider wurden bei dem KVH Balken nur wenige Daten registriert. Die Verschiebungen sind ähnlich mit etwas höherer Steifigkeit bei den KVH Messwerten. Allerdings startet der erste registrierte Messpunkt der KVH Probe bei ca. 2300 N, was bedeuten könnte, dass die Messkurve hier „zu Gunsten“ des Miscanthusträgers korrigiert werden müsste.

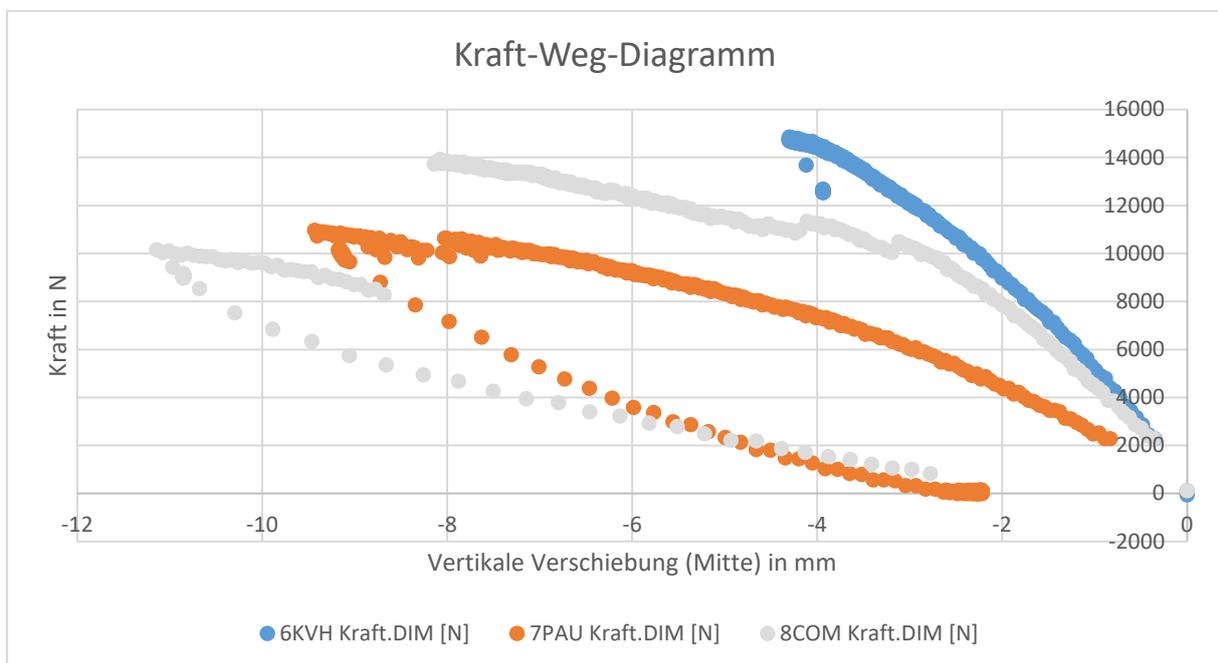
Abb. 54
Vergleich von KVH-Balken (blau) und knochenleimgebundenem Miscanthusbalken (orange)



Quelle: M. Wirths

Das Diagramm (Abb. 55) zeigt den Vergleich von KVH-Balken (blau) und epoxidharzgebundenem Miscanthus/Paulowniakompositbalken (grau) sowie einem Paulownia Vollholzbalken (orange) knochenleimgebundenem Miscanthusbalken (orange). Die Abmessungen sind 1100 mm x 65 mm x 145 mm (LxBxH). Die Graphen verlaufen hier unregelmäßiger als in den vorherigen Diagrammen, da sowohl der Paulowniabalken (orange), als auch das Kompositmaterial (grau) aus Paulownia und Miscanthus vor Erreichen der Prüflast von 15 kN versagt haben. Das Kompositmaterial (benötigte Kraft für eine vertikale Verformung von 4 mm ca. 11.200 N) zeigt sich zwar etwas steifer als das Paulowniavollholzprodukt (benötigte Kraft für eine vertikale Verformung von 4 mm ca. 7.700 N), erreicht aber nicht die Festigkeit von KVH (blau) (benötigte Kraft für eine vertikale Verformung von 4 mm ca. 14.800 N).

Abb. 55
Vergleich von KVH-Balken (blau), epoxidharzgebundenem Miscanthus/Paulowniakompositbalken (grau) und einem Paulownia Vollholzbalken (orange)



Quelle: M. Wirths

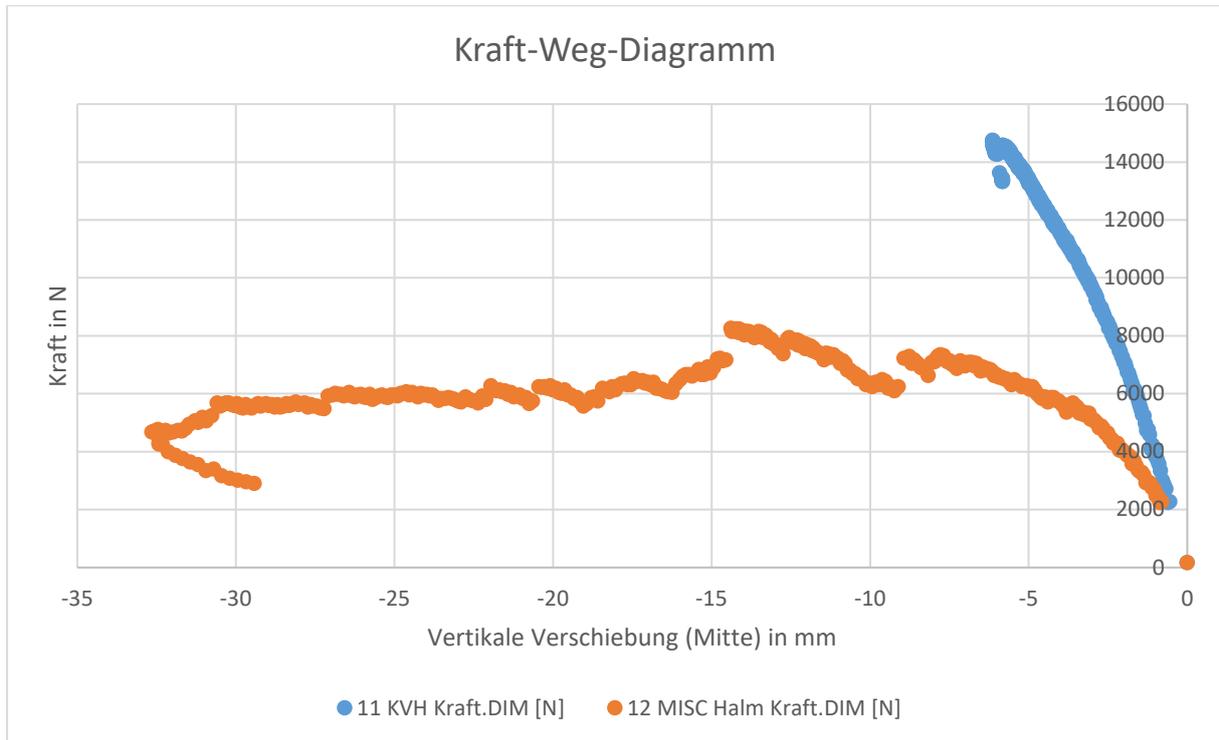
Auch im nachfolgend zu sehenden Diagramm (Abb. 56) versagt der Balken aus ganzen epoxidharzgebundenen Halmen (orange) vorzeitig und kann im Vergleich zu KVH (blau) nicht die gleiche Kraft aufnehmen (benötigte Kraft für eine vertikale Verformung von 5 mm ca. 6.000 N). Beide Proben haben eine Breite von 52 mm. Die Überlegung, dass sich das Herstellungsverfahren mit Vakuum und gleichzeitigem Verkleben mit Epoxidharz in der Heißpresse zu einem leistungsfähigem Biegeträger führt, hat sich mit diesem Versuch nicht bewahrheitet. Der KVH-Träger ist wesentlich steifer (benötigte Kraft für eine vertikale Verformung von 5 mm ca. 13.800 N). Dies zeigt aber auch, dass die bisherige Vorgehensweise des Aufspleißens der Miscanthushalme und deren Verleimung zu Plattenstreifen nicht unnötig war.

Exkurs:

Aus dem Material des Prüfkörpers mit ganzen Halmen wurde im Nachgang ein Druckstab mit den Abmessungen 3 cm x 3 cm x 45 cm erstellt und bis zum Bruch bei 16.061 N belastet (vgl. Werte in Kap. 3.4). Dies zeigt, dass eine weitere Untersuchung der Verklebung ganzer Halme als Druck- und Zugstab von Interesse sein könnte.

Abb. 56

Vergleich von KVH-Balken (blau) und, epoxidharzgebundenem Miscanthusbalken aus ganzen Halmen (orange)

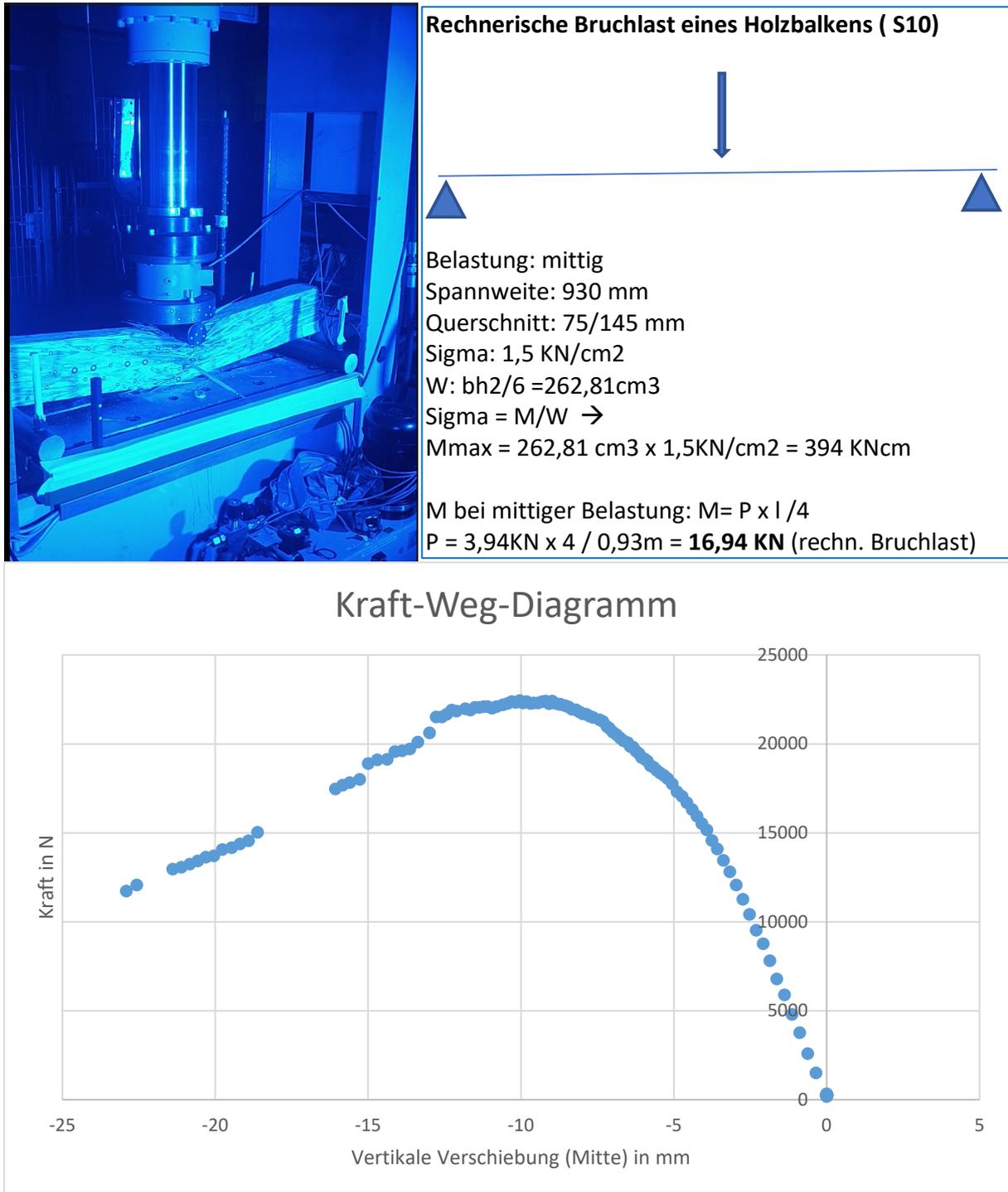


Quelle: M. Wirths

Zum Abschluss der Tests wurde ein knochenleimgebundener Miscanthusbalken mit den Abmessungen 1100 mm x 75 mm x 145 mm bis zum Bruch belastet (Abb. 57). Es wurde eine maximale Kraft von 28,6 KN registriert (obwohl in den vorausgegangenen Tests der Balken bereits einmal mit 15 KN belastet wurde). Die rechnerische Bruchlast auf Basis des Nachweises über das Biegemoment beträgt für einen Holzbalken der Sortierklasse S10 mit diesen Abmessungen und der Stützweite von 930 mm ca. 16,9 KN. Damit zeigt sich auch hier wieder die Tendenz, dass „Miscantusholz“ hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften im Vergleich mit Bauholz gute Werte aufweist. Diese Tendenz sollte mit einer größeren Anzahl von Testungen verifiziert werden.

Abb. 57

Belastung eines Miscanthusbalkens bis zum Bruch in Bild und Diagramm sowie rechnerische Bruchlast eines Holzbalkens gleicher Abmessung



Quelle: M. Wirths

3.7 Betrachtungen zur Nachhaltigkeit durch den Projektpartner INAB

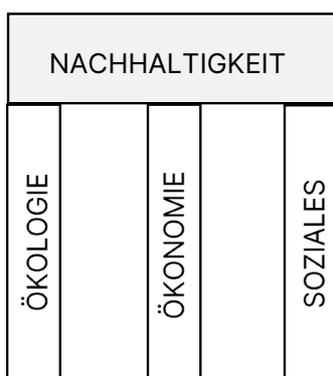
Das Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen begleitete das Projekt mit einer Konzepterstellung zur Durchführung einer Ökobilanz. Bei nachgewiesener Machbarkeit der Verklebung von Miscanthus zu belastbaren Holzwerkstoffen können in einem Folgeprojekt detailliert auf Basis einer Ökobilanz die Umweltauswirkungen, beginnend mit dem Anbau von Miscanthus über die Fertigung und die Nutzungsphase bis zum Recycling des Holzwerkstoffes, dargestellt werden. In dieser frühen Entwicklungsphase, die sich durch einen z.T. improvisierten Labormaßstab mit geringer Probeanzahl auszeichnet, ist eine belastbare Ökobilanz noch nicht zielführend. Es können jedoch erste Überlegungen angestellt werden, wie die Prozesskette aufgebaut sein wird und welche wesentlichen Parameter vermutlich im Rahmen der Durchführung einer Ökobilanz einen wichtigen Beitrag zur Bewertung der Umweltleistung des neuartigen Produktes leisten werden.

Durch die Ökobilanz wird aufzuzeigen sein, welche Verfahrensansätze mit den geringsten Umweltlasten verbunden sind. Es soll an dieser Stelle bereits darauf hingewiesen werden, dass unterschiedliche Wirkungskategorien (z.B. Treibhauspotenzial, Versauerungspotenzial, Eutrophierungspotenzial, Ressourcenverbrauch etc.) je Verfahrensansatz unterschiedlich starke Ausprägung aufweisen, so dass eine differenzierte Auswertung erforderlich sein wird. So konnte beispielsweise durch einen höheren Energieaufwand die Struktur des Holzwerkstoffes verbessert werden, was möglicherweise zu einer längeren Lebensdauer mit entsprechenden ökobilanziellen Vorteilen führen kann. Gleichzeitig war jedoch der höhere Energieaufwand zu berücksichtigen, der sich negativ auf das Treibhauspotenzial auswirken wird. Diese „trade-offs“ werden durch eine Ökobilanzstudie von der „Wiege bis zur Bahre“ aufgezeigt, so dass dadurch fundierte Entscheidungen hinsichtlich einer ganzheitlichen Prozessoptimierung ermöglicht werden. Gleichzeitig sollte bereits zu diesem frühen Zeitpunkt eine Strategie für eine Nachhaltigkeitsbewertung entworfen werden.

3.7.1 Nachhaltigkeitsbewertung

Die Nachhaltigkeitsbewertung (Life Cycle Sustainability Assessment – LCSA) basiert auf der ganzheitlichen Betrachtung der Auswirkungen eines Produktes oder einer Dienstleistung auf die Ökologie (Life Cycle Assessment - LCA), auf die Ökonomie (Life Cycle Costing – LCC) sowie hinsichtlich sozialer Aspekte (Social Life Cycle Assessment - S-LCA). Diese drei Aspekte fixieren die drei Säulen der Nachhaltigkeit (Abb. 58).

Abb. 58
Die drei Säulen der Nachhaltigkeit



Quelle: M. Wirths in Anlehnung an https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/1_3_a_drei_saeulen_modell_1531.htm

Das Themenfeld der ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbewertung gewinnt vor dem Hintergrund teils dramatischer Veränderungen des globalen Klimas aber auch sich verknappender Rohstoffe weiter an Bedeutung. Zudem wird der Blickwinkel in der Gesellschaft, der Politik und der Industrie vermehrt auf die sozialen Auswirkungen einer wirtschaftlichen Tätigkeit gerichtet.

Die UN hat mit der Definition von 17 Sustainable Development Goals (SDGs) (UN 2015) einen Rahmen geschaffen, der das komplexe Feld der Nachhaltigkeitsbewertung in einzelne Umweltaspekte unterteilt (Abb. 59). Nachhaltigkeitsbestrebungen können nach dieser Systematik genauer spezifiziert werden, um aufzuzeigen, in welchen Bereichen eine verbesserte Leistung erzielt wurde. Die 17 SDGs decken die drei Säulen der Nachhaltigkeit ab, ohne eine übergreifende Gesamtbewertung über alle Ziele zu fordern. Die 17 SDGs stellen somit eine wertvolle Grundlage in der systematischen Erfassung von nachhaltigkeitsrelevanten Aspekten dar, die jedoch im Sinne einer abschließenden Nachhaltigkeitsbewertung noch einer zusammenfassenden Auswertung bedürfen.

Abb. 59
Nachhaltigkeitsziele der UN

1 KEINE ARMUT	2 KEIN HUNGER	3 GESUNDHEIT UND WOHLERGEHEN	4 HOCHWERTIGE BILDUNG	5 GESCHLECHTER-GLEICHHEIT	6 SAUBERES WASSER UND SANITÄR-EINRICHTUNGEN
7 BEZAHLBARE UND SAUBERE ENERGIE	8 ARBEIT UND WIRTSCHAFTS-WACHSTUM	9 INDUSTRIE, INNOVATION UND INFRASTRUKTUR	10 WENIGER UNGLEICH-HEITEN	11 NACHHALTIGE STÄDTE UND GEMEINDEN	12 NACHHALTIGE/R KONSUM UND PRODUKTION
13 MASSNAHMEN ZUM KLIMASCHUTZ	14 LEBEN UNTER WASSER	15 LEBEN AN LAND	16 FRIEDEN, GERECHTIGKEIT UND STARKE INSTITUTIONEN	17 PARTNER-SCHAFTEN ZUR ERREICHUNG DER ZIELE	VEREINTE NATIONEN: ZIELE FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG

Quelle: M. Wirths in Anlehnung an <https://unric.org/de/17ziele/>

Während durch die Systematik der SDGs Aspekte aus den drei Säulen der Nachhaltigkeit einzeln betrachtet werden, soll im Rahmen dieses Forschungsprojektes und darüber hinaus in Folgeprojekten eine Bewertung der drei Säulen erfolgen und zu einer Gesamtaussage verdichtet werden. Dafür sollen die wesentlichen Aspekte über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes oder einer Dienstleistung im Sinne einer Hotspot-Analyse ermittelt und bewertet werden, um entscheidungsrelevante Informationen zur Steigerung der Nachhaltigkeitsleistung bereitzustellen.

Es muss sichergestellt werden, dass alle drei Säulen gleichermaßen in die Bewertung einfließen. Für die Bewertung sind geeignete Indikatoren erforderlich, die z.T. aus allgemein anerkannten Methoden wie z.B. der Ökobilanz nach ISO 14040 (ISO 14040) oder Standards zur sozialen Bewertung (vgl. UNEP 2020; UNEP 2021) stammen. Darüber hinaus sind jedoch auch projektspezifische Indikatoren zu entwickeln, um eine detaillierte, maßgeschneiderte Bewertung der Nachhaltigkeitsleistung zu gewährleisten. Während eine ökonomische Betrachtung in Projekten in der Regel Bestandteil des Managements ist, stellt die Ökobilanz nach ISO 14040 sowie die Betrachtung der sozialen Auswirkungen besondere Herausforderungen dar, die im Folgenden näher erläutert werden.

3.7.2 Sozialbewertung

Die Bewertung der sozialen Auswirkungen stellt trotz internationaler Bestrebungen der Vereinheitlichung noch ein offeneres Forschungsfeld dar. Als maßgebliche Dokumente können hier die Berichte „Guidelines for social life cycle assessment of products and organizations“ (UNEP 2020) und „Methodological Sheets for subcategories in social life cycle assessment“ (UNEP 2021) genannt werden.

Diese Dokumente zeigen eine Struktur für eine Sozialbewertung auf, die auch in Ansätzen in einem Folgeprojekt zur Anwendung kommen soll. Neben der Sozialbewertung wird auch die Sozialakzeptanz bei der Einführung der neuen Werkstoffe zu berücksichtigen sein. Es ist nicht auszuschließen, dass eine Erweiterung bzw. Umstellung eines landwirtschaftlichen Betriebes auf Miscanthus zunächst auf Ablehnung stoßen wird. Hier gilt es, durch frühzeitige Aufklärungs- und Werbekampagnen die Einführung der neuen Werkstoffe zu begleiten.

Eine umfassende Sozialbewertung beinhaltet eine vorab durchgeführte Stakeholderanalyse, um eine ganzheitliche Bewertung der sozialen Auswirkungen aller Betroffenen sicherzustellen. Nach den „Guidelines for social life cycle assessment of products and organizations“ (UNEP 2020) können die folgenden Stakeholdergruppen relevant sein:

- Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer
- Lokale Gemeinschaft
- Akteure der Wertschöpfungskette
- Verbraucherinnen und Verbraucher
- Gesellschaft
- Kinder

Im Rahmen des Projektes wurde der Kreis der betroffenen Stakeholder in einem ersten Analyseschritt spezifiziert. Dabei werden ausgehend von dem Prozess der Miscanthusnutzung, der sich vereinfacht aus dem Anbau inkl. Ernte, der Produktion der Bauelemente, der Bauphase, der Nutzungsphase sowie dem Recycling am Ende des Lebenszyklus zusammensetzt, die Betroffenen identifiziert.

- Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer

Während des Anbaus, der Weiterverarbeitung, der Anwendung (Baumaßnahme) sowie des Recyclings (Rückbau sowie Verwertungsmaßnahme) sind unmittelbar Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer durch den Umgang mit Miscanthus betroffen.

- Lokale Gemeinschaft

Der Anbau von Miscanthus auf landwirtschaftlichen Flächen wird je nach genutzten Anbauflächen zu einer Veränderung des Landschaftsbildes beitragen. Dieser Aspekt ist in Bezug auf die Wahrnehmung der lokalen Gemeinschaft zu berücksichtigen. Frühe Kampagnen zur Aufklärung der Bevölkerung über neuartige Entwicklungen sollten in Betracht gezogen werden.

- Akteure der Wertschöpfungskette

Miscanthuselemente werden eine Ergänzung zu herkömmlichen Holzelementen darstellen. Insofern sind unter Berücksichtigung des Marktumfeldes ggf. auch die Auswirkungen auf betroffene Marktteilnehmer der Forstwirtschaft zu betrachten.

- Verbraucherinnen und Verbraucher

Bauelemente aus Miscanthus werden einen eigenen Charakter hinsichtlich der Wahrnehmung durch Verbraucherinnen und Verbraucher haben. Es wird im weiteren Projektverlauf von Bedeutung sein, Verbraucherinnen und Verbraucher über die neuartigen Bauelemente aufzuklären (Social Media, Messeauftritte, Demonstrationen vor Ort...), um einen Markteintritt positiv zu begleiten.

Spätere Anpassungen bezüglich der Stakeholderanalyse im weiteren Projektverlauf sind nicht ausgeschlossen.

3.7.3 Ökobilanz

Für die Bewertung der Auswirkungen auf die Umwelt kann das allgemein anerkannte Instrument der Ökobilanz nach ISO 14040 herangezogen werden. Dieses beinhaltet die Erfassung aller „Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung (d.h. „von der Wiege bis zur Bahre“).“ (ISO 14040). Das Vorgehen bei der Erstellung einer Ökobilanz unterteilt sich in vier Phasen:

- Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

Von zentraler Bedeutung, insbesondere in der aktuell frühen Entwicklungsphase eines Miscanthus-Bauelementes, ist die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen. Gerade die Festlegung des Untersuchungsrahmens, die u.a. die Systemgrenzen und die funktionelle Einheit umfasst, bestimmen maßgeblich das Ergebnis einer Ökobilanz. Im Rahmen des Projektes liegen in dieser frühen Entwicklungsphase noch keine belastbaren Daten vor (s.u. „Überlegungen zu Prozessschritten“), so dass im jetzigen Forschungszeitraum zunächst lediglich grundlegende Überlegungen zum Aufbau einer Ökobilanz erstellt wurden. Grundsätzlich ist anzumerken, dass im Rahmen der Ökobilanz alle Prozessschritte des gesamten Lebenszyklus erfasst werden müssen. Ggf. können Vereinfachungen vorgenommen werden, deren Auswirkungen abzuschätzen und zu dokumentieren sind. So könnten beispielsweise, nach einer ersten groben Abschätzung, Transporte dahingehend vereinfacht werden, dass lediglich der Dieserverbrauch der erforderlichen Fahrzeuge in die Bilanz einbezogen wird und nicht etwa der Material- und Energieverbrauch zum Bau der Fahrzeuge.

Die funktionelle Einheit stellt die maßgebliche Bezugsgröße im Rahmen einer Ökobilanz dar. Da noch nicht abzusehen ist, welche Produkte konkret betrachtet werden sollen, da aktuell die grundlegende Machbarkeit der Herstellung eines Bauelementes im Vordergrund des Projektes steht, wird die Festlegung der funktionellen Einheit auf eine spätere Forschungsphase verschoben. Auch Allokationsverfahren, d.h. die Zuordnung von Verbräuchen in Prozessschritten mit mehreren Outputs, weitere Annahmen und Einschränkungen oder auch die Wahl der heranzuziehenden Wirkungskategorien werden zu einem späteren Zeitpunkt in die Überlegungen einbezogen.

So bestand in der laufenden Projektphase die Hauptaufgabe darin, den Prozess bis zur aktuellen Entwicklungsphase, d.h. ohne Bau- und Nutzungsphase sowie Rückbau inkl. Verwertung zu erfassen. Ein weiterer Ausbau des Prozessschemas sowie die Spezifizierung einzelner Prozessschritte wird Bestandteil späterer Folgeprojekte sein.

Zu dem folgenden vereinfachten Prozessschema ist anzumerken, dass im Rahmen einer Machbarkeitsstudie (Ziel des aktuellen Forschungsprojektes) die Daten weniger von Belang sind als das grundsätzliche Prozessverständnis. Es ist nicht auszuschließen, dass während der späteren Umsetzung in ein marktfähiges Produkt mit entsprechenden Up-Scaling-Effekten der Prozessablauf angepasst werden muss.

3.7.4 Überlegungen zu Prozessschritten

Für die Vorüberlegungen zur Nachhaltigkeitsbewertung wurde der Prozess zur Erstellung eines Konstruktionselementes aus Miscanthus in vier Prozessschritte unterteilt (Abb. 60 bis 63), die wiederum in Teilprozessen weiter spezifiziert wurden ³.

³ Paulownia wurde in dieser Phase zunächst nicht betrachtet, da hier von einer Verarbeitung vergleichbar mit der üblichen Forstwirtschaft ausgegangen werden kann. Eine detailliertere Betrachtung von Paulownia wird in einem Folgeprojekt erfolgen.

Abb. 60
Anbau und Ernte von Miscanthus



Quelle: M. Wirths

1. Anbau und Ernte von Miscanthus

- a) Flächeninanspruchnahme
- b) Anbau von Miscanthus
- c) Einsatz von Düngemitteln und ggf. Pestiziden
- d) (maschineller) Pflegeaufwand
- e) Ernte

Abb. 61
Zerfasern der Halme



Quelle: M. Wirths

2. Materialvorbereitung

- a) Schälen
- b) Schleifen / Aufrauen
- c) Zerfasern
- d) Zuschnitt
- e) Portionierung

Abb. 62
Ansetzen des Klebers



Quelle: M. Wirths

3. Vorbereitung des Klebstoffes

- a) Mischprozess
- b) Portionierung

Abb. 63
Heißpresse



Quelle: M. Wirths

4. Verklebungsprozess

- a) Heißpresse vorheizen
- b) Einlegeprozess
- c) Pressvorgang
- d) Zuschnitt
- e) (bei Balkenproduktion) Kalibrieren und erneut verkleben

Dieser Aufbau wurde in ein Prozessfließschema in das Ökobilanzierungstool „GaBi“ (Ganzheitliche Bilanzierung) der Firma Sphera übertragen, wobei in dieser Phase zunächst meist „Dummies“ als Platzhalter ohne belastbare Datengrundlage eingesetzt wurden. Weitere konkretere Überlegungen zu den Prozessschritten auf einer theoretischen Basis werden im Folgenden diskutiert. Für eine belastbare Aussage, ob Miscanthus eine nachhaltige Alternative im Bausektor darstellt, sind die zu erwartenden Einflussgrößen genauer zu beziffern. Zu diesem Zweck ist ein Folgeprojekt geplant, das eine Erfassung von primären Daten zum Anbau von Miscanthus eröffnet.

■ Anbau und Ernte von Miscanthus

Flächeninanspruchnahme: Es ist davon auszugehen, dass der Flächenverbrauch im Anbau der beiden regenerativen Werkstoffe einen bedeutenden Einfluss haben wird. Es wird zu klären sein, wie viel Material pro Hektar und Jahr gewonnen werden kann und insbesondere auch, welche Flächen für den Anbau von Miscanthus in Frage kommen. Hier könnte es sich als vorteilhaft erweisen, wenn die Flächen einerseits nicht in Konkurrenz zu anderen Flächennutzungen stehen (z.B. Anbau von Lebensmitteln) und andererseits einen Zusatznutzen (zusätzliche Ökosysteme, Erosionsschutz...) darstellen können. Es wird zu prüfen sein, wie Miscanthus in ein optimiertes Flächennutzungskonzept eingebunden werden kann.

Im Rahmen einer Nachhaltigkeitsbewertung ist auch die soziale Komponente zu betrachten. Hier könnte sich das Landschaftsbild als relevante Einflussgröße herauskristallisieren, das von der

Bevölkerung unterschiedlich wahrgenommen werden könnte. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich, um diesen Einfluss, der wiederum vom Flächennutzungskonzept abhängt, zu bewerten. Einen weiteren Einflussfaktor stellen klimatische Veränderungen dar, die einen großen Einfluss auf zukünftige Flächennutzungskonzepte haben werden. Diese zu erwartenden Veränderungen müssen in einem Langzeitkonzept Berücksichtigung finden, wobei gerade Miscanthus in diesem Punkt große Vorteile aufweist.

Anbau von Miscanthus: Der Anbau von Miscanthus wird möglicherweise einen maschinellen Aufwand erfordern, der in die ökobilanziellen Überlegungen einfließen muss. Nach ersten Erkenntnissen ist dieser Aufwand gering, da die Pflanze ohne Neuanpflanzung immer wieder neu nachwächst. Dieser Effekt stellt einen großen Vorteil von Miscanthus dar und wird zu einem positiven Ökobilanzergebnis beitragen.

Einsatz von Düngemitteln und ggf. Pestiziden: Genaue Angaben zu dem Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden liegen noch nicht vor. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Pflanzen robust sind und insofern wenig oder keine Düngemittel und Pestizide erfordern. Es ist zu erwarten, dass diese Einflussgröße einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Ökobilanz und somit auf das Ergebnis der Nachhaltigkeitsbewertung hat, so dass in Zukunft diesem Aspekt weiter nachgegangen wird. Das Versuchsgelände in Klein-Altendorf ist für diese Untersuchungen prädestiniert, so dass in Zukunft belastbare Daten vorliegen werden.

(Maschineller) Pflegeaufwand: Der Einsatz von Maschinen wird in Ökobilanzierungen oftmals vereinfacht über den damit verbundenen Deseinsatz erfasst (*ggf. kann zusätzlich der Materialverbrauch über eine Stahlmenge erfasst werden, wobei diese Größe über eine entsprechend lange Maschinenlaufzeit möglicherweise vernachlässigbar ist*). Auch hier werden die Erfahrungen aus dem Anbau auf dem Versuchsgelände wichtige Daten liefern, wobei Skaleneffekte zu berücksichtigen sind. Eine verhältnismäßig kleine Versuchsfläche wird in Relation zur gewonnenen Materialmasse einen höheren Einfluss haben als ein größeres Anbaufeld. Diese grundsätzliche Frage der Skalierung kann in einem Folgeprojekt über Expertenbefragungen in Verbindung mit Sensitivitätsanalysen abgeschätzt werden.

Ernte: Die Ernte stellt sich in der Ökobilanz ähnlich dar, wie die Pflege der Pflanzen. Es wird der maschinelle Aufwand zu erfassen sein, der mit der Ernte von Miscanthus verbunden ist. Hier wird vergleichbar zum Pflegeaufwand am Versuchsstandort Klein Altendorf ermittelt, mit welchem Aufwand (maschinell, energetisch, personell) die Pflanzen geerntet werden. Es wird zudem versucht, den Aufwand über eine entsprechende Skalierung auf eine größere Flächenanwendung hochzurechnen. Ausgeklammert werden zunächst Überlegungen zu der Entwicklung von Spezialmaschinen, die zu einer Effizienzsteigerung während der Ernte beitragen können.

■ Materialvorbereitung

Die Tätigkeiten zur Materialvorbereitung wurden z.B. händisch durchgeführt, da im Rahmen dieser Projektphase die grundsätzliche Machbarkeit im Vordergrund stand. Zudem sind manche Arbeitsabläufe noch optional, so dass noch keine belastbaren Daten zur Auswertung im Rahmen einer Ökobilanz vorliegen. Es ist davon auszugehen, dass ein großtechnischer Einsatz von Miscanthus zu entsprechenden maschinellen Neuentwicklungen führen und somit zu einer deutlich effizienteren Anwendung von Miscanthus im Bausektor beitragen würde.

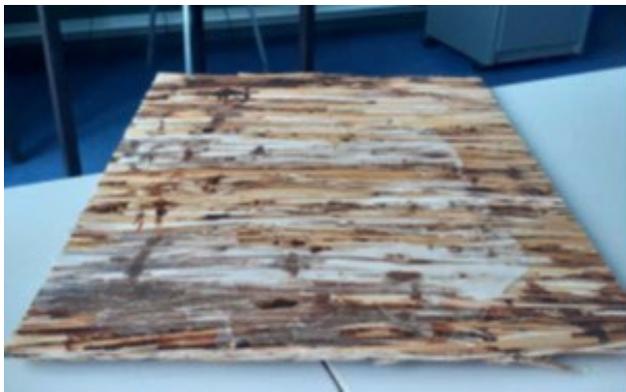
■ Vorbereitung Klebstoffe

Auch die Vorbereitung der Klebstoffe ist noch in der Erprobungsphase. Es wurden unterschiedliche Kleber auf ihre grundsätzliche Eignung getestet. Da zu erwarten ist, dass die Wahl des Klebstoffes einen deutlichen Einfluss auf die Ökobilanz des Produktes haben wird, sind hier in einem Folgeprojekt verstärkt Bestrebungen geplant, einen Kleber auf Basis von umweltfreundlichen Bindemitteln zu entwickeln, der eine Einhaltung der erforderlichen, baurelevanten Anforderungen gewährleistet. Diese Eignung wird in zahlreichen Versuchen auch unter realen Bedingungen (Freiland) zu belegen sein.

■ Verklebungsprozess

Für den Verklebungsprozess ist eine Heißpresse erforderlich, die während des Vorheizens und des eigentlichen Pressvorganges mit einem Energieverbrauch verbunden ist. Dieser beläuft sich im Versuchsprozess auf 3,22 bis 3,74 kWh aufgrund des Vorheizens und auf 9,68 bis 10,55 kWh während des Pressvorganges pro produzierter Platte (Abb. 64). Wie bereits zuvor erwähnt, ist davon auszugehen, dass eine Ausweitung der Stückzahlen zu Effizienzsteigerungen führen wird (mehrmalige Nutzung einer vorgeheizten Presse, optimierter, ggf. verkürzter Pressvorgang, effizientere Wärmenutzung (Isolation) etc.) Es wird in einem Folgeprojekt angestrebt, diese Skaleneffekte im Rahmen einer Nachhaltigkeitsbetrachtung zu berücksichtigen.

Abb. 64
Heißgepresste Platte aus Miscanthusfasern



Quelle: M. Wirths

3.7.5 Weitere zu erwartende Einflussaspekte

Die Einführung von Miscanthus und Paulownia in die Bauwirtschaft wird möglicherweise weitreichende Auswirkungen haben, die im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung behandelt werden sollen, wozu erste Überlegungen angestellt wurden.

Holz als regenerativer Werkstoff stellt in vielen Bereichen eine nachhaltige Alternative zu dem mit hohen CO₂-Emissionen verbundenen klassischen Bau mit Beton dar. Ein ganzer Wirtschaftszweig ist auf die Gewinnung von Holz und dessen Weiterverarbeitung spezialisiert; in dieses Umfeld muss sich eine Miscanthus-Wirtschaft einbinden. Da aufgrund der Klimaziele der Politik davon auszugehen ist, dass die Verwendung klimaneutraler Werkstoffe wie Holz und Miscanthus verstärkt zur Anwendung kommen wird, ist davon auszugehen, dass durch Miscanthus keine Konkurrenzsituation gegenüber der klassischen Holzwirtschaft, sondern vielmehr ein ergänzender Markt für regenerative Werkstoffe entsteht. Aufgrund der zu erwartenden erhöhten Nachfrage nach nachwachsenden Rohstoffen im Bausektor, könnte durch die Etablierung von Miscanthus als Baumaterial dieser Nachfrage teilweise nachgekommen und somit die Importabhängigkeit von Holz(-produkten) reduziert werden. Der regionale Bezug des regenerativen Werkstoffes aus Miscanthus würde somit zu einer Reduzierung von Transporten und dadurch zu einer weiteren Reduzierung von CO₂-Emissionen beitragen.

Durch eine intelligente Einbindung von Miscanthus in ein Flächennutzungskonzept können darüber hinaus positive Effekte bezüglich der Ausbildung von Ökosystemen, der Verbesserung der Bodenstruktur oder auch der Verminderung von Bodenerosion auf benachbarten Freiflächen entstehen. Diese sollen in einem Folgeprojekt mit Expertinnen und Experten diskutiert und bewertet werden.

Als weiterer positiver Effekt ist der Parenchymkern von Miscanthus zu nennen, der als Nebenprodukt für die Produktion von Dämmstoffplatten genutzt werden kann. Diese weitere Nutzungsmöglichkeit von Miscanthus wird den wirtschaftlichen Nutzen von Miscanthus weiter steigern (vgl. Hettler, 2019)

Fazit

Die Welt befindet sich mitten in einem Klimawandel, der teils zu dramatischen Veränderungen der Natur führen wird. Länger anhaltende Dürren werden in Zukunft der klassischen Holzwirtschaft weiterhin große Schäden zufügen, so dass der Nachfrage nach dem regenerativen Werkstoff möglicherweise in Zukunft nicht mehr in dem geforderten großen Maße entsprochen werden kann. Diese Verluste in der Holzwirtschaft sowie eine zu erwartende verstärkte Nachfrage nach klimaneutralen Baustoffen erfordert die Einführung eines klimaresistenten Baustoffes wie Miscanthus, der das Potenzial hat, diese Lücke anteilig zu schließen und somit zu einer Reduzierung des CO₂-Ausstoßes in der Bauwirtschaft beizutragen. Die Vorteile von Miscanthus gehen aber noch über die bloße Bereitstellung eines regenerativen Baustoffs hinaus. Wird Miscanthus auf Freiflächen der Landwirtschaft angebaut, kann die Pflanze zu einem aktiven Erosionsschutz beitragen, sie bietet möglicherweise auch im Winter einen ökologischen Rückzugsraum für Tierarten und führt nach ersten empirischen Erkenntnissen auch zu einer Verbesserung des Bodengefüges. Eine zusätzliche Nutzung des Parenchymkerns von Miscanthus zur Produktion von regenerativen Dämmstoffplatten stellt dabei eine fast schon vernachlässigbare weitere Nutzungsmöglichkeit dar.

Die sich abzeichnenden zahlreichen Vorteile von Miscanthus in der Bauwirtschaft können nur mit weitergehenden Forschungen realisiert werden, die im Idealfall zur Einführung eines neuartigen, klimaresistenten sowie klimaneutralen Baustoffes führen werden.

3.8 Überlegungen zu Verbindungen

Vor dem Einsatz von Miscanthus im Baubereich müsste der Nachweis erbracht werden, dass sowohl die technischen Eigenschaften gegeben als auch die Nachhaltigkeitsleistung dieser Materialien vorteilhaft sind. Dazu gehört auch der effektive Einsatz des Materials durch auf den Herstellungsprozess abgestimmte Konstruktionsweisen und Verbindungen. Mit Abschluss des Projektzeitraumes konnte die grundsätzliche Eignung dieses Elementes aus Miscanthus für den Baubereich nachgewiesen werden und es wurden darüber hinaus Überlegungen zu konstruktiven Verbindungen angestellt.

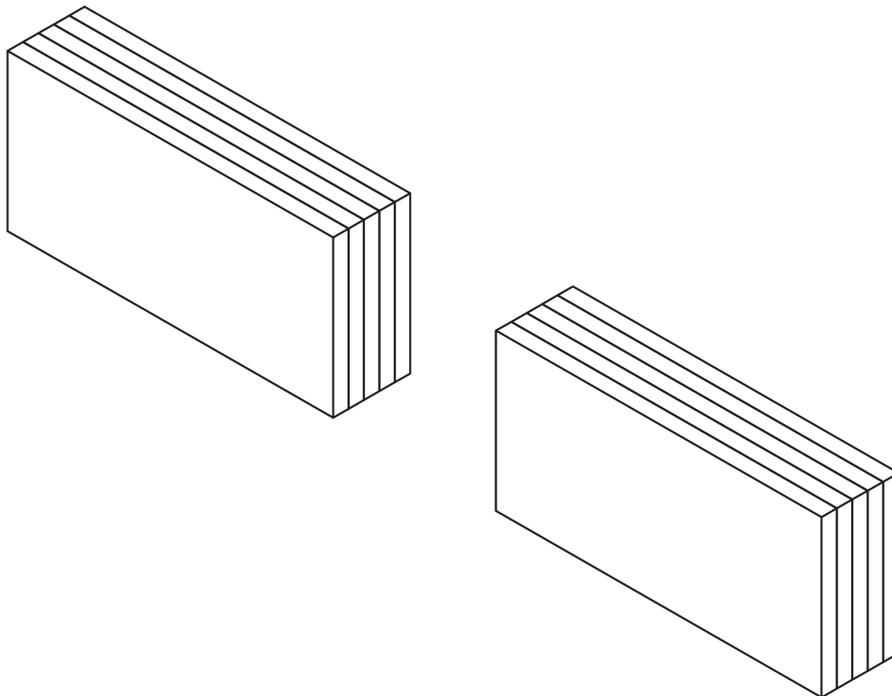
Die Entwicklung von Balken aus Miscanthuswerkstoffen eröffnet neue Perspektiven für den Bau. Diese Innovation begründet sich auf der Suche nach nachhaltigen und ökologischen Materialalternativen. Die Analyse des Forschungskontextes und der ermittelten bauphysikalischen Merkmale legen nahe, dass besonders der Bereich des konstruktiven Holzbaus von diesen Materialien profitieren kann. Ein besonderes Augenmerk gilt dabei der Integration der Balken in bestehende Baustrukturen, wobei die Verbindungstechniken zentrale Aspekte darstellen. Auf der Grundlage der neuartigen Miscanthuswerkstoffe sollen im Folgenden Einsatzmöglichkeiten und deren spezifische Verbindungsmethoden erörtert werden. Die Analyse erstreckt sich von klassischen Holz-Holz-Verbindungen über speziell angepasste Verbindungen für Laminierholz bis hin zu Kompositstechniken, die auf die Eigenschaften der Miscanthuswerkstoffe abgestimmt sind. Ziel ist es, durch die Darstellung verschiedener Anwendungsszenarien nicht nur die praktische Umsetzbarkeit zu demonstrieren, sondern auch die breiten Verarbeitungsmöglichkeiten der Miscanthusmaterialien hervorzuheben. Als Vergleichsmodell dient ein verklebter Miscanthusbalken mit den Maßen 145x70 mm, dessen Struktur durch Variation in Faserausrichtung und Klebmethoden modifiziert werden kann.

3.8.1 Verbindungen von Miscanthuswerkstoffen analog zu traditionellen Holzverbindungen

Die Untersuchung der Verbindungstechniken für Konstruktionen aus Miscanthusmaterialien beginnt mit dem Vergleich zu bewährten Holzverbindungen. Traditionelle Methoden wie Zapfen, Schwalbenschwanz, Gerberstoß und Dübelverbindungen, die im Holzbau für ihre Zuverlässigkeit und Effizienz geschätzt werden, dienen als Ausgangspunkt (vgl. Neuhaus, 2017). Diese Techniken, deren mechanische Eigenschaften und Belastbarkeit umfassend dokumentiert sind (vgl. Sons., et al., 2020) bieten eine solide Grundlage für die Anwendung und Evaluation der Miscanthuswerkstoffe. Ziel ist es, anhand dieser bewährten Verbindungen die Möglichkeiten und Herausforderungen der neuen Materialien zu erkunden. Dabei wird zunächst von den spezifischen Eigenschaften der Miscanthuswerkstoffe abstrahiert, um eine breite Basis für die Analyse der Verbindungsmöglichkeiten zu schaffen. In weiterführenden Untersuchungen sollen dann die besonderen Merkmale der Miscanthusmaterialien in die Entwicklung innovativer Verbindungstechniken einfließen, um deren Potenzial voll auszuschöpfen und maßgeschneiderte Lösungen für den modernen Holzbau zu entwickeln.

Im Rahmen der Untersuchung alternativer Baumaterialien zu herkömmlichem Bauholz wird ein aus fünf Schichten verleimter Miscanthusbalken herangezogen (Abb. 65), der einen Querschnitt von 145 x 70 mm aufweist. Ziel ist es, die strukturellen Eigenschaften und potenziellen Vorteile dieses Materials im Vergleich zu traditionellen Holzprodukten zu evaluieren. Die Faserrichtung der einzelnen Schichten dieses Verbundmaterials ist dabei analog zu der von Brettschichtholz konzipiert, wobei die Fasern in jeder Schicht kohärent in die gleiche Richtung verlaufen. Diese konstruktive Ausrichtung soll die mechanischen Eigenschaften des Miscanthusbalkens optimieren und seine Eignung als tragfähiges Baumaterial im Bauwesen demonstrieren.

Abb. 65
Durch die Produktion bedingter Schichtenaufbau Miscanthusbalken

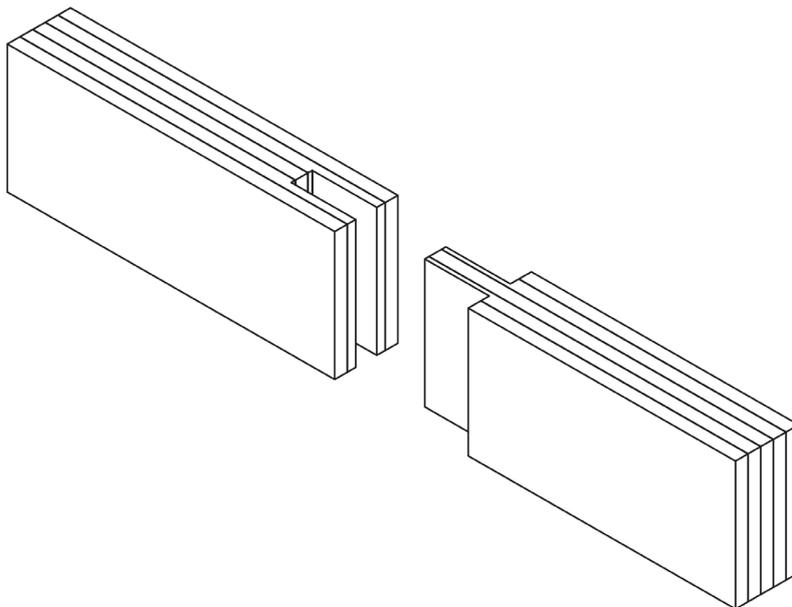


Quelle: P. v. Oheimb-Loup

Nachfolgend werden beispielhaft drei traditionelle Holzverbindungen dargestellt (Abb. 66 bis 68). Diese spezifischen Verbindungen wurden ausgewählt, da sie repräsentative Beispiele für strukturelle Holzverbindungen im traditionellen Bauwesen darstellen. Ihre Wahl dient der Bildung einer verlässlichen Grundlage für den Vergleich, der sowohl die Übertragung von Lasten als auch die Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Beanspruchungen umfasst. Dieser Vergleich soll eine Bewertung der Kompatibilität der neuen Materialien mit bestehenden Konstruktionsmethoden und -prinzipien ermöglichen.

1. Zapfenstoßverbindung

Abb. 66
Zapfenstoß



Schnelle Längsverbindung
mit einfacher Geometrie.

Hohe Druckkräfte

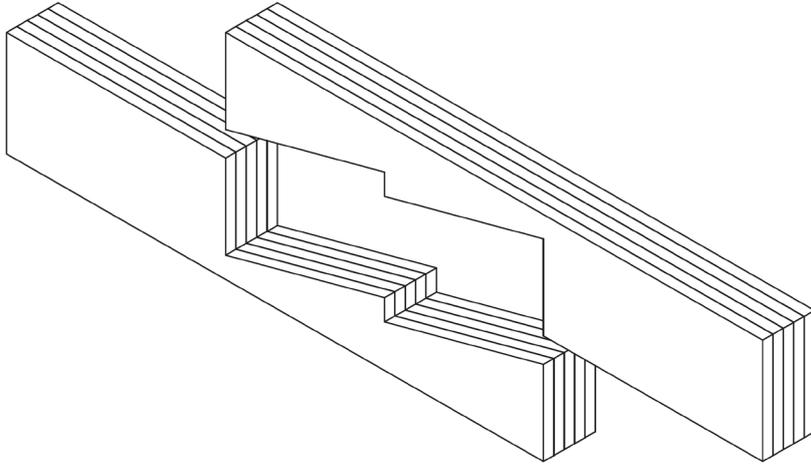
Geringe Querkräfte

Zugkräfte mittels Holznägel
oder Dübeln übertragbar

Quelle: P. v. Oheimb-Loup

2. Schräges Hakenblatt:

Abb. 67
Hakenblatt



Quelle: P. v. Oheimb-Loup

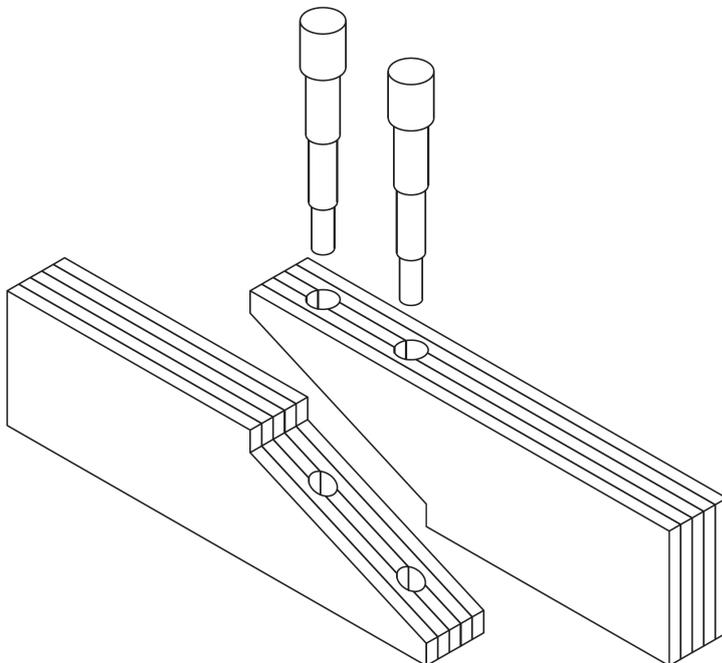
Schnelle Lagersicherung

Hohe Querkräfte

Zugkräfte mittels Holznägel
oder Dübeln übertragbar

3. Gerberstoß mit Holznägeln

Abb. 68
Gerberstoß mit Holznägeln



Quelle: P. v. Oheimb-Loup

Hohe Querkräfte

Zugkräfte mittels Holznägel oder
Dübeln übertragbar

Die Verwendung klassischer Holz-
Holzverbindungen und deren
Adaption auf Miscanthuswerkstoffe
ist ein erster pragmatischer Ansatz
zur praktischen Untersuchung und
Implementierung Dieser im
konstruktiven Holzbau.

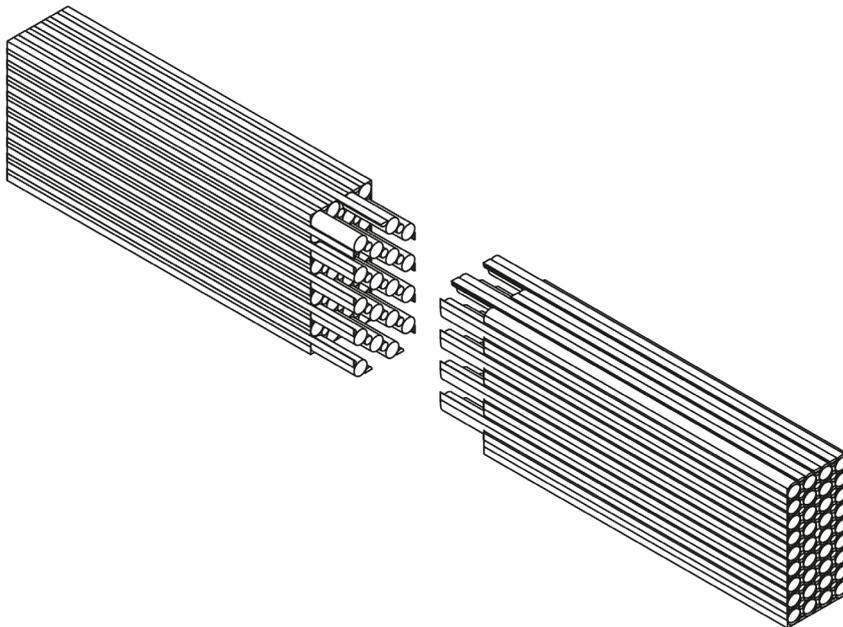
3.8.2 Werkstoffspezifische Verbindungen für Balken aus Miscanthuswerkstoffen

Die Fertigung tragender Bauteile aus Miscanthus erfordert die Anwendung spezifischer Prozesse (Schälen, Aufspalten, Kleben...), die wiederum maßgeblichen Einfluss auf die Auswahl geeigneter Verbindungstechniken nehmen. In den nachfolgenden Anwendungsbeispielen wird von einem homogenen Materialverbund der Miscanthusfasern in einem Balken mit Querschnittsabmessungen von 145 x 70 mm ausgegangen. In diesem Kontext sollen exemplarisch verfahrensspezifische Verbindungstechniken vorgestellt werden, die sich auf unterschiedliche Faserausrichtungen und Verklebungsarten stützen.

■ Miscanthusstäbe, verzahnt und eingegossen

Im Kontrast zu den mehrschichtigen Balkenkonstruktionen, die auf der Verarbeitung von Miscanthusfasern basieren, fokussiert dieses innovative Konzept auf den Einsatz ganzer Miscanthus-Halme (Abb. 69). Diese werden in einer spezifischen Anordnung gebündelt, sodass bei einem Teil der Halme innerhalb des Balkenquerschnitts gleichmäßige und versetzte Überstände entstehen. Diese sorgfältig arrangierten Bündel werden bis auf die definierten Überstände in biobasierte Epoxydharze eingegossen, um eine feste Matrix zu bilden. In einem weiteren Schritt werden je zwei dieser präparierten Segmente durch eine verzahnte Verbindung ineineinandergefügt und erneut mit dem Harz vergossen. Aufgrund der Ergebnisse in Kapitel 3.6.3, S.45 (ein Balken aus ganzen Halmen war als Biegeträger wenig performant als Druckstab war das Ergebnis zufriedenstellend) bietet sich diese Konstruktion hauptsächlich für Druckelemente an.

Abb. 69
Verzahnung von Miscanthushalmen



Quelle: P. v. Oheimb-Loup

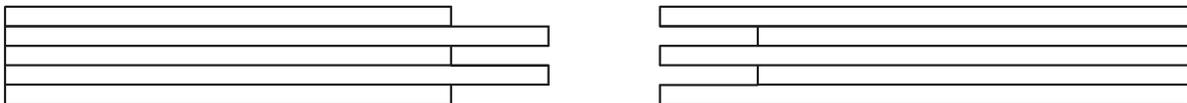
Diese Methode erlaubt die Schaffung einer nahezu nahtlosen Längsverbindung zwischen den Halmen innerhalb des Balkengefüges, wodurch die Notwendigkeit einer intensiven mechanischen Vorbehandlung der Rohstoffe signifikant reduziert wird.

Der Einsatz von verzahnten Verbindungen in Kombination mit dem Eingussverfahren bietet nicht nur eine optimierte Lastverteilung innerhalb des Verbundmaterials, sondern erhöht auch die strukturelle Integrität der Konstruktion

■ Zinkenverbindung

Auch wenn die Zinkenverbindung eine klassische Holzverbindung darstellt macht sich diese die spezifischen Eigenschaften der mehrschichtigen Miscanthusbalken zu Nutze. Die Balken entstehen durch die Schichtung von fünf Lagen langfasriger, präzise ausgerichteter Platten (Abb. 70). Entsprechend der spezifischen Anforderungen des Einsatzbereiches können die Platten entweder in ihrer Faserrichtung versetzt oder parallel miteinander verklebt werden, um optimale mechanische Eigenschaften zu gewährleisten. Bereits während des Verklebungsprozesses der einzelnen Balkenschichten können Zinkenverbindungen integriert werden, um somit beliebige Balkenlängen zu erzielen. Zudem ermöglichen gezielt eingeplante Überstände die Herstellung von Zinkenverbindungen für Anschlusspunkte, wie beispielsweise Stützen, ohne dass diese im Nachhinein mechanisch realisiert werden müssen.

Abb. 70
Zinkenverbindung



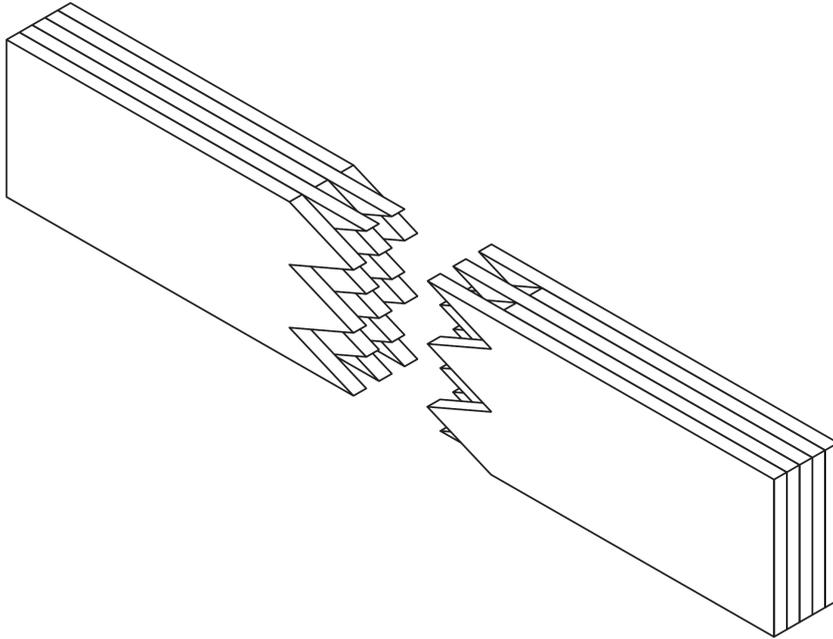
Quelle: P. v. Oheimb-Loup

■ Schicht-Keilzinkung

Die Schicht-Keilzinkung erweitert die traditionelle Methode der Keilzinkung auf Holzwerkstoffe, indem sie speziell den stratifizierten Aufbau von Miscanthusbalken ausnutzt. Diese innovative Technik beginnt mit der präzisen Vorbereitung der Plattensegmente, deren Enden vor der Montage der einzelnen Schichten mit Keilzinken ausgestattet werden. Die versetzte Platzierung der Zinken über die verschiedenen Schichten hinweg führt zu einer umfassenden Mehrfachverzahnung (Abb. 71). Diese Konfiguration generiert eine signifikant vergrößerte Oberfläche, die für die Kraftübertragung zwischen den Schichten optimiert ist und somit die strukturelle Integrität des Gesamtbauwerks verbessert.

Diese Methode ermöglicht es, die mechanischen Eigenschaften der Miscanthusbalken erheblich zu steigern, indem sie die interlaminaire Haftung durch die vergrößerte Verklebungsfläche maximiert. Zudem bietet die Schicht-Keilzinkung eine verbesserte Lastverteilung und trägt zur Erhöhung der Zug- und Biegefestigkeit des Balkens bei.

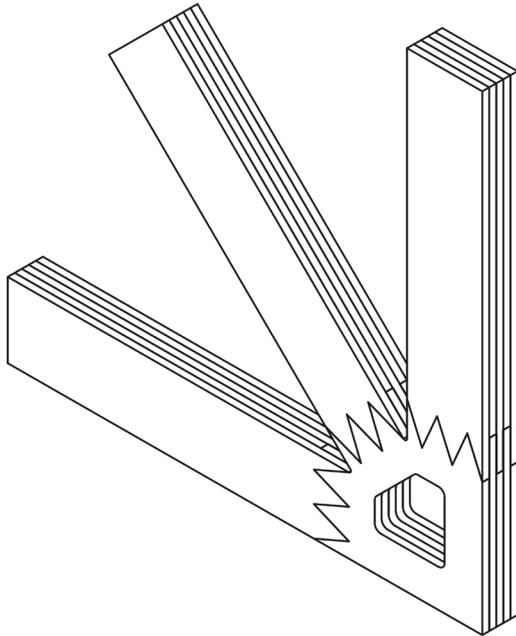
Abb. 71
Schicht-Keilzinkung als Längsverbinding



Quelle: P. v. Oheimb-Loup

Die Schicht-Keilzinkung stellt eine fortschrittliche Methode in der Holzverbindungstechnologie dar, die ein breites Spektrum an strukturellen Einsatzmöglichkeiten eröffnet, einschließlich Träger-Stützen-Verbindungen und Eckverknüpfungen. Die Realisierung dieser Verbindungen erfolgt durch den Einsatz von Dreifachknoten (Abb. 72), welche die Effizienz und Stabilität der Konstruktionen signifikant steigern. Diese speziellen Knotenpunkte werden ebenfalls aus mehrschichtigen Miscanthusmaterialien gefertigt, wodurch sich selbst komplexe Fachwerkstrukturen wie Mehrfeldträger umsetzen lassen.

Abb. 72
Schicht- Keilzinkung als Knotenpunkt



Quelle: P. v. Oheimb-Loup

Spezifische Verbindungstechniken, die auf Miscanthusmaterialien abgestimmt sind, nutzen die inhärenten Eigenschaften des Materials für strukturelle Zwecke. Diese methodischen Ansätze fördern die Steigerung der Effizienz und die Maximierung der Haltbarkeit in Konstruktionen, indem sie eine optimierte Materialnutzung und strukturelle Integrität gewährleisten.

3.8.3 Einsatz von Kompositverbindungen bei Miscanthuswerkstoffen

In der dritten Phase erweitert sich der Betrachtungshorizont von ausschließlich homogenen Materialstrukturen hin zu komplexeren Kompositverbindungen. Diese Verbindungen integrieren Miscanthusbalken in Synergie mit kunstharzgebundenen Pressholzelementen sowie mit laminierten oder umreifenden Fasermatten. Diese Überlegungen zielen darauf ab, die mechanischen Eigenschaften und die strukturelle Integrität der Miscanthuswerkstoffe durch die Kombination mit anderen Materialien zu optimieren.

■ Kompositverbindungen von Miscanthusbalken mit Kunstharzpressholzelementen

Kunstharzpressholz zeichnet sich durch eine hohe Dichte und Festigkeit aus (vgl. Aurand, 2021), die in Kombination mit der Leichtigkeit und Flexibilität von Miscanthus zu Materialien führt, die sowohl robust als auch leicht sind. Diese Eigenschaften tragen dazu bei, die strukturelle Stabilität, Biege- und Scherfestigkeit potenzieller Bauteile zu erhöhen. Als Basis für Verbindungen dieser Art dient ein Miscanthusbalken mit einem Querschnitt von 145x70 mm, der aus fünf verklebten Schichten besteht.

Abb. 73
Mittige Anordnung eines Kunstharzpressholzes

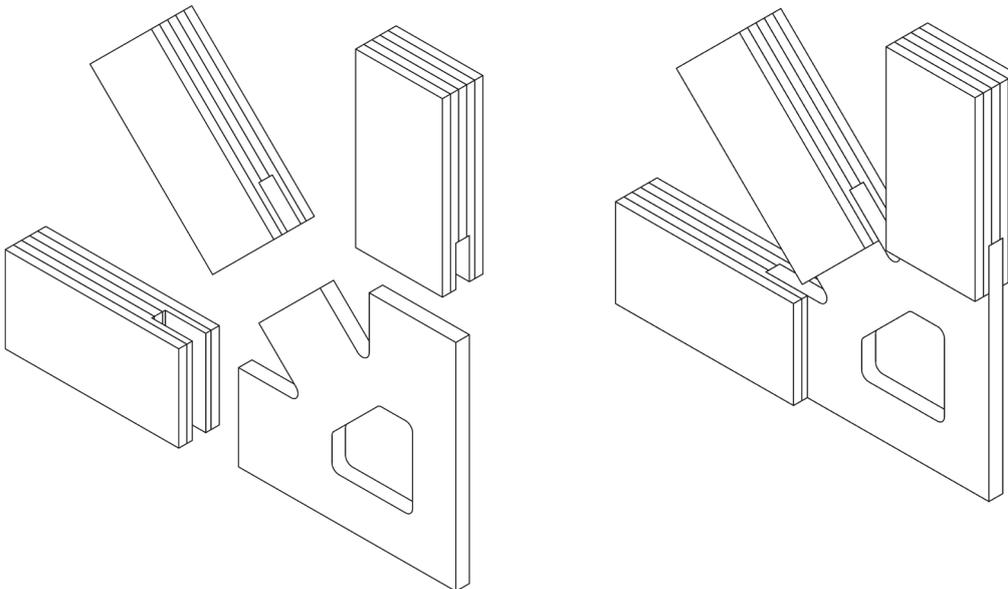


Quelle: P. v. Oheimb-Loup

Die hohe Dichte und Festigkeit des Kunstharzpressholzes ermöglichen die Konzeption von Verbindungselementen (Abb. 73) und Knotenpunkten (Abb. 74) mit reduzierter Materialstärke. Diese Elemente können entweder analog zu einer Zapfenverbindung in speziell dafür vorgesehene Nuten, die während der Verklebung der Miscanthusbalken integriert werden, eingesetzt oder direkt in diesen Prozess einlaminiert werden. Dabei ist die Qualität der Verklebung beider Materialien von entscheidender Bedeutung für die Gesamtintegrität der Struktur.

Diese Verbindungstechnik eröffnet die Möglichkeit, komplexe Konstruktionen wie Mehrfeldträger zu realisieren und bietet gleichzeitig eine Vielzahl an Anschlussoptionen. Durch die innovative Kombination der Materialien werden nicht nur die strukturellen Eigenschaften verbessert, sondern es ergeben sich auch neue Gestaltungsmöglichkeiten in der architektonischen Anwendung.

Abb. 74
Möglicher Knotenpunkt mit Kunstharzpressholz



Quelle: P. v. Oheimb-Loup

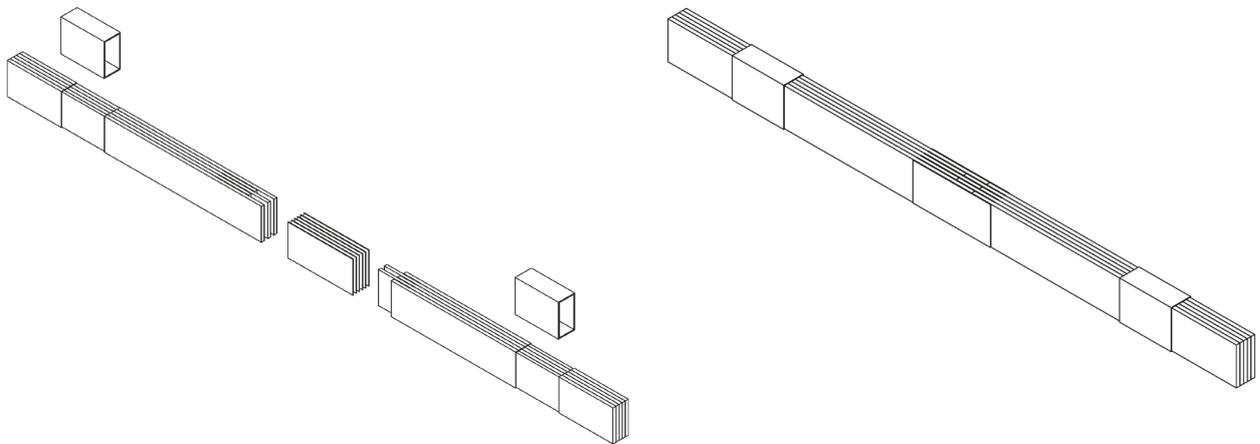
■ Kompositverbindungen von Miscanthusbalken mit Fasermatten

Die Integration von Fasermatten in Miscanthuswerkstoffe bietet erhebliche Potenziale zur Verstärkung von Konstruktionen und zur gleichmäßigen Verteilung von Lasten. Dabei liegt der Fokus auf besonders zugfesten Naturfasern wie Ramie, Flachs, Hanf und Sisal. Zur Herstellung dieser Verbindungen werden hauptsächlich zwei Verfahren angewendet:

Laminationverfahren: Bei diesem Verfahren werden die Fasermatten entweder bereits während des Verklebens der einzelnen Balkenschichten als zusätzliche Zwischenlagen an entsprechenden Verbindungspunkten eingefügt oder sie werden vollflächig in den Balken einlaminiert. Dies ermöglicht eine gleichmäßige Verteilung der Fasern und trägt zur Erhöhung der Festigkeit bei.

Umwickelungsverfahren (Rowing): In besonders belasteten Bereichen oder Verbindungspunkten innerhalb der Konstruktion werden die Fasermatten in Harz getränkt und um die entsprechenden Stellen gewickelt. Dieses Verfahren verstärkt gezielt die beanspruchten Bereiche und trägt zur Verbesserung der Tragfähigkeit bei. Die Verwendung dieser hochzugfesten Naturfasern in Kombination mit den genannten Verfahren ermöglicht die Bildung robuster Kompositverbindungen, die die Leistungsfähigkeit von Bauteilen in verschiedenen Anwendungen erheblich steigern könnten (Abb. 75).

Abb. 75
„Kompositmanschetten“ bei Längsverbindungen



Quelle: P. v. Oheimb-Loup

Die vorgestellten Anwendungsmöglichkeiten und spezifischen Verbindungstechniken für Balken aus Miscanthuswerkstoffen repräsentieren eine wissenschaftliche Hypothese und theoretische Überlegungen, die bislang nicht durch praktische Tests oder Implementierungen verifiziert wurden. Diese Konzepte basieren auf der Annahme, dass Miscanthuswerkstoffe, durch ihre nachhaltigen und ökologischen Eigenschaften, das Potenzial haben, traditionelle Materialien im Bauwesen zu ergänzen oder zu ersetzen. Die Adaption bewährter Verbindungstechniken sowie die Entwicklung neuer, an die spezifischen Eigenschaften von Miscanthus angepasster Methoden, sind theoretische Ansätze, die das Ziel verfolgen, die Einsatzmöglichkeiten dieses Materials im konstruktiven Holzbau zu erkunden.

Es ist wichtig zu betonen, dass diese Überlegungen und Hypothesen einer eingehenden empirischen Überprüfung bedürfen, um ihre Praktikabilität, Effizienz und Tragfähigkeit in realen Anwendungsfällen zu bestätigen. Die vorgeschlagenen Techniken und Materialkombinationen erfordern umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, einschließlich Materialtests, Belastungstests und Langzeitstudien, um ihre technische und ökonomische Umsetzbarkeit zu gewährleisten. In diesem Kontext dienen die Ausführungen zu den potenziellen Anwendungen und Verbindungstechniken von Miscanthuswerkstoffen im Bauwesen vorrangig als Ausgangspunkt für zukünftige Forschungen.

3.8.4 Modellstudie

Nachfolgende Abbildungen (Abb. 76 + 77) waren zunächst als reine Modellstudie zur Verdeutlichung der in den Kapiteln 3.8.2 und 3.8.3 beschriebenen Anschlüsse gedacht. Die Anschlüsse wurden 3D-gedruckt. In diesem Kontext eröffnen sich auch neue Forschungsfelder, da die mechanischen Eigenschaften neuer Filamenttypen, die zukünftig möglicherweise einen hohen Bioanteil haben, interessant für reale Verbindungen von stabförmigen Tragelementen aus Miscanthus werden können.

Abb. 76
Darstellung verschiedener Verbindungen von Miscanthus mit 3D-Druck-Anschlüssen

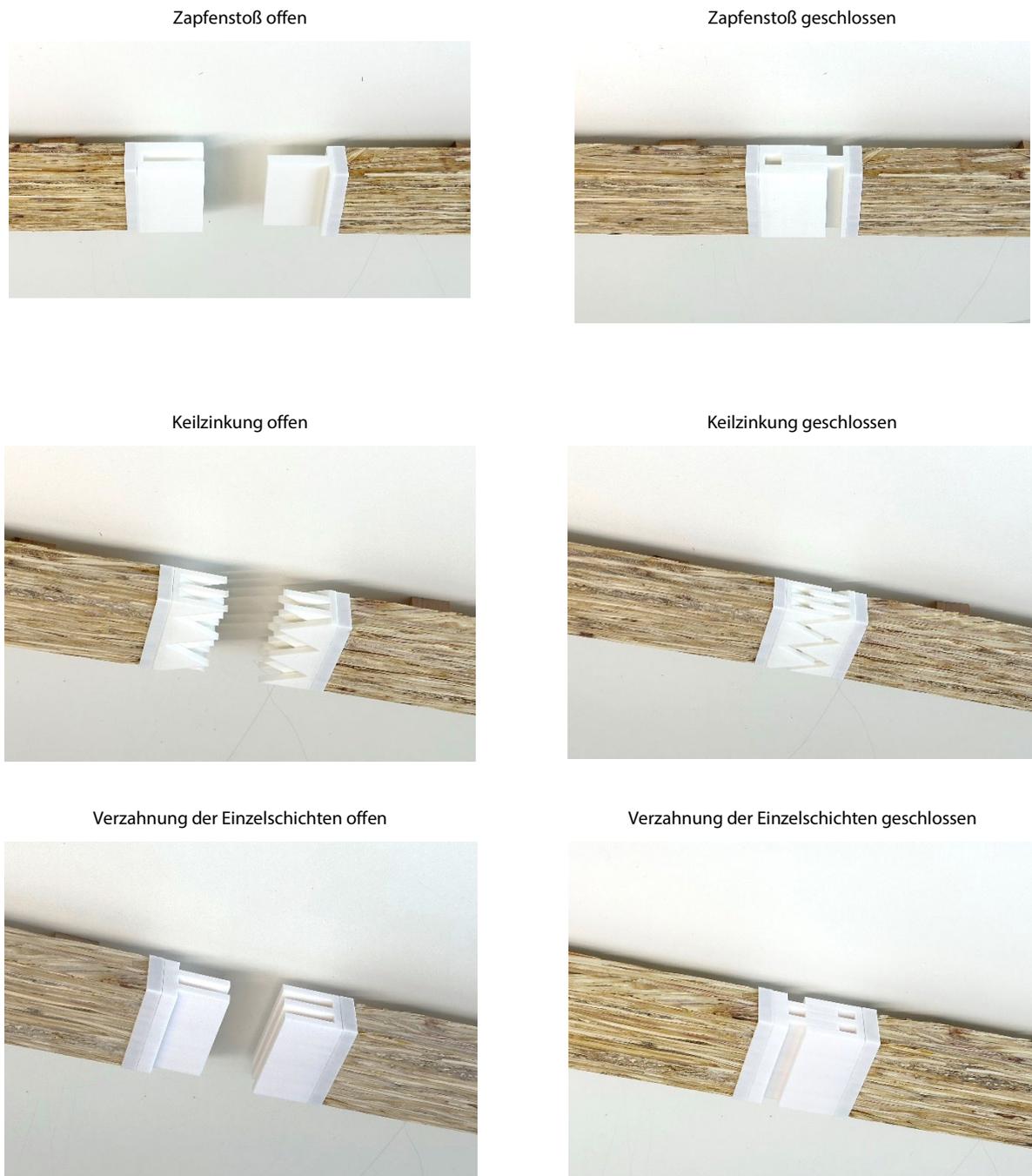


Abb. 77
Darstellung von Knotenpunkten und Balken-Stützen-Anschlüssen

Knotenpunkt mit Kunstpressholz offen



Zapfenstoß geschlossen



Knoten mit Keilzinkung offen



Knoten mit Keilzinkung geschlossen



Anschluss Stütze Balken offen



Anschluss Stütze Balken geschlossen



Quelle: P. v. Oheimb-Loup

4 Schlussbetrachtung

4.1 Zusammenfassung und Resümee

Fünf Meilensteine wurden für dieses Projekt formuliert (vgl. Kap. 2.4.2).

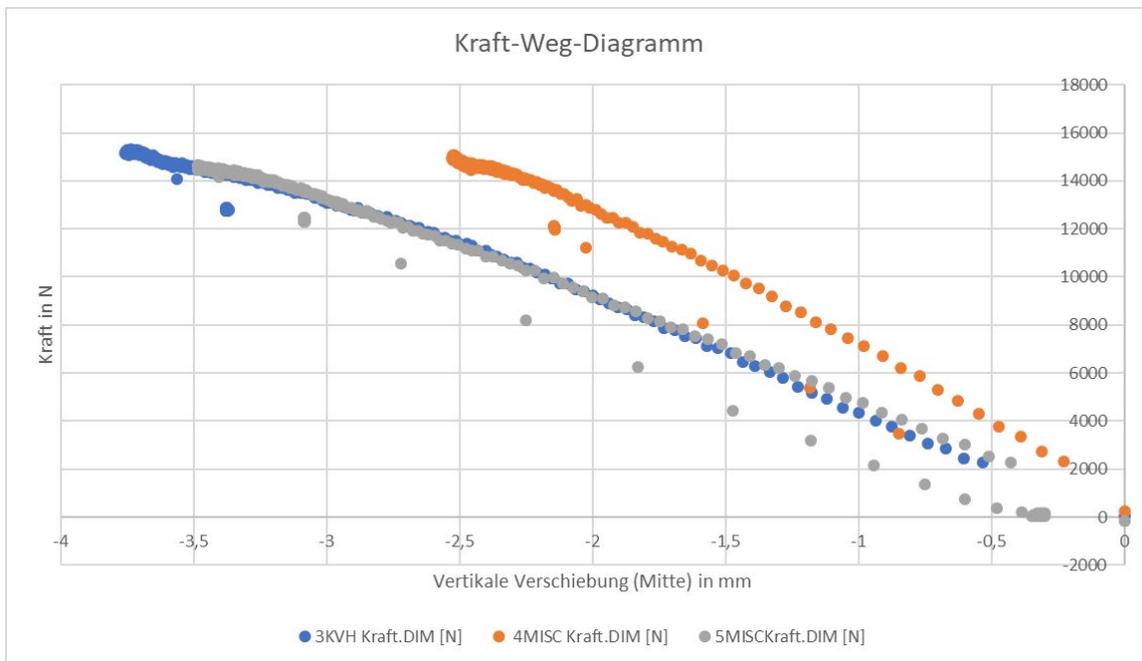
- a) Gelingt es Material ausreichender Qualität und Menge zu beschaffen und für eine Verklebung vorzubereiten? Die Zielerreichungskriterien wurden hier vollumfänglich erreicht, es wurde ausreichend Material beschafft und für die Verklebung vorbereitet.
- b) Der zweite Meilenstein beschäftigt sich damit, ob es überhaupt gelingt aus Miscanthus-Spänen kantholz-ähnliche Tragelemente wie Balken und Stützen herzustellen. Verschiedene kantholz-ähnliche Tragelemente wurden durch Verkleben von Miscanthusspänen in Form von Stützen und Trägern hergestellt, womit auch im zweiten Meilenstein die Kriterien, die das Erreichen des Zieles diese Meilensteins beschreiben erfüllt wurden.
- c) Im dritten Meilenstein wurden die Konditionen für eine erfolgreiche Bewertung der zu entwickelnden Produkte hinsichtlich der Ökobilanz untersucht. Dies entspricht auch den Zielerreichungskriterien, erste Einschätzungen lassen vermuten, dass Baustoffe aus Miscanthus eine gute Ökobilanz aufweisen. Es wurde bei diesen Voruntersuchungen aber auch deutlich, dass aufgrund des experimentellen Status der bisher hauptsächlich händisch hergestellten Prototypen für eine belastbare ökobilanzielle Aussage umfangreiche weitere Untersuchungen erforderlich werden.
- d) Der vierte Meilenstein, das Testen von Prototypen im Vergleich zu Holzwerkstoffen konnte nicht nur planmäßig, sondern auch mit dem erfreulichen Ergebnis abgeschlossen werden, dass bei den neuen Materialien Festigkeitswerte erreicht wurden, die mit Bauholz vergleichbar sind.
- e) Der fünfte Meilenstein, Untersuchungen zu verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten der erstellten Bauelemente, wurde bearbeitet. Modellhaft wurden Beispiele für die Anwendungen Stütze/ Träger oder Fachwerkträger dargestellt. Hier sind weitere Untersuchungen und Entwicklungsschritte für die effiziente Anwendung von Konstruktionswerkstoffen aus Miscanthus erforderlich.

Wenn es auch dem Projektumfang nicht ganz gerecht wird, die Projektergebnisse mit zwei Abbildungen zusammenzufassen, sagen die nachfolgenden Abbildungen (Abb. 78 und 79) viel über den Erfolg des Projektes aus. Das Foto zeigt den mit Knochenleim (und PU-Leim zwischen den Plattenstreifen) gebundenen Miscanthusbalken, der im Belastungstest in der Grafik darunter durch den orangen Kraft-Weg-Verlauf dargestellt wird. Die Steifigkeit ist hier sogar noch etwas besser als die von KVH.

Abb. 78
Miscanthusbalken knochenleimgebunden



Abb. 79
Vergleich von KVH-Balken (blau), epoxidharzgebundenem Miscanthusbalken (grau) und knochenleimgebundenem Miscanthusbalken (orange), Wiederholung von Abb. 52



Quelle: M. Wirths

In der Projektlaufzeit wurden Geräte und Verfahren für die Verarbeitung von Miscanthus x giganteus zu holzerkstoffähnlichen Materialien entwickelt. Mit der als „Miscanthustiger“ bezeichneten Maschine ist ein effizientes Schälen, Aufrauen und Aufspießen für die Produktion im Labormaßstab möglich. Damit konnte das größte Problem hinsichtlich einer Verklebung von Miscanthusspänen, die äußerst glatte Oberfläche der Halme, gelöst werden.

Sowohl mit biobasierten Bindemittel wie synthetischen Bindemitteln wurden neue Baumaterialien hergestellt. Im Projektrahmen wurde das Verkleben mit Knochenleim und mit Epoxidharz erfolgreich durchgeführt. Beide Bindemittel haben Vor- und Nachteile. Knochenleim hat den Vorteil eines komplett biobasierten Bindemittels und guter mechanischer Eigenschaften. Nachteilig ist vor allem die nicht gelöste Problematik der Wasserlöslichkeit. Der Kleberanteil war mit durchschnittlich 30% Gewichtsanteil relativ hoch. Die Proben weisen eine hohe Dichte auf.

Epoxidharzverbindungen sind wasserfest. Die mechanischen Ergebnisse waren auch zufriedenstellend. Die im Forschungsprojekt eingesetzten Harze sind zwar synthetisch, jedoch haben diese Bindemittel nach Einschätzung des Projektpartners Creavis eine gute Prognose, zukünftig mit einem hohen Bioanteil hergestellt werden zu können. Die Kosten liegen über denen von PMDI Klebstoffen. Jüngste Informationen der Creavis deuten darauf hin, dass auch diese Klebstoffgruppe für Miscanthus modifiziert und mittelfristig mit Bioanteil hergestellt werden kann. Da die tatsächliche Entwicklung von Klebstoffen außerhalb der Möglichkeiten in diesem Forschungsprojekt liegen, sind die angewendeten Bindemittel nur als Beispiele für gelungene Anwendungen zu sehen.

Dabei konnten sowohl optische als auch technische Parameter zufriedenstellend berücksichtigt werden. Mithilfe von E-Modulberechnungen an Plattenstreifen, wie auch durch Vergleichsmessungen bei Belastungstests von Probekörpern im Labormaßstab und in praxisnaher Größe, konnte belegt werden, dass die mechanische Leistungsfähigkeit der neu entwickelten Materialien mit Bauholz konkurrieren kann.

Erste Überlegungen zu spezifischen Konstruktionsweisen wurden angegangen und modellhaft Lösungen erarbeitet.

Wie zu Beginn des Kapitels erwähnt, wurde die wichtigste Zielsetzung des auf 18 Monate angelegten ersten Forschungspakets erreicht. Die mechanischen Eigenschaften der Baustoffe aus Miscanthus sind ebenso vielversprechend wie das Potential dieser Pflanze für eine positive Ökobilanz.

Die Entwicklung von neuen Baustoffen aus Paulownia für Primärkonstruktionen konnte dagegen in diesem Projekt nicht vorangetrieben werden. Versuche mit Kompositmaterial aus Paulownia und Miscanthus ergaben Werte, die eine konzentrierte Beschäftigung mit diesem Thema im Kontext dieses Forschungsprojektes als nicht lohnenswert herausgestellt haben. In der während der Projektlaufzeit von Prof. Dr. Ralf Pude und dem Autor betreuten Masterthesis von Luisa Pfingsten „Paulownia Holz als regional und schnell nachwachsender Werkstoff“ lautet (sehr komprimiert) das Fazit auch, dass sich die Festigkeiten von Paulownia nur für geringere Lasten eignen. Damit ist nicht gesagt, dass Bauten aus Paulownia keinen Sinn ergeben. Aufgrund der Schnellwüchsigkeit und der damit verbundenen CO₂-Speicherfähigkeit erscheinen weitere Untersuchungen hinsichtlich geeigneter Kostruktionen für dieses Material lohnenswert.

In diesem Verbundprojekt haben Kolleginnen und Kollegen von vier Hochschulen und einem Industrieunternehmen trotz relativ geringer Laufzeit und relativ kleinem Budget in gegenseitigem Respekt und viel Engagement zusammengearbeitet. Neben dem Kernteam haben weitere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler das Potential von Miscanthus für die Verwendung als Werkstoff kennengelernt. So kam es auch zu der Unterstützung hinsichtlich der Messtechnik durch den Lehrstuhl für Umformtechnik von Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel wie in Kapitel 3.6.2 beschrieben. Das Interesse an den außergewöhnlichen Eigenschaften von Miscanthus x giganteus ist über das aktuelle Forscherteam hinaus gewachsen.

4.2 Zukünftige Forschungsbereiche und Ausblick

Für die Entwicklung nachhaltiger Baustoffe aus Miscanthus sind die im Rahmen dieses Forschungsprojektes gewonnenen Erkenntnisse ein wichtiger Schritt. Es war zu erwarten, dass gerade durch erste positive Ergebnisse viele weitere Fragen aufgeworfen werden.

Hinsichtlich der Verfahrensprozesse in der Ernte, der Baustoffproduktion, der Modifizierung und dem Einsatz der Bindemittel, der Nachhaltigkeit in ökologischer **und** ökonomischer wie sozialer Hinsicht sowie spezifischer Konstruktionsweisen gibt es daher eine Unmenge an Fragen, die sich nun um so mehr lohnen, gestellt und Schritt für Schritt beantwortet zu werden.

Bereits bei Antragstellung wurde daher darauf hingewiesen, dass bei positiver Bilanz dieses hier beschriebenen Teils des Projektes weiterer Forschungsbedarf besteht.

Aus der Antragstellung:

Nach erfolgreicher Herstellung von stabförmigen Werkstoffen aus den beschriebenen Pflanzen, werden diese weiter hinsichtlich mechanischer und bauphysikalischer Eigenschaften und hinsichtlich ihrer Ökobilanz optimiert. Anschließend gilt es die Herstellung der Werkstoffe vor dem Hintergrund der Anforderungen der Holzindustrie zu verbessern sowie besonders geeignete Konstruktionsweisen für die neuen Werkstoffe zu entwickeln. Hier wird man sich zwar nah an der Verarbeitung von Vollholzprodukten orientieren, allerdings könnten ohnehin notwendige Verarbeitungsschritte wie z.B. das Verkleben der Miscanthushalme zu einem größeren Querschnitt dazu genutzt werden, im gleichen Vorgang beispielsweise Verbindungselemente dem Konstruktionselement hinzuzufügen, um ggfls. ein modulares Zusammenfügen der Einzelemente zu erleichtern. Durch das Herstellen von Demonstratoren in Form von einzelnen Tragelementen wie beispielsweise einem Fachwerkträger bis hin zu komplexeren Systemen wie einem Haus in Tinyhouse-Größe, können allein durch den Herstellungsprozess dieser Demonstratoren sowie mit in situ Belastungen oder Monitoring Erkenntnisse über die Qualitäten als Bauweise gewonnen werden. Mit einer Studie zur Ökobilanz der neuen Werkstoffe im Vergleich mit der Ökobilanz herkömmlicher biogener und nicht biogener Werkstoffe sowie einer sozialen Akzeptanzstudie zur Identifizierung potenzieller Markteintrittshemmnisse wird die Praxistauglichkeit der Forschungsergebnisse untermauert werden.

Eine Fortsetzung der hier umrissenen Forschung innerhalb des Innovationsprogramms „Zukunft Bau“ wird daher als sehr positiv und vielversprechend angesehen.



Foto: A. Zamponi, Auf Miscanthus kann man bauen!

4.3 Danksagung

Ein Team aus Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern von 4 Hochschulen und einem Industrieunternehmen werden vom „Miscanthusvirus“ angesteckt und wollen ein Projekt voranbringen, welches sich letztendlich, wie zugegeben viele andere Projekte in Wissenschaft und Forschung auch, der Herausforderung unserer Zeit - der Reduzierung des CO₂ Ausstoßes - widmet.

Ein großer Dank gilt allen, die in operativer oder administrativer Funktion zur Durchführung beigetragen haben. Es ist sehr schön, gemeinsam an etwas arbeiten zu dürfen, was vom ganzen Projektteam als spannend und gesellschaftlich relevant angesehen wird. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes fußen auf dieser Teamleistung und auf der Freundlichkeit vieler Kolleginnen und Kollegen, die zwar nicht im engen Sinn zum Projektteam gehörten, die aber auf „kleinem Dienstweg“ Vieles erst möglich gemacht haben. Unser Dank gilt nicht zuletzt dem BBSR als Mittelgeber und den verständnisvollen Fachbetreuerinnen und -betreuern des Projektes dort im Hause.

In Dankbarkeit möchten wir namentlich an Dr. Odo Wunnicke erinnern, der mit Weitsicht für künftige Forschung und Entwicklung auf Seiten unseres Industriepartners die Kooperation ermöglicht hat und im August 2023 im Alter von 51 Jahren verstarb.

Literaturverzeichnis

- Abel, S. S. C. & J. H., 2012. *Paludikulturpflanzen. Potenziale aufdecken mit der DPPP*, Greifswald: Universität Greifswald, Institut für Botanik und Landschaftsökologie.
- Aurand, S. u. B. H. J., 2021. Verbinder aus Kunstharzpressholz – Versuche mit ersten Prototypen für Traglasten bis 500 kN . In: *Bautechnik, Jahrgang 98*. s.l.:s.n.
- Bierttümpfel, A. e. a., 2011. *Miscanthus 15 Jahre Thüringer Ergebnisse*. Jena: Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Forsten, Umwelt und Naturschutz.
- Bundesministerium des Innern, f. B. u. H. (., kein Datum *Ökobaudat: Informationsportal Nachhaltiges Bauen*. [Online]
Available at: <https://www.oekobaudat.de/>
[Zugriff am 27. Januar 2024].
- Bundesministerium für Umwelt, N. n. S. u. V., kein Datum *17 Nachhaltigkeitsziele - SDGs*. [Online]
Available at: <https://www.bmu.de/themen/nachhaltigkeit/nachhaltigkeitsziele-sdgs>
[Zugriff am 18. Januar 2024].
- Bundesregierung, 2024. *Klimaschutzgesetz*. [Online]
Available at: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/tipps-fuer-verbraucher/klimaschutzgesetz-2197410>
[Zugriff am 15. Januar 2024].
- Bussemaker, M. J., Day, K. & Drage, G., 2017. Impact of technology choices. *Waste and Biomass Valorization*, 8 (7), pp. 2247-2261.
- China, F. o., 1998. *Flora of China, Vol. 18*. [Online]
Available at: http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=124177
[Zugriff am 28. Januar 2024].
- Chung, J. H. & Kim, D. S., 2012. Miscanthus as a potential bioenergy crop in East Asia. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 15 (2), pp. 65-77.
- Commission, E., 2018. *A sustainable bioeconomy for Europe*. [Online]
Available at: www.ec.europa.eu
- Cossel, M. v., Winkler, B., Mangold, A. & Lewandowski, I., 2020. Bridging the Gap between biofuels and biodiversity through monetizing environmental services of Miscanthus. *Earth's Future*, 8 (10).
- Deutsches Institut für Bautechnik, D., 2024. *Informationsportal Bauprodukte*. [Online]
Available at: <https://www.dibt.de/de/bauprodukte/informationsportal-bauprodukte-und-bauarten/produktgruppen/bauprodukte-detail/bauprodukt/klebstoffe-und-geklebte-verbindungen-im-holzbau>
- Emmerling, C. & Pude, R., 2017. Introducing Miscanthus to the greening measures of the EU common agricultural policy. *GCB Bioenergy*, 9 (2), pp. 274-279.
- Europäische Union, 2019. *EFRE Projektveröffentlichung*. [Online]
Available at: https://www.efre.nrw.de/fileadmin/user_upload/Oeffentlichkeitsarbeit/19-01-03_TM_Liste_der_Vorhaben_zum_Veroeffentlichen.pdf
[Zugriff am 11. März 2024].
- Evonik, 2022. *Sicherheitsdatenblatt Epodil 750, Version vom 09.12.2022*, s.l.: s.n.
- Evonik, 2022. *Sicherheitsdatenblatt: Amine Hardener 598, Version vom: 26.01.2022*, s.l.: s.n.

Formotitz, B. & F. M., 2009. *Miscanthus als Nachwachsender Rohstoff, Ergebnisse aus bayrischen Forschungsarbeiten*, Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe.

Gutbier, A., Sauer, E. & Schelling, F., 1922. Ueber die Einwirkung von Alaun auf tierischen Leim. *Kolloid-Zeitschrift* 30, p. 376–395 .

Hafner & Özdemir, 2023. *Comparative LCA study of wood and mineral non-residential building in Germany and related substitution potential*, *European Journal of Wood and Wood Products*. s.l.:s.n.

Hecker, U. & Weisgerber, H., 2014. Paulownia tomentosa. In: *Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie*. s.l.:Wiley .

Hermanns, et al., 2017. Miscanthus als Alternative für Leichtzuschläge im Wärmedämmputz. In: Pude, Hrsg. *Bioökonomische Anwendungs- und Forschungsfelder bei Miscanthus*. s.l.:CentMA GmbH, p. 58 ff..

Hettler, M., 2019. Erprobung der Einsatzmöglichkeiten von Dämmplatten aus Miscanthus. In: *Bioökonomie - aber nicht ohne Miscanthus*. Bonn: CentMa, p. 44 ff..

Hexion, kein Datum *Sicherheitsdatenblatt: EPIKOTE™ Resin 828*, s.l.: s.n.

Himken, M. & Lammel, J., 1997. Cultivation of Miscanthus under west European conditions. *Plant and soil*, 189 (1), pp. 117-126.

Holz vom Fach, o. J.. *Holz vom Fach*. [Online]
Available at: <https://www.holzvomfach.de/fachwissen-holz/holz-abc/kiri/>
[Zugriff am 11. März 2024].

IBAU, 2022. *Akademie IBAU*. [Online]
Available at: <https://www.ibau.de/akademie/wissenswertes/co2-ausstoss-im-gebaeude-und-bausektor-auf-rekordhoch/>
[Zugriff am 15. Januar 2024].

Katzer, S., 2017. *Verleimen mit Vakuum*. [Online]
Available at: <https://www.handwerkundbau.at/handwerk-bau/verleimen-mit-vakuum-so-gehts-7537>
[Zugriff am 28. Januar 2024].

Klaasen, L. & Schulz, B., 2021. Der Chef im Schilf. Interview zum Thema Forschung mit Prof. M. Wirths. *Deutsches Architektenblatt*, September, pp. 18-21.

Knaack, U. K. T. B. M. A. T., 2014. *Fassaden: Prinzipien der Konstruktion*. Berlin, Basel: Birkhäuser.

Lewandowski, I., 2016. The role of perennial biomass crops in a growing bioeconomy. In: *Perennial biomass crops for a resource-constrained world*. s.l.:Springer, pp. 3-13.

Lewandowski, I. & Kiesel, A., 2017. Miscanthus as biogas substrate. *GCB Bioenergy*, 9 (1), pp. 153-167.

Lexikon der Chemie, kein Datum [Online]
Available at: <https://www.chemie.de/lexikon/Holzleim.html>).
[Zugriff am 11. März 2024].

Massivum, 2020. *Paulownia*. [Online]
Available at: <https://www.massivum.de/wissenswertes/holz-und-geflechtarten/paulownia/>
[Zugriff am 28. Januar 2024].

Mecklenburg-Vorpommern, M. f. L. u. U., 2017. *Fachstrategie zur Umsetzung der nutzungsbezogenen Vorschläge des Moorschutzkonzeptes*, Schwerin: s.n.

Meisel, A., Wallner, B. & Schickhofer, G., 2015. Tragfähigkeit und Verformungsverhalten druckbeanspruchter Blattverbindungen. . In: *Bautechnik*, 92. Jg.. s.l.:s.n.

- Morbe, T. W., 2022, Rheinische Universität Bonn. *Setzfeste Einblasdämmung aus verschiedenen Schilfgräsern. Masterthesis (unveröffentlicht)*. [Online]
Available at: <https://www.inres.uni-bonn.de/nawaro/de/lehre/abschlussarbeiten>
- Mosandl, R. & Stimm, B., 2015. *Kurzportrait Blauglockenbaum*. [Online]
Available at: www.waldwissen.net
- Nelis, P. A. & Mai, C., 2019. Improved strength properties of three-layered particleboards with different core and surface layers based on kiri wood (*Paulownia* spp.). *European Journal of Wood and Wood Products*, 77 (5), p. 761–769.
- Neuhaus, H., 2017. Zimmermannsmäßige Verbindungen. . In: *Ingenieurholzbau: Grundlagen – Bemessung – Nachweise – Beispiele*. s.l.:s.n.
- Normung, D. I. f., 1993. *DIN EN 310: "Holzwerkstoffe; Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit"*. Berlin: Beuth.
- Normung, D. I. f., 2009. *DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz : Grundsätze und Anforderungen*. Berlin: Beuth.
- Normung, D. I. f., 2009. *DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz : Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Berlin: Beuth.
- Normung, D. I. f., 2011. *DIN EN ISO 11925: Prüfungen zum Brandverhalten - Entzündbarkeit von Produkten bei direkter Flammeneinwirkung*. Berlin: Beuth.
- Normung, D. I. f., 2012. *DIN 4074: Qualitätskriterien für konstruktive Vollholzprodukte*. Berlin: Beuth.
- Normung, D. I. f., 2012. *DIN 4074-1: Sortierung von Holz nach Tragfähigkeit - Teil 1, Nadelschrittholz*. Berlin: Beuth.
- Normung, D. I. f., 2016. *DIN 4102: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen*. Berlin: Beuth.
- Normung, D. I. f., 2016. *DIN/EN 204 Klassifizierung von thermoplastischen Holzklebstoffen für nichttragende Anwendungen*. Berlin: Beuth.
- Normung, D. I. f., 2023. *DIN EN 301: „Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen“*. Berlin: Beuth.
- Normung, D. I. f., 2023. *DIN EN 302-2: Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren: Teil 2 Bestimmung der Delaminierungsbeständigkeit*. Berlin: Beuth.
- Peters, G. M. & Svanström, M., 2016. *Life cycle assessment of forest products. Challenges and solutions*. Biobased Polymers Hrsg. s.l.:Springer.
- Peters, S., 2014. *Materialrevolution II. Neue nachhaltige und multifunktionale Materialien für Design und Architektur*. s.l.:Birkhäuser.
- Pfingsten, L., 2022; Rheinische Universität Bonn. *Paulowniaholz als regional und schnell nachwachsender Rohstoff. Masterthesis (unveröffentlicht)*. [Online]
Available at: <https://www.inres.uni-bonn.de/nawaro/de/lehre/abschlussarbeiten>
- Programm, U. E., 2021. *Methodological Sheets for subcategories in social life cycle assessment*, s.l.: Life Cycle Initiative.
- Pude, R., 2010. *Miscanthus - Netzwerke und Visionen*. Bonn: CentMa GmbH.
- Pude, R., 2017. *Bioökonomische Anwendungs- und Forschungsfelder bei Miscanthus*. Bonn: CentMa GmbH.
- Pude, R., 2019. *Bioökonomie – aber nicht ohne Miscanthus*. Bonn: CentMA GmbH.
- Pude, R., 2022. *Circular sustainability contribution. Miscanthus and Perennial Energy Grasses*. s.l.:CentMa GmbH.

- Pude, R., Wever, C. & Kraska, T., 2022. Sustainable resources. From plants to products. In: D. e. a. Lanzerath, Hrsg. *Bioeconomy and Sustainability*. s.l.:Springer.
- Scheer, C. & Peter, M., 2009. *Holz-Brandschutz-Handbuch*,. Berlin: Ernst & Sohn.
- Sons., J. W. &, Claus, T. & Seim, W., 2020. Zapfenverbindungen im Holzbau – bruchmechanische Analyse und Vorschlag eines Berechnungsmodells. In: *Bautechnik*, 97. Jg. . s.l.:s.n.
- Sperr, R., 2021. *Energiepflanzen*. [Online]
Available at: https://www.energiepflanzen.com/paulownia/#Kompaktinfo_zum_PaulowniaBlauglockenbaum
[Zugriff am 28. Januar 2024].
- Sponsel, W. W., 1987. *Lexikon der Anstrichtechnik 1*. 8. Auflage Hrsg. München: Callwey.
- Statistik, kein Datum *Preisentwicklung-der-erzeugerpreise-fuer-holz*. [Online]
Available at: (vgl. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1238743/umfrage/preisentwicklung-der-erzeugerpreise-fuer-holz/>).
[Zugriff am 11. März 2024].
- Stimm, B., Heinrichs, S. & Mosandl, R., 2015. Paulownia . In: G. Forstwirtschaften, Hrsg. *Potenziale und Risiken eingeführter Baumarten*. Göttingen: s.n., pp. 83-94.
- Timbertom, 2019. *Weltrekord! Der am schnellsten wachsende Baum*. [Online]
Available at: <https://timbertom.de/blog/weltrekord-paulownia>
[Zugriff am 28. Januar 2024].
- Umweltbundesamt, kein Datum *angepasster Waldumbau*. [Online]
Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/angepasster-waldumbau-0#modellgestutzte-simulation-der-gesamtwirtschaftlichen-effekte>
[Zugriff am 11. März 2024].
- UNEP, 2022. *Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi*.. [Online]
Available at: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/41133>
[Zugriff am 28. Januar 2024].
- Union, E., 2024. *EU*. [Online]
Available at: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
[Zugriff am 15. Januar 2024].
- United Nations Environment, U., 2022. *Guidelines for social life cycle assessment of products and organizations*. [Online]
Available at: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/34554>
[Zugriff am 27. Januar 2024].
- Völkening, G., Pude, R. & Moll, L., 2020. Increase of Miscanthus cultivation with new roles in materials production. a review. *Agronomy*, 10(2), p. 308.
- Winter, S. & Peter, M., 2021. *Holzbau Taschenbuch*,. 10. Auflage Hrsg. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.
- Zhai, P., Pirani, A. & Connors, S., 2021. Summary for Policymakers. In: C. U. Press, Hrsg. *Climate Change*. United Kingdom and New York: s.n., pp. 3-32.
- ZHU, Chao, Z. H. & Lu, X. Y. X. Y., 1986. *Paulownia in China. Cultivation and utilization*.. s.l., International Development Research Center.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Miscanthushalme	8
Abb. 2 Miscanthusfeld in Lindlar	11
Abb. 3 Paulowniaplantage am Campus	11
Abb. 4 In situ Belastung Fachwerkträger aus Miscanthusbündeln	12
Abb. 5 „Möbius Schleife aus Miscanthus“ Kunstprojekt, Prof. Willem-Jan Beeren und Prof. Dr.-Ing. Mathias Wirths	12
Abb. 6 Workbox	13
Abb. 7 Demonstrationsgebäude „workbox“ aus Miscanthus und Paulownia im Bauprozess	13
Abb. 8 Oberfläche Miscanthus im Rasterelektronenmikroskop	13
Abb. 9 "Miscanthusbiber"	14
Abb. 10 Im EFRE-Projekt (AZ0500036) entwickelte Maschine zur Aufrauhung der Miscanthusoberfläche	14
Abb. 11 Organigramm Forschungsteam und Förderer	16
Abb. 12 Methodischer Ansatz - Iteration	17
Abb. 13 Unterschiedliche Verarbeitungsstufen von Miscanthus x giganteus	20
Abb. 14 Entwurf Miscanthusaufspleißer „Miscanthustiger“	21
Abb. 15 Inbetriebnahme Miscanthusaufspleißer	21
Abb. 16 Experimente hinsichtlich des Verhaltens von Miscanthushalmen bei Druck und Hitze	22
Abb. 17 Ausgangsprodukt	22
Abb. 18 Mit Miscanthus beschickte Heißpresse	22
Abb. 19 Platte mit Weißleim als Bindemittel	23
Abb. 20 Platte mit Knochenleim als Bindemittel	23
Abb. 21 Aufnahme verleimter Miscanthushalmfragmente im REM	23
Abb. 22 Vergrößerte Darstellung der Vernadelung	23
Abb. 23 Platte mit Knochenleim als Bindemittel	24
Abb. 24 Plattenstreifen für den Drei-Punkt-Biegeversuch	24
Abb. 25 Drei-Punkt-Biegeversuch, Prüfmaschine Fa. Hess	25
Abb. 26 Verleimen der Knochenleimstreifen zu einem Biegeträger in Labormaßstab	26
Abb. 27 Biegeträger aus Miscanthus	26
Abb. 28 Biegeträger aus Paulownia (mittig) und Miscanthus (außen)	26
Abb. 29 Ansicht der drei Biegeträger	26
Abb. 30 Biegeträger aus Miscanthus	27
Abb. 31 Biegeträger aus Nadelholz	27

Abb. 32 Biegeträger Kompositmaterial, Miscanthus und Paulownia	27
Abb. 33 Kraftaufwand für eine Verformung von 3mm	28
Abb. 34 Überprüfung der Knochenleimproben mit und ohne zugesetztem Alaun hinsichtlich der Wasserlöslichkeit	29
Abb. 35 Verschiedene Druckstäbe aus Miscanthus	30
Abb. 36 Biege-Druck-Prüfung eines Probekörpers	32
Abb. 37 Stütze mit Bindemittel Modellgips, Ergebnis Maximallast 7.728,05 N	32
Abb. 38 Ergebnis Stützen-Druck-Versuch, Bindemittel Modellgips	32
Abb. 39 Stütze mit Bindemittel Montagekleber (PU), Maximallast 15.039,60 N	33
Abb. 40 Ergebnis Stützen-Druck-Versuch, Bindemittel Montagekleber	33
Abb. 41 Stütze mit Bindemittel Epoxidharz, Maximallast: 19.541,93 N	34
Abb. 42 Ergebnis Stützen-Druck-Versuch, Bindemittel Epoxidharz	34
Abb. 43 Diagramm Bindemitteluntersuchung Creavis	35
Abb. 44 Prüfobjekte	37
Abb. 45 Ausgangsmaterial für eine Platte (ca. 3kg Miscanthus)	38
Abb. 46 Plattenstreifen für einen Balken, zu erkennen sind die längs und quer ausgerichteten Fasern.	39
Abb. 47 Balken im Vakuumsack vor dem Schließen der Heißpresse	39
Abb. 48 V. li. n. re.: Trager knochenleimgebundene Plattenstreifen mit PU verklebt, Trager komplett epoxidharzgebunden, Trager mittig aus Paulownia und epoxidharzgebundenem Miscanthus in den Randbereichen, komplett epoxidharzgebundener Trager aus ganzen Halmen	39
Abb. 49 V. li. N. re. M. Sc. Maximilian Schmidt, Dr.-Ing. Rainer Steinheimer, Prof. Dr.-Ing. Mathias Wirths bei der Vorbereitung der Biegeversuche im Labor des Lehrstuhls fur Umformtechnik von Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel	41
Abb. 50 Versuchsaufbau mit dem GOM Aramis SRX Meßsystem	42
Abb. 51 Verfolgung der Verformung mit Hilfe der angebrachten Messpunkte	42
Abb. 52 Vergleich von KVH-Balken (blau), epoxidharzgebundenem Miscanthusbalken (grau) und knochenleimgebundenem Miscanthusbalken (orange)	43
Abb. 53 Vergleich von KVH-Balken (blau), epoxidharzgebundenem Miscanthusbalken (orange)	44
Abb. 54 Vergleich von KVH-Balken (blau) und knochenleimgebundenem Miscanthusbalken (orange)	44
Abb. 55 Vergleich von KVH-Balken (blau), epoxidharzgebundenem Miscanthus/Paulowniakompositbalken (grau) und einem Paulownia Vollholzbalken (orange)	45
Abb. 56 Vergleich von KVH-Balken (blau) und, epoxidharzgebundenem Miscanthusbalken aus ganzen Halmen (orange)	46
Abb. 57 Belastung eines Miscanthusbalkens bis zum Bruch in Bild und Diagramm sowie rechnerische Bruchlast eines Holzbalkens gleicher Abmessung	47
Abb. 58 Die drei Sulen der Nachhaltigkeit	48
Abb. 59 Nachhaltigkeitsziele der UN	49
Abb. 60 Anbau und Ernte von Miscanthus	52
Abb. 61 Zerfasern der Halme	52

Abb. 62 Ansetzen des Klebers	53
Abb. 63 Heißpresse	53
Abb. 64 Heißgepresste Platte aus Miscanthusfasern	55
Abb. 65 Durch die Produktion bedingter Schichtenaufbau Miscanthusbalken	57
Abb. 66 Zapfenstoß	58
Abb. 67 Hakenblatt	59
Abb. 68 Gerberstoß mit Holznägeln	59
Abb. 69 Verzahnung von Miscanthushalmen	60
Abb. 70 Zinkenverbindung	61
Abb. 71 Schicht-Keilzinkung als Längsverbindung	62
Abb. 72 Schicht- Keilzinkung als Knotenpunkt	63
Abb. 73 Mittige Anordnung eines Kunstharzpressholzes	64
Abb. 74 Möglicher Knotenpunkt mit Kunstharzpressholz	64
Abb. 75 „Kompositmanschetten“ bei Längsverbindungen	65
Abb. 76 Darstellung verschiedener Verbindungen von Miscanthus mit 3D-Druck-Anschlüssen	66
Abb. 77 Darstellung von Knotenpunkten und Balken-Stützen-Anschlüssen	67
Abb. 78 Miscanthusbalken knochenleimgebunden	69
Abb. 79 Vergleich von KVH-Balken (blau), epoxidharzgebundenem Miscanthusbalken (grau) und knochenleimgebundenem Miscanthusbalken (orange), Wiederholung von Abb. 52	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Darstellung der ermittelten E-Moduli	25
Tabelle 2 Biege-Druck-Versuche bis zum Bruch	31
Tabelle 3 Testmatrix	36
Tabelle 4 Abmessungen von Prüfkörpern	40