

eingereicht/handed in: 14.02.2022
angenommen/accepted: 19.07.2022

Robert Hartmann, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Florian Puch
Fachgebiet Kunststofftechnik, Technische Universität Ilmenau

Entwicklung eines Herstellungsprozesses für umweltfreundliche und ressourceneffiziente Formteile aus lastgerecht verstärkten Holz-Kunststoff-Verbunden

Dieser Beitrag beschreibt einen Herstellungsprozess für umweltfreundliche und ressourceneffiziente Formteile aus neuartigen Holz-Kunststoff-Verbunden (HKV). Bei der Herstellung von HKV werden anisotrope mechanische Eigenschaften von langen, schlanken Holzspänen (Strands) durch deren lastgerechte Positionierung auf dreidimensionaler Werkzeugoberfläche anwendungsoptimiert ausgenutzt und umweltverträgliche duro- als auch thermoplastische Kunststoffe als Alternative zu den konventionellen formaldehyd- oder isocyanathaltigen Bindemitteln eingesetzt.

Development of a production process for environmentally friendly and resource-efficient molded parts consisting of load-appropriate reinforced wood-plastic composites

This article describes a production process for environmentally friendly and resource-efficient molded parts consisting of innovative wood chip plastic composites (in German: Holz-Kunststoff-Verbunde, HKV). In the manufacture of HKV, anisotropic mechanical properties of long, slender wood chips (strands) are used application-optimized by positioning them in the load-bearing direction on a three-dimensional tool surface and by using environmentally friendly thermosetting or thermoplastic polymers as an alternative to conventional formaldehyde- or isocyanate-based binders.

Entwicklung eines Herstellungsprozesses für umweltfreundliche und ressourceneffiziente Formteile aus lastgerecht verstärkten Holz-Kunststoff-Verbunden

R. Hartmann, F. Puch

1 EINLEITUNG

Deutschland ist mit einer jährlichen Produktionsleistung von mehr als 12 Millionen Kubikmetern einer der bedeutendsten globalen Hersteller plattenförmiger Holzwerkstoffe [1],[2]. Diese Werkstoffe sind aufgrund ihrer CO₂-Speicherwirkung (1 Kubikmeter Holz bindet ca. 1 Tonne CO₂), ihrer Eignung zur Substitution nicht-nachwachsender Rohstoffe und ihrer geringen Herstellungskosten aktuell branchen- und länderübergreifend besonders nachgefragt [3-5]. Um den stetig wachsenden Anforderungen an effiziente Leichtbau-, Transport-Logistik-, Bau- und Möbelanwendungen gerecht zu werden wird daher weltweit an umweltfreundlichen Klebstoffsystemen, effizienzsteigernden Verarbeitungsprozessoptimierungen sowie innovativen neuen Verfahren geforscht, die zu einer Verbesserung der erreichbaren Werkstoffeigenschaften von Holzverbundwerkstoffen führen. In dieser Arbeit wird ein Herstellungsprozess für umweltfreundliche und ressourceneffiziente Formteile bestehend aus Holz-Kunststoff-Verbunden (HKV) beschrieben. Der Herstellungsprozess erlaubt es, lange und großflächige Holzspäne mit einem hohen Aspektverhältnis, sogenannte Strands, gezielt lastgerecht auszurichten, mit umweltverträglichen Thermo- als auch Duroplasten zu benetzen und in einem geschlossenen Werkzeug unter Temperatur und Druck zu dreidimensional komplex geformten und nacharbeitsarmen Hybridbauteilen zu verbinden. Als innovativer Strand-verstärkter Verbundwerkstoff weisen HKV im Vergleich zu konventionellen Holzspanwerkstoffen erhebliche Vorteile auf und eröffnen dadurch neue Nutzungs- und Recyclingmöglichkeiten [6-8].

Der in Bild 1 gezeigte Vergleich von HKV mit konventionellen Werkstoffen im doppellogarithmischen Ashby-Diagramm verdeutlicht, dass HKV die vorhandene Vakanz im Bereich der Dichte um 1 g/cm³ und einem Elastizitätsmodul über 10 GPa besetzen können. Die deutlich erkennbar hohe Materialeffizienz von HKV gekoppelt mit niedrigen gewichtsspezifischen Kosten und der kurzen Lieferkette aufgrund regionaler Verfügbarkeit von Nadelholz machen HKV-Formteile besonders attraktiv.

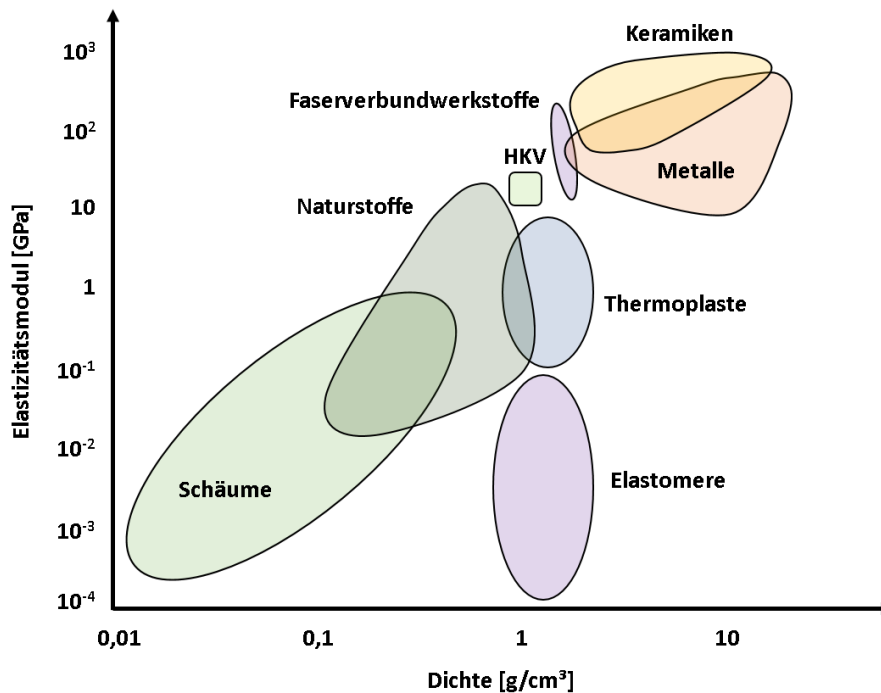


Bild 1: HKV im dichtespezifischen Werkstoffvergleich [nach 9]

2 STAND DER TECHNIK

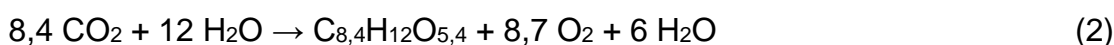
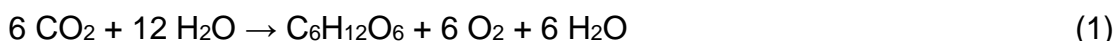
2.1 Nadelholz

2.1.1 Vorkommen und Nutzung in Deutschland

Die dritte Bundeswaldinventur hat im Jahr 2012 [10] gezeigt, dass über die Hälfte der 10,9 Mio. Hektar Waldboden in Deutschland von Nadelbäumen, überwiegend Fichte und Kiefer, bewachsen ist. Nadelholz ist für viele Branchen nicht nur aufgrund des geringen Preises und der guten Bearbeitbarkeit attraktiv, sondern ist im Vergleich zu Laubholz widerstandsfähiger gegenüber Wittereinflüssen, Holzschädlingen und Chemikalien sowie aufgrund geringer Schwindung auch formstabiler [11]. In der Bauindustrie wird Nadelholz vor allem für den Innenausbau durch Herstellung von Balken, Sparren, Brettern und Spanplatten genutzt. Die Verpackungs- und Logistikbranche setzt Paletten und Ladungsträger bestehend aus Nadelhölzern ein. Die Papierbranche nutzt die Industrienadelhölzer zur Gewinnung von Zellstoff und das anfallende Kronen- und Restholz wird zur Energie- und Wärmeerzeugung verwendet [5],[12].

2.1.2 CO₂-Speicherwirkung

Nach Wagenführ und Scholz sind die nur wenige Nanometer langen Cellulosemoleküle (C₁₂H₂₀O₁₀) mit ca. 50 Ma% der Hauptbestandteil des Nadelholzes. Sie sind unverzweigt und bestehen aus mehreren hunderten bis zehntausenden Glucose- (C₆H₁₂O₆) bzw. Cellobiose-Einheiten (C₁₂H₂₂O₁₁) [13]. Hasch verdeutlicht das hohe CO₂-Einsparungspotential von Holz sehr anschaulich an der Reaktionsgleichung zur photosynthetischen Entstehung von Glucose (1) und der darauf aufbauenden Modellgleichung zur Berechnung der Masseströme beim Holzaufbau (2) [14].



Die Modellgleichung zeigt, dass in 1000 kg Holz über 1800 kg Kohlenstoffdioxid gebunden sind. Holz bietet daher bei Ausnutzung der anisotropen Werkstoffeigenschaften ein hohes Potential, konventionelle nicht-nachwachsende Materialien zu substituieren und gleichzeitig klimaschädliches Treibhausgas zu speichern.

2.2 Holzwerkstoffe

Dunky und Niemz zeigen, dass Holzwerkstoffe überwiegend plattenförmig durch das Fügen von Holzpartikeln mittels Kleben hergestellt werden. Durch die Zerkleinerung des Rundholzes können anisotrope Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit von Größe und Form der Holzpartikel anwendungs- und lastgerecht ausgenutzt werden. Weitere Vorteile sind variable Abmessungen durch Endlosfertigung und eine zum Teil höhere Festigkeit als Vollholz, bedingt durch Verminderung von Defekten und Wuchsfehlern [11].

2.2.1 Einteilung

Rundholz kann in Schnittholz, Furnier, Späne und Fasern zerkleinert werden [15]. Aus dem Schnittholz (meist Bretter) werden Massivholzplatten, Brett-schichtholz oder Kreuzbalken hergestellt. Aus den nur wenige mm hohen Schäl-furnieren werden mehrlagige Sperr- (Einzellagen mit jeweils 90° Winkelversatz) oder Schichtholzplatten (parallele Ausrichtung der Einzellagen) hergestellt. Späne werden je nach Größe zur Herstellung von Spanplatten (beinhalten Späne aus Koppelprodukten der Schnittholzproduktion wie z. B. Sägespäne, Hobelspäne, Kappstücke, Schwarten und Spreißel sowie Späne aus der Altholzaufbereitung) oder OSB, seltener auch als Grobspanplatten bezeichnet, (Strands mit über 75 mm Länge) genutzt. Fasern, die durch Dämpfen, Kochen und Aufschließen entrindeter Hackschnitzel gewonnen werden, werden im Naß-

(Holzfaserdämmplatte - HFD, Holzfaserplatte hart - HFH) oder Trockenverfahren (mitteldichte Faserplatte - MDF, hochdichte Faserplatte - HDF) verarbeitet [16].

2.2.2 Prozessrelevante Werkstoffeigenschaften von Strands

Die in den experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit verwendeten Kiefernholzstrands bestehen im Wesentlichen aus den wasserunlöslichen Grundbausteinen Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Diese Grundbausteine reagieren sehr verschieden auf prozessbedingte Temperatur- und Feuchteänderung. Das Matrixpolymer Lignin ist hydrophob und zeigt einen Glasübergangstemperaturbereich von ca. 50 bis 100 °C. Die Hemicellulose- und Cellulosefasern sind hygroskopisch und weisen eine Glasübergangstemperatur von ca. 40 bzw. über 100 °C auf [17]. Dies führt dazu, dass die Elastizität der Zellwand abhängig von den vorherrschenden Verarbeitungsbedingungen von ca. 22 GPa (bei 8 % Feuchtegehalt und 30 °C) auf ca. 13,5 GPa (bei 8 % Feuchtegehalt und 100 °C) bzw. 8 GPa (bei Restfeuchte nahe 0 % und 225 °C) absinken kann [18]. Diese Elastizitätsänderung der Zellwand hat wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und das Verformungsverhalten der Strands. Die mechanische Festigkeit von Nadelholz steigt linear mit dessen wachstumsbedingt variierender Dichte, respektive dem Spätholzanteil, an. Mit zunehmendem Winkelunterschied zwischen Wachstums- und Belastungsrichtung (Faser-Last-Winkel), zunehmender Feuchte und Temperatur sinkt der Elastizitätsmodul deutlich ab. Bei Feuchteänderung unterhalb des Fasersättigungsbereiches (ab ca. 30 % bei Nadelholz) muss zudem das richtungsabhängige Quell- und Schwindungsverhalten der Strands beachtet werden. Bei Kiefernholz beträgt das Schwind- bzw. Quellmaß tangential 0,29 %, radial 0,17 % und longitudinal 0,01 % je 1 % Feuchteänderung [13].

Niemz und Sonderegger zeigen, dass neben den Prozessbedingungen auch die Geometrie der Strands signifikanten Einfluss auf die erreichbaren mechanischen Eigenschaften hat. Aus der Forschung ist bekannt, dass die höchstmögliche Biegefestigkeit mit Strands erreicht wird, die über 80 mm lang, zwischen 8 – 10 mm breit und ca. 1 mm stark sind [19].

Nach Dunky und Niemz müssen zwei weitere Effekte die bei der Verarbeitung von Strand-basierten Preforms zu Formteilen berücksichtigt werden. Zum einen der „spring-back“ Effekt als sofortige elastische Rückstellung der Verformung bei Abnahme der Last, die die Verformung verursacht hat und zum anderen der „set-recovery“ Effekt als langfristige feuchte- oder temperaturinduzierte Verformung des verdichteten Holzes zurück in den Ausgangszustand [11]. Der spring-back Effekt muss bei der Auslegung der Presszeit und -temperatur (Mindestfestigkeit des Klebstoffsystems) beachtet werden. Der set-recovery Effekt beeinflusst das Verhalten der Formteile beim Übergang von prozessbedingter Niedrigfeuchte zur umgebungsabhängigen Normalfeuchte.

2.2.3 Strand-basierte Holzwerkstoffe

Konventionelle Strand-basierte plattenförmige Holzwerkstoffe werden überwiegend dreilagig als OSB mit zweiachsiger Spanausrichtung hergestellt [20],[21]. OSB bestehen üblicherweise aus ca. 96 Ma% Holzstrands (Nadel- als auch Laubholz - bspw. Kiefer, Douglasie, Erle, Pappel), ca. 2,5 Ma% Klebstoff sowie ca. 1,5 Ma% Hydrophobierungsmittel (üblicherweise Emulsionen). Je nach Anwendungsbereich (Feuchte, Temperatur und mechanische Belastung) werden die Anteile entsprechend den Anforderungen angepasst [12]. Im OSB-Herstellungsprozess werden die Strands mit einer Breite von ca. 15-25 mm, Länge von ca. 75-150 mm und Stärke von ca. 0,6-1 mm in großvolumigen Einzugtrommeltrockern oder seltener in Bandtrocknern auf 2-3 % Feuchtigkeitsgehalt getrocknet, beleimt und mechanisch mittels Scheibenwalzen (Deckschichtstreuung zur Längsorientierung in Produktionsrichtung) sowie Fächerwalzen (Mittelschichtstreuung zur Querorientierung der Strands) in speziellen Streuköpfen endlos auf ein umlaufendes Textilband gestreut. Anschließend erfolgt die Übergabe auf ein Stahlband und die thermomechanische Verdichtung mittels kontinuierlicher Presse [16]. Randbereiche derartig hergestellter Rohplatten werden abschließend besäumt und die Deckschichten in seltenen Fällen geschliffen [11]. Geimer zeigt, dass Fallhöhe und Abstand der Scheibenwellen in den Streuköpfen bei der mechanischen Ausrichtung maßgebend für die erreichbare Genauigkeit der Spanorientierung und -verteilung sind [22].

Die Möglichkeiten zur prozessbedingten Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften von OSB sind in der Literatur bereits ausführlich beschrieben. [11], Wagenführ und Scholz verdeutlichen die Abhängigkeit mechanischer Eigenschaften von OSB von der Strandorientierung zur Belastungsrichtung, der Strandgeometrie, der Strandardichte, dem Schichtaufbau der Matten, der „Strandverbindungsgüte“ und der Klebstoffart sowie dem Klebstoffvolumenanteil [13]. Durch entsprechende Variation dieser Parameter können Spanplatten anwendungsorientiert und ressourceneffizient ausgelegt werden. So kann nach Lungulease et. al. bspw. zur Verbesserung der Kraftübertragung die Klebfläche zwischen den Strands maximiert werden, indem die Anzahl an Überlappungen (Strandlänge und -breite) sowie die Lagenanzahl (Strandhöhe) vergrößert werden [23]. Narin et. al. untersuchen die Abhängigkeit mechanischer Eigenschaften von OSB von Spanondulation und Klebefuge. Sie verdeutlichen, dass Ondulation und adhäsive Verbindung verwendeter Strands voneinander abhängig sind - je größer die Spanondulation ist, desto größer ist der Einfluss der Klebstoffsteifigkeit auf die Biegesteifigkeit der hergestellten OSB [24].

Hamzaçebi führt mittels Taguchi-Methode eine Optimierung von Prozessparametern bei der Herstellung von OSB durch. Dabei werden die Auswirkungen der Parameter Bindemittelanteil (3 bis 6 Ma%), Pressdruck (3,5 bis 4,5 MPa) und Presszeit (3 bis 7 min.) auf die Wärmeleitfähigkeit von OSB untersucht, um deren Dämmwirkung bei Verwendung als Baumaterial zu verbessern. Die Ergebnisse zeigen, dass der Bindemittelanteil den größten Einfluss nimmt, gefolgt von Pressdruck und Presszeit [25].

Way et. al. stellen einen Herstellungsprozess für einen Strand-basierten Sandwichaufbau vor (molded-core sandwich panels „MCP“). Dieser wird durch adhäsive Verbindung von zwei OSB-Deckschichten mit einer domförmig versteiften Kernschicht mit niedriger Dichte bestehend aus bidirektional geformten Holzstrands hergestellt. Das erheblich größere Verhältnis von Biegesteifigkeit zur Gesamtmasse von MCP im Vergleich zu OSB zeigt die hohe Struktureffizienz bei Biegebelastung [26].

Die Dimensionsstabilität von OSB kann durch Verringerung von deren Quell- und Schwindungsneigung verbessert werden. Hornus et. al. stellen dazu Versuchsergebnisse zur Extraktion der hygroskopischen Hemicellulosen aus Kiefernholzstrands vor [27]. Diese Vorbehandlung ist immer dann sinnvoll, wenn der Einsatz von Hydrophobierungsmitteln nicht ausreichend ist, um OSB in feuchter Umgebung einsetzen zu können. Sie konnten zeigen, dass eine derartige Vorbehandlung der Kiefernholzstrands eine Entfernung von Hemicellulosen erlaubt, ohne dabei Cellulose oder Lignin abzubauen. Die mit diesen vorbehandelten Strands hergestellten OSB zeigten eine deutlich verbesserte Dimensionsstabilität unter feuchten Bedingungen als konventionelle OSB.

2.2.4 Verdichtungsabhängige Permeabilität Strand-basierter Preforms

Haas et. al. zeigen, dass der Verdichtungsgrad eines Strand-Preforms maßgeblich dessen Gas- und Flüssigkeitspermeabilität [28] beeinflusst. Die bei der OSB- Herstellung aufgrund von Wasserverdunstung entstehenden Gasdrücke führen zu einer Dampfströmung von den Deckschichten, die in direktem Kontakt mit den Werkzeugoberflächen stehen, in die Kernschicht. Diese Dampfströmung wird gezielt als Wärmeübertragungsmechanismus zur Plastifizierung der Strands und Polymerisierung der duroplastischen Klebstoffsysteme genutzt. Um Porosität und Permeabilität der mattenförmigen OSB Preforms mathematisch zu beschreiben, wird der Preform als System überlappender Strands modelliert und Längs- sowie Querpermeabilität von Deck- und Kernschicht in Abhängigkeit von deren Dichte charakterisiert [29],[30]. Das Hohlraumvolumen eines Preforms wird meist aus Hohlräumen innerhalb der Strands und Hohlräumen zwischen Strands abgeschätzt. Relevante Auslegungsgrößen sind das Verdichtungsverhältnis (Prefomdichte zu Stranddichte) und das Höhenverhältnis (Prefomhöhe zu Strandhöhe).

Gartner et. al. stellen einen Versuchsaufbau zur Bestimmung der Flüssigkeitspermeabilität von Strand-Preforms nach dem Darcy-Gesetz vor. Sie zeigen, dass die Permeabilität abhängig von Fließrate, Formfüllzeit, Porosität, Strandabmessungen und -orientierung sowie den Eigenschaften des Duroplastsystems (Härtungsgeschwindigkeit, Viskosität, Benetzungsverhalten) ist. In den durchgeführten Experimenten wurden die Strands mit Polyethylen zu einem Preform verbunden. Dieser Preform wurde anschließend in ein Versuchswerkzeug mit Glasdeckel eingelegt und ein Duroplastsystem injiziert. Über das Verhältnis von Injektionsvolumenstrom (Zeit, Injektionsvolumen), Harzviskosität und Fließweglänge zu Preformquerschnittsfläche und Druckgradienten wurde mittels des Darcy-Gesetzes die Permeabilitätsmessung durchgeführt. Erkennt-

nisse der Arbeit sind, dass 1 % Polypropylenanteil ausreichend für die Preformstabilität (Transportfähigkeit) sind und der Preform „ausreichende Permeabilität“ für die Verarbeitung im RTM Prozess aufweist [31].

2.2.5 Klebstoffsysteme

Aktuelle Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Klebstoffsysteme zielen darauf ab, deren Hydrolysebeständigkeit zu verbessern sowie eventuelle umwelt- und gesundheitsschädliche Bestandteile zu minimieren. Es werden dazu alternative Systeme entwickelt (bspw. Additivierung von polymerem Diphenylmethandiisocyanat mit Nanocellulosefasern, Soja-substituiertes Phenol-Formaldehyd oder Beimischung von recyceltem Polypropylen), die hinsichtlich Verarbeitbarkeit, mechanischer Eigenschaften und Kosten vergleichbar zu konventionellen Systemen sind [11], [32-37]. Ein weiterer Fokus liegt auf der Entwicklung von Haftvermittlern für Thermoplast-basierte Systeme mit Zielstellung höchstmöglicher Grenzflächenhaftfestigkeit. So untersuchen Shen et. al. unter anderem die Grenzflächenhaftfestigkeit von thermoplastgebundenen Holzstrandwerkstoffen (oriented strand-thermoplastic composites „OSPC“) bei Verwendung von unterschiedlichen Haftvermittlern (3-Aminopropyltriethoxysilan Typ KH550 oder Methylendiphenylisocyanat) und Thermoplasten (LDPE, HDPE, PP oder PVC) [38]. Die höchste mechanische Stabilität zeigten OSPC, die aus PVC-Folien und MDI als Haftvermittler hergestellt wurden (Bruchfestigkeit von 91,9 MPa, Elastizitätsmodul von 10,9 GPa und Dickenschwellung von 2,4 %).

2.3. Verfahren zur Herstellung faserverstärkter Kunststoffe

Rajak et. al. geben einen aktuellen Überblick zu relevanten Herstellungsverfahren und erreichbaren mechanischen Eigenschaften von faserverstärkten Kunststoffen [39]. *Tabelle 1* zeigt dazu einen Auszug für die Verarbeitung und Anwendung naturfaserverstärkter Kunststoffe.

Nach Hennig und Moeller ist für eine hohe Verstärkungswirkung neben den Werkstoffkennwerten von Faser und Matrix sowie dem Faseranteil auch die sich zwischen beiden ausprägende Grenzschicht relevant. Da die Faser-Matrix Haftung vom Anteil an mechanischer, chemischer sowie physikalischer Adhäsion abhängig ist wird prozessseitig immer eine vollständige Benetzung der Fasern angestrebt. Je nach Länge der Faserverstärkung wird in Hochleistungsfaserverbundwerkstoffe mit gerichteter, kontinuierlicher bzw. endloser Faserverstärkung (Faserlänge > 50 mm, entspricht Bauteillänge) und in quasihomogene Faserverbunde mit diskontinuierlicher ungerichteter Lang- (5-50 mm) oder Kurzfaserverstärkung (0,1-5 mm) unterschieden. Als Matrix können dabei duroplastische als auch thermoplastische Kunststoffe verwendet werden [40].

Materialien		Verfahren	Anwendung
Faser	Kunststoff		
Sisal	Polypropylen, Polystyrol, Epoxidharz	Handlaminieren, Formpressen	Automobilkarosserieteile, Dachbleche
Hanf	Polyethylen, Polypropylen, Polyurethan	Resin Transfer Molding, Formpressen	Möbel, Automobilformteile
Kenaf	Polylactid, Polypropylen, Epoxidharz	Formpressen, Pultrusion	Werkzeuge, Lager, Automobilformteile
Flachs	Polypropylen, ungesättigtes Polyesterharz, Epoxidharz	Resin Transfer Molding, Faserspritzen, Handlaminieren, Vakuuminfusion	strukturell, textil
Jute	Polypropylen	Handlaminieren, Formpressen Spritzguss	Seile, Dachbleche, Türverkleidungen
Kokus	Polypropylen, Epoxidharz, Polyethylen	Extrusion Spritzguss	Automobilformteile, Bauplatten, Dämmplatten

*Tabelle 1: Verarbeitung und Anwendung von naturfaserverstärkten Kunststoffen
[nach 39]*

Herstellungsverfahren für Duroplast-basierte Hochleistungsfaserverbundwerkstoffe, die technologisch ähnlich zum HKV Prozess sind, sind das Resin Transfer Molding (hier werden trockene Fasermatten in ein Werkzeug drapiert und mit einem Harz-Härter-Gemisch unter Druck umgossen), die Vakuuminfusion (hier werden trockene Fasermatten in eine Form drapiert, diese mit einer Vakuumfolie verschlossen und das Harz-Härter-Gemisch mittels Vakuum injiziert), das Form-/ bzw. Nasspressen (hier werden trockene Fasermatten in ein Werkzeug drapiert, das Harz-Härter-Gemisch aufgegossen und durch den Schließvorgang des Werkzeugs im Formnest verteilt), das Prepreg-Verfahren (hier werden vorimprägnierte Verstärkungsmaterialien verarbeitet) und das Tape- bzw. Fiber Placement (hier werden faserverstärkte Kunststoffbänder robotergeführt unter Druck und Temperatur entlang eines vorgegebenen Pfades auf eine

Form abgelegt). Mit derartig hergestellten Halbzeugen wird ein Faservolumengehalt zwischen 50% und 60% erreicht, und als Matrices können ungesättigte Polyesterharze, Vinylesterharze, Epoxidharze und Phenolharze eingesetzt werden. Übliche Verstärkungsmaterialien sind Glas-, Kohlenstoff- Aramid- und Naturfasern (pflanzlich, tierisch, mineralisch). Bei den Verfahren zur Herstellung Thermoplast-basierter Hochleistungsfaserverbundwerkstoffe sind neben dem Tape-bzw. Fiber Placement auch das Organoblechverfahren (hier werden mehrere Lagen Kunststofffolien und Endlosfaserhalbzeuge diskontinuierlich verpresst oder per Extrusion kontinuierlich hergestellt und anschließend konsolidiert) für die Entwicklung des HKV Prozesses von hohem Interesse. Mit derartig hergestellten Halbzeugen wird ein Faservolumengehalt zwischen 30 % und 60 % erreicht, und als Matrices können Standardkunststoffe als auch technische Kunststoffe wie Polypropylen, Polyethylenterephthalat und Polyamide als auch Hochleistungskunststoffe wie Polyphenylsulfid Polyetherimid oder Polyetheretherketon eingesetzt werden. Übliche Verstärkungsmaterialien sind Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern.

3 KONZEPT FÜR HKV HERSTELLUNGSPROZESS

Zur effizienten Ausnutzung der mechanischen Eigenschaften von Holz in dessen Wachstumsrichtung müssen die Strands entsprechend der beim Einsatz des Formteils vorherrschenden Lastpfade ausgerichtet werden können. Ein erstes Konzept für einen derartigen Herstellungsprozess zeigt Bild 2.

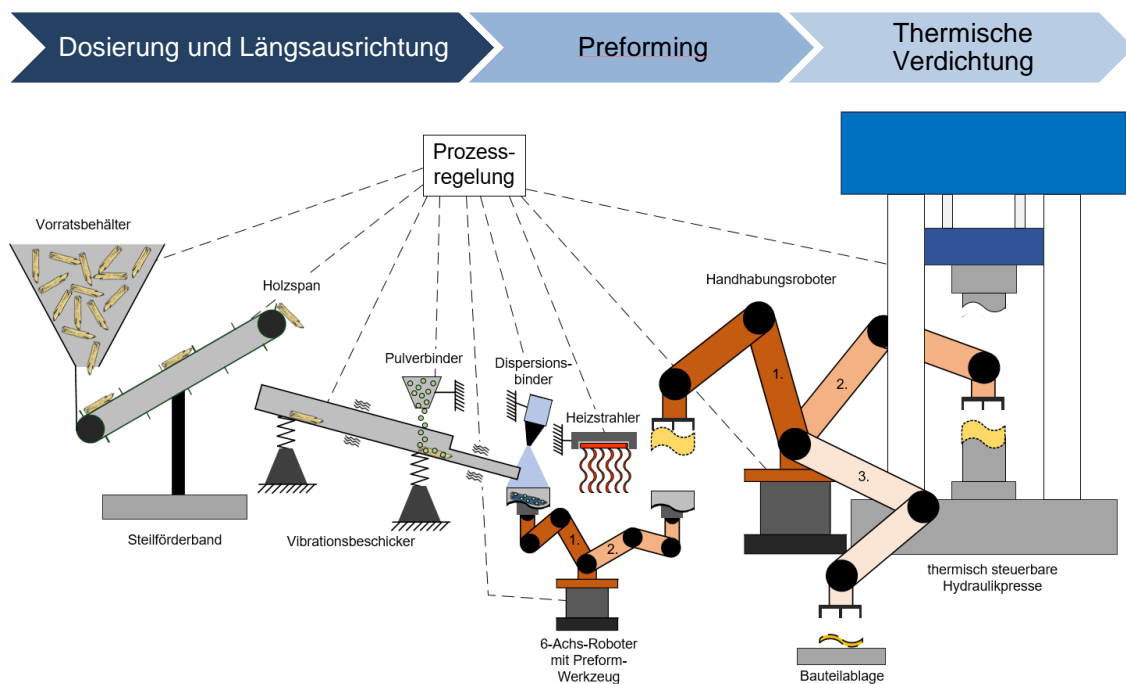


Bild 2: Konzept für einen HKV-Herstellungsprozess

Dieses Konzept gliedert den Gesamtprozesses in drei grundsätzliche Prozessschritte auf:

- Dosierung und Längsausrichtung,
- Preforming und
- thermische Verdichtung.

Im ersten Prozessschritt fallen die Strands dosiert aus einem Vorratsbehälter auf ein Förderband. Auf dem Förderband werden die Strands portioniert und in einen Vibrationsbeschicker gefördert, in dem sie in Längsrichtung ausgerichtet und mit einem pulverförmigen Klebstoffsystem beschichtet werden, Bild 3.

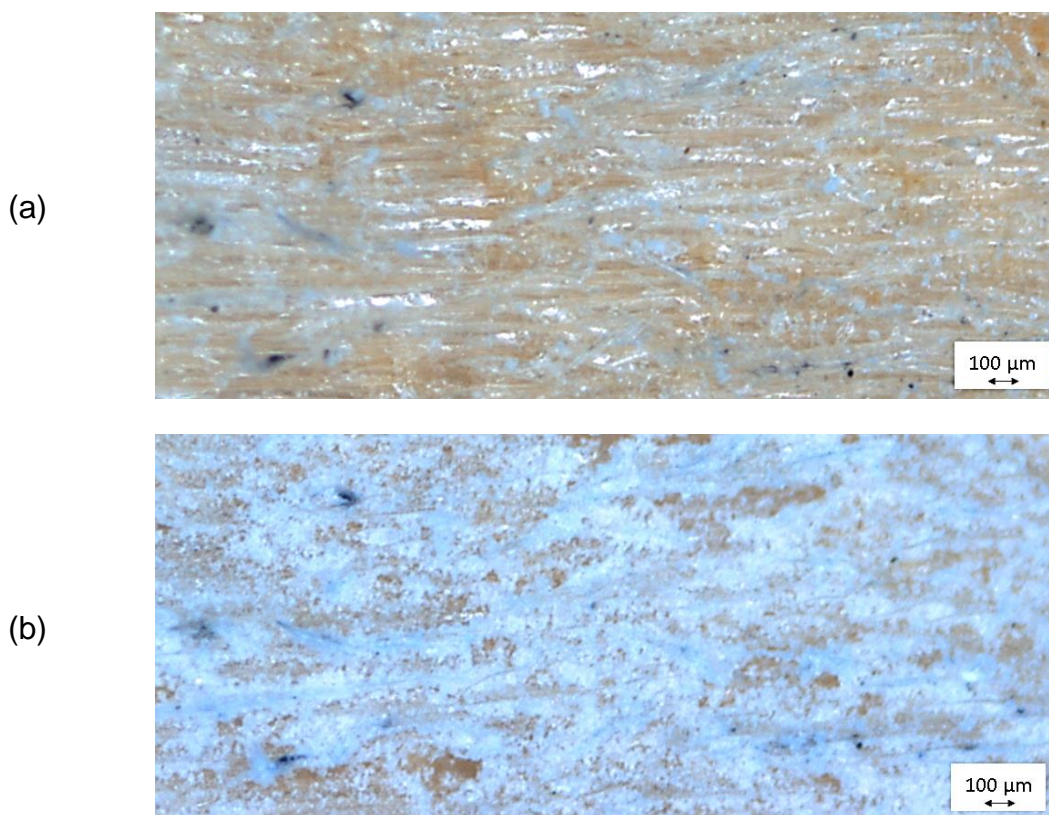


Bild 3: Oberfläche Kiefernholzstrand unbehandelt (a), Oberfläche Kiefernholzstrand nach Beschichtung mit thermoplastischem Pulver (b)

Die Haftung, respektive Benetzbarkeit, ist dabei abhängig von der Oberflächenenergie (disperser/ polarer Anteil) des Kunststoffes im Vergleich zum Holzstrand (nach [41] bspw. Kiefernfrühholz 41,4 mN/m dispers und 2,1 mN/m polar, Kiefernspätholz 40 mN/m dispers und 4,7 mN/m polar) sowie der Partikelgeometrie (mechanische Verklammerung mit Strandoberfläche, Partikeleigengewicht). Im zweiten Prozessschritt werden die Späne mithilfe eines Roboters schichtweise in ein Preform-Werkzeug abgelegt und zur Lagefixierung lokal mit einem Dispersionsklebstoffsystem durch Sprühauftrag benetzt. Zur Vermeidung von Overspray ist eine Einhausung und Absaugung dieses Anlagenbereiches not-

wendig. Nach Fertigstellung des Preforms wird dieser mithilfe eines Roboters in eine Presse übergeben. Dort werden die Strands und das pulverförmige Klebstoffsystem unter Druck- und Temperatureinfluss zum Formteil verdichtet. Alternativ zum Pulverklebstoff können Kunststofffolien schichtweise alternierend mit den Strands im Preform-Werkzeug abgelegt oder duroplastische Kunststoffe in Anlehnung an das RTM Verfahren im Presswerkzeug injiziert werden.

4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

4.1 Verwendete Materialien

4.1.1 Kunststoffe

An die Kunststoffe, die zur Herstellung der HKV geeignet sind, werden folgende Anforderungen gestellt:

- Geringe gesundheits- oder umweltschädigende Wirkung,
- hohe Oberflächenhaftung am verwendeten Holz (mechanische/spezifische Adhäsion),
- hohe Zugscherfestigkeit,
- geringe Schwindung und Quellung (Formstabilität),
- hohe Wärmeformbeständigkeit,
- geringe Kosten und
- gute Recyclingfähigkeit (bspw. durch Regranulierung der HKV Formteile zur Herstellung von Wood-Plastic-Composites).

Thermoplastische Kunststoffe sollten zudem eine möglichst niedrige Schmelzeviskosität und eine Verarbeitungstemperatur aufweisen, die unterhalb der Zersetzungstemperatur des verwendeten Holzes liegt. Duroplastische Kunststoffe sollten eine Mischviskosität aufweisen, die eine vollständige Imprägnierung des Strandpreforms ermöglicht und einer vollständigen Tränkung der Strands entgegenwirkt.

4.1.2 Holzstrands

Für die Versuche wurden Kiefernholzstrands mit parallel zur Längsachse verlaufenden Jahrringen und wenig Wachstumsfehlern verwendet. Die Strands weisen Längen von 80 bis 150 mm, Breiten von 10 bis 20 mm und eine Stärke von ca. 1 mm auf. Die gemessene Dichte beträgt $0,5 \text{ g/cm}^3$ (Analysenwaage Sartorius Cubis MSU224S-000-DU) und die gemessene Feuchte bei Laborklima 7,8 % (thermogravimetrischer Feuchtebestimmer Sartorius MA 100). Der in Anlehnung an DIN 527-4 gemessene Zug-Elastizitätsmodul der Strands (rechteckige Prüfkörpergeometrie mit L150 mm x B10 mm x H1 mm) beträgt im

Durchschnitt 7651 N/mm^2 (+1164/ -674 MPa). Dies deckt sich in guter Näherung mit den Werten aus der Literatur (2 bis 12,9 GPa und im Mittel 5 GPa) [42].

4.2 Parameterstudien zur HKV Prozessentwicklung

Zur Prozessentwicklung und Ermittlung erreichbarer mechanischer Formteileigenschaften in Abhängigkeit von Strandausrichtung, -verdichtung und -volumenanteil wurden Parameterstudien durchgeführt.

4.2.1 Dosierung, Längsausrichtung und Preforming von Strands

Für den Prozessteilschnitt der Dosierung und Längsausrichtung wurde ein labormaßstäblicher Prototyp entwickelt, mit dem zum einen die grundsätzliche anlagentechnische Machbarkeit nachgewiesen und zum anderen ein Prozessfenster ermittelt werden konnte, Bild 4.

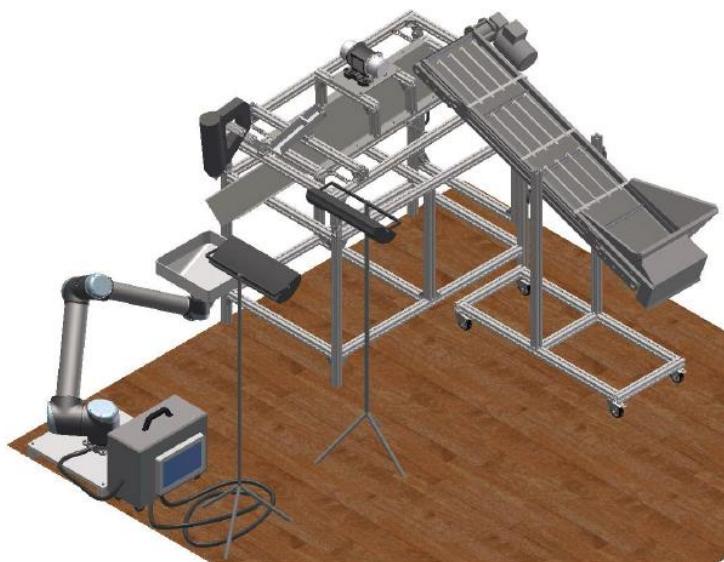


Bild 4: 3D CAD - Modell des entwickelten Dosiersystems

Der Prototyp besteht aus einem Steilförderband mit PU-Querstollengurt (trio-technik Maschinenbau GmbH, Meinerzhagen, Sonderanfertigung - Stollenhöhe 30 mm, Stollenabstand 200 mm, Nutbreite 210 mm, Gesamtlänge 1500 mm), einer schwingend gelagerten v-förmigen Blechrinne als Schwingförderer (Eigenkonstruktion mit ca. 25 kg Gewicht, mittels sechs beanspruchungsgerecht ausgelegten Zugfedern vom Typ RZ-126I am Rahmen befestigt), die mit einem Vibrationsmotor (Würges Vibrationsmotoren GmbH, Neusäß, Modell HV 2/4-9, bei 50 Hz Netzfrequenz Drehzahl 1500 U/min und Fliehkraft 1100 N) ausgestattet und zur Reibungsminimierung mit PTFE Folie beklebt wurde, sowie einem 6-Achs-Roboter (Universal Robots, Odense, Modell UR-6-85-5-A), an dem ein pyramidenförmiges Preform-Werkzeug aus Blech (Eigenkonstruktion mit spezifischen Radien- und Winkelgeometrien) angebracht wurde, Bild 5.



Bild 5: Labormaßstäblicher Prototyp eines Systems zur Dosierung, Längsausrichtung und Vorformung der Strands im HKV Prozess

Aufgabe dieses Dosiersystems ist es, die Strands in ihrer Längsachse auszurichten und mit einem konstanten, vorgegebenen Massenstrom in einem Preform-Werkzeug abzulegen, Bild 6.

Prozess-schritte	1. Trennung & Förderung	2. Dosierung	3. Ausrichtung	4. Spanablage/Roboter
Schema				
Prozess-parameter	Förderband: <ul style="list-style-type: none"> Bandgeschwindigkeit Neigungswinkel 	Förderband: <ul style="list-style-type: none"> Neigungswinkel Geschwindigkeit Linearer Vibrations-Beschicker: <ul style="list-style-type: none"> Neigungswinkel Drehzahl 	Linearer Vibrations-Beschicker: <ul style="list-style-type: none"> Neigungswinkel Drehzahl 	Roboter: <ul style="list-style-type: none"> Roboter Bewegungsprogramm Spanablage-distanz Werkzeugwinkel
Auswertung			<ul style="list-style-type: none"> Ergebnisse nicht reproduzierbar Auswertung durch Fehlerwahrscheinlichkeit 	

Bild 6: Prozessparameter des Dosiersystems

Dementsprechend wurden die Möglichkeiten zur Anpassung der Massenströme von Förderband und Vibrationsbeschicker untersucht. Der Massenstrom vom Vibrationsbeschicker hängt von dessen Schwingfrequenz (gesteuert über Netz-

frequenz, respektive Drehzahl der Unwucht im Vibrationsmotor) und Neigungswinkel β ab, Bild 7.

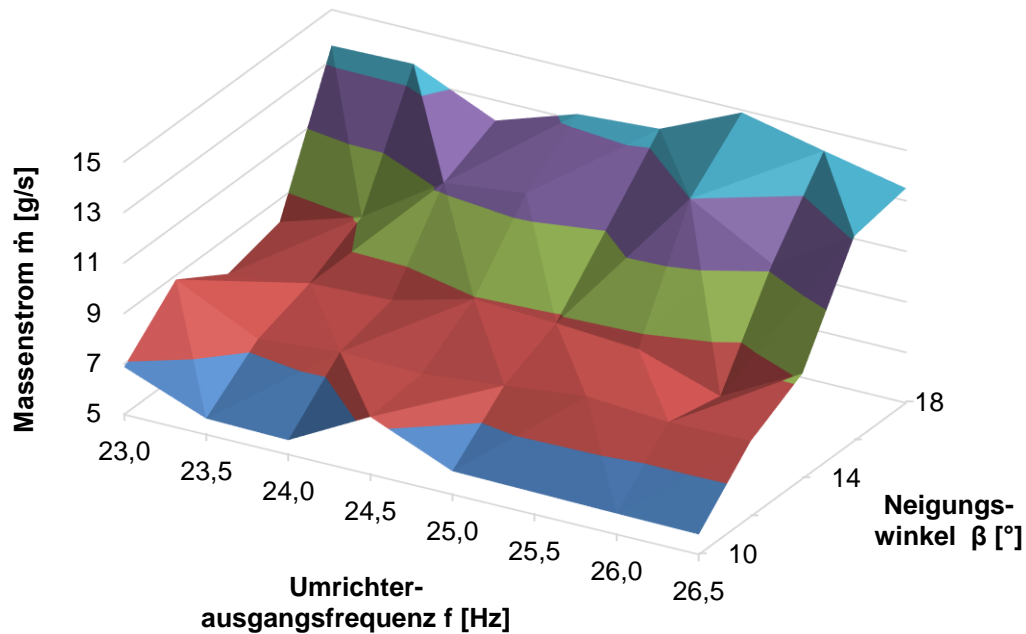


Bild 7: Abhängigkeit Massenstrom vom Vibrationsbeschicker von Umrichter Ausgangsfrequenz und Neigungswinkel

Ab dem Grenzwinkel $\beta=13^\circ$ ist ein starker quasilinearer Anstieg des Massenstroms zu erkennen. Dieser Anstieg entsteht dadurch, dass die Strands nicht mehr gleichmäßig durch den Vibrationsbeschicker gefördert werden, sondern lawinenartig abrutschen. Die Schwingfrequenz hatte im untersuchten Prozessfenster (von 23 bis 26,5 Hz Umrichter Ausgangsfrequenz, respektive 690 bis 796 U/min Drehzahl des Vibrationsmotors) nur geringfügigen Einfluss auf den Massenstrom – hier gilt es bei einem späteren Prozess-Upscaling mögliche Resonanzfrequenzen zu vermeiden. Für die Versuche wurde ein Gesamt-Massenstrom von 8 g/s als Zielgröße definiert.

Der Massenstrom von Förderband hängt von dessen Bandgeschwindigkeit und Neigungswinkel α ab.

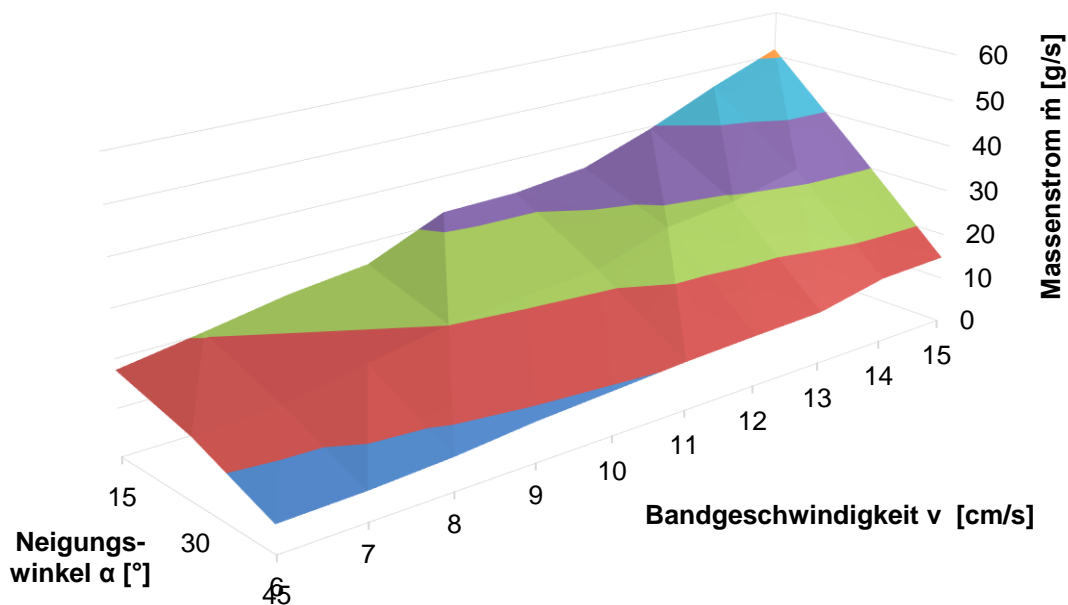


Bild 8: Abhängigkeit Massenstrom vom Förderband von dessen Bandgeschwindigkeit und Neigungswinkel

Um den festgelegten Gesamt-Massenstrom von 8 g/s zu erreichen, wurden für die Preform-Versuche ein Neigungswinkel α von 45° und eine Bandgeschwindigkeit v von 8,6 cm/s gewählt.

Wie im Stand der Technik beschrieben, ist die Abweichung von Soll- und Ist-Position der Strands im Preform-Werkzeug stark von dem Abstand h (entspricht der Fallhöhe) und dem Winkel γ zwischen Preform-Werkzeug und Vibrationsbeschicker abhängig, Bild 9.

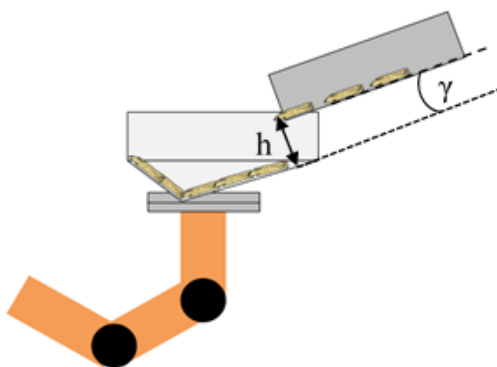


Bild 9: Abstand und Winkel zwischen Preform-Werkzeug und Vibrationsbeschicker

Bild 10 zeigt den Grenzwinkel φ der zur qualitativen Bestimmung der Spanorientierungsgüte, als prozentualer Gewichtsanteil abweichend ausgerichteter Strands, in Abhängigkeit von Abstand h und Winkel γ eingeführt wurde.

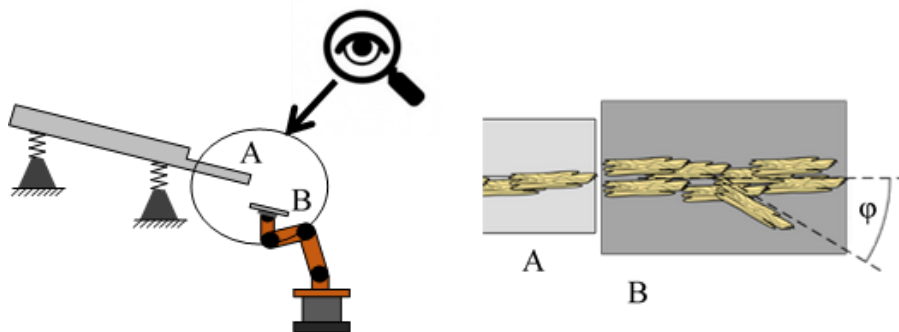


Bild 10: Grenzwinkel φ zur Untersuchung der Spanorientierung

Die Versuchsergebnisse aus Bild 11 verdeutlichen, dass der Anteil abweichend ausgerichteter Strands (hier für $\varphi \geq 20^\circ$) ab ca. 3 cm Fallhöhe mit zunehmendem Abstand h linear zunimmt. Bei einem Abstand von 9 cm waren mehr als die Hälfte der Strands abweichend ausgerichtet. Die bestmöglichen Ergebnisse konnten mit der kleinstmöglichen Ablagedistanz zwischen Preform-Werkzeug und Vibrationsbeschicker erzielt werden. Mit steigendem Abstand steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein längs ausgerichteter Strand während der Freifallablage abweichend ausrichtet.

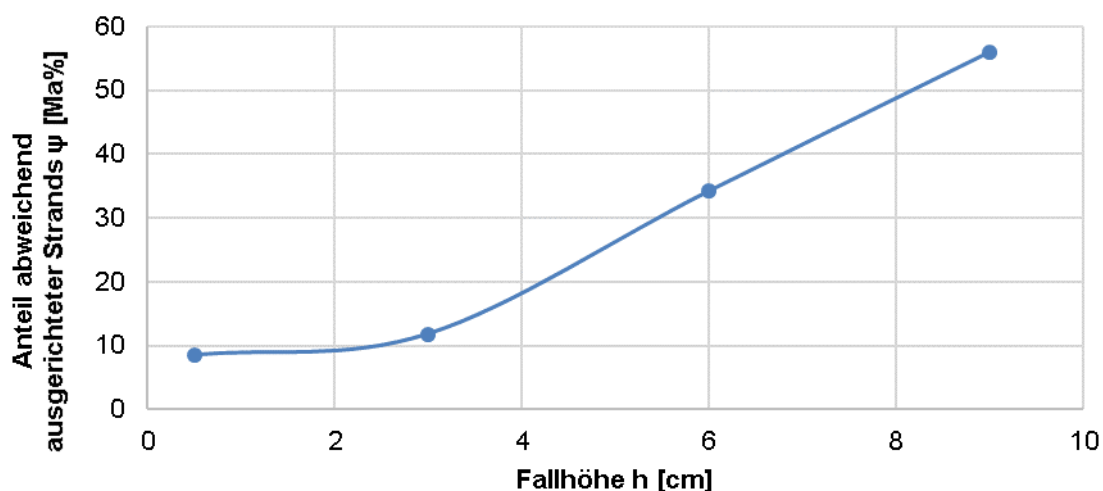


Bild 11: Anteil abweichend ausgerichteter Strands in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Vibrationsbeschicker und Preform-Werkzeug

Bild 12 zeigt, dass mit steigendem Winkel zwischen Preform-Werkzeug und Vibrationsbeschicker der prozentuale Anteil abweichend ausgerichteter Strands ansteigt. Es ist zu sehen, dass die Werte ab ca. 10° gegen einen Grenzwert von 20 % streben. In den Versuchen konnte die bestmögliche Strandorientierung erzielt werden, wenn der Neigungswinkel des Vibrationsbeschickers gleich mit dem Neigungswinkel der lokalen Spanablageebene im Preform-Werkzeug ist.

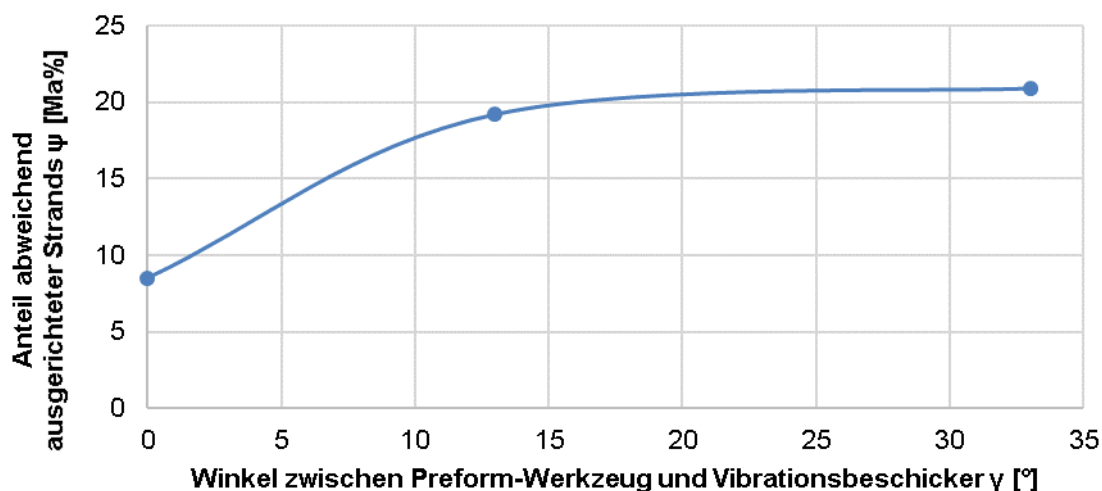


Bild 12: Anteil abweichend ausgerichteter Strands in Abhängigkeit vom Winkel zwischen Preform-Werkzeug und Vibrationsbeschicker

Während der Versuche zeigte sich zudem, dass der automatisierte Ablageprozess im Preform-Werkzeug aufgrund der herstellungs- und wachstumsbedingten Geometrie- und Gewichtsvarianz der Strands erschwert wird.

4.2.2 Imprägnierungsverhalten vorverdichteter, unidirektionaler Strand-Preforms

Im letzten Prozessschritt des HKV Prozesses findet die Verdichtung des Strandpreforms statt. Bei der duroplastischen Herstellungsrouten wird dabei zudem ein Reaktivsystem als Matrix in das Presswerkzeug injiziert. Dazu ist es notwendig, das Imprägnierungsverhalten vorverdichteter Strand-Preforms zu charakterisieren. Aufgrund dessen wurden Untersuchungen mit unidirektional ausgerichteten Strands in einem plattenförmigen Versuchswerkzeug (335 mm x 335 mm) mit einem Epoxidharzsystem (Harz EPIKOTE Resin MGS RIMR135, Härter EPIKURE Curing Agent MGS RIMH134, Mischviskosität 375 mPas) unter Variation von Injektions- und Vorkompressionsdruck sowie Strandmasse durchgeführt, *Tabelle 2*.

Versuchsnummer	Injektionsdruck	Vorkompression	Strandmasse
	[MPa]	[MPa]	[g]
1	0,05	0,4	250
2	0,1	0,4	150
3	0,05	0,4	150
4	0,1	0,6	150
5	0,1	0,4	250
6	0,1	0,6	250
7	0,05	0,6	150
8	0,05	0,6	250

Tabelle 2: Versuchparameter Untersuchung Imprägnierungsverhalten

Im Stempel des Versuchswerkzeuges ist eine Glasplatte eingelassen, sodass die Fließfrontausbreitung in sowie orthogonal zur Strandlängsrichtung optisch ausgewertet werden kann (Bild 13, Bild 14). Die Fließfront ist dabei blau umrandet. Grün umrandet ist der Racetrack-Effekt zu erkennen. Hier eilt die Fließfront in den werkzeugwandnahen Preform-Bereichen mit besonders hoher Permeabilität vor.

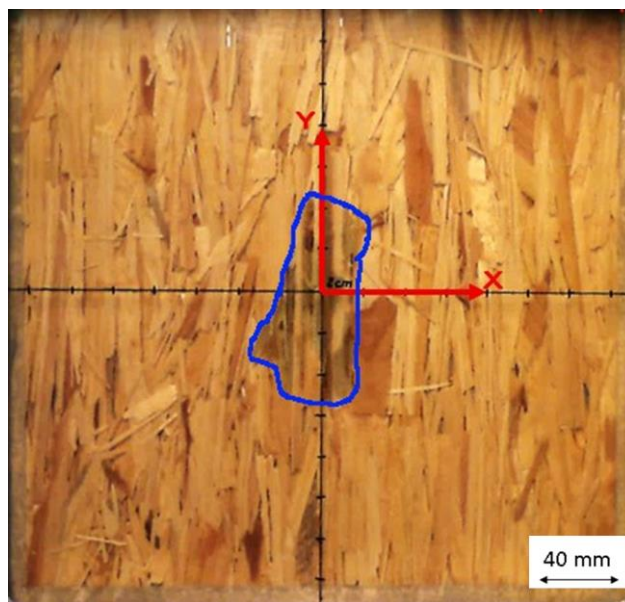


Bild 13: Darstellung typischer Fließfrontverlauf bei $t = 1$ s

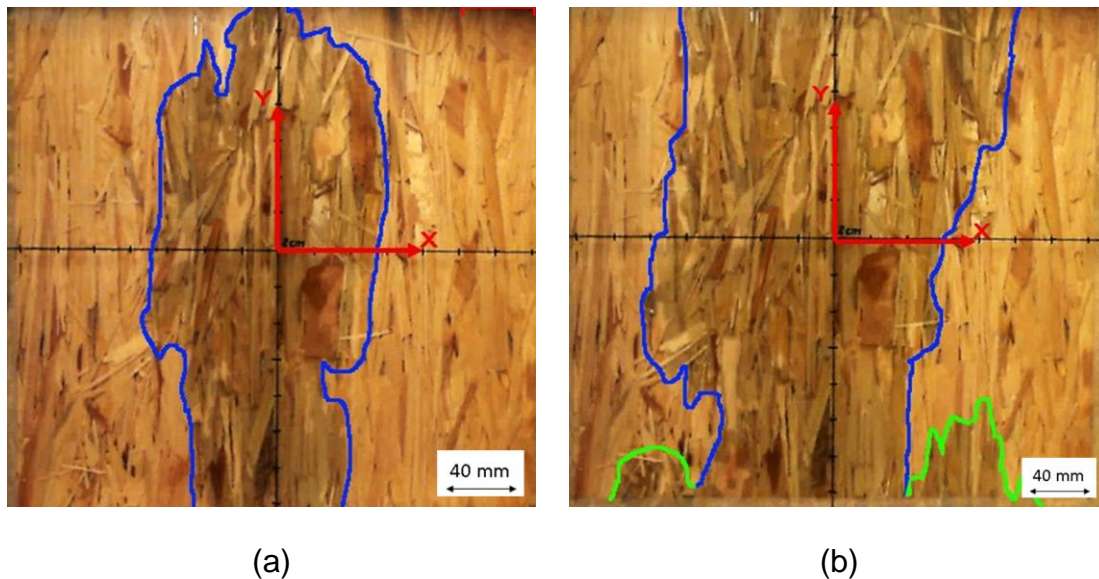


Bild 14: Darstellung typischer Fließfrontverlauf bei t = 6 s (a) und t = 10 s (b)

Nach [43] kann die Permeabilität K unidirektionaler Verstärkungen über folgende Gleichung abgeschätzt werden:

$$x_f^2 = 2 \cdot \frac{K \cdot \Delta p \cdot t}{\eta \cdot (1 - \varphi_f)} \quad (4)$$

$$K = \frac{\frac{x_f^2}{t} \cdot \eta \cdot (1 - \varphi_f)}{2 \cdot \Delta p} \quad (5)$$

Dabei ist x_f die Fließfrontposition gemessen vom Injektionspunkt, Δp ist der Differenzdruck zwischen Injektionspunkt und Fließfrontposition, η ist die Mischviskosität des verwendeten Reaktivsystems, φ_f der Faser-, respektive Strandvolumenanteil, und t die jeweilige Dauer bis zum Erreichen von x_f .

Bild 15 zeigt exemplarisch die durchgeführte Auswertung des Fließfrontverlaufs. Dazu wurden für die x- und y-Achse die positiven und negativen Abstände der Fließfront vom Injektionspunkt quadriert und über die Zeit aufgetragen. Der gemittelte Anstieg der Trendgeraden entspricht dem gesuchten Wert von $\frac{x_f^2}{t}$.

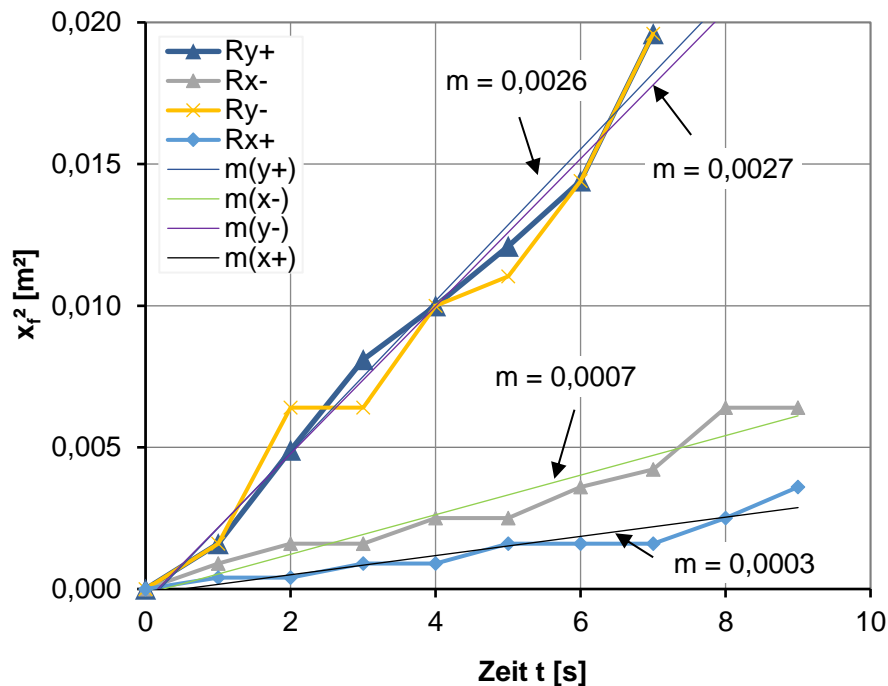


Bild 15: Darstellung des Fließfrontverlaufs über die Zeit für Versuchsnr. 1

Zur Bestimmung des resultierenden Strandvolumenanteils wurden Schliffbilder von den hergestellten Proben aufgenommen und optisch entsprechend Bild 16 ausgewertet.

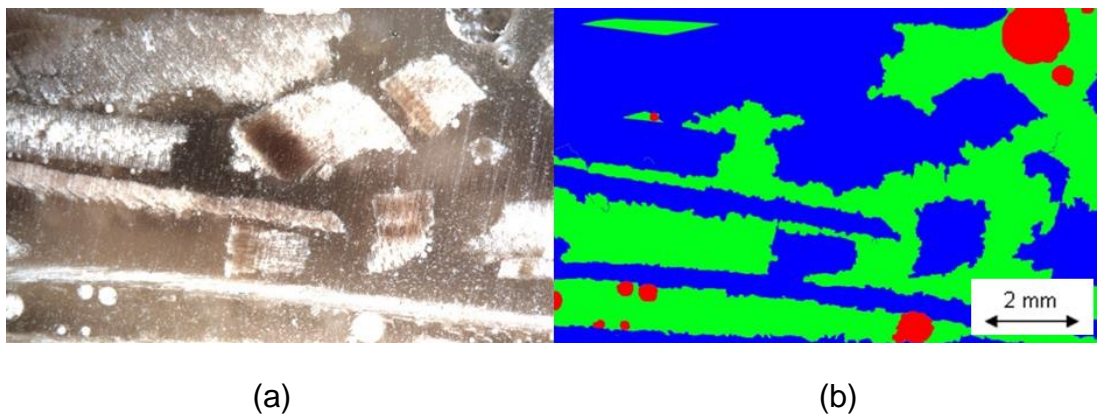


Bild 16: Schliffbild (a) und Auswertungsmethodik zur Bestimmung des resultierenden Strandvolumenanteils (blau-Strand, grün-Matrix, rot-Poreneinschlüsse) (b)

Mithilfe dieser Ergebnisse wurde die Permeabilität in und orthogonal zur Strandlängsachse nach Gleichung 5 berechnet und über den Strandvolumenanteil aufgetragen, Bild 17.

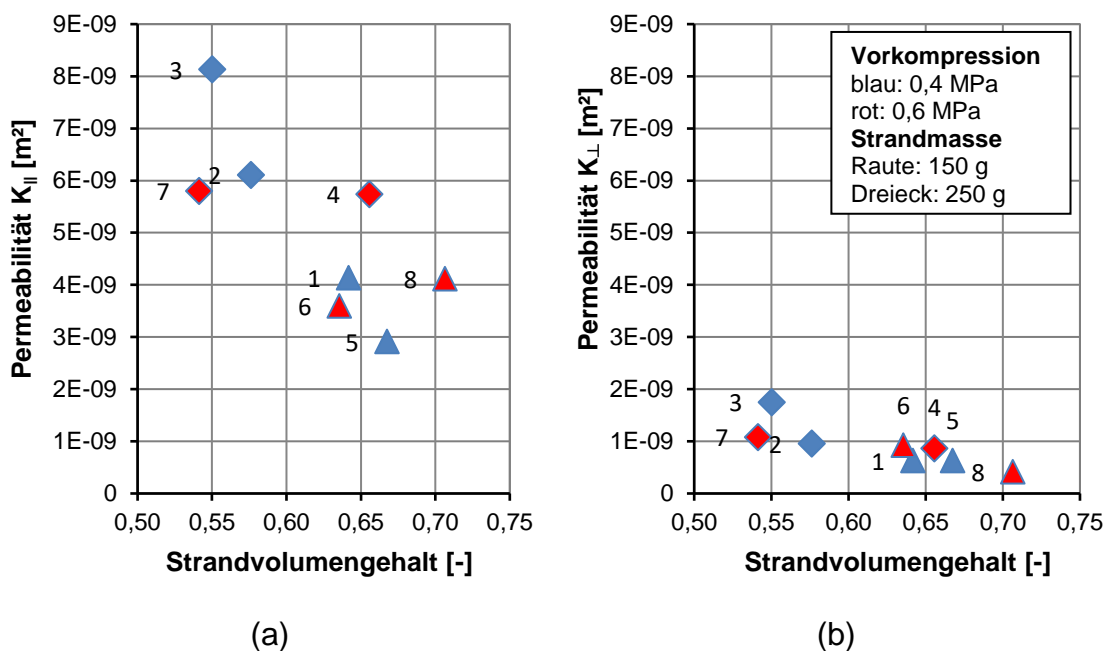


Bild 17: Preform-Permeabilität in (a) und orthogonal zur Strandlängsachse (b) über Strandvolumengehalt bei Tränkung mit Epoxidharz

Dabei ist zu erkennen, dass die Lagenanzahl, respektive der Strandmasseanteil erheblichen Einfluss auf die Permeabilität in Strandlängsachse nimmt. Wie zu erwarten ist, sinkt die Preform-Permeabilität bei Erhöhung der Vorkompression, respektive des Preformverdichtungsgrades. Die gemessene Preform-Permeabilität orthogonal zur Strandlängsachse ist wesentlich geringer und hat eine geringere Schwankungsbreite als die in Strandlängsachse.

4.3 Herstellung und Prüfung plattenförmiger unidirektional verstärkter HKV Probekörper mit duroplastischer Matrix

Zur Abschätzung erreichbarer mechanischer Eigenschaften wurden unidirektional verstärkte und plattenförmige HKV Probekörper mit duroplastischer Matrix in einem Versuchswerkzeug (Kavität 203 mm x 203 mm) hergestellt. Dazu wurden die Reaktivsysteme (10 Ma%, 22 g) in die mit Strands gefüllte (90 Ma%, 200 g) und auf 80 °C temperierte Werkzeugkavität händisch eingegossen. Anschließend wurde der Forminhalt durch druckgesteuertes Absenken des Werkzeugstempels mit 10 MPa (~40 t) verdichtet. In üblicher Reaktionszeit erfolgte die Vernetzung des Reaktivsystems (EP 40 min., UP 23 min. PU 39 min.) und die Entformung der Probekörper.

Die folgenden Reaktivsysteme wurden für die Versuche verwendet:

- Epoxidharz (EP):
 - A-Komponente: EPIKOTE Resin MGS RIMR135
 - B-Komponente: EPIKURE Curing Agent MGS RIMH134
 - Mischungsverhältnis A/B: 100/30
 - Mischviskosität: 375 mPas
- Ungesättigtes Polyesterharz (UP)
 - A-Komponente: Enydyne I-69277-A (vorbeschleunigt, DCPD)
 - B-Komponente: Butanox M50 (MEKP)
 - Mischungsverhältnis A/B: 100/1,5
 - Mischviskosität: 190 mPas
- Biobasiertes Polyurethanharz (Bio-PUR)
 - A-Komponente: Silitech Biothan 2 MD 614
 - B-Komponente: Silitech Biothan M 333
 - Mischungsverhältnis A/B: 100/180
 - Mischviskosität: 1260 mPas
 -

Die derartig hergestellten Probekörper, Bild 18, wurden anschließend mit einer Universalprüfmaschine (Modell inspekt20, Hegewald & Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH, Nossen) nach der Norm DIN EN 310 im 3-Punkt-Biegeversuch untersucht (Bild 19). Die Biegefestigkeit der Probekörper liegt im Bereich von 45,8 bis 67,8 MPa und der Biegeelastizitätsmodul im Bereich von 10,1 bis 12,2 GPa.

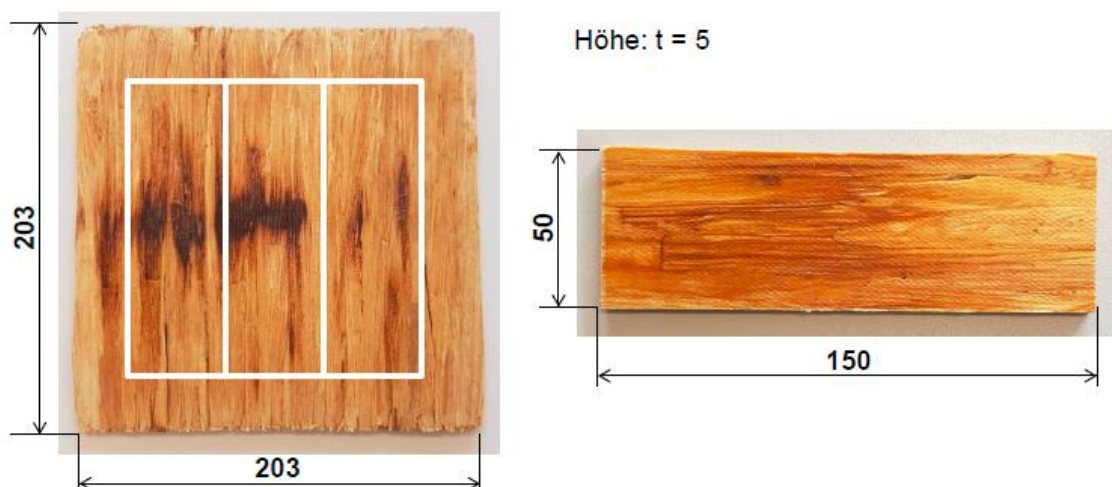


Bild 18: Entnahmeposition und Probekörperabmessungen in mm

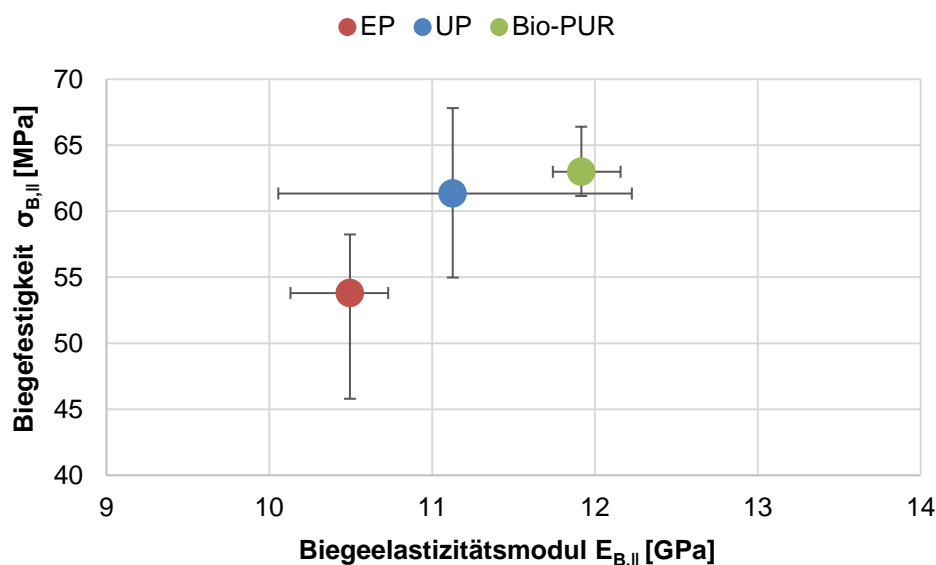


Bild 19: Vergleich Biegefestigkeit und Biege-E-Modul hergestellter Duroplast-basierter HKV Probekörper

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen dieses Beitrags wurde der relevante Stand der Technik zu Strand-basierten Holzwerkstoffen zusammengefasst und ein Konzept für einen Prozess zur Herstellung von HKV Formteilen vorgestellt. Für die Prozessschritte Dosierung, Längsausrichtung und Preforming wurde ein labormaßstäblicher Prototyp entwickelt, mit dem zum einen die grundsätzliche anlagentechnische Machbarkeit nachgewiesen und zum anderen geeignete Prozessfenster ermittelt wurden. Das Imprägnierungsverhalten vorverdichteter, unidirektionaler Strand-Preforms wurde untersucht, und in guter Übereinstimmung mit den Forschungsergebnissen von Haas et. al. [38] und Gartner et. al. [31] konnte gezeigt werden, dass die Preformpermeabilität in Strandlängsachse mit steigender Lagenanzahl, respektive Strandmasseanteil, und steigender Vorkompression verringert wird. Die gemessene Preform-Permeabilität orthogonal zur Strandlängsachse ist wesentlich geringer und hat eine geringere Schwankungsbreite als die parallel zur Strandlängsachse. Erreichbare mechanische Eigenschaften von unidirektional verstärkten, plattenförmigen und Duroplast-basierten HKV Probekörpern wurden im 3-Punkt-Biegeversuch nach der DIN EN 310 Norm für Holzwerkstoffe ermittelt. Bei einem Strandanteil von 90 Ma% und Verwendung eines teilweise biobasierten Polyurethanharzes konnte dabei eine Biegefestigkeit von bis zu 67,8 MPa und ein Biegeelastizitätsmodul von bis zu 12,2 GPa nachgewiesen werden.

Zur Bewältigung bestehender prozesstechnischer und werkstofflicher Herausforderungen sind folgende weitere Schritte geplant:

- Prozessskalierung auf Industriemaßstab mit entsprechendem Massstrom,
- Minimierung der Lage- und Winkelabweichung der Strands während Dosierungsprozess (Partikelkinematik in Zwangsförderung und Luftströmung) sowie während Verdichtungsprozess im Presswerkzeug,
- Erhöhung des Strandanteils auf mind. 90 Ma%;
- statistische Absicherung der Ergebnisse sowie Modellbildung zum Imprägnierungsverhalten vorverdichteter Strand-Preforms,
- Entwicklung numerischer Prozesssimulationsmodelle zur Bestimmung der lastgerechten Strandorientierung und zum Verdichtungsverhalten unterschiedlicher Preformgeometrien mit dreidimensionaler Geometrie und komplexem Laminataufbau und
- Entwicklung von Berechnungsmethoden zur Abschätzung verfahrensabhängiger mechanischer Werkstoffeigenschaften von HKV Formteilen.

LITERATUR

- [1] Statistisches Bundesamt (Destatis) Fachserie 4 Reihe 3.1 - Produzierendes Gewerbe - Produktion des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden, S. 76
Wiesbaden, 2019
- [2] Forest Products and Statistics Team Global Forest Products - Facts and Figures 2018
Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019
- [3] Onlineplattform Holzkurier Befragung zur Marktsituation in der Holzwerkstoff-Branche im April 2021
www.holzkurier.com/holzprodukte/2021/04/nachfrage-uebersteigt-angebot.html
abgerufen am 27.06.2022
- [4] Europäische Kommission Europäischer Grüner Deal – Erster klimaneutraler Kontinent werden
https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de
abgerufen am 27.06.2022
- [5] Europäischer Panelverband Arten von Holzwerkstoffplatten und ihre wirtschaftlichen Auswirkungen
<https://europanel.org/the-wood-based-panel-industry/types-of-wood-based-panels-economic-impact>
abgerufen am 27.06.2022
- [6] Hartmann, R. Koch, M. Production of 3D Parts from Wood Chips in a Closed Mold Process
Materials Science Forum 825-826 (2015), S. 1027-1032
DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.825-826.1027
- [7] Hartmann, R. Koch, M. Wood chip plastic composite – a novel bio-based material with high mechanical properties
Polimery 62 (2017) 7-8, S. 556-559
DOI: 10.14314/polimery.2017.556

- [8] Hartmann, R. Puch, F. Numerical Simulation of the Deformation Behavior of Softwood Tracheids for the Calculation of the Mechanical Properties of Wood–Polymer Composites
Polymers 14 (2022) 13
DOI: 10.3390/polym14132574
- [9] Weißbach, W. Dahms, M. Jaroschek, C. Werkstoffe und ihre Anwendungen - Metalle, Kunststoffe und mehr
Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2018
- [10] BMEL Der Wald in Deutschland - Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur
3. korrigierte Auflage, Berlin, 2018
- [11] Dunky, M. Niemz, P. Holzwerkstoffe und Leime
Springer Verlag, Berlin, 2002
DOI: 10.1007/978-3-642-55938-9
- [12] Nishimura, T. Wood Composites: Chipboard, oriented strand board (OSB) and structural composite lumber
Elsevier Verlag, Cambridge, 2015
DOI: 10.1016/B978-1-78242-454-3.00006-8
- [13] Wagenführ, A. Scholz, F. Taschenbuch der Holztechnik
Hanser Verlag, München, 2008
- [14] Hasch, J. Ökologische Betrachtungen von Holzspan- und Holzfaserplatten
Dissertation, Universität Hamburg, 2002
- [15] Verband der Deutschen Holzwerkstoffindustrie e.V. Holzwerkstoffe
<https://vhi.de/span-und-faserplatten/>
abgerufen am 27.06.2022
- [16] U.S. Department of Agriculture, Forest Service Wood handbook—wood as an engineering material
General Technical Report FPL-GTR-282
Forest Products Laboratory, Madison, 2021
- [17] Furuta Y. Aizawa H. Yano H. et. al. Thermal-Softening Properties of Water-Swollen Wood - the effects of chemical constituents of the cell wall on the thermal-softening properties of wood
Japan Wood Research Society 43 (1997) 9, S. 725–730

- [18] Wolcott, M. P. Modeling viscoelastic cellular materials for the pressing of wood composites
Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg (USA), 1989
URI: 10919/54813
- [19] Niemz, P.
Sonderegger, W. Holzphysik - Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe
Carl Hanser Verlag, 7. Auflage, 2017
- [20] Shmulsky, R.
Jones, P. D. Forest Products and Wood Science: An Introduction
Wiley-Blackwell Verlag, 7. Auflage, 2019
DOI: 10.1002/9781119426400
- [21] Hiziroglu, S. Oriented Strand Board as a Building Material
Oklahoma State University, Oklahoma Cooperative Extension Service, FAPC-145, 2017
- [22] Geimer, R.L. Flake alignment in particleboard as affected by machine variables and particle geometry
USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison (FPL 275) 17, 1976
- [23] Lunguleasa, A.
Dumitrascu, A.-E.
Spirchez, C.
et. al. Influence of the Strand Characteristics on the Properties of Oriented Strand Boards Obtained from Resinous and Broad-Leaved Fast-Growing Species
Appl. Sci. 11 (2021) 4
DOI: 10.3390/app11041784
- [24] Nairn, J.A.
Le, E. Numerical Modeling and Experiments on the Role of Strand-to-Strand Interface Quality on the Properties of Oriented Strand Board
Proceedings of 9th International Conference on Wood Adhesives, Lake Tahoe, 2009
- [25] Hamzaçebi, C. Optimization of Process Parameters in Oriented Strand Board Manufacturing by Taguchi Method
BioResources 11 (2016) 3, S.5987-5993
10.15376/biores.11.3.5987-5993
DOI: 10.15376/biores.11.3.5987-5993

- [26] Way, D.
Sinha, A.
Kamke, F.
et. al. Evaluation of a Wood-Strand Molded Core Sandwich Panel
Journal of Materials in Civil Engineering 28 (2016) 9
DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001589
- [27] Hornus, M.
Cheng, G.
Erramuspe, IBV.
et al. Oriented strand board with improved dimensional stability by extraction of hemicelluloses
Wood and Fiber Science 52 (2020) 3
DOI: 10.22382/wfs-2020-024
- [28] Haas, G. v.
Steffen, A.
Frühwald, A. Untersuchungen zur Permeabilität von Faser-, Span- und OSB-Matten für Gase
Holz als Roh- und Werkstoff 56 (1998), S.386-392
- [29] Fakhri, H.R.
Semple, K.E.
Smith, G.D. Permeability of OSB. Part 1. The Effects of Core Fines Content and Mat Density on Transverse Permeability
Wood and Fiber Science 38 (2006) 3, S.450 – 462
- [30] Fakhri, H.R.
Semple, K.E.
Smith, G.D. Transverse Permeability of OSB. Part 2. Modeling the Effects of Density and Core Fines Content
Wood and Fiber Science 38 (2006) 3, S.463–473
- [31] Gartner, B.
Yang, W.
Yadama, V.
et. al. Resin Transfer Molding (RTM) of Bio-Based Composite Panels
18th Annual SPE Automotive Composites Conference & Exhibition, 2018, Novi (USA)
- [32] Hornus, M.
Via, B. K.
Gallagher, T.
et. al. Partial substitution of pMDI with lignin containing cellulose nanofibrils: low density oriented strand board,
Wood Material Science & Engineering 16 (2021) 6, S. 391-396
DOI: 10.1080/17480272.2020.1769722
- [33] Hand, W.
Cheng, G.
Via, B. Soy-substituted liquid phenol formaldehyde binders for flakeboard
Eur. J. Wood Prod. 75 (2017), S.135–138
DOI: 10.1007/s00107-016-1114-2

- [34] Lucia, A.
van Herwijnen,
H.
Rosenau, T. Wood-based resins and other bio-based binders for the production of mineral wool
Holzforschung 74 (2020) 6, S.539-550
DOI: 10.1515/hf-2019-0280
- [35] Ferreira, A.M.
Pereira, J.
Almeida, M. Biosourced Binder for Wood Particleboards Based on Spent Sulfite Liquor and Wheat Flour
Polymers 10 (2018) 10
DOI: 10.3390/polym10101070
- [36] Bandara, N.
Wu, J. Randomly Oriented Strand Board Composites from Nanoengineered Protein-Based Wood Adhesive
ACS Sustainable Chem. Eng. 6 (2018) 1, S. 457–466
DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b02686
- [37] Yorur, H. Utilization of Waste Polyethylene and its Effects on Physical and Mechanical Properties of Oriented Strand Board
Bioresources 11 (2016) 1, S. 2483-2491
DOI: 10.15376/biores.11.1.2483-2491
- [38] Shen, Z.
Ye, Z.
Li, K.
et.al. Effects of Coupling Agent and Thermoplastic on the Interfacial Bond Strength and the Mechanical Properties of Oriented Wood Strand–Thermoplastic Composites
Polymers 13 (2021) 23
DOI: 10.3390/polym13234260
- [39] Rajak, D.K.
Pagar, D.D.
Menezes, P.L.
et. al. Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications
Polymers 11 (2019) 10
DOI: 10.3390/polym11101667
- [40] Henning, F.
Moeller, E.: Handbuch Leichtbau
Carl Hanser Verlag, 2011
DOI: 10.3139/9783446428911

- [41] Cao, J. Kamdem, P.D. Surface energy of preservative-treated southern yellow pine (*Pinus* spp.) by contact angle measurement
Front. Forest. China 2 (2007) 99
DOI: 10.1007/s11461-007-0016-1
- [42] Kohan, N. Via, B. Taylor, S. A Comparison of Geometry Effect on Tensile Testing of Wood Strands
Forest Products Journal 62 (2012) 3, S.167-170
DOI: 10.13073/0015-7473-62.3.167
- [43] Gebart, B.R. Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM
Journal of Composite Materials 26 (1992) 8, S.1100–1133
DOI: 10.1177/002199839202600802

Bibliography

DOI 10.3139/O999.01042022
Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics
Technology 18 (2022) 4; page 202–233
© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
ISSN 1864 – 2217

Stichworte:

Holzwerkstoffe, Grobspanplatte, lastgerechte Verbundwerkstoffe, formaldehydfreie Bindemittel, biobasierte Duroplaste, Prozessentwicklung, Imprägnierungsverhalten, Permeabilität

Keywords:

Wood-based materials, oriented strand board, load-specific composite materials, formaldehyde-free binders, bio-based thermosets, process development, impregnation behavior, permeability

Autor / author

Robert Hartmann, M.Sc.
Prof. Dr. Florian Puch
Fachgebiet Kunststofftechnik
Technische Universität Ilmenau
Gustav-Kirchhoff-Str. 5
98693 Ilmenau

E-Mail: kti@tu-ilmenau.de
Webseite: www.tu-ilmenau.de/kti
Tel.: +49 (0)3677/69-2841

Herausgeber / Editors**Europa / Europe**

Prof. Dr.-Ing. habil. Bodo Fiedler
Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe
Technische Universität Hamburg
Denickestr. 15 (K)
21073 Hamburg
Deutschland
Tel.: +49 (0)40 42878 3038
E-Mail: fiedler@kunststofftech.com

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Schiffers
Institut für Produkt Engineering
Universität Duisburg-Essen
Lotharstr. 1, MA 222
47057 Duisburg
Deutschland
Tel.: +49 (0)203 379 2500
E-Mail: schiffers@kunststofftech.com

Amerika / The Americas

Prof. Prof. hon. Dr. Tim A. Osswald
Polymer Engineering Center, Director
University of Wisconsin-Madison
1513 University Avenue
Madison, WI 53706
USA
Tel.: +1 608 263 9538
E-Mail: osswald@engr.wisc.edu

Verlag / Publisher

Carl-Hanser-Verlag GmbH & Co. KG
Jo Lendle, Oliver Rohloff
Geschäftsführer
Kolbergerstraße 22
81679 München
Germany
Tel.: +49 (0)89 99830 0
E-Mail: info@hanser.de

Redaktion / Editorial Office

Dr.-Ing. Eva Bittmann
Janina Mittelhaus, M.Sc.
E-Mail: redaktion@kunststofftech.com