

eingereicht/handed in: 10.07.2020
angenommen/accepted: 18.01.2021

**Frederik Obermeier (M.Sc.)¹, Mara Schumacher (B.Eng.)¹, Simon Barth (M.Sc.)¹,
Prof. Dipl.-Ing. Peter Karlinger¹, Prof. Dr. Andreas Michanickl¹,
Prof. Dr.-Ing. Michael Schemme¹, Prof. Dr.-Ing. Volker Altstädt²**
¹Technische Hochschule Rosenheim, F&E Kunststofftechnik und Holztechnik;
²Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe

Verstärkung von Polypropylen mit Holzfasern durch Direkt-Compoundierung

Ergänzend zum bisherigen Stand der Wissenschaft und Technik wurden in dieser Veröffentlichung Fichtefasern aus einem thermo-mechanischen Aufschlussprozess über einen Spritzgusscompounder mit Polypropylen und Haftvermittler direkt compoundiert. Bei der direkten einstufigen Verarbeitung wurde ein steigender Holzfasernanteil bis 30 Gew.-% untersucht. Die Charakterisierung der Materialkombinationen erfolgte durch Zugversuche, Melt-Flow-Rate - Messungen, Dichtebestimmung, Mikroskopie und Kerbschlagbiegeversuche. Bei steigendem Holzfasernanteil wird eine Steigerung der Zugeigenschaften, der Viskosität und der Dichte festgestellt. Die Kerbschlagzähigkeit bleibt bei steigendem Holzfasernanteil im Rahmen der Standardabweichung konstant, ist jedoch im Vergleich zum unveränderten Grundpolymer geringer.

Reinforcement of polypropylene with wood fibres by direct compounding

In addition to the previous state of the art in science and technology, in this publication spruce fibres from a thermo-mechanical pulping process were directly compounded with polypropylene and coupling agent using an injection moulding compounder. An increasing wood fibre content of up to 30 wt.% was investigated in direct single-stage processing. The characterisation of the material combinations is carried out by tensile tests, melt-flow-rate measurements, density determination, microscopy and impact tests. An increase in tensile properties, viscosity and density is observed with increasing wood fibre content. The impact strength is lower compared to the unchanged base polymer, but remains constant within the standard deviation with increasing wood fibre content.

Verstärkung von Polypropylen mit Holzfasern durch Direkt-Compoundierung

F. Obermeier, M. Schumacher, S. Barth, P. Karlinger, A. Michanickl, M. Schemme, V. Altstädt

1 EINLEITUNG UND MOTIVATION



Bild 1: Hackschnitzel und Fasern aus Fichte (Hintergrund), Zugprüfstab und Kerbschlagbiegeprüfstab aus Polypropylen mit 20 Gew.-% Fichte (Vordergrund) über Spritzgusscompounder direkt compoundiert

Materialkombinationen aus Holz und Kunststoff sind seit längerer Zeit von Interesse [1]. Bekannt ist der Einsatz von Holzmehl als Füllstoff in Extrusion und Spritzguss [2]. Bezeichnet wird diese Produktklasse meist als WPC (Wood Plastic Composite). Im Gegensatz zur Verwendung von Naturfasern (z.B. Flachs, Hanf) resultiert eine Erhöhung des Holzmehlanteils lediglich in einer Erhöhung der Steifigkeit, jedoch nicht in der Verbesserung der Festigkeit. [3] Des Weiteren stellen Bledzki et al. und Stadlbauer et al. die sinkende Schlagzähigkeit bei steigendem Holzanteil als eines der Hauptprobleme von WPCs dar [4, 5].

Diverse Untersuchungen zeigen, dass Holzfasern durchaus das Potenzial haben, die mechanischen Eigenschaften zu verbessern [4-13]. Bisherige Untersuchungen beschränken sich hauptsächlich auf mehrstufige Verarbeitungsverfahren (Compoundierung, Granulierung, Spritzgießen).

Die direkte, einstufige Compoundierung von Glasfasern und Naturfasern über einen Spritzgusscompounder ist bereits seit längerem Stand der Technik [14-18]. Zur Direkt-Verarbeitung von Holz in der Kunststofftechnik gibt es bisher nur

wenige Studien [19]. In diesen Studien wurden keine Holzfasern, sondern Holzmehl untersucht [17-19].

Ergänzend zum Stand der Technik ist die Motivation dieser Arbeit die Direkt-Compoundierung von Holzfasern (Fichtefasern) aus einem thermo-mechanischen Aufschlussprozess auf einem Spritzgusscompounder. Dabei sollte der Einfluss eines steigenden Holzfaserteils auf die grundlegende Mechanik, Viskosität und Dichte herausgearbeitet werden. Es wird beurteilt, ob durch diesen Prozess und diese Werkstoffe grundsätzlich eine Faserverstärkung möglich ist.

Die Herstellung der Holzfasern durch einen Laborrefiner, deren Pelletierung (3.2.1 Herstellung von Holzfasern) und die Weiterverarbeitung auf einem Spritzgusscompounder (3.2.2 Direkt-Compoundierung) wurde an der TH Rosenheim durchgeführt. Die Holzfasern wurden mit Polypropylen und Haftvermittler direkt compoundiert. Ein steigender Holzfaserteil bis 30 Gew.-% wurde untersucht. Dabei wurden die verwendeten Materialien (Hackschnitzel, Fasern, Pellets) anhand mikroskopischer Studien bestimmt und mit der Literatur verglichen (4.1 Herstellung und Charakterisierung von Holzfasern). Nach Bledzki et al. wurden in vielen Veröffentlichungen die verwendeten holzbasierten Materialien nur sehr ungenau beschrieben [3, 5]. Dies erschwert die Interpretation und die Vergleichbarkeit dieser Studien. Die Beurteilung der Materialkombinationen erfolgte durch Zugversuche, Melt-Flow-Rate (MFR) Messungen, Dichtebestimmung, Mikroskopie und Kerbschlagbiegeversuche.

2 STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK

2.1 Holz- und Naturfasern in der Kunststofftechnik

Naturfasern sind in der DIN 60001 kategorisiert. Demnach können Naturfasern pflanzlichen, tierischen oder mineralischen Ursprungs sein. Pflanzliche Naturfasern können in Samenfasern (z.B. Baumwolle), Bastfasern (z.B. Flachs, Hanf, Kenaf) und Hartfasern (z.B. Sisal und Kokos) unterschieden werden. Holzfasern werden in dieser Norm nicht erwähnt [20]. In der Kunststofftechnik werden Holzfasern und Naturfasern folglich häufig separat genannt.

Holzfasern sind ein komplexer Werkstoffverbund. Die nachfolgende Darstellung zeigt den schematischen Aufbau einzelner Tracheiden mit Lumen und deren Verbindung aus Mittellamellen, Bild 2.

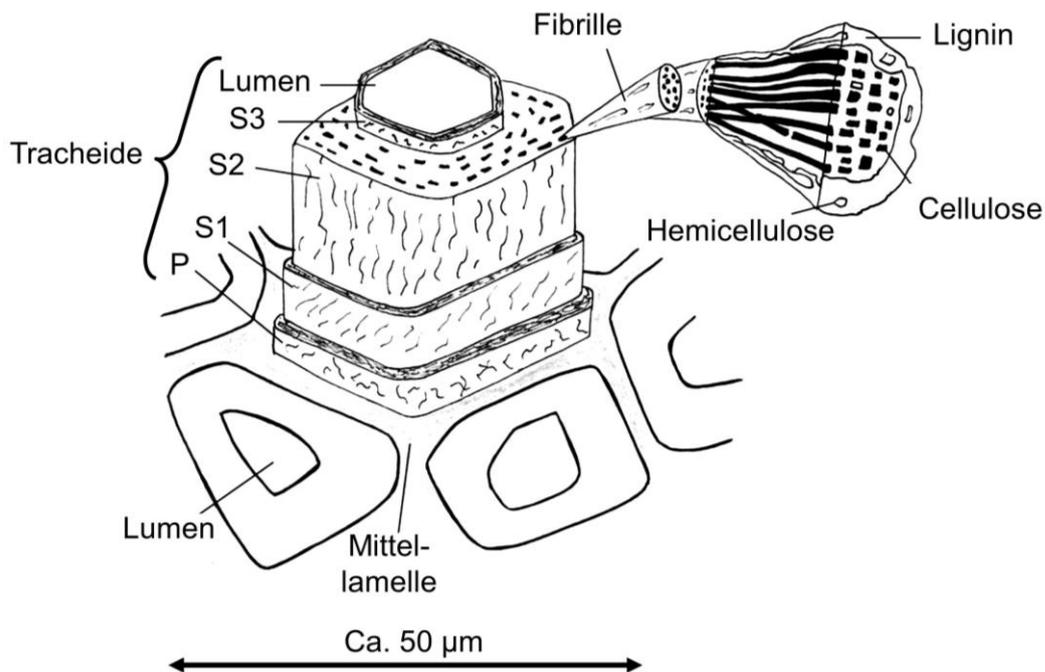


Bild 2: Prinzipieller Aufbau von Holz nach [21]

Tracheiden setzen sich aus einer Primärwand (P) und drei Sekundärwandschichten (S1, S2 und S3) zusammen. Diese Schichten bestehen aus Cellulosefibrillen, welche in Hemicellulose und Lignin eingebettet sind. Tracheiden haben einen Hohlraum in der Mitte, welcher als Lumen bezeichnet wird. Die einzelnen Tracheiden werden durch eine Mittellamelle verbunden, welche zu 90 % aus Lignin besteht. Die Primärwand (P) besteht hauptsächlich aus ungeordneten Cellulosefibrillen und Lignin. Die Dicke liegt im Bereich von 0,1 bis 0,2 µm. Die Sekundärwand S1 hat eine Dicke von 0,12 bis 0,35 µm und besteht aus Fibrillen, welche einen Winkel von 40 bis 50° zur Faserrichtung aufweisen. Die Schicht S2 hat eine Dicke von 1 bis 5 µm, und die Fibrillen verlaufen fast parallel zur Faserrichtung. S2 weist wenig Lignin und

Hemicellulose auf, macht allerdings 80 bis 90 % des Faserwandmaterials aus. Der Aufbau der Schicht S3 ist vergleichbar mit S1 und hat eine Dicke im Bereich von 0,1 bis 0,14 μm . [21]

Bledzki et al. vergleichen die Dichte, Zugfestigkeit und Zugmodul von Nadelholz, Naturfasern und Standardverstärkungsfasern der Kunststofftechnik, Tabelle 1. Bledzki et al. nehmen für die Dichte von Holz 1,5 g/cm^3 an [5]. Dies entspricht nach Kollmann der Dichte der Zellwand von Holz [22]. Die Rohdichte von Fichte mit Lumen im darrtrockenen Zustand liegt im Bereich von 0,42 g/cm^3 [23].

Faser	Dichte [g/cm^3]	Zugfestigkeit [MPa]	Zugmodul [GPa]
Nadelholz (z.B. Fichte)	1,5	1000	40
Flachs	1,5	345-1035	27,6
Sisal	1,5	511-635	9,4-22
E-Glas	2,6	3400	73
Aramid (hochsteif)	1,45	3000	130
Carbon (hochfest)	1,78	3600	240

Tabelle 1: Zugfestigkeit und Zugmodul einiger typischer Verstärkungsfasern der Kunststofftechnik im Vergleich zu Nadelholz [5, 24]

2.2 Compoundierung von Holzfasern

2.2.1 Mehrstufige Verarbeitungsverfahren

Bledzki et al. geben eine Übersicht über Veröffentlichungen zu Natur- und Holzfasern als Verstärkung in Polymeren [3, 5]. Ergebnisse diverser Untersuchungen zeigen die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Polypropylen durch verschiedene Holzfasern in Kombination mit Maleinsäure-anhydrid als Haftvermittler. Die Veröffentlichungen beschränken sich auf mehrstufige Verarbeitungsverfahren. [4-13]

Schirp und Stender haben Kiefernfasern aus einem thermo-mechanischen Aufschluss und mechanisch aufgeschlossenen Hanffasern in einem zweistufigen Prozess extrudiert und untersucht. Als Referenzmaterial wurde Holzmehl (J. Rettenmaier & Söhne, Lignocel® BK 40/90) verwendet. Der Faseranteil wurde konstant bei 70 Gew.-% gehalten. Als Matrix wurden Fasern aus Polypropylen mit Polyethylen Copolymer, Polypropylenfasern, Polypropylen mit Maleinsäure-anhydrid und Gleitmittel verwendet. Die Materialkombinationen wurden auf einem Heizmischer vermengt und auf einem konischen, gegenläufigen Doppelschneckenextruder in Platten extrudiert. Ohne

Maleinsäureanhydrid konnte bei Holzfasern und Hanffasern keine Verbesserung der Festigkeit im Vergleich zum Holzmehl festgestellt werden. Mit Haftvermittler konnte bei Hanffasern im Vergleich zu Holzmehl eine höhere Biegefestigkeit erreicht werden. [6] Mit Polyethylen als Matrix konnten Schirp et al. bei Buchefasern aus einem thermo-mechanischen Aufschluss keine Verbesserung der Biegefestigkeit im Vergleich zu Holzmehl feststellen. [25]

Peltola et al. untersuchten chemisch gebleichten Zellstoff aus Kiefer und Fichte, gebleichten Zellstoff aus Eukalyptus und Birke sowie mit Peroxid gebleichte Fichtefasern aus einem thermo-mechanischen Aufschluss. Teilweise wurden die Fasern vorab pelletiert, was die Dosierung vereinfachte. Als Referenzmaterial wurde ein Holzmehl aus Kiefer und Fichte verwendet. Als Matrix wurde Polypropylen und als Haftvermittler Maleinsäureanhydrid verwendet. Die Materialien wurden über einen Doppelschneckenextruder und eine Spritzgussmaschine mit einem Faseranteil von 30 Gew.-% verarbeitet. Die Fasern führten zu deutlich besseren mechanischen Kennwerten im Vergleich zum Holzmehl. Beim Grundpolymer wurde im Mittel eine Zugfestigkeit von 22,5 MPa und eine Schlagzähigkeit von 65,5 kJ/m² (ungekerbt) bestimmt. Durch die Fichtefasern erhöhte sich die Zugfestigkeit im Mittel auf 35,5 MPa. Die Schlagzähigkeit sank auf 17 kJ/m² [7].

Bledzki et al. untersuchten Faserverbunde mit PP und einer Kombination aus Regeneratcellulose und Holzmehl (Jeluwark, Jeluxyl Weho500, Fichte und Tanne). Als Haftvermittler wurde ein Maleinsäureanhydrid verwendet. Die Materialien wurden über einen Laborextruder vermischt und spritzgegossen. Die Zugfestigkeit des Grundpolymers lag zwischen 25 und 30 MPa. Bei der Materialkombination mit 40 Gew.-% Holzmehl stieg die Zugfestigkeit auf 49 MPa. Bei 40 Gew.-% Regeneratcellulose stieg die Zugfestigkeit auf 72 MPa. Bei beiden Compounds lagen die Dichten im Bereich von 1,05 und 1,07 g/cm³ [26].

2.2.2 Direkt-Compoundierung

Bürkle et al. vergleichen die klassische mehrstufige Verarbeitung von Compounds mit Holzfasern (Compoundierung, Granulierung, Spritzguss) mit der Direkt-Compoundierung im Spritzgussprozess (IMC-Technologie). Bei der Direkt-Compoundierung zeigt sich ein um 40 % geringerer Energieverbrauch. Die schonende Verarbeitung durch nur ein einmaliges Aufheizen vermindert die Geruchsemissionen und verbessert die Bauteileigenschaften. [14]

Im Teilvorhaben 9 des FENAFANetzwerkverbundes wurden verschiedene Kombinationen von Polypropylen, Flachfasern und Holzmehl (J. Rettenmaier & Söhne, Lignocel® BK 40/90) untersucht. Thermoplast und Haftvermittler werden nicht explizit genannt. Als Verarbeitungstechnologie wurde dabei der klassische mehrstufige Prozess (Compoundierung, Granulierung, Spritzgießen) mit einer Direkt-Compoundierung im Spritzgussprozess (KM 1300-14000 IMC) verglichen. Dabei wurden Verarbeitungsparameter optimiert und die Maschinenkomponenten der IMC-Technologie weiterentwickelt. Bei der Verarbeitung über die IMC-Technologie wurden Prüfkörper mit 20 Gew.-% und

40 Gew.-% Holzmehl untersucht. Die Erhöhung des Holzmehlanteils von 20 auf 40 Gew.-% wirkte sich positiv auf die normierte Zugfestigkeit und negativ auf die normierte Schlagarbeit aus [18].

Gusovius et al. zeigten in einer weiteren Veröffentlichung im Rahmen des FENAFNA-Netzwerkverbundes die Verarbeitung von Hanf und Flachs in Kombination mit Polypropylen (Borealis, BE170MO) und Haftvermittler (BYK, Scona TPPP8112 GA). Verarbeitet wurden die Materialien über einen Spritzgusscompounder (KM 1300-14000 IMC). Tabelle 2 zeigt die mechanischen Kennwerte des Grundpolymers laut Datenblatt [27] sowie die Messwerte der Mischungen mit 3 Gew.-% Haftvermittler und 30 Gew.-% Naturfaseranteil [17]. Veröffentlicht wurde dieser Artikel im Rahmen eines Buches von Fanguero und Rana, in welchem die Veröffentlichungen der International Conference on Natural Fibers aus dem Jahr 2015 zusammengefasst wurden [28].

Material	Grundpolymer Unverstärkt	Grundpolymer mit Flachs	Grundpolymer mit Hanf
Naturfaseranteil [Gew.-%]	-	30	30
Zugmodul [MPa]	1250	1970	2430
Zugfestigkeit [MPa]	25	21,5	26,9
Schlagzähigkeit [kJ/m²]	8 (Kerbe A)	8,16	11,35

Tabelle 2: Mechanische Kennwerte aus dem FENAFNA-Netzwerkverbund von direkt compoundierten Kunststoffen mit Naturfaserverstärkung, Zugprüfung nach ISO 527-1 und 527-4, Schlagzähigkeit nach ISO 179-2 edgewise bei Raumtemperatur, die Kerbart der Schlagzähigkeitsprüfkörper ist nur beim Datenblattwert des Grundpolymers bekannt [17, 27]

Guo und Kethineni untersuchten verschiedene Werkstoffe über einen einstufigen direkten Spritzgussprozess. Dabei wurden die Materialien über einen Trommelmischer vermengt und ohne Compoundierung direkt über eine Spritzgussmaschine verarbeitet. Als Grundpolymer wurde ein Polypropylen verwendet. Das Grundpolymer wurde in Kombination mit Holzmehl (P.J. Murphy Forest Products, Hartholz), Glasfasern und Kohlenstofffasern verarbeitet. Bei 20 Gew.-% Holzmehl sank die Zugfestigkeit des Verbundes um etwa 24 %. Bei einer Mischung aus 10 Gew.-% Holzmehl und 10 Gew.-% Glasfasern oder Kohlenstofffasern konnte die Zugfestigkeit um 30 % und 38 % gesteigert werden [19].

2.3 Zusammenfassung des Standes der Wissenschaft und Technik sowie Ableitungen für diese Arbeit

Die meisten Veröffentlichungen zu thermoplastischen Kunststoffen in Verbindung mit Holzmehl oder Holzfasern beschreiben klassische mehrstufige Verarbeitungsprozesse (Compoundierung, Granulierung und Spritzgießen).

Im Rahmen des FENFAFA-Netzwerkverbundes wurde die Direkt-Compoundierung von Naturfasern und Holzmehl über einen Spritzgusscompounder veröffentlicht.

Ergänzend zum Stand der Technik ist die Motivation dieser Arbeit die Direkt-Compoundierung von Holzfasern (Fichtefasern) aus einem thermo-mechanischen Aufschlussprozess auf einem Spritzgusscompounder. Dabei sollte der Einfluss eines steigenden Holzfaserteils auf die grundlegende Mechanik, Viskosität und Dichte herausgearbeitet werden. Es wird beurteilt, ob durch diesen Prozess und diese Werkstoffe grundsätzlich eine Faserverstärkung möglich ist.

3 MATERIAL UND METHODEN

3.1 Material

Es wurde Fichtenrundholz aus dem Rosenheimer Umland verwendet und daraus über einen thermo-mechanischen Aufschluss Holzfasern (Holzstoff) hergestellt. Dabei bleiben die Holzinhaltsstoffe Lignin und Polyosen im Vergleich zu chemisch aufgeschlossenem Zellstoff weitgehend erhalten. Man spricht auch von Ausbeuten größer 95 % bzw. der Massenverlust liegt unter 5 %. Die Schüttdichte der Fasern betrug 35 kg/m^3 . Zur Weiterverarbeitung auf dem In-Mould-Compounder wurden die Fichtefasern zu Pellets mit einer Schüttdichte von 110 kg/m^3 weiterverarbeitet (3.2.1).

Als Thermoplast wurde das Polypropylen Homopolymer HJ120UB von Borealis verwendet. Laut Datenblatt beträgt die Dichte des Polypropylens $0,905 \text{ g/cm}^3$ und hat einen MFR-Wert von 75 g/10 min bei 230°C und $2,16 \text{ kg}$ Prüfgewicht. [29]

Als Haftvermittler wurde ein mit Maleinsäureanhydrid gefropftes Polypropylen Copolymer der Firma BYK Additives verwendet. Die Typenbezeichnung ist SCONA TPPP 8112 GA. Der Gehalt von Maleinsäureanhydrid beträgt laut Datenblatt $1,4 \%$ und der MFR-Wert liegt bei 80 g/10 min bei 190°C und $2,16 \text{ kg}$ Prüfgewicht. [30]

3.2 Methoden

3.2.1 Herstellung von Holzfasern

Das Fichtenrundholz wurde manuell entrindet und mit einem Trommelhacker der Firma Bruks (Typ CV 400N-2M) zu Hackschnitzeln zerkleinert. Die Zerfaserung der frischen Hackschnitzeln erfolgte auf einer 12“ Laborrefineranlage vom Typ 12-1CP der Andritz AG. Der thermo-mechanische Aufschluss fand bei 160°C bzw. 5,2 bar Sattedampfdruck für 3 min statt. Für die Zerfaserung wurde die Mahlscheibe 12XASR01 eingesetzt [31]. Die feuchten Fichtefasern wurden über eine Pelletierpresse (Münch-Edelstahl, Typ RMP 250) zu Pellets weiter-verarbeitet. Bei der Pelletierung wird der Vorschub der Dosierschnecke und die Komprimierung manuell geregelt.

3.2.2 Direkt-Compoundierung

Die Direkt-Compoundierung der Materialien Polypropylen, Haftvermittler und Fichtepellets wurde auf einem Spritzgusscompounder von Krauss Maffei (KM 300 CX IMC) durchgeführt. Nachfolgende Tabelle zeigt die Verarbeitungsparameter, Tabelle 3.

Der Haftvermittler und die Fichtepellets wurden vor der Verarbeitung 3 Stunden bei 80°C in einem Umluftofen getrocknet. Die Materialien wurden gravimetrisch dosiert. Das Polypropylen und der Haftvermittler wurden über den regulären Materialeinzug zugeführt. Die Fichtepellets wurden über die Seitenbeschickung in den Compounder eingebracht.

Drehzahl Extruder [1/min]	400
Massedurchsatz [kg/h]	7
Staudruck (Extruder) [bar]	60
Verarbeitungstemperatur [°C]	170
Zweistufiger Spritzdruck [bar]	1500 / 1000
Zweistufige Einspritzgeschwindigkeit [mm/s]	50 / 20
Umschaltpunktgesteuerter Nachdruck [mm]	16
Einstufiger Nachdruck [bar]	350
Heißkanal [°C]	170
Werkzeugtemperatur [°C]	40

Tabelle 3: Parameter bei der Verarbeitung über den Spritzgusscompounder

Es wurde ein Multiprüfkörperwerkzeug der TH Rosenheim verwendet, Bild 3. Nachfolgende Abbildung zeigt die Geometrie des Werkzeugs bzw. der

Prüfkörper. Der Multiprüfkörper enthält vier reguläre Zugprüfstäbe (Typ 1A), zwei Zugprüfstäbe mit Bindenaht (Typ 1A), vier Schlagbiegestäbe ohne Kerbe (Typ 1), vier Schlagbiegestäbe mit Kerbe (Typ 1, Kerbart B) sowie eine Prüfplatte mit Filmanguss. In dieser Veröffentlichung wurden zum Zwecke der Materialprüfung die regulären Zugprüfstäbe und die gekerbten Schlagbiegestäbe verwendet.

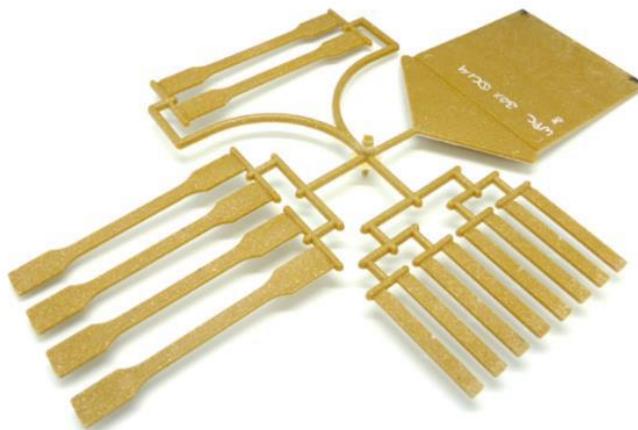


Bild 3: Zur Materialprüfung wurde ein Multiprüfkörper mit einem Werkzeug der TH Rosenheim verwendet

3.2.3 Materialprüfung

Die mikroskopischen Aufnahmen wurden mit einem Digitalmikroskop der Firma Zeiss vom Typ Smartzoom 5 durchgeführt. Die Beleuchtung ermöglicht Ringlicht und koaxiales Hellfeld.

Die Luftstrahlsiebanalysen wurden mit einem Luftstrahlsieb der Firma Hosokawa Alpine vom Typ e200 LS durchgeführt. Die verwendeten Maschenweiten der Siebe betragen 125, 315, 630, 1000, 1600 und 2500 μm . Die Probeneinwaage betrug 5 g. Das Luftstrahlsieb wurde in Kombination mit einer Waage von Mettler Toledo vom Typ PB602-S verwendet.

Die Zugprüfung wurde auf einer Zugprüfmaschine von Zwick/Roell vom Typ Z020 mit einer Kraftmessdose von 20 kN und taktilem Extensometer durchgeführt. Die Kerbschlagbiegeprüfung wurde auf einem Pendelschlagwerk der Firma Zwick/Roell vom Typ HIT50P durchgeführt.

Die Messung der Melt-Flow-Rate wurde mit einem Schmelzindex-Prüfgerät der Firma Göttfert vom Typ MI-3 durchgeführt. Der Prüfkanaldurchmesser betrug 9,5 mm. Im Zuge der MFR-Messungen wurde auch die Dichte der Schmelze ermittelt.

Die Computertomographie (CT) wurde mit einem TomoScope XS Plus der Firma Werth durchgeführt. Die maximale Länge des zu vermessenden Bauteils beträgt bei diesem Typ ca. 450 mm je nach Breite und Höhe. Die maximale Auflösung beträgt 60 Milliarden Voxel.

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.1 Herstellung und Charakterisierung von Holzfasern

Zur Herstellung von Holzfasern wurde Fichtenrundholz zu Hackschnitzeln zerkleinert (3.2.1 Herstellung von Holzfasern). In nachfolgender Mikroskopie eines Hackschnitzels aus Fichte ist die mikroskopische Struktur des Holzes sichtbar. Die regelmäßige Anordnung der Tracheiden, Bild 2, ist durch den Trommelhacker teilweise zerstört.

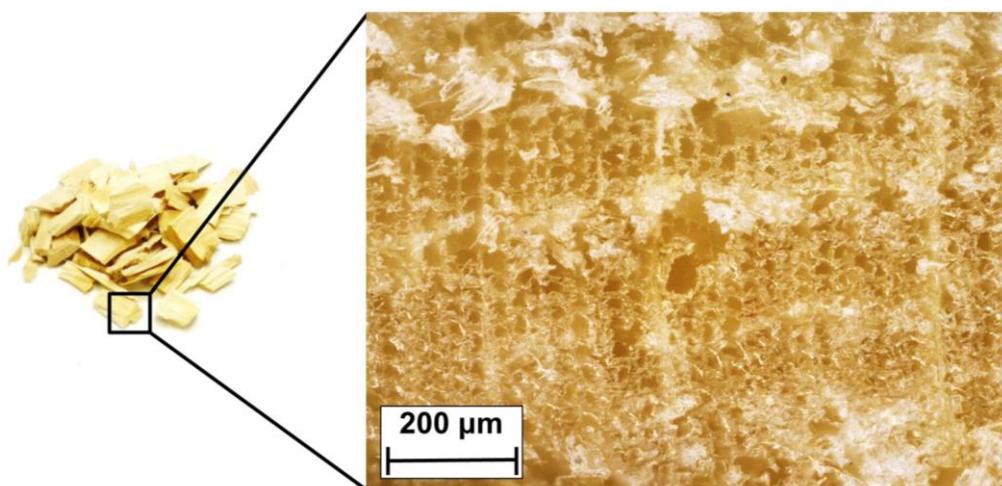


Bild 4: Übersichtsbild einiger Hackschnitzel aus Fichte (links), Mikroskopie eines Mikrotomanschnitts eines Hackschnitzels aus Fichte (rechts), Querschnitt in Bezug auf die Wachstumsrichtung des Baumes, Auflicht

Die Geometrie der Tracheiden variiert je nach Alter des Baumes, Lage im Stamm und Umwelteinflüssen in der Länge zwischen 1,7 und 3,7 mm beziehungsweise beim Durchmesser zwischen 20 und 40 μm [32]. Daraus ergibt sich ein durchschnittliches Längen-Durchmesser Verhältnis von 97:1. Es wird ersichtlich, dass ein Großteil des Fichtenholzes aus freiem Volumen in den Lumen besteht, die im lebenden Baum dem Stofftransport dienen. Die Literaturangaben der Rohdichte von darrtrockener Fichte von 0,42 g/cm^3 [23] wird so verständlich. Die Dichte der Zellwand beträgt laut Literatur im Mittel 1,5 g/cm^3 [22].

Die Hackschnitzel wurden in einer Laborrefineranlage zu Holzfasern aufgeschlossen (3.2.1 Herstellung von Holzfasern). Die Herstellung von Holzfasern im Refiner zieht eine von der Auswahl der Aufschlussparameter und der verwendeten Holzart abhängige Fasergrößenverteilung nach sich. Die Charakterisierung der Anteile an Faserbündeln, Einzelfasern und Feinanteil kann optisch und gravimetrisch erfolgen. Nachfolgende Abbildung zeigt ein Faserbündel und eine Einzelfaser. Das Faserbündel besteht aus mehreren Einzelfasern (Tracheiden). Die Einzelfaser besteht aus einer einzelnen Faser (Tracheide) mit nur einem Lumen. Faserbruchstücke und kleinere Partikel werden als Feinanteil

bezeichnet. Nachfolgend wird der Begriff Holzfasern synonym für ein Gemisch aus Faserbündel, Einzelfasern und Feinanteil verwendet.

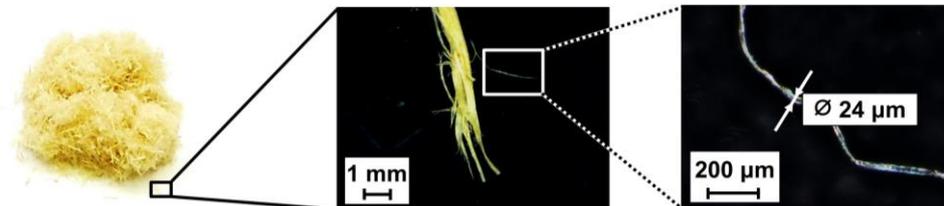


Bild 5: Übersichtsbild einiger thermo-mechanisch hergestellter Fasern aus Fichte (links), Mikroskopie eines Faserbündels aus Fichte (Mitte), Mikroskopie einer Einzelfaser aus Fichte (rechts)

Holzfasern sind über die klassischen Dosierer der Kunststofftechnik schwierig zu verarbeiten, da sie nicht rieselfähig sind, Bild 5 (Übersichtsbild der Refinerfasern aus Fichte). Aus diesem Grund wurden die Holzfasern über einen Zwischenschritt zu Pellets verdichtet. Dabei werden die Holzfasern über eine Pelletieranlage (3.2.1 Herstellung von Holzfasern) durch eine Lochmatrize gepresst. Nachfolgende Abbildung zeigt mehrere Fichtepellets und ein stark vergrößertes Pellet. Pellets bestehen aus Faserbündeln, Einzelfasern und Feinanteil. Durch die Pelletierung ist die Verarbeitung über eine klassische gravimetrische Dosierung möglich. Ziel bei der Compoundierung ist, die Holzfaserpellets wieder in Faserbündel und Einzelfasern aufzulösen, in der Matrix zu dispergieren und homogen in das Bauteil einzubringen.

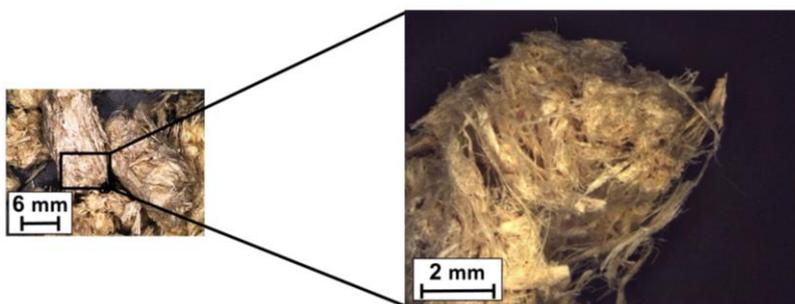


Bild 6: Übersichtsbild einiger Pellets aus Fichtefasern (links), Mikroskopie von einem Pellet aus Fichtefasern (rechts), auffällig ist die geringe Komprimierung

Die Analyse der gravimetrischen Größenverteilung erfolgte über ein Luftstrahlsieb (3.2.3 Materialprüfung). Nachfolgende Diagramme zeigen die Analyse von Fasern und Pellets aus Fichte, Bild 7. Das Luftstrahlsieb lässt keine ausreichende Aussage zur Geometrie der Fasern zu. Hierzu sind optische Verfahren besser geeignet. Die geringe Standardabweichung bei der Analyse der Fichtefasern deutet allerdings auf eine hohe Reproduzierbarkeit hin. Die Standardabweichung bei den Pellets ist deutlich höher. Dies liegt daran, dass sich von den Pellets während der Siebung kleinere Teile ablösen, Bild 6. Eine genauere Analyse der Fasergeometrien sowie des Längen-

Durchmesser-Verhältnisses (L/D Verhältnis) über optische Faserlängenmesssysteme (FASEP Eco System, FibreShape Cross M) und Computertomographie (TomoScope XS Plus) werden aktuell an der TH Rosenheim untersucht.

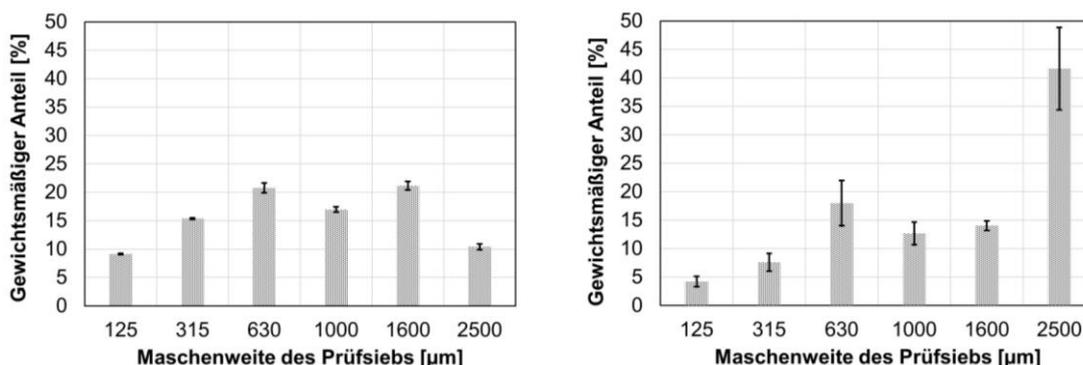


Bild 7: Luftstrahlsiebanalyse von Holzfasern aus Fichte (links) und deren Pellets (rechts), n = 3 ± SD

4.2 Direkt-Compoundierung von Holzfasern

4.2.1 Zugversuch, Viskosität und Dichte

Die Holzfaserpellets (Bild 6 und Bild 7) wurden über den Spritzgusscompounder (3.2.2) mit steigendem Holzanteil, Haftvermittler und Grundpolymer (3.1) direkt compoundiert.

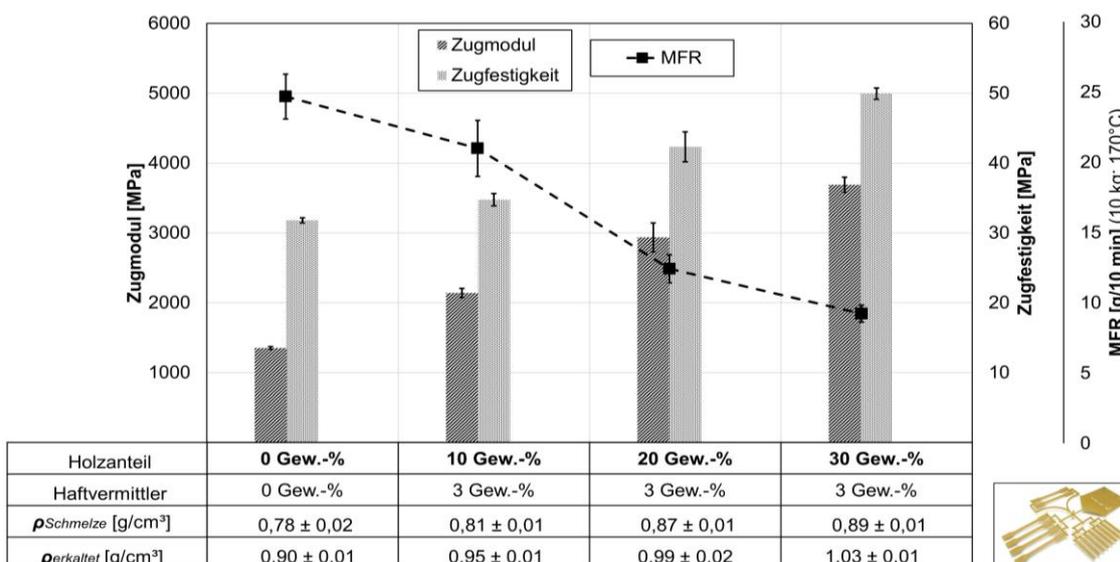


Bild 8: Zugprüfung nach ISO 527-2/1A von PP mit Haftvermittler und unterschiedlichem Holzanteil, MFR-Messung, ρSchmelze und ρerkaltet mit n = 3 ± SD

Die Mechanik wurde über die Zugprüfung ISO 527-2/1A überprüft. Zur Charakterisierung der Viskosität wurde eine MFR Messung der gespritzten Prüfkörper durchgeführt. Bei der MFR-Messung wurde zudem die Dichte der Schmelze (ρ_{Schmelze}) bei den Prüfbedingungen ermittelt (10 kg, 170°C). Im Vergleich dazu wurde die Dichte der Prüfkörper im erkalteten Zustand (ρ_{erkaltet}) geometrisch über deren Gewicht ermittelt, Bild 8.

Ein steigender Holzanteil führt zu einer stetigen Erhöhung der Steifigkeit und Festigkeit. Die Holzfasern haben eine Verstärkungswirkung. Nachfolgende Tabelle zeigt die Messwerte des Diagramms im Vergleich zum Matrixpolymer (Bild 8).

Holzanteil [Gew.-%]	0	10	20	30
Zugmodul [MPa]	1352 ± 20	2142 ± 64	2937 ± 207	3691 ± 109
Zugfestigkeit [MPa]	31,8 ± 0,4	34,8 ± 0,9	42,3 ± 2,2	49,9 ± 0,9
MFR [g/10 min]	24,7 ± 1,6	21,0 ± 2,0	12,4 ± 1,0	9,2 ± 0,6

Tabelle 4: Messwerte des Diagramms (Bild 8), Zugprüfung nach ISO 527-2/1A, MFR-Messung mit $n = 3 \pm SD$

Der theoretische Faservolumenanteil lässt sich vom Fasergewichtsanteil mit nachfolgender Gleichung ableiten [24] und wird in Tabelle 5 dargestellt. Die Messung des Faservolumenanteils mittels CT wird aktuell an der TH Rosenheim untersucht.

$$\varphi = \frac{\psi}{\psi + (1 - \psi) \times \frac{\rho_{\text{Faser}}}{\rho_{\text{Matrix}}}}$$

mit

φ :	Faservolumenanteil
ψ :	Fasergewichtsanteil (Tabelle 4)
ρ_{Faser} :	Dichte der Holzfaser (1,5 g/cm ³ , Tabelle 1)
ρ_{Matrix} :	Dichte der Matrix (0,905 g/cm ³ , 3.1 Material)

Mit dem theoretischen Faservolumenanteil lässt sich der theoretisch maximale Zugmodul parallel zur Faserrichtung errechnen. Die theoretische Betrachtung ist stark vereinfacht unter den Annahmen, dass es sich um eine unidirektionale und endlose Faserverstärkung handelt, die Belastung parallel zur Faser erfolgt, Matrix und Faser isotrope Eigenschaften haben und die Faser-Matrix-Haftung vollkommen ist [24].

$$E_{\parallel} = E_{Faser} \times \varphi + E_{Matrix} \times (1 - \varphi)$$

mit

E_{\parallel} :	<i>Zugmodul des Faserverbunds parallel zur Faserrichtung</i>
E_{Faser} :	<i>E-Modul der Faser (40 GPa, Tabelle 1)</i>
φ :	<i>Faservolumenanteil (Tabelle 5)</i>
E_{Matrix} :	<i>E-Modul der Matrix (1352 MPa, Tabelle 4)</i>

Holzanteil [Gew.-%]	0	10	20	30
φ Holzanteil [Vol.-%]	0	6	13	21
Theoretischer Zugmodul$_{\parallel}$ [MPa]	1352	3780	6417	9292
Gemessener Zugmodul [MPa]	1352 ± 20	2142 ± 64	2937 ± 207	3691 ± 109

Tabelle 5: Fasergewichtsanteil, theoretischer Faservolumenanteil, theoretischer und gemessener Zugmodul

Der gemessene Zugmodul ist wesentlich niedriger als der theoretisch mögliche Zugmodul, Tabelle 5. Der Unterschied erklärt sich durch die stark vereinfachten Annahmen bei der Berechnung des theoretischen Zugmoduls. Bei der Verarbeitung können diese vereinfachten Annahmen kaum realisiert werden. Bei direkt compoundierten Holzfasern handelt es sich um eine diskontinuierliche Faserverstärkung.

Bei steigendem Holzanteil kann zudem eine stetige Abnahme der Melt-Flow-Rate, also eine Erhöhung der Viskosität festgestellt werden. Die Erhöhung der Viskosität von thermoplastischen Schmelzen durch Füllstoffe oder Verstärkungsfasern ist allgemein bekannt.

Der Anstieg der Dichte mit steigendem Holzanteil (Bild 8) mag zunächst nicht intuitiv erscheinen. Das verwendete Polypropylen hat laut Datenblatt eine Ausgangsdichte von 0,905 g/cm³. Im darrtrockenen Zustand hat Fichte eine Dichte von 0,42 g/cm³ [23]. Die niedrige Dichte von Fichte im darrtrockenen Zustand liegt an dem großen freien Raum in den Lumen (Bild 4). Demnach müsste die Dichte des Verbundes bei einem steigenden Holzanteil sinken, wenn die Luftanteile in den Lumen erhalten bleiben. Es zeigt sich jedoch, dass sich die Holzfasern durch die Verarbeitung verändern. Entweder füllen sich die Lumen mit Schmelze oder die Zellwände der Tracheiden werden durch die hohen Scherkräfte und Drücke (Compoundierung, Staudruck, Spritzdruck) aufgebrochen oder komprimiert, Bild 9. Dies wird im Vergleich zu der Prinzipskizze in Bild 2 deutlich. Die reine Dichte der Zellwände beträgt ca. 1,5 g/cm³ [22]. Durch das Füllen der Lumen oder Aufbrechen der Tracheiden kommt es zu dem Anstieg der Dichte des Verbundes.

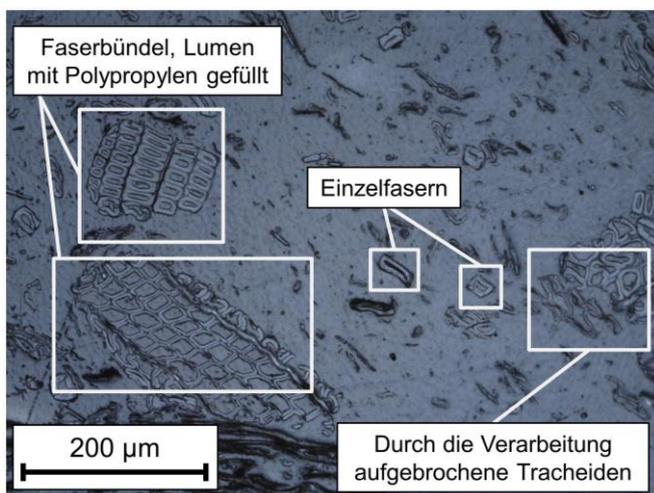


Bild 9: PP mit 20 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler, Anschliff, koaxiales Hellfeld

In Bild 9 lassen sich Einzelfasern und Faserbündel erkennen. Außerdem ist Feinanteil erkennbar, also Holzstrukturen, welche kleiner sind als eine Einzelfaser (4.1 Herstellung und Charakterisierung von Holzfasern). Die Holzfaserpellets (Bild 6) lösen sich in Faserbündel, Einzelfasern und Feinanteil auf und fügen sich homogen in die Matrix ein. Durch das Füllen der Lumen mit der Matrix lässt sich auch die Verbesserung der Mechanik erklären. Die Matrix (Polypropylen) geht durch das Füllen der Lumen eine formschlüssige Verbindung mit den Holzfasern ein. Dies wird verstärkt durch die Verwendung eines Haftvermittlers der zusätzlich eine stoffschlüssige Verbindung von dem unpolaren Polypropylen zur Holzfaser schafft. Aufgrund der hohen Festigkeit und Steifigkeit von Holzfasern (Tabelle 1) kommt es so zu einer Verstärkungswirkung im Vergleich zum Grundpolymer.

Der Versuch mit 30 Gew.-% Holzanteil (Bild 8) wurde wiederholt, und die Ergebnisse konnten bestätigt werden, Tabelle 6. Beim wiederholten Versuch kam es zum leichten Abfall der Zugfestigkeit nach ISO 527-2/1A. Dies lässt sich durch Schwankungen bei der Verarbeitung erklären (Material, Mensch, Maschine, Mitwelt). Bei dem Wiederholungsversuch konnte außerdem der Effekt des Haftvermittlers nachgewiesen werden. Der Mittelwert der Zugfestigkeit sank ohne Haftvermittler deutlich ab.

Versuchsreihe	1 (Bild 8)	2	2
Haftvermittler [Gew.-%]	3	3	0
Holzanteil [Gew.-%]	30	30	30
Zugfestigkeit [MPa]	49,9 ± 0,9	44,7 ± 2,4	30,9 ± 0,6

Tabelle 6: Validierungsversuch und Effekt des Haftvermittlers auf die Zugfestigkeit von PP mit 30 Gew.-% Holzanteil

4.2.2 Kerbschlagbiegeversuch

Die Schlagzähigkeit bei steigendem Holzanteil wurde über einen Kerbschlagbiegeversuch nach ISO 179/1eB ermittelt, Bild 10. Es zeigte sich, dass die Schlagzähigkeit im Vergleich zum Grundpolymer leicht abfiel. Bei steigendem Holzanteil blieb die Schlagzähigkeit im Rahmen der Standardabweichung jedoch konstant.

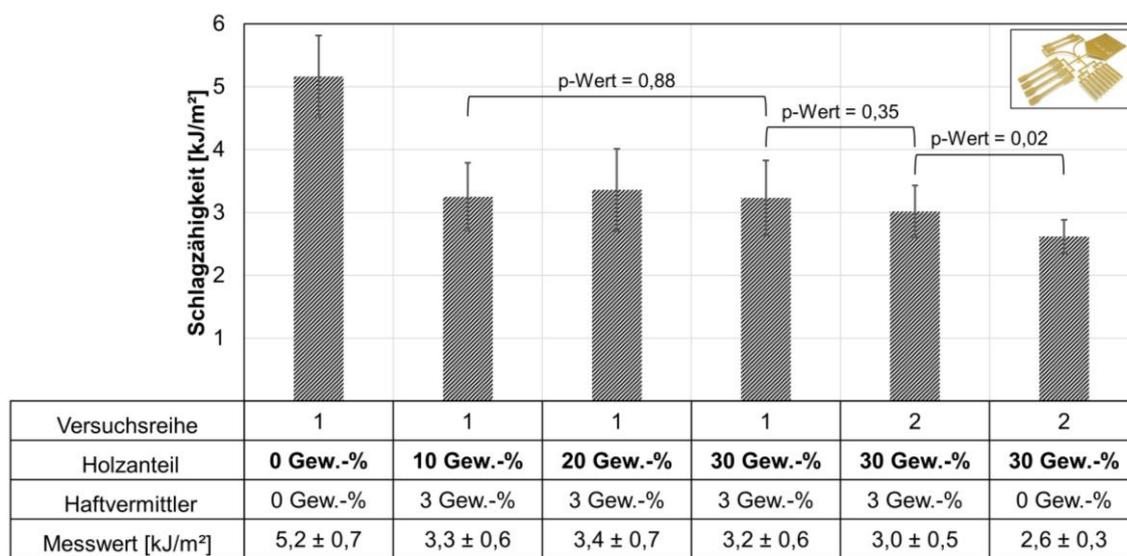


Bild 10: Schlagzähigkeitsprüfung ISO 179/1eB (edgewise, Kerbart B) von PP mit und ohne Haftvermittler und unterschiedlichem Holzanteil aus zwei Versuchsreihen, $n = 10 \pm SD$, p-Wert durch einfaktorielle Varianzanalyse bei $\alpha = 0,05$

Die konstante Schlagzähigkeit bei steigendem Holzanteil ist im Vergleich zum Stand der Wissenschaft und Technik positiv hervorzuheben. Unter anderem Bledzki et al. und Stadlbauer et al. stellen die sinkende Schlagzähigkeit bei steigendem Holzanteil als eines der Hauptprobleme von WPCs dar [4, 5]. Durch die Compoundierung konnten die Holzfaserpellets (Bild 6) in der Matrix dispergiert werden. Die Pellets lösen sich in Faserbündel, Einzelfasern und Feinanteil auf (Bild 9). Die konstante Schlagzähigkeit erklärt sich durch die homogene Einarbeitung der Pellets sowie durch die formschlüssige und stoffschlüssige Verbindung von Matrix und Holzfaser (4.2.1 Zugversuch, Viskosität und Dichte). Bei einer einfaktoriellen Varianzanalyse und einem Alphaniveau von 0,05 besteht kein Unterschied zwischen der Schlagzähigkeit in Versuchsreihe 1 mit 10, 20 sowie 30 Gew.-% Holzanteil (p-Wert = 0,88). Der direkte Vergleich von Versuchsreihe 1 und 2 bei 30 Gew.-% Holzanteil zeigt ebenfalls keinen Unterschied (p-Wert = 0,35). Bei Versuchsreihe 2 zeigt sich bei gleichem Alphaniveau ein Unterschied mit und ohne Haftvermittler (p-Wert = 0,02).

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ergänzend zum Stand der Wissenschaft und Technik wird in diesem Artikel belegt, dass durch die Direkt-Compoundierung von Holzfasern (Fichtefasern) aus einem thermo-mechanischen Aufschlussprozess auf einem Spritzgusscompounder eine Faserverstärkung möglich ist.

Ein steigender Holzanteil führt zu einer stetigen Erhöhung der Steifigkeit und Festigkeit. Die Holzfasern haben eine Verstärkungswirkung. Die Pelletierung der Holzfasern ermöglicht eine einfache Dosierung über die gravimetrische Dosiereinrichtung. Die Holzfaserpellets lösen sich durch die Verarbeitung im Spritzgusscompounder in Faserbündel, Einzelfasern und Feinanteil auf und fügen sich homogen in die Matrix ein. So bleibt auch die Kerbschlagzähigkeit bei steigendem Holzfaseranteil im Rahmen der Standardabweichung konstant. Die erreichten Werte für Steifigkeit und Festigkeit mit einem Holzfaseranteil von 30 Gew.-% (Bild 8) übersteigen die Werte aus FENAFa mit 30 Gew.-% Hanf und Flachs deutlich [17]. Prozess und Materialien aus FENAFa (Tabelle 2) können sehr gut mit den Ergebnissen dieser Untersuchung verglichen werden. Ein steigender Füllgrad führt außerdem zur Erhöhung der Dichte und der Viskosität. Die Lumen der Holzfasern füllen sich teilweise mit Kunststoff. Die Dichte der Zellwand übersteigt die Dichte des Grundpolymers. So kommt es zum Anstieg der Dichte des Verbundwerkstoffs.

Im Rahmen einer Entwicklungs-Kooperation mit der Firma Werth wurde eine vergleichende Untersuchung von Computertomographie und Mikroskopie durchgeführt, Bild 11. Es zeigt sich, dass mittels der Computertomographie ebenfalls Faserbündel und Einzelfasern detektierbar sind. Die Computertomographie ermöglicht im Vergleich eine zerstörungsfreie Prüfung und hat einen deutlich geringeren Präparationsaufwand.

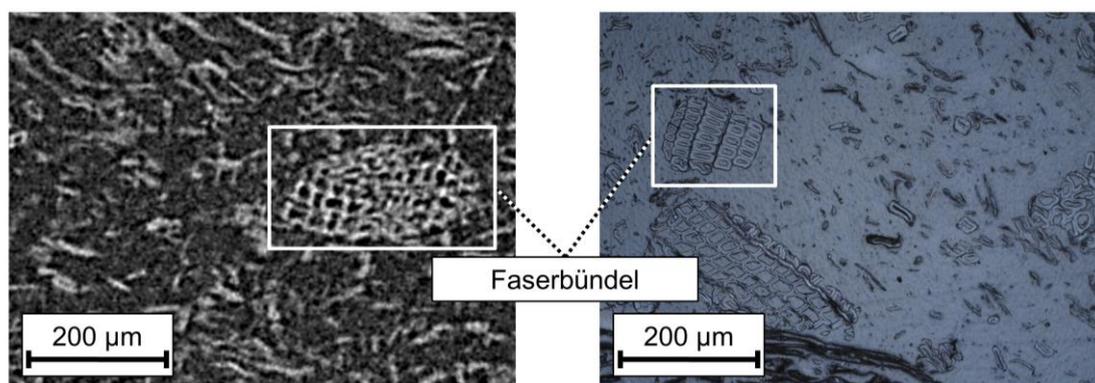


Bild 11: Vergleichende Darstellung einer Computertomographie (links) und einer Mikroskopie (rechts, Anschliff, koaxiales Hellfeld), PP mit 20 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler

Im Verlauf des Forschungsprojekts NFRipp werden weitere Untersuchungen mittels Computertomographie zur Holzfasergeometrie, deren dreidimensionale Lage, deren Dichte und deren Verformung durchgeführt. Das Verhalten der Lumen in der Interaktion mit der Kunststoffschmelze beim Füllen wird weiter untersucht.

Die Möglichkeiten zu einer genaueren Analyse der Fasergeometrien beim Compoundier- und Spritzgussprozess sowie des Längen-Durchmesser-Verhältnisses (L/D Verhältnis) über optische Faserlängenmesssysteme (FASEP Eco System, FibreShape Cross M) und Computertomographie (TomoScope XS Plus) werden aktuell an der TH Rosenheim untersucht.

Des Weiteren werden vertiefende Untersuchungen und Parametervariationen beim Refiner (z.B. Holzfaserart, Mahlscheibe, Druck) sowie beim Spritzgusscompounder (z.B. Temperatur, Druck) durchgeführt.

6 DANKSAGUNG

Die Ergebnisse dieser Veröffentlichung wurden im Rahmen des Forschungsprojekts NFRipp (Förderkennzeichen 13FH069PX6) an der TH Rosenheim gewonnen. Dabei möchten wir uns herzlich für die Förderung durch das BMBF sowie beim VDI als Projektträger bedanken.

Wir danken allen industriellen Kooperationspartnern, welche dieses Projekt unterstützen (in alphabetischer Reihenfolge): Brose Fahrzeugteile, Bamberg, Faurecia Autositze, Stadthagen, Frimo, Sontra, Krauss Maffei Technologies, München, Krelus, Oberentfelden, Schweiz, Pfeleiderer Deutschland, Neumarkt, und Pöppelmann, Lohne.

Außerdem geht ein herzliches Dankeschön an Borealis Polyolefine, Linz, Österreich und Krahn Chemie, Hamburg, die uns Versuchsmaterialien bereitstellen.

Des Weiteren bedanken wir uns bei allen Kollegen an der TH Rosenheim, welche direkt oder indirekt dieses Projekt unterstützen. Nachfolgend in alphabetischer Reihenfolge: Sabine Hummel, Thomas Koch, Roberto Lackner, Thomas Schmid und Markus Zillmer. Außerdem bedanken wir uns bei dem Studenten der TH Rosenheim Jonas Herz.

Abschließend wollen wir uns bei der Firma Werth für die Computertomographie im Rahmen unserer gemeinsamen Entwicklungs-Kooperation bedanken.

Literatur

- [1] Carus, M.; Partanaen, A. Biocomposites, find the real alternative to plastic – An examination of biocomposites in the market
Reinforced Plastics 2019; Volume 63; S. 317-321
DOI: 10.1016/j.repl.2019.04.065
- [2] Medina, L.; Dzalto, J. Natural Fibers
Comprehensive Composite Materials II; Volume 74; S. 269-294; 2018
DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09877-5
- [3] Bledzki, A.K.; Jazkiewicz, A.; Murr, M.; et al. Processing techniques for natural- and wood-fibre composites
Erschienen in: Pickering, K.L.: Properties and Performance of Natural-Fibre Composites; Woodhead Publishing; S. 163-192; 2008
DOI: 10.1533/9781845694593.1.163
- [4] Stadlbauer, W.; Wimmer, D.; Hartl, F.; et al. Wood Plastic Composites – Neues Eigenschaftsprofil durch Refinerfasern
Schriftenreihe 63/2010; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie; Wien; 2010
- [5] Bledzki, A.K.; Sperber, V.E.; Faruk, O. Natural and Wood Fibre Reinforcement in Polymers
Rapra Review Reports; Vol. 13, No. 8, rept. 152; Smithers Rapra Publishing; Shrewsbury; 2002
ISBN: 1-85957-359-2
- [6] Schirp, A.; Stender, J. Properties of extruded wood-plastic composites based on refiner wood fibres (TMP fibres) and hemp fibres
European Journal of Wood and Wood Products; Volume 68; S. 219–231; 2010
DOI: 10.1007/s00107-009-0372-7
- [7] Peltola, H.; Pääkkönen, E.; Jetsu, P.; et al. Wood based PLA and PP composites: Effect of fibre type and matrix polymer on fibre morphology, dispersion and composite properties
Composites: Part A; Volume 61; S. 13–22; 2014
DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.02.002

- [8] Park, B.-D.; Balatinez, J.J. Short term flexural creep behavior of wood-fiber/polypropylene composites
Polymer Composites; Volume 19; Nummer 4; S. 377–382; 1998
DOI: 10.1002/pc.10111
- [9] Park, B.-D.; Balatinez, J.J. Mechanical properties of wood-fiber/toughened isotactic polypropylene composites
Polymer Composites; Volume 18; Nummer 1; S. 79–89; 1997
DOI: 10.1002/pc.10263
- [10] Costa, T.H.S.; Carvalho, D.L.; Souza, D.C.S.; et al. Statistical experimental design and modeling of polypropylene–wood fiber composites
Polymer Testing; Volume 19; Nummer 4; S. 419–428; 2000
DOI: 10.1016/S0142-9418(99)00014-8
- [11] Coutinho, F.M.B.; Costa, T.H.S.; Carvalho, D.L.; Polypropylene–wood fiber composites: Effect of treatment and mixing conditions on mechanical properties
Journal of Applied Polymer Science; Volume 65; Nummer 6; S. 1227–1235; 1997
DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19970808)65:6<1227::AID-APP18>3.0.CO;2-Q
- [12] Anglès, M.N.; Salvadó, J.; Dufresne, A. Steam-exploded residual softwood-filled polypropylene composites
Journal of Applied Polymer Science; Volume 74; Nummer 8; S. 1962–1977; 1999
DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19991121)74:8<1962::AID-APP10>3.0.CO;2-X
- [13] Chuai, C.; Almdal, K.; Poulsen, L.; Plackett, D. Conifer fibers as reinforcing materials for polypropylene-based composites
Journal of Applied Polymer Science; Volume 80; Nummer 14; S. 2833–2841; 2001
DOI: 10.1002/app.1400
- [14] Bürkle, E.; Scheel, G.; Darnedde, L. Energieeffiziente Verarbeitung naturfaserverstärkter Kunststoffe
Kunststoffe 2/2009; Carl Hanser Verlag; München; 2009

- [15] Rohde-Tibitz, M. Direct Processing of Long Fiber Reinforced Thermoplastic Composites and their Mechanical Behavior under Static and Dynamic Load
Carl Hanser Verlag; München; 2015
ISBN: 978-1-56990-629-3
DOI: 10.3139/9781569906309
- [16] Schadhauser, M.; Martin, J.; Würtele, M.; et al. Homogenität ist der Schlüssel – Wie sich die Durchmischung von Fasern und Schmelze objektiv beurteilen lässt
Kunststoffe 9/2017; Carl Hanser Verlag; München; 2017
- [17] Gusovius, H.-J.; Wallot, G.; Schierl, S.; et al. Processing of Wet Preserved Natural Fibers with Injection Molding Compounding (IMC)
Erschienen in: Figueiro, R.; Rana, S.: Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications. From Science to Market; Springer Netherlands; Dordrecht; S.197-210; 2016
DOI: 10.1007/978-94-017-7515-1_15
- [18] N.N. FENAFa-Netzwerkverbund - Teilvorhaben 9: IMC basierte Technologien für den Einsatz von Naturfasern in innovativen Spritzgießbauteilen am Beispiel von Transportsystemen - Schlussbericht zum Vorhaben - Laufzeit: 01.06.09 bis 31.05.14
Schlussbericht; Krauss Maffei Technologies GmbH; München; 2014
DOI: 10.2314/GBV:862441692
- [19] Guo, G.; Kethineni, C. Direct injection molding of hybrid polypropylene/wood-fiber composites reinforced with glass fiber and carbon fiber
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology; Volume 106; S. 201-209; 2020
DOI: 10.1007/s00170-019-04572-7
- [20] N.N. DIN 60001-1:2001-05, Textile Faserstoffe – Teil 1: Naturfasern und Kurzzeichen
Beuth Verlag GmbH; Berlin; 2010
DOI: 10.31030/9129378

- [21] Koplín, T. Untersuchung der einflussgebenden Parameter bei der Compoundierung von Cellulosefaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen mittels eines gleichläufigen Doppelschneckenextruders
Dissertation; TU Clausthal; 2014
DOI: 10.21268/20150507-094135
- [22] Kollmann, F. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Zweiter Band: Holzschutz, Oberflächenbehandlung, Trocknung und Dämpfen, Veredelung, Holzwerkstoffe, spanabhebende und spanlose Holzbearbeitung, Holzverbindungen
Springer; Berlin Heidelberg; 1955
DOI: 10.1007/978-3-642-52947-4
- [23] Sell, J. Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten
Lignum, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für das Holz; Baufachverlag; 4. Auflage; Dietikon; 1997
ISBN: 3855652236
- [24] Ehrenstein, G.W. Faserverbund-Kunststoffe, Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften
2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2006
ISBN-10: 3-446-22716-4
DOI: 10.3139/9783446457546
- [25] Schirp, A.; Mannheim, M.; Plinke, B. Influence of refiner fibre quality and fibre modification treatments on properties of injection-moulded beech wood-plastic composites
Composites Part A: Applied Science and Manufacturing; Volume 61; S. 245-257; 2014
DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.03.003
- [26] Bledzki, A. K.; Franciszczak, P.; Meljon, A. High performance hybrid PP and PLA biocomposites reinforced with short man-made cellulose fibres and softwood flour
Composites Part A: Applied Science and Manufacturing; 74; S. 132-139; 2015
DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.03.029
- [27] N.N. Technisches Datenblatt Polypropylene BE 170 MO
Borealis AG; Wien; 2013
- [28] Figueiro, R.; Natural Fibres: Advances in Science and Technology

- Rana, S. Towards Industrial Applications. From Science to Market
Springer Netherlands; Dordrecht; 2016
DOI: 10.1007/978-94-017-7515-1
- [29] N.N Technisches Datenblatt Polypropylene HJ 120 UB
Borealis AG; Wien; 2015
- [30] N.N Technisches Datenblatt SCONA TPPP 8112 GA.
Haftungsmodifikator für TPE-S-Overmolding
Compounds sowie Koppler für Naturfasercompounds
in Polypropylen
BYK-Chemie GmbH; Wesel; 2013
- [31] Obermeier, F.; Thermoplastische Hybridverbunde mit
Schumacher, M.; Holzfaserverstärkung
Barth, S.;
et al. Technomer 2019; 26. Fachtagung über Verarbeitung
und Anwendung von Polymeren; Technische
Universität Chemnitz; 2019
ISBN: 978-3-939382-14-0
- [32] Fengel, D.; Wood. Chemistry, Ultrastructure, Reactions
Wegener, G. Kessel; Remagen; 2003
ISBN: 3935638-39-6

Bibliography

DOI 10.3139/O999.02022021
Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics
Technology 17 (2021) 2; page 87–111
© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
ISSN 1864 – 2217

Stichworte:

Direkt-Compoundierung, Spritzgusscompounder, Holz, Holzfasern, Polypropylen

Keywords:

Direct compounding, injection moulding compounder, wood fibres, polypropylene

Frederik Obermeier (M.Sc.)¹
Mara Schumacher (B.Eng.)¹
Simon Barth (M.Sc.)¹
Prof. Dipl.-Ing. Peter Karlinger¹
Prof. Dr. Andreas Michanickl¹
Prof. Dr.-Ing. Michael Schemme¹
Prof. Dr.-Ing. Volker Altstädt²

E-Mail: frederik.obermeier@th-rosenheim.de
Webseite: www.th-rosenheim.de
Tel.: +49 (0) 8031 805-2266

¹Technische Hochschule Rosenheim
F&E Kunststofftechnik und Holztechnik
Hochschulstraße 1
83024 Rosenheim

²Universität Bayreuth
Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe
Universitätsstraße 30 / Gebäude FAN A
D-95447 Bayreuth

Herausgeber / Editors:Editor-in-Chief

Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Tel.: +49 (0)9131/85 - 29703
Fax: +49 (0)9131/85 - 29709
E-Mail: ehrenstein@ikt.uni-erlangen.de

Europa / Europe

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer, verantwortlich
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Tel.: +49 (0)9131/85 - 29700
Fax: +49 (0)9131/85 - 29709
E-Mail: drummer@ikt.uni-erlangen.de

Amerika / The Americas

Prof. Prof. hon. Dr. Tim A. Osswald, verantwortlich
Polymer Engineering Center, Director
University of Wisconsin-Madison
1513 University Avenue
Madison, WI 53706
USA
Tel.: +1 608/263 9538
Fax: +1 608/265 2316
E-Mail: osswald@enr.wisc.edu

Verlag / Publisher:

Carl-Hanser-Verlag GmbH & Co. KG
Wolfgang Beisler
Geschäftsführer
Kolbergerstraße 22
D-81679 München
Tel.: +49 (0)89/99830-0
Fax: +49 (0)89/98480-9
E-Mail: info@hanser.de

Redaktion / Editorial Office:

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

Beirat / Advisory Board:

Experten aus Forschung und Industrie, gelistet unter
www.kunststofftech.com