

Entwicklung und Herstellung von kombinierten WPC-Trag- und Gleitelementen für die Fördertechnik

Use of WPC for components in conveying systems

*Clauß, B., Dr.-Ing.; Gehde, M., Prof. Dr.-Ing.; Nendel, K. Prof. Dr.-Ing.; Eichhorn, S.;
Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik, Technische Universität Chemnitz,
Reichenhainer Str. 70, D-09126 Chemnitz, GERMANY*

Zusammenfassung

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten resultieren aus dem Ansatz, die theoretisch ableitbaren erheblichen Vorteile der Werkstoffgruppe WPC zur Herstellung von kombinierten WPC-Trag- und Gleitelementen für fördertechnische Anwendungen industrieller Verkettungssysteme (Stückgutförderer) zu nutzen. Es wurde davon ausgegangen, dass sich die typischen Verschleißursachen hochbelasteter polymerer Gleitelemente:

- Abrasivverschleiß
- mechanische Überlast und Deformation in den Kontaktstellen
- thermisch bedingter Verschleiß

durch geeigneten Holzzusatz und –anteil zu höheren Grenzen hin verschieben lassen, indem der anfängliche Abrasivverschleiß der polymeren Komponente als Schmiermittel den Abrieb bzw. den Verschleiß und die Reibungszahl der stärker tragenden Holzkomponente verringert. Zudem sollen durch diese Werkstoffmischung die negativen Folgen steigender Temperaturentwicklung auf die Reibpaarung gesenkt werden.

Für die Optimierung der WPC-Werkstoffe zum Einsatz in maschinenbautechnischen Anwendungen wurden Rezepturen entwickelt, die neben dem verbesserten tribologischen Verhalten gleichfalls durch erhöhte mechanische Festigkeiten aufgrund gezielter Haftvermittlerzugabe gekennzeichnet sind. Einflußgrößen aus Rezeptur und Verarbeitung wurden untersucht, Grundlagenversuche zur Schweißbarkeit durchgeführt. Dabei zeigt sich eine geringere Abhängigkeit von Prozeßgrößen, wie Temperaturen oder Drücke in der Fügezone.

Die durchgeführten tribologischen Untersuchungen zur Verifikation der Annahme zeigen, daß bei der Verwendung von WPC in hoch belasteten Reibpaarungen ein verbesserter Gleitreibwert bei geringerem Verschleiß im Gegensatz zum reinen Kunststoff vorliegt und somit der Ansatz der Projektzielstellung bestätigt wurde. Für die Übertragung der Erkenntnisse in der Praxis wurde abschließend zusammen mit einem Industriepartner ein vorteilhaftes Profilsystem für einen Stückgutförderer konzipiert und in einer ersten Testanlage geprüft.

Motivation und Zielstellung der Arbeiten

In derzeitigen Stückgutfördersystemen verursacht das Reibungs- und Verschleißverhalten des Systems Zug-/ Tragmittel und Führungsschiene verschiedene Probleme, wie z. B. das Einarbeiten des Zugmittels in die Führungsschiene und damit eine Überlastung der Antriebe, die Bildung von Spuren und Kratzern auf der Oberfläche, das Abtragen von Partikeln und Weiterverschleppen in Produkte und vieles mehr. Dazu kommen noch durch den Austausch der Führungsschienen bedingte Wartungs- und Stillstandszeiten.

Vor allem aus tribologischen Aspekten wird ausgehend von den Erfahrungen mit Holzwerkstoffen als Konstruktions- und Lagerwerkstoff in früheren Zeiten nach einem neuen Werkstoff gesucht, der die o. g. Probleme mindert und gleichzeitig weitere Funktionen einschließt. An dieser Stelle bieten sich holzgefüllte Thermoplaste an, da diese über die Rezeptur eine festigkeitserhöhende und das Laufverhalten verbessernde Wirkung erwarten lassen bei geringerem Verschleiß, da die Holzkomponente den Abrieb der Kunststoffkomponente aufnimmt und diesen ähnlich eines Schmiermittels wirken lässt. Neben der Werkstoffentwicklung, -prüfung und der möglichen Herstellung im industriellen Maßstab erfolgt parallel die anwendungsbezogene Entwicklung von Profilsystemen für die Fördertechnik.

Stand der Technik im angestrebten Einsatzumfeld

In Anwendungen der innerbetrieblichen Logistik, der Erfüllung von Handhabe-, Verkettungs- und Transportfunktionen in Form von Stückgutförderern wird bis heute aus Werkstoff- und Kostengründen die Integrationsfähigkeit und Integrationsdichte kunststoffgerechter Konstruktionen nicht ausgenutzt. Üblicherweise werden die zwei Hauptfunktionen

- statische und dynamische Tragfähigkeit
- tribologische Eigenschaften

mit zwei getrennten Konstruktionselementen abgedeckt. Die Trägerstrukturen sind Aluminiumprofilssysteme oder Stahlkonstruktionen, als tribologisch beanspruchte Führungs- und Lager-elemente werden häufig extrudierte oder spanend bearbeitete Kunststoffelemente verwendet, Bild 1.



Bild 1: Tribologisches System Gestell-Führungselement in herkömmlicher Bauweise

Die Verbindungs- und Montagetechnik besteht aus handelsüblichen Verbindungssystemen als Verschraubung. Unter den verschiedenen möglichen Fügeverfahren bietet sich das Schweißen von WPC aufgrund der thermoplastischen Matrix als werkstoffgerechte Füge-technik für die Weiterverarbeitung an und führt somit zur Reduzierung des Montageaufwandes.

Werkstoffe und Rezepturen, Probeneigenschaften

Aus einer Auswahl von Matrix-, Füllstoff- und Zusatzmaterialien (Haftvermittlern) wurde eine Rezeptur entwickelt, die sich durch hohe Festigkeiten und Steifigkeiten auszeichnet. Als Matrixmaterial wurden Thermoplaste (PP/PE) mit höheren Festigkeitskennwerten gewählt, als Füllstoff feineres Weichholz (Mischung aus Fichte/ Tanne) mit einer mittleren Faserlänge von 75 µm. Die Verwendung von Hartholz verspricht zwar aus der Literatur höhere Festigkeiten, aufgrund von durch austretende Teervorstufen in der Verarbeitung bedingten Problemen wurden Harthölzer nicht in die weiteren Untersuchungen einbezogen.

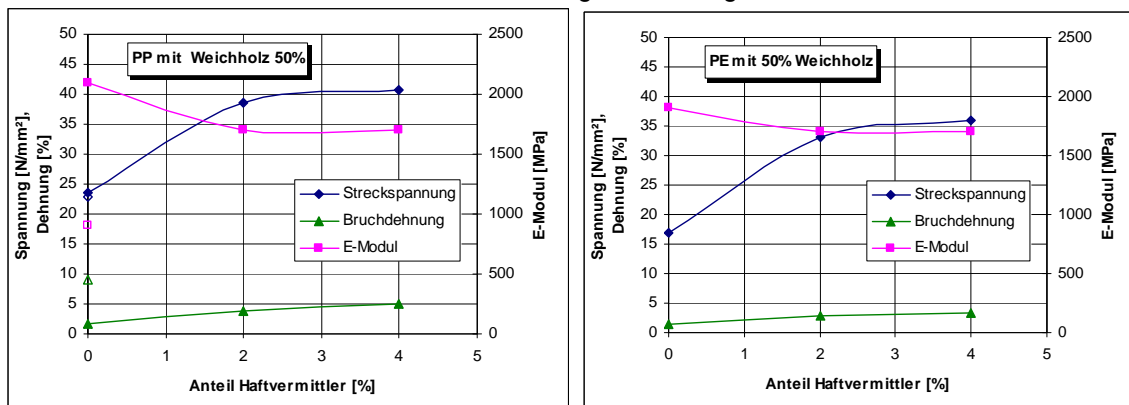


Bild 2: Einfluß eines Haftvermittlers auf die mechanischen Kennwerte (Zug Zugversuch DIN EN ISO 527)

Die Faserlänge und somit die Aufbereitungsart des Holzes hat einen signifikanten Einfluß auf die Festigkeit im Compound. Tendenziell liefern kleinere Holzpartikel höhere Festigkeiten und Steifigkeiten, unabhängig von der Holzart. Weiterhin steigt mit zunehmendem Holzanteil die Steifigkeit des Werkstoffes an, gleichzeitig nimmt die Sprödigkeit zu (Erhöhung des E-Moduls, Verringerung der Bruchdehnung, keine signifikante Änderung der Bruchspannung). Das Werkstoffverhalten ändert sich von zäh-elastisch (reines PP bzw. PE) zu spröd-elastisch (WPC mit höherem Füllgrad).

Die Diagramme in Bild 2 zeigen die mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit des Haftvermittleranteils (MAH). Mit gezielter Zugabe von Haftvermittlern wird das Werkstoffverhalten über zunehmende Festigkeiten, weit über Matrixfestigkeit, und zunehmende Bruchdehnungen verändert.

Verarbeitungsverhalten und Profileigenschaften

Zur Extrusion von Proben im Labor wurde ein zunächst ein Einschnecken-Extruder (Kompression 1:1,5, Länge 20 D) mit einem Werkzeugquerschnitt von 10x4 mm genutzt. Die ermittelten Parameter wurden anschließend auf eine Produktionsanlage zur Herstellung von Profilen mit max. Breite 86 mm, max. Wandstärke 16 mm, min. Wandstärke 6 mm übertragen:

- Temperaturprofil vom Einzug her abnehmend (200-190-180-160-150°C)
- Werkzeugtemperatur von 145°C
- Massedruck 190 bis 230 bar
- Massetemperatur 185°C
- schnellere Drehzahl (20 U/min) bei niedriggefüllten WPC (30% Holzanteil) bzw. bei Kunststoffmatrix mit hohem MFI

In der Prüfung der mechanischen Eigenschaften (Zug, 3-Punkt-Biegung) wurden die aus den Laborversuchen ermittelten Tendenzen bestätigt, Bild 3.

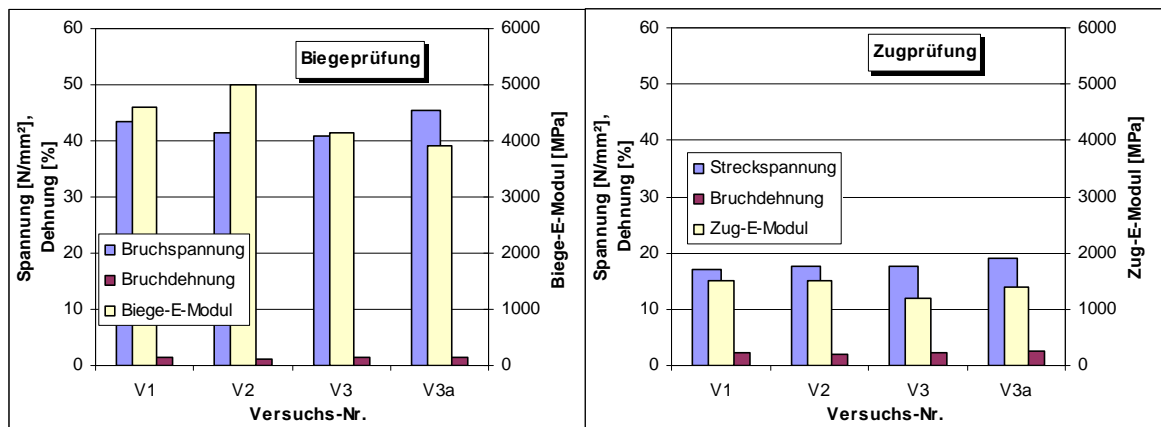


Bild 3: Mechanische Kennwerte von Proben aus extrudierten Profilen (PP mit 70% Weichholz) Biegeversuch DIN EN ISO 178, Zugversuch DIN EN ISO 527

Die Extrusion von WPC ist mit vergleichsweise höheren Füllgraden (bis 70%) möglich, zusätzlich wirkt hier stärker der Einfluß der Kunststoffmatrix (geeigneter MFI). WPC aus einer Kunststoffmatrix mit hohem MFI und niedrigem Füllgrad (30% Holz) ist nicht extrudierbar.

Füge- und Verbindungstechnik in Grundlagen

Neben Einschraubversuchen/ Versuchen zur Festigkeit von Schraubverbindungen liegen erste Ergebnisse aus den Schweißversuchen vor. Als geeignete Verfahren bieten sich das Heizelement- und das Vibrationsschweißen an. Insgesamt zeigen naturfasergefüllte Thermoplaste hier ein völlig anderes Werkstoffverhalten im Gegensatz zu ungefüllten oder mit mineralischen Fasern gefüllten Thermoplasten.

Entwicklung und Herstellung von kombinierten WPC-Trag- und Gleitelementen für die Fördertechnik

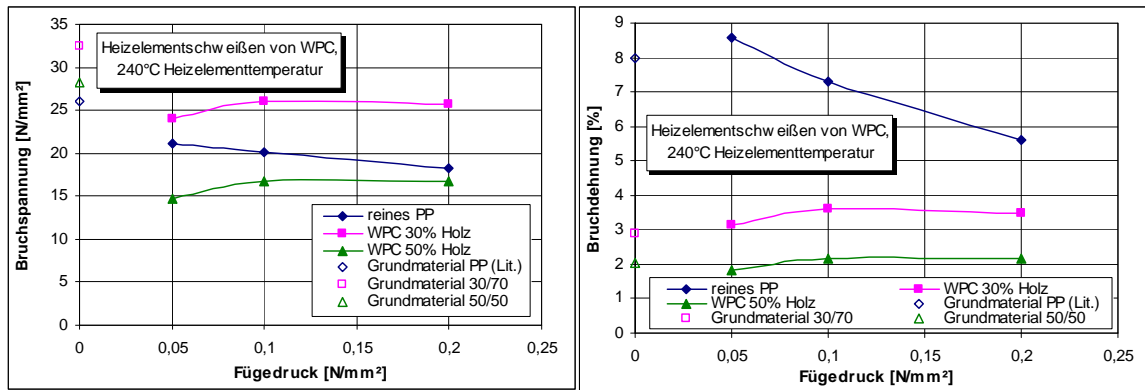


Bild 4: Parametervariation im Heizelementschweißen von WPC Zugversuch DIN EN ISO 527

Schweißverbindungen erreichen eine geringere Festigkeit und eine höhere Dehnung im Vergleich zum ungeschweißten WPC-Grundmaterial. Ursachen hierfür sind in der Orientierung der Holzpartikel zu suchen, welche im Bereich der Fügezone eine fließbedingte Querorientierung zeigen. Im Gegensatz zum ungefüllten Matrixmaterial zeigen beim Heizelementschweißen die Eigenschaften der WPC-Proben eine geringere Abhängigkeit von den Verfahrensparametern, wie Fügedruck oder Heizelementtemperatur, Bild 4.

Um das Werkstoffverhalten in der Fügezone besser zu verstehen, wurden unterschiedliche mikroskopische Analysen (Auflicht/ Durchlicht mit Polarisationsoptik) durchgeführt. Deutlich zu erkennen sind Fließlinien/ Ausrichtungen der Partikel. Schwierigkeiten entstehen in der Unterscheidung von Holzpartikeln und Fehlstellen (Lunker). Erst durch die 2. Aufnahme Bild 6 ist deutlich zu erkennen, dass in der Fügezone vorwiegend quer orientierte Füllstoffe und im Schweißwulst überwiegend Lunker zu finden sind.



Bild 5: WPC 50% PP, 50% Holz (T_{HE} 240°C, p_F 0,1 N/mm²), Auflichtmikroskopie einer Schliffprobe 2,5 fach

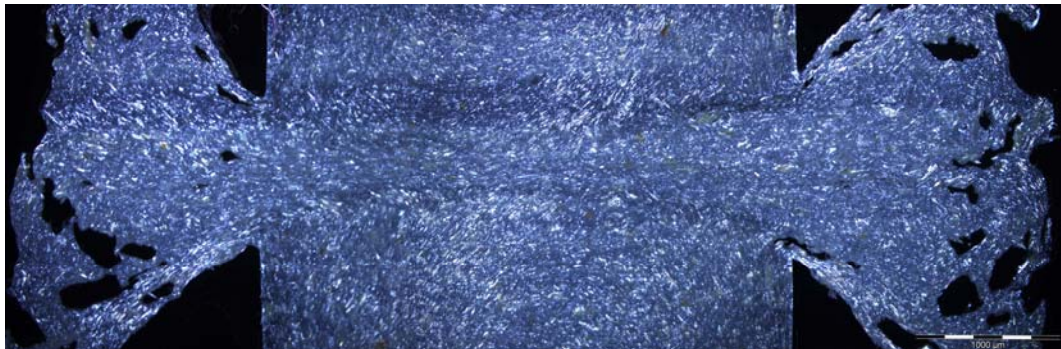


Bild 6: WPC 50% PP, 50% Holz (T_{HE} 240°C, p_F 0,1 N/mm²) Durchlichtmikroskopie einer Dünnschnittprobe, 2,5 fach

Grundlagen zur Tribologie an Proben

Zum tribologischen Verhalten liegen erste Aussagen vor. Dazu wurden sowohl WPC-Proben wie auch die dazugehörigen Matrixwerkstoffe in einem Stift-Scheibe-Tribometer gegen Stahl getestet, um erste Anhaltspunkte zum tribologischen Verhalten und eine Vergleichbarkeit mit der Literatur [1] [2] [3] zu erhalten. Mit dem Stift-Scheibe-Prüfstand (feststehender WPC-Stift, rotierende Stahlscheibe) werden die im Einsatzbereich auftretenden Beanspruchungen im Laborversuch nachgestaltet, die Belastungsrichtung wechselt nicht und somit entstehen keine Einflüsse durch evtl. aus der WPC-Oberfläche herausstehende Fasern.

Als Gegenkörper wurde zunächst Stahl gewählt, um eine Vergleichbarkeit mit Literaturangaben zu erhalten, in nächster Stufe werden die Untersuchungen durch Werkstoffe der Einsatzpaarung ergänzt.

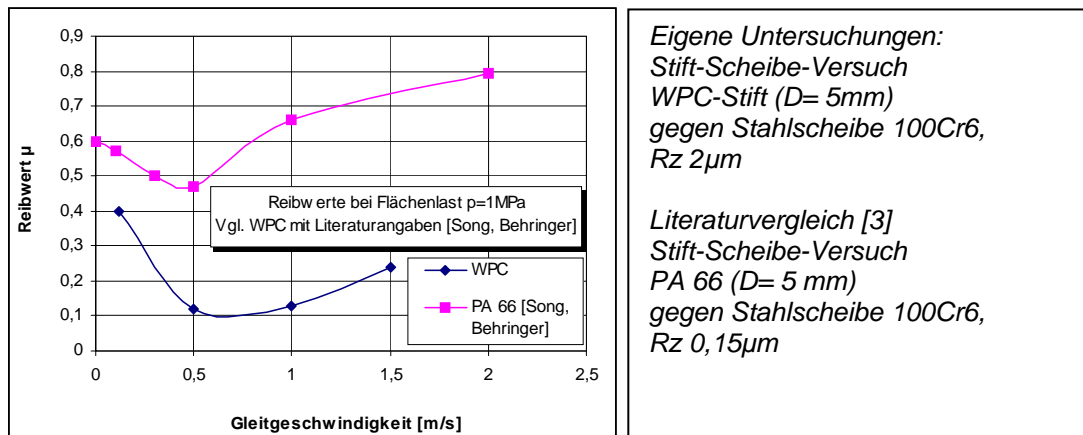


Bild 7: Reibwerte im Vergleich in Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit (Stift-Scheibe-Tribometer)

Aus den Versuchsauswertungen ist deutlich zu erkennen, daß bei der Verwendung von WPC bessere Reibwerte im Gegensatz zum reinen PP und im Literaturvergleich ermittelt und somit aus den Grundlagenuntersuchung der Ansatz der Zielstellung, daß die im Verbund enthaltenen Holzpartikel durch die abgetragenen Kunststoffpartikel geschmiert werden, bestätigt wurde. Weitere an die Einsatzbedingungen angepasste Untersuchungen werden im folgenden vorgestellt.

Systemnahe Untersuchungen zum tribologischen Verhalten von WPC bei Gleitreibung im Dauerbetrieb

In Vorbereitung der Versuche im realen Fördersystem wurden weitere Grundlagen zum Gleitreibungsverhalten von WPC an einer der späteren Einsatzpraxis näher kommenden Versuchseinrichtung und mit entsprechenden Materialpaarungen ermittelt [6], [7] und nachfolgend methodisch untersucht. Dabei wurde auf einen 24 h-Dauertest zur Charakterisierung von Gleitreibungspaarungen unter Nutzung eines speziell konstruierten Versuchstandes nach [8] zurückgegriffen. Die Reibpaarung besteht aus Ober- und Unterprobe, die einseitig bewegt durch einen Schubkurbelantrieb oszillierend aufeinander abgleiten. Die theoretische Flächenpressung (p [N/mm²]) und die Reibgeschwindigkeit (v [m/s]) können per Voreinstellung variiert und der Reibwert μ [-] im Versuchsverlauf kontinuierlich gemessen werden (Bild 8).

Für die Analysen wurden dem späteren Anwendungsgebiet angepasste Paarungen wie folgt gewählt:

- Unterproben aus PP (Polypropylen) und WPC (PP/Weichholz) sowie aus Holz (Fichte), um das Verhalten des ungefüllten Kunststoffes und des WPC zu vergleichen sowie eine reine Holzprobe, um Tendenzen und Einflüsse im WPC abklären zu können
Die Unterproben entsprechen im späteren System dem Gleit-/ Tragelement bzw. der Führungsschiene.
- jeweils zwei verschiedenen Oberproben (Kunststoff, Stahl), entnommen aus handelsüblichen Finger- bzw. Scharnierbandketten, entsprechend für das Transportelement (Förderkette).

Entwicklung und Herstellung von kombinierten WPC-Trag- und Gleitelementen für die Fördertechnik

Zu Gewinnung der Unterproben [150x20x3] mm wurden Platten aus Kunststoff (PP) bzw. WPC mit 50% Holz- und 2,5% Haftvermittleranteil im Spritzguss hergestellt und unter Beachtung der Spritzrichtung zu Proben geschnitten.

Die astfreien Vollholzproben (Weichholz/ Fichte) wurden aus handelsüblichen Brettern (Tangential bzw. Fladerschnitt, Dicke 10 mm) gewonnen und auf eine Holzfeuchte von 9,4% (Versuchsbeginn) klimatisiert.

Die zwei verschiedenen Oberproben (Kunststoff, Stahl) wurden aus einer handelsüblichen Kunststofffingerkette (Bosch-Rexroth VF60, Werkstoff Delrin 500AL, Versuchsbezeichnung Kunststoff) bzw. Scharnierbandkette (novonorm SSE815-K325, Werkstoff: 1.4589, X5CrNiMoTi15-2, Versuchsbezeichnung: Stahl), jeweils aus einer Charge in den Abmaßen [15x15] mm entnommen und vom Grat befreit, ohne die potenzielle Kontaktfläche der Reibpaarung zu verändern.

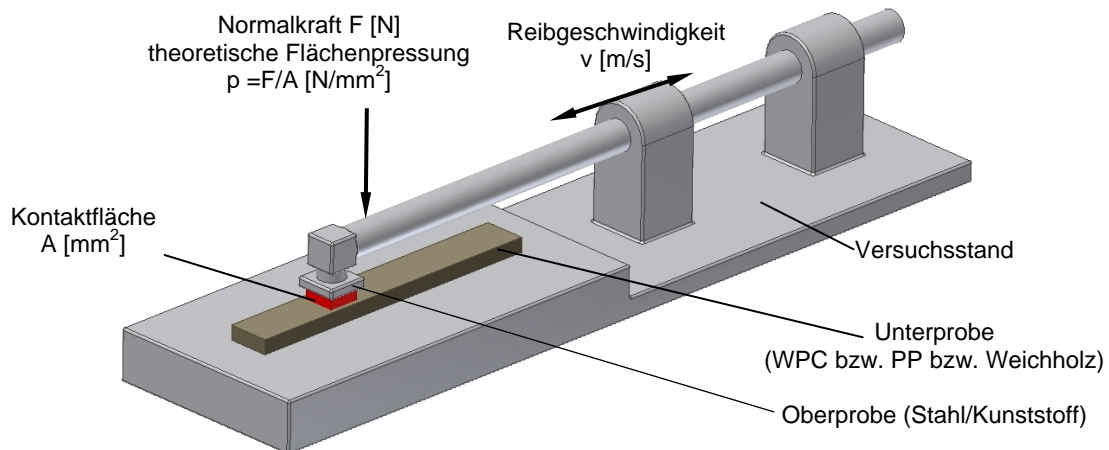


Bild 8: Schematischer Aufbau des Versuchstandes nach [8]

Die Reibpaarungen (WPC gegen Stahl-/ Kunststoffkette, PP gegen Stahl-/ Kunststoffkette, Vollholz gegen Stahl-/ Kunststoffkette) wurden bei vier verschiedenen tribologischen Grundbelastungen in Flächenpressung und Geschwindigkeit (sog. $p \cdot v$ -Werte [W/mm^2]) unter gleichen Randbedingungen hinsichtlich Reibwert und Verschleißverhalten untersucht. Die Reibwerte für die Beurteilung wurden dabei im Versuchszeitraum von 22-24 h (oder bei kürzeren Zeiträumen an früher versagenden Proben 2-0 h vor Versagen der Reibpaarung) in einen Mittelwert überführt.

Die Begutachtung des Verschleißverhaltens der Paarung erfolgte für Ober- und Unterprobe getrennt nach einer optischen Methode, bei der anhand mikroskopischer und makroskopischer Aufnahmen der Probenoberfläche in acht Stufen der Abrieb und die Oberflächendeformation in ein Bewertungssystem gefasst werden und in den sog. Verschleißwert [-] für die vergleichende Betrachtung der tribologischen Paarung einfließen [9]. Verschleißwert null (0) bedeutet dabei kein Verschleiß, Verschleißwert drei (3) bildet die Unbrauchbarkeit der Reibpaarung durch übermäßigen Verschleiß nach 24 h-Testzeit ab. Verschleißwert vier (4) verkörpert das Versagen der/des Reibpartner/s in der Reibpaarung vor Ablauf des 24 h-Versuches durch übermäßigen Verschleiß (vgl. Kriterium 3).

Die Ergebnisse der Versuche sind als Mittelwerte, resultierend aus zwei Versuchen pro Kennwert für die verschiedenen Reibpaarungen, als Reibwert in Abhängigkeit der tribologischen Beanspruchung in Bild 9 und als Verschleißwert in den Bildern 10 und 11 dargestellt.

Bei der Auswertung ist zu beachten, dass alle Unterproben in Verbindung mit Kunststoff (PP, WPC) 90° zur Spritzrichtung untersucht wurden. Für Fichte war die generelle Messung mit einer 90° Faserausrichtung sowie 0° bei Stahl (Oberprobe) aufgrund von Überlastung zu Versuchsbeginn nicht möglich. Aus diesem Grund wurden nur die Ergebnisse für die Experimente mit 0° -Proben bzgl. der Holzfaserrichtung und Kunststoff zum Vergleich angegeben. Stahl (Oberprobe) zeigte über alle Versuche keinen sichtbaren Verschleiß und wurde somit nicht in die Abbildungen zum Verschleißverhalten (Bild 10 und 11) aufgenommen.

Entwicklung und Herstellung von kombinierten WPC-Trag- und Gleitelementen für die Fördertechnik

Für alle Diagramme gilt: Je größer der Ordinatenwert für Reibwert und Verschleiß desto ungünstiger die Reibpaarung für eine praktische Anwendung.

Tendenziell ergeben Holzzusätze oder Vollholzmaterialien im Vergleich zu Kunststoffen sowohl gegen Stahl als auch gegen Kunststoff niedrigere Reibwerte. Vorteile werden in den Paarungen WPC-Kunststoff deutlich, wenngleich die z. T. noch geringeren Werte der Paarung Vollholz-Kunststoff nicht erreicht werden.

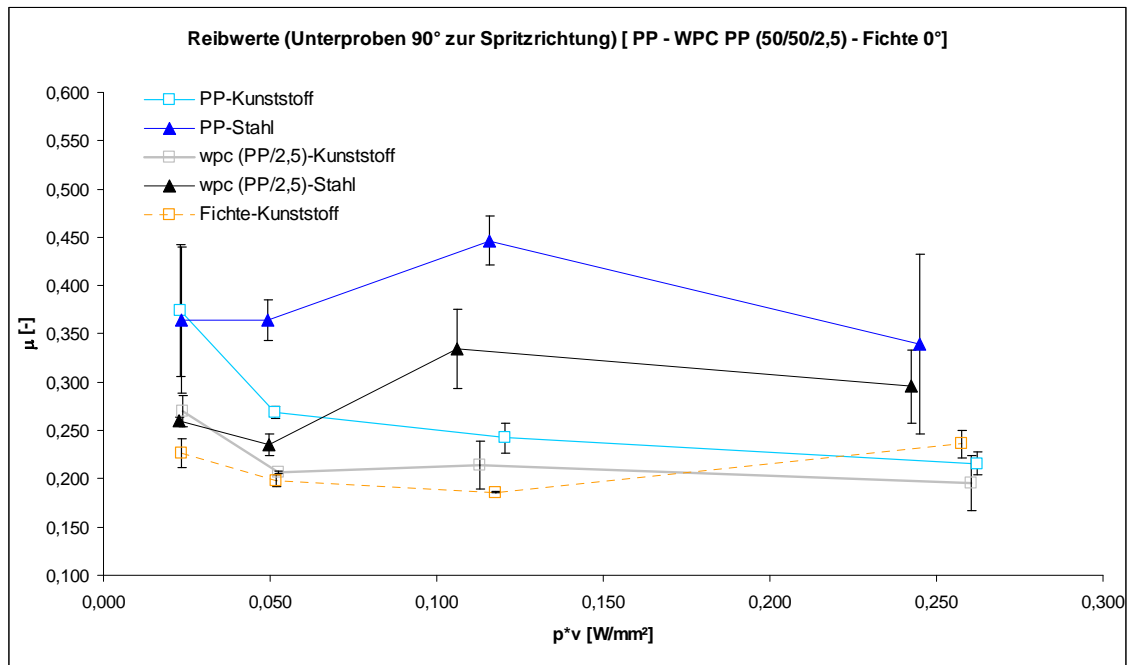


Bild 9: Mittlere Gleitreibwerte mit Standardabweichung PP, WPC (PP, Weichholz), Vollholz/Fichte gegen Kunststoff (Delrin 500 Al) und Stahl (X5CrNiMoTi15-2)

Die Untersuchungen zeigen, dass sich die charakteristischen Gleitreibwerte μ [-] und der typische Verschleißwert hochbelasteter polymerer Gleitelemente (Unterproben) in Funktion des Reibpartners (Oberproben) durch geeigneten Holzzusatz mehr oder weniger deutlich verringern lassen (vgl. z.B. Bild 10, Bild 11 Kurven PP-Stahl – WPC-Stahl).

Die Aussagen zum Verschleiß sind weniger eindeutig. Unter bestimmten Bedingungen (hohe Flächenlast und hohe Geschwindigkeit) erfährt die Oberprobe der Reibpaarung (Kunststoffkette) einen höheren Verschleiß, d. h. es erfolgt ein überdurchschnittlicher Oberflächenabtrag und Abrieb, während die Unterproben verschleißfest bleiben, vgl. Bild 11. Hier verursacht die WPC-Unterprobe im Materialvergleich den geringsten Verschleiß an der Oberprobe unter hohen tribologischen Belastungen. Als Schlussfolgerung aus diesen Erkenntnissen sind weitere Untersuchungen an der Rezeptur des WPC, z. B. der Einfluß der Füllstoff-Partikelgeometrie auf die Oberflächenrauigkeit notwendig sowie eine verstärkte Einbeziehung von Werkstoffen für Kunststoffketten in die Arbeiten.

Der im Forschungsansatz unterstellte Wirkmechanismus (...polymere Komponente senkt als Schmiermittel den Abrieb und die Reibungszahl der stärker tragenden Holzkomponente...) konnte dabei hinsichtlich tendenziell geringerer Reibwerte nachgewiesen werden, vertiefende Untersuchungen zum Verschleißverhalten dauern noch an.

Entwicklung und Herstellung von kombinierten WPC-Trag- und Gleitelementen für die Fördertechnik

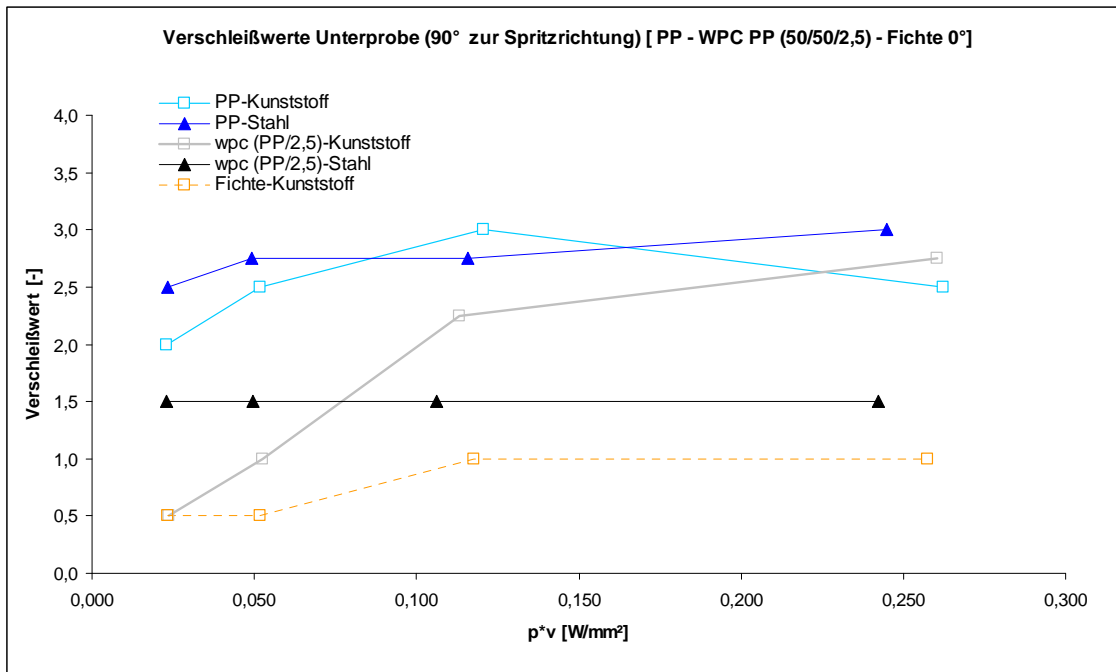


Bild 10: Verschleißwerte Unterprobe PP, WPC (PP/Weichholz), Vollholz/Fichte gegen Kunststoff (Delrin 500 Al) und Stahl (X5CrNiMoTi15-2)

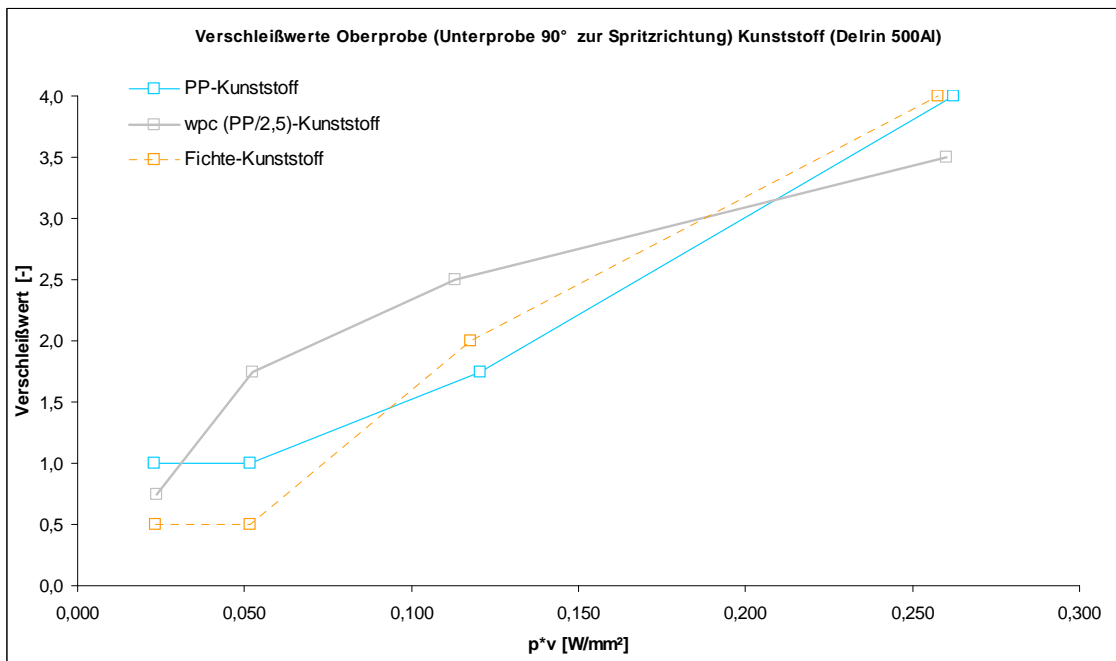


Bild 11: Verschleißwerte Oberprobe Kunststoff (Delrin 500 Al), Unterprobe PP, WPC (PP, Weichholz), Fichte

Für eine Anwendung von WPC in der Fördertechnik eröffnet das charakterisierende Gleitreibungsverhalten grundlegend neue Möglichkeiten. Zudem wurde weiterer Forschungsbedarf zur vorteilhaften Gestaltung von holzpartikelgefüllten Trag- und Gleitelementen deutlich. Weitere detaillierte Veröffentlichungen zu Gleitreibungsuntersuchungen an WPC aus der Gesamtheit der untersuchten Versuchsmatrix (Modifikation Inhaltsstoffe, Oberfläche, Randbedingungen) und den praxisnahen Untersuchungen am Prototyp des Hängerrörderers sind ange-dacht.

Profilentwicklung: kombiniertes Trag- Gleitprofil eines Hängefördersystems

Die im Punkt „Stand der Technik“ dargestellte Funktionstrennung an Gestellstrukturen in der Fördertechnik soll durch die Übertragung der Trag- und Gleitfunktion in ein Profil aus Holz-kunststoffverbund (WPC) überwunden werden. Als erste technische Anwendung wurde der Einsatz in einem Hängeförderer (Bild 12) ausgewählt. Dieses Transportsystem bewegt Stückgüter „hängend“ an einem Aufnehmer innerhalb des innerbetrieblichen Materialflusses. Die Aufnehmer werden dabei durch Rollen in einem Schienensystem (Tragprofil) geführt.

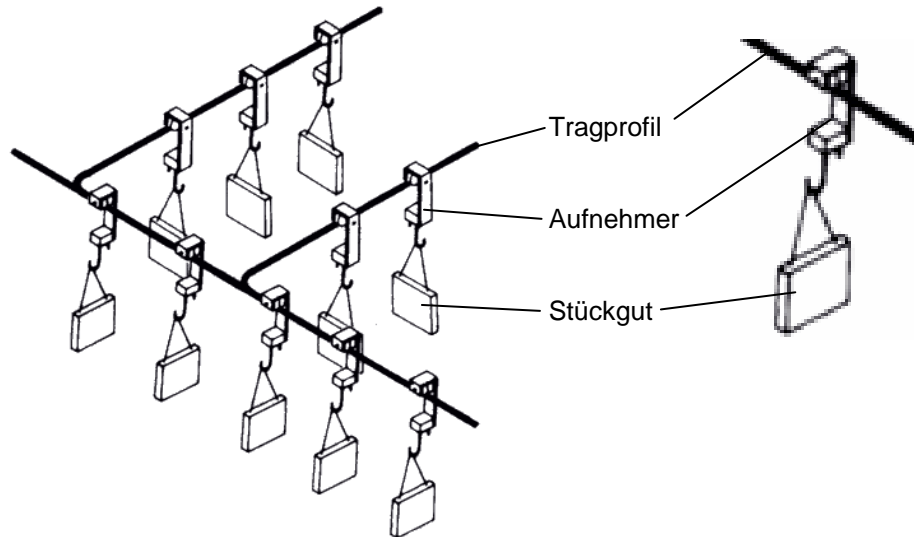


Bild 12: Schematische Abbildung Hängebahn (Rohrbahn) [1]

Die Analyse eines ausgewählten Förderersystems nach Stand der Technik ergab neben den charakteristischen statischen und dynamischen mechanischen Belastungen des Gestells tribologische Problemzonen in den Stoß- und Verzweigungsstellen des Profils. An diesen Stellen tritt partiell, Roll- anstelle von Gleitreibung auf, welche die Funktionsweise stört. Für eine erste Erprobung des gewählten Lösungsansatzes wurde das Standardprofil durch eine Hilfskonstruktion (Bild 13) in Verbundbauweise (WPC/Metall) substituiert. Die tribologisch relevanten Bereiche sind dabei aus WPC.

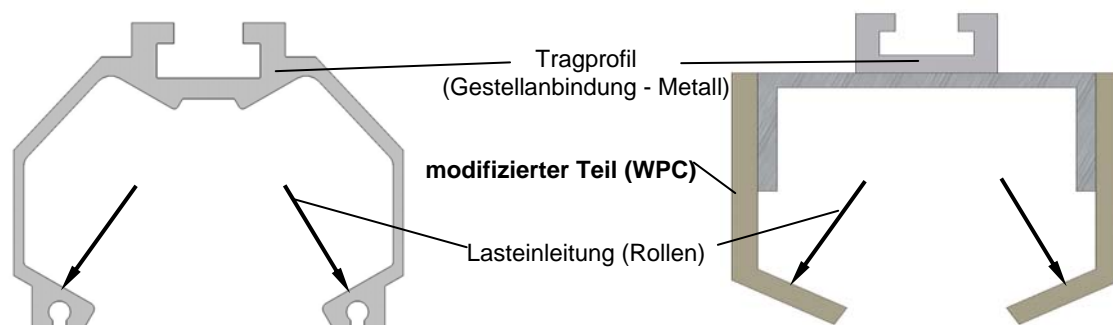


Bild 13: Bauweise Stand der Technik [6], Anpassung für Versuchszwecke in Verbundbauweise

Ein anschließender Dauerversuch sollte die grundsätzliche Eignung des Holz-kunststoffverbundes überprüfen und Hinweise sowohl für die Weiterentwicklung der WPC-Rezeptur wie auch für die Konstruktion einer vorteilhaften Profilbauweise aufzeigen. Über erste Ergebnisse soll im Vortrag berichtet werden.

Literatur

- [1] Szameitat, M.: Reibung und Verschleiß von Mischungen aus hochtemperaturbeständigen Thermoplastischen Kunststoffen. Diss. Erlangen-Nürnberg, 1998 ISBN 3-931864-03-0
- [2] Erhard, G., Strickle, E.: Maschinenelemente aus thermoplastischen Kunststoffen – Grundlagen und Verbindungselemente. VDI-Verlag Düsseldorf 1974. ISBN 3-18-40 0290-X
- [3] Ehrenstein, G. W.: Mit Kunststoffen konstruieren - Eine Einführung 3., überarbeitete Auflage Hanser München 2008. ISBN-10: 3-446-41322-7. ISBN-13: 978-3-446-41322-1
- [4] Nendel, K.: Vorlesungsskript zur Lehrveranstaltung „Fördertechnik“ Teil 1, 10/2008 S 76
- [5] AKE Systemtechnik GmbH, Profilquerschnitt (Aluminiumlegierung) Hängefördersystem
- [6] Gehde, M.; Clauß, B.: Entwicklung und Herstellung von WPC für maschinenbautechnische Anwendungen 7th Global WPC and Natural Fibre Composites Congress and Exhibition : June 18-19, 2008, Kassel. - Kassel : Innovationszentrum Kunststoff- und Recyclingtechnik, 2008, A6-1 - A6-10
- [7] Eichhorn, S.; Clauß, B.: Holzverbundwerkstoffe in der Fördertechnik - kombinierte Trag- und Gleitelemente Tagungsbericht zum 4. Fachkolloquium der WGTL an der Technischen Universität Chemnitz : Posterausstellung. - Chemnitz, 2008
- [8] Nendel, K.; Mitzschke, F.: Kunststoffgleitpaarungen in der Fördertechnik – Methoden zur Messung von Reibungswerten Logistic Journal 09/2006
- [9] Schumann, A.; Eichhorn, S.; Sumpf, J.: Optische Methode zur vereinfachten qualitativen Bewertung des Verschleißverhaltens typischer Reibpaarungen in der Fördertechnik (unveröffentlicht, Stand 06/2009)