

## **Charakterisierende Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten von WPC (Wood Polymer Composite)**

(Characterising studies of WPC behaviour focusing friction and wear)

### **Autoren:**

Dipl.-Ing. Sven Eichhorn (Referent)\*  
Dr.-Ing. Brit Clauß\*\*

Technische Universität Chemnitz  
Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik,  
Reichenhainer Straße 70, 09107 Chemnitz

\*Professur Fördertechnik (sven.eichhorn@mb.tu-chemnitz.de)  
\*\*Professur Kunststoffe (brit.clauss@mb.tu-chemnitz.de)

### **Bibliografische Kurzbeschreibung:**

Eichhorn, Sven  
Clauß, Brit

„Charakterisierende Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten von WPC (Wood Polymer Composite)“  
(Characterising studies of WPC behaviour focusing friction and wear)

Langfassung zum Fachvortrag auf der 21. Fachtagung über die Verarbeitung und Anwendung von Polymeren - TECHNOMER 2009, 12.11.2009, 12:00 Uhr,  
Themenblock „Konstruktions- und Verbindungstechnik“

#### **Schlagworte:**

WPC, Wood Polymer Composite, dynamische Gleitreibung, Tribologie, Verschleiß, Tribologiewert, gefülltes Polymer, gefüllter Kunststoff, dynamischer Reibwert  
Kunststoffe

45 Seiten, 55 Abbildungen, 4 Tabellen

## 1 Kurzfassung und Einleitung

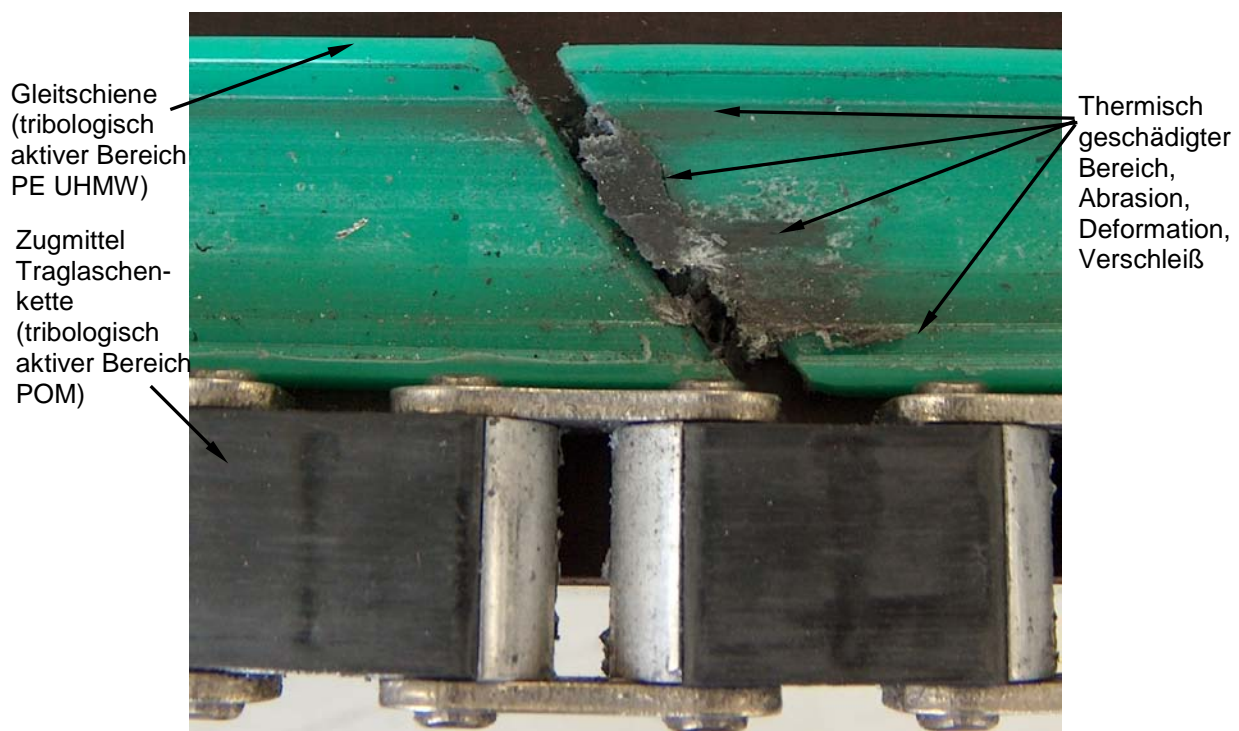
Die vorliegende Forschungsarbeit resultierte aus dem Ansatz, die theoretisch ableitbaren Vorteile der Werkstoffgruppe WPC (Wood Polymer Composite) zur Herstellung von Gleitelementen für fördertechnische Anwendungen (z.B. Gleitschienen in Stückgutförderern) zu nutzen.

Diesem Ansatz lag der Gedanke zu Grunde, dass der anfängliche abrasive Verschleiß der polymeren Komponente als Schmiermittel den Abrieb und den Reibwert der stärker tragenden Holzkomponente verringert. Im WPC würde damit eine Funktionstrennung zwischen „tragendem“ Holz und „schmierendem“ Kunststoff vorherrschen.

Darauf aufbauend erschien die These zulässig, dass sich im tribologisch aktiven Maschinenteil (Gleitschienen) die typischen Verschleißursachen hochbelasteter polymerer Gleitelemente (Abb. 1) wie:

- starke Abrasion der Reibpartner,
- mechanische Überlast und damit Deformation in den Kontaktstellen
- und thermisch bedingter Verschleiß durch Temperaturstau in der Reibzone

durch gezielten Holzzusatz in eine Kunststoffmatrix minimieren bzw. zu höheren Grenzen hin verschieben lassen.



**Abb. 1** Beispielhaftes charakteristisches Verschleißbild einer Gleitpaarung in einem Stückgutförderer

Diese These wurde in verschiedenen tribologischen Untersuchungen an spritzgegossenen und extrudierten Versuchskörpern grundlegend bestätigt.

Die nachfolgend dargestellten Ausführungen zu den Untersuchungen gliedern sich inhaltlich in drei Schwerpunkte.

- Im ersten Punkt werden die Ergebnisse aus einfachen Tests zum grundlegenden Reibungsverhalten von WPC (siehe dazu auch [5]) unter Nutzung des Stift-Scheibe-Versuches und einer nach praxisnahen

fördertechnischen Anforderungen konzipierten Versuchseinrichtung (nach [6]) vorgestellt (siehe dazu auch [7]) sowie in den Stand der Technik eingeordnet. Die Praxisnähe der Versuche wird dabei durch die Probeauswahl weiter erhöht, indem Versuchskörper aus extrudierten Halbzeugen (Terrassendecks aus kommerziellen WPC) und Segmenten aus Förderketten ausgewählt werden.

Die daraus resultierenden Aussagen ermöglichen erste Erkenntnisse hinsichtlich des dynamischen Reibwertes des WPC im relevanten tribologischen Belastungsspektrum für Gleitschienen.

- Im zweiten Punkt wird, aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen, eine Betrachtungsweise vorgestellt, die neben dem Reibwert Aussagen zum Verschleißverhalten beinhaltet und eine vereinfachte Möglichkeit bietet, mittels des „Tribologiewertes“ die gewonnenen Erkenntnisse in einer praxisnahen Sichtweise darzustellen. Zudem wird die Versuchsmatrix hinsichtlich der verwendeten Parameter:
  - Reibpartner
  - Reibgeschwindigkeit
  - theoretischer Flächenpressungen

konkretisiert und erweitert. Die vorgestellte Betrachtungsweise und das verwendete Parameterfeld werden an spritzgegossenen Proben aus tribologisch „bekannten“ Materialien (Stand der Technik) und den Bestandteilen des untersuchten WPC (PP, PE, Fichte) überprüft. Weiterhin wird an vergleichbaren Proben aus WPC (50% PP / 50% Weichholz Fichte/Tanne) das tribologische Verhalten des Holzkunststoff - Verbundes klassifiziert (siehe dazu auch [12]). Dieses Verhalten wird hinsichtlich der tribologisch „bekannten“ Materialien in den Stand der Technik eingeordnet und eine These zum Wirkmechanismus bezüglich des Reibungs- und Verschleißverhaltens von WPC vorgestellt.

- Der dritten Punkt beinhaltet vertiefende Untersuchungen an spritzgegossenen Proben aus WPC mit 50% Weichholz und 50% PP - Matrix hinsichtlich des Einflusses:
  - der Spritzrichtung bzw. Holzpartikelorientierung
  - einer Wasserlagerung
  - der Konzentration des Haftvermittlers
  - einer Oberflächenbearbeitung

Weiterhin werden Aussagen zum Reibungs- und Verschleißverhalten von WPC mit PE-Matrix an spritzgegossenen Proben erarbeitet und eine erste Gegenüberstellung der Herstellungsverfahren Spritzguss und Extrusion vorgenommen.

Die Untersuchungen ermöglichten in Summe das Gleitreibungs- und Verschleißverhalten des WPC grundlegend aber nicht vollständig zu charakterisieren. Die tribologischen Betrachtungen zur Werkstoffgruppe WPC stehen noch am Anfang ihrer Entwicklung. Die dargestellten Ergebnisse sind somit zudem als Startpunkt eines wissenschaftlichen Diskurses zu sehen.

## 2 Abkürzungen und Formelzeichen

Kurzzeichen	Einheit	Bemerkungen
A	mm <sup>2</sup>	Kontaktfläche
B <sub>t</sub>	W/mm <sup>2</sup>	tribologische Belastungsintensität, siehe p*v-Wert
C <sub>1</sub>	[-]	Wichtungsfaktor dynamischer Reibwert
C <sub>2</sub>	[-]	Wichtungsfaktor Verschleißwert Unterprobe
C <sub>3</sub>	[-]	Wichtungsfaktor Verschleißwert Oberprobe
F <sub>N</sub>	[N]	Belastungskraft senkrecht zur Kontaktfläche (Normalenkraft)
F <sub>R</sub>	[N]	Reibkraft
HV		Haftvermittler
P <sub>R</sub>	[W]	Reibleistung
PE		Polyethylen
PP		Polypropylen
POM		Polyoxymethylen
T	[-]	Tribologiewert
p	N/mm <sup>2</sup>	theoretische Flächenpressung
p*v –Wert	W/mm <sup>2</sup>	„Energieeintrag pro Fläche“, Maß für die Belastungsintensität der Reibpaarung
v	m/s	Reibgeschwindigkeit
V <sub>O</sub>	[-]	Verschleißkennwert der Unterprobe
V <sub>U</sub>	[-]	Verschleißkennwert der Unterprobe
V <sub>i</sub>		Versuchsnummer fortlaufend 1-4
VIT		Variable Incidence Tribometer
WPC		Wood-Polymer-Composite, Holz-Kunststoff - Verbund mindestens 50 mass% Holzpartikel, mit polymerer Matrix „verklebt“
FSC		FLOOR SLIDE CONTROL, „Reibungsmessgerät“
μ	[-]	Reibwert, wenn nicht anders im Text vermerkt - dynamischer Gleitreibwert, (z.B. aus dem 24 h Dauerversuch)
ρ	g/cm <sup>3</sup>	Werkstoffdichte

### 3 Stand der Technik – Ausgangspunkt der Untersuchungen

WPC werden derzeit vorrangig in so genannten „Terrassendecks“ als Fußbodenbelag im Außenbereich verwendet. Für diese Anwendung ist ein großer Haftreibwert bei trockenen und vor allem nassen Einsatzbedingungen erforderlich. Die so genannte „Rutschhemmung“ (slip resistance) ist für eine ausreichend große „Fortbewegungssicherheit“ (human locomotion safety) unerlässlich. Erklärtes Ziel der aktuellen tribologischen Entwicklung bei Holzkunststoffverbund ist es somit, einen hohen Haftreibwert zu erreichen und diesen beim Übergang zum „Rutschen“ zu halten. Die Prüfung der Rutschfestigkeiten erfolgt dabei im Kurzzeitversuch unter Nutzung einer Reihe von Prüfvorschriften (Deutschland [1], USA – Zusammenfassung siehe [2] und Prüfgeräten (Deutschland: „FSC 2000“, USA: „VIT“) oder mittels Prüfperson [3]). Die praktisch relevanten Reibpartner des WPC sind dabei durch „Kunststoff Sohlen“ diverser Schuhe [1], [2] oder die menschliche Haut [3] festgelegt. Die Trittsicherheit des Bodenbelages bzw. seine Rutschhemmung wird über eine definierte Versuchsstrecke aus dem Mittelwert des zeitlichen Verlaufes des Reibwertes [1], [2] oder über den erreichten Neigungswinkel [3] bis zum „Unsicher werden der Person“ bestimmt. Abschließend erfolgt eine Beurteilung auf Trittsicherheit in verschiedenen Kategorien. Die Deutsche Richtlinie [1] gibt einen Richtwert für den minimalen Reibwert von  $\mu = 0,43$  (Rutschklasse „Sicher“) vor. Das ermittelbare Spektrum für den Gleitreibwert von WPC nach [1] liegt nach einer kurzen Einlaufphase zwischen  $\mu = (0,27 - 0,43)$  [4].

Werden diese vorhanden Prüfvorschriften in Summe näher betrachtet wird deutlich, dass keine exakte Trennung zwischen Haft- und Gleitreibwert und dem zu Grunde liegenden tribologischen Verhalten erfolgt. Zudem wird der Verschleiß beider Reibpartner vernachlässigt. Die verwendeten Gegenkörper (menschliche Haut, „Kunststoff Sohlen“) stellen im engeren (förder-) technischen Sinne keine eindeutige definierten Referenzgrößen dar. Weiterhin ist in Anbetracht des derzeitigen Einsatzgebietes von WPC als Terrassendeck (niedrige Belastung, Rutschhemmung – hohe Gleitreibwerte) ein Gegensatz zu der angestrebten Anwendung in der Fördertechnik als Gleitschiene (hohe Belastung, niedrige Gleitreibungs- und Verschleißwerte) feststellbar. Die existierenden Prüfvorschriften eignen sich deshalb nur begrenzt für eine Bewertung von höher belasteten Maschinenelementen wie sie Gleitschienen darstellen.

Für die eigenen Untersuchungen bietet die dargestellte Versuchsmethode Ansatzpunkte hinsichtlich einer tribologisch weiterführende versuchstechnische Charakterisierung des Gleitreibungsverhaltens und ein Spektrum an Referenzwerten des zu erwartenden Gleitreibwertes  $\mu = (0,27 - 0,43)$  [4] für im fördertechnischen Sinne „niedrige“ Werkstoffbelastungen.

Ziel der im Nachfolgenden dargestellten Betrachtungen war es WPC als potenziellen Werkstoff für (förder-)technische hoch belastete Gleitreibungspaarungen und damit dessen grundlegende Eignung für Anwendungen in tribologischen Funktionsbauteilen der Fördertechnik zu prüfen.

## 4 Charakterisierende Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten von WPC bei Gleitreibung im Dauerbetrieb

### 4.1 Grundlegende Charakterisierung und verwendete Methoden

Das grundlegende Gleitreibungsverhalten von WPC wurde mit einem konventionellen Stift - Scheibe-Versuch wie folgt charakterisiert: ein Stift aus WPC bzw. PP (Durchmesser 5 mm) wurde 6h gegen eine rotierende Stahlscheibe (ST52-3) unter einer Belastung von  $p = 0,92 \text{ N/mm}^2$  bei  $v = 0,12 \text{ m/s}$  gepresst (Abb. 2).

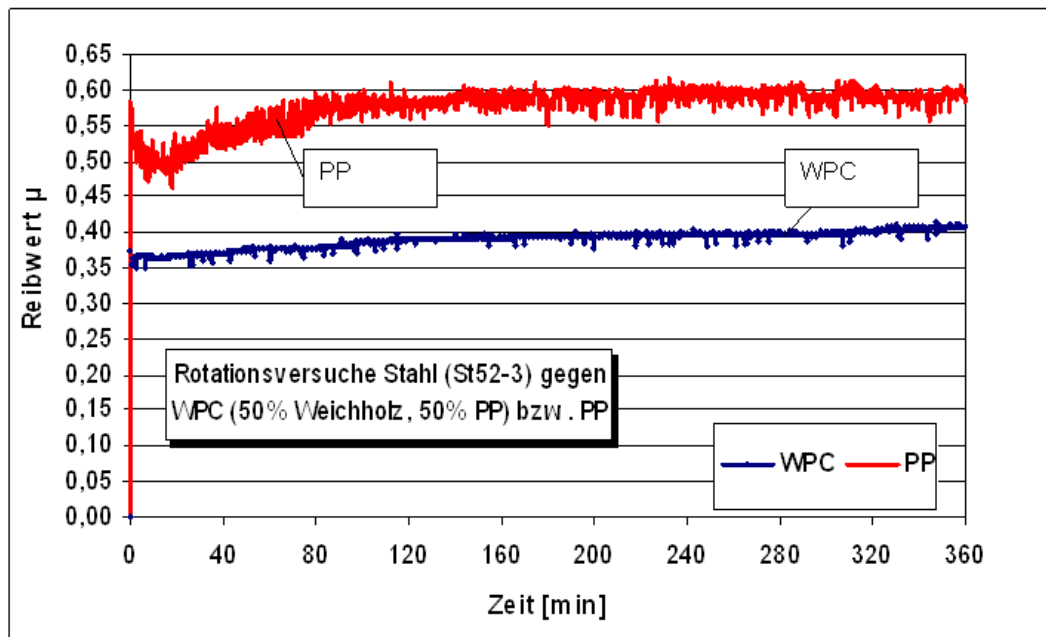
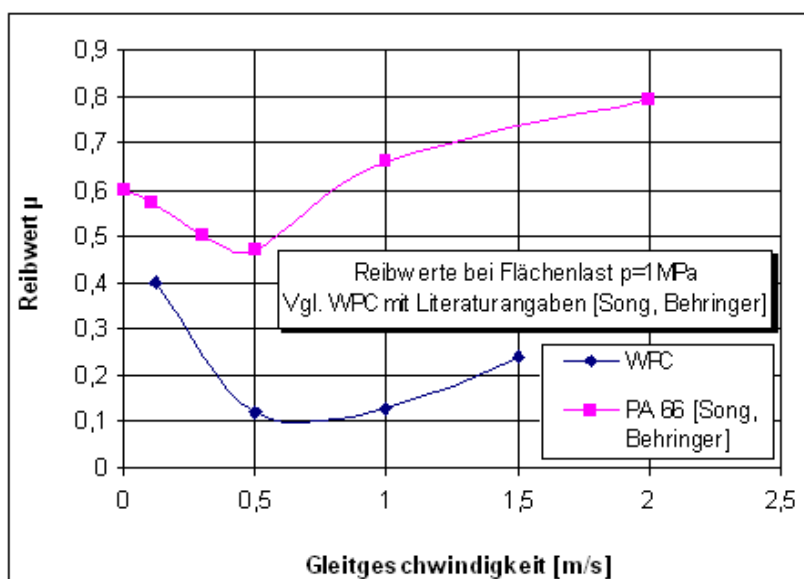


Abb. 2 Ergebnis Stift-Scheibe- Versuch WPC, PP  $p=0,92 \text{ N/mm}^2$ ,  $v=0,12 \text{ m/s}$ ,  $p \cdot v = 0,11 \text{ W/mm}^2$  [5]

Im Ergebnis ist eine Reibwertminderung bei WPC (50% Weichholz – Fichte Tanne/ 50% PP) gegenüber PP um ca. 40% nachweisbar. Darauf aufbauend, wurden Versuche mit größeren Geschwindigkeiten bei bekannter Rauheit durchgeführt und diese mit Literaturwerten verglichen (Abb. 3). Die Ergebnisse zeigen, dass eine grundlegende technische Eignung des WPC als Gleitelement gegeben ist.

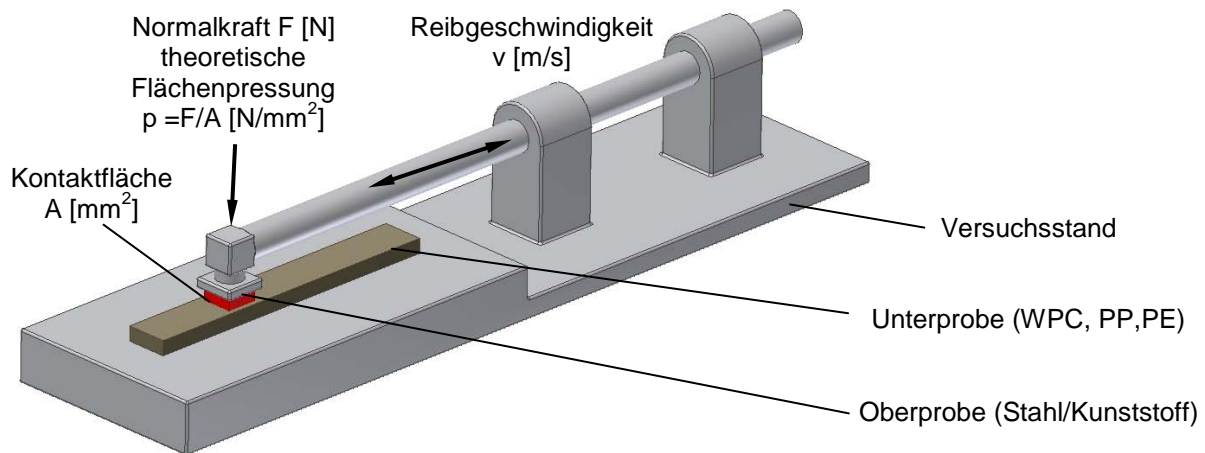


WPC-Stift  
(D= 5mm)  
gegen  
Stahlscheibe  
100Cr6, Rz 2 $\mu\text{m}$

PA 66  
gegen  
Stahlscheibe  
100Cr6, Rz  
0,15 $\mu\text{m}$

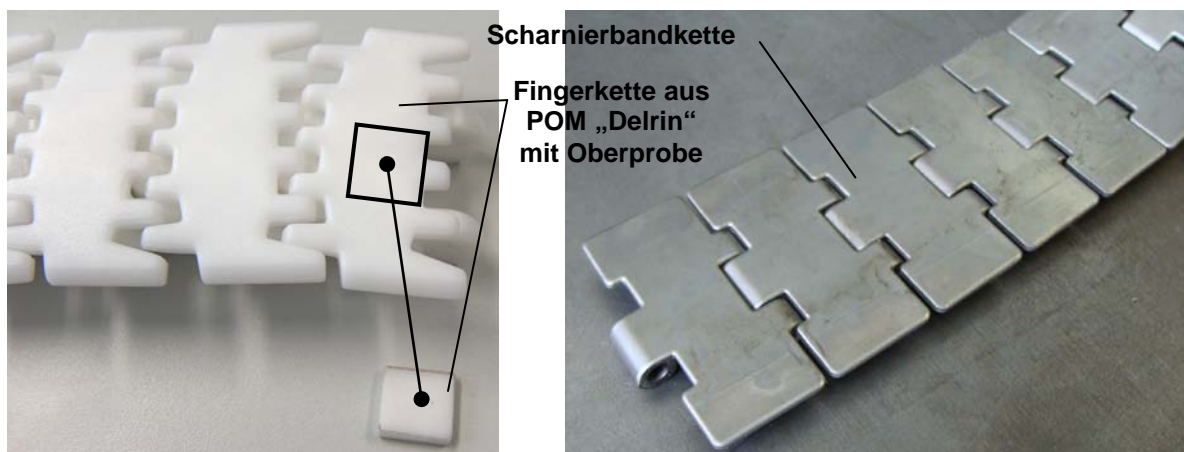
Abb. 3 Ergebnis Stift - Scheibe - Versuch WPC, PP  $p = 0,92 \text{ N/mm}^2$ ,  $v = (0,12-1,5) \text{ m/s}$ , [5]

Im nächsten Schritt wurde für detaillierte Aussagen zum tribologischen Verhalten eine Methodik zur Charakterisierung von Gleitreibungspaarungen aus der Fördertechnik angewandt [6]. Bei diesem Verfahren wird eine Reibpaarung aus Ober- und Unterprobe, die einseitig bewegt oszillierend aufeinander abgleiten, untersucht. Die theoretische Flächenpressung ( $p$  [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]) und die Reibgeschwindigkeit ( $v$  [ $\text{m}/\text{s}$ ]) können dabei variiert und der Reibwert  $\mu$  [-] kontinuierlich gemessen werden (Abb. 4).



**Abb. 4** Schematischer Aufbau des Versuchstandes nach [6]

Für die Analysen mit WPC wurden für die Fördertechnik typische Oberproben („Kunststoff“, „Stahl“) aus handelsüblichen Kunststofffingerketten (Bosch-Rexroth VF60, Werkstoff Delrin 500 AL Du Pont, gleitmodifiziert, Versuchsbezeichnung „Kunststoff“) bzw. Scharnierbandketten (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 (Abb. 5).



**Abb. 5** Probenspender mit Beispieloberprobe

Die Gewinnung der Unterproben [150x20]mm variabler Dicke erfolgte aus extrudierten Terrassendecks sowie aus spritzgegossenen Platten (verschiedener Kunststoffe bzw. WPC) einer Charge unter Beachtung der Spritzrichtung (Abb. 6).

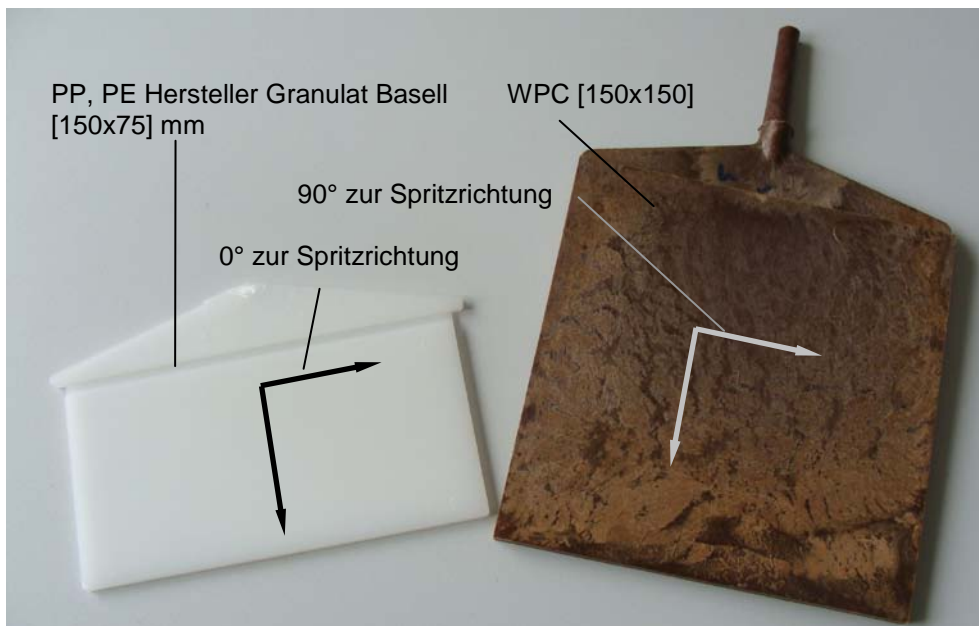


Abb. 6 Platten Spritzguss aus PP, PE und WPC (mit PP bzw. PE-Matrix)

#### 4.2 Abgrenzung technischer Parameter bei Gleitreibungsbelastung

Für eine erste Klassifizierung des Gleitreibungsverhaltens extrudierter Oberflächen wurden die Proben aus den extrudierten Profilen (Terrassendecks) vergleichend betrachtet. Dabei wurde das Reibverhalten unter Beachtung des Verschleißes praxisnah und unter der Perspektive der wirtschaftlichen Nutzung untersucht sowie eine grundlegende Materialauswahl hinsichtlich tribologischer Randgrößen für weitere Detailtests getroffen. Abb. 7 zeigt den gemessenen Verlauf des Reibwertes (Versuchstand Abb. 4) über 20h.

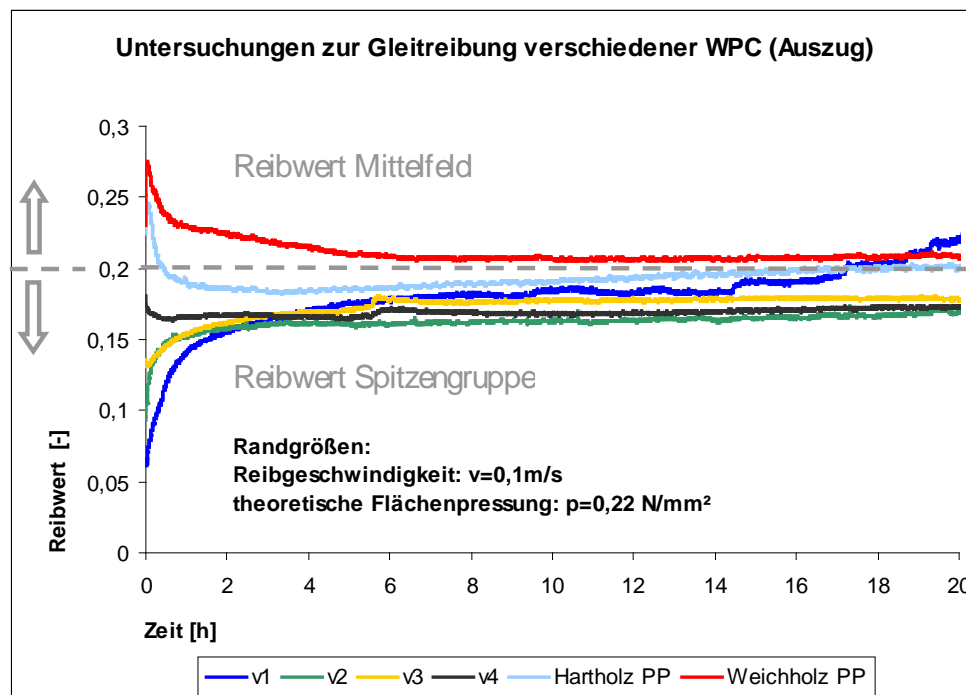


Abb. 7 Einordnung extrudierter WPC,  $p \cdot v = 0,022 \text{ W/mm}^2$ , Reibpartner „Kunststoff“ (Delrin 500 AL) [7]

Die Oberprobe Delrin 500 AL („Kunststoff“ aus Kunststofffingerkette) wurde gegen die verschiedenen extrudierten Unterproben WPC aus kommerziellen Compounds mit



50% PP -Matrix und unterschiedlichen Gleitmittelanteilen (wichtig für Verarbeitung im Extrusionsprozess) und variierten Verarbeitungsparametern (V1 - V4) sowie erste Compounds aus eigener Herstellung (Hartholz / PP, Weichholz / PP, Professur Kunststoffe) getestet. Die Abbildung verdeutlicht, dass sowohl der Gleitmittelzusatz (V1 [übermäßig] – PP Weichholz, PP/Hartholz [kein]) als auch eine Variation in den Verarbeitungsparametern (V3, V4) einen Einfluss auf den Reibwert sowie dessen zeitlichen Verlauf haben. Dies wird sehr ausgeprägt im unterschiedlichen Einlaufverhalten der Reibpaarungen in den ersten 6 h des Versuches deutlich.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die getesteten extrudierten WPC für einen Einsatz in Gleitelementen (Reibpaarung Kunststoff - WPC) hinsichtlich des Reibwertes eignen. Der Verschleiß war dabei technisch akzeptabel. Der Einfluss technisch relevanter Größen und eine Verallgemeinerung der Erkenntnis sowie die genauere Charakterisierung des Verschleißes bleiben dabei offen. Hinsichtlich des Gleitmittels ist aufgrund von Kurve V1 ersichtlich, dass innerhalb der ersten Stunden ein positiver Effekt des WPC gegen POM vorliegt.

### 4.3 Untersuchungen des Wirkmechanismus und wichtiger Einflussgrößen

#### 4.3.1 Theorie/Methodik/Probengeometrie

Übergeordnetes Ziel der Versuchsmethodik war es, einen einfachen Ansatz zur Ermittlung von tribologischen Einflüssen fördertechnischer Bauteile an kleinen, schnell variierbaren Probenchargen zu finden. Für diese Vorgehensweise war es nötig, ein geeignetes Versuchsprogramm mit passender Auswertemethodik zu entwickeln. Für die relevanten Versuchsparameter gilt theoretisch:

$$p = \frac{F_N}{A} \text{ [N/mm}^2\text{]} \text{ Gleichung 1}$$

$p$  = theoretische Flächenpressung  
 $A$  = theoretische Kontaktfläche  
 $F_N$  = Normalkraft hinsichtlich theoretischer Kontaktfläche  
 $B_t$  = tribologische Belastungsintensität  
 $v$  = Reibgeschwindigkeit

$$B_t = p \cdot v, B_t = \frac{F_N \cdot v}{A} \text{ [W/mm}^2\text{]} \text{ Gleichung 2}$$

$$F_R = F_N \cdot \mu \text{ [N]} \text{ Gleichung 3}$$

$F_R$  = Reibkraft  
 $\mu$  = dynamischer Reibwert  
 $P_R$  = Reibleistung

$$P_R = F_R \cdot v = F_N \cdot v \cdot \mu \text{ [W]} \text{ Gleichung 4}$$

$$B_t(P_R, A, \mu) = \frac{1}{A \cdot \mu} P_R \text{ [W/mm}^2\text{]} \text{ Gleichung 5}$$

tribologische Belastungsintensität in  
 Funktion der Reibleistung, des  
 dynamischen Reibwertes und der  
 theoretischen Kontaktfläche

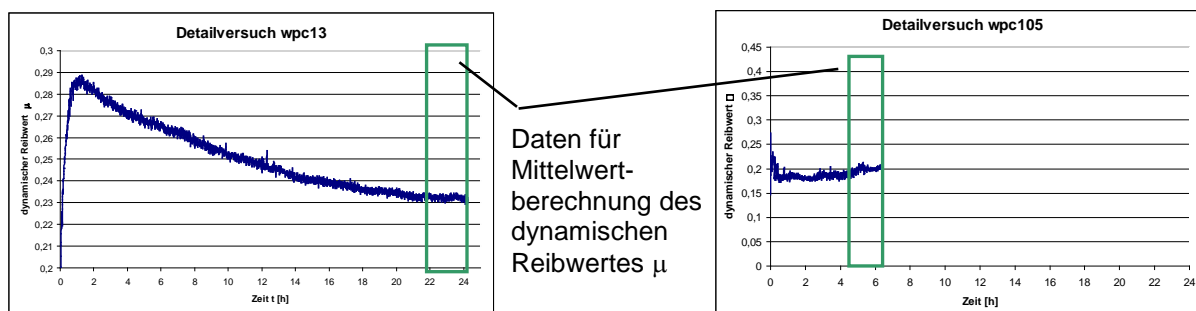
„Bei den vorliegenden Reibpaarungen Kunststoff – Kunststoff oder Kunststoff – Stahl ist dabei von einer „Doppelfunktion“ der theoretischen Flächenpressung  $p$  bzw. einem nicht linearen Einfluss der Reibgeschwindigkeit  $v$  auszugehen. Diese „Doppelfunktion“ von  $p$  wird einerseits durch die in Gleichung 1 dargestellte Pressung als mechanische Beanspruchung und andererseits durch eine charakteristischen Wärmeeintag (Gleichung 4) in die Reibpaarung gekennzeichnet. Besonders relevant ist bei den untersuchten Reibpaarungen zudem die Wärme(ab)leitung aus der Wirkzone. Der dynamische Reibwert und der auftretende Verschleiß sind somit als Resultat einer mechanisch - thermischen Belastung bzw. deren Wechselwirkungen zu sehen.“ [8] Gleichung 5 gibt nur eine verkürzte Betrachtung der Verhältnisse wieder, stellt aber aus Sicht der Verfasser eine zulässige Vereinfachung für die angestrebten charakterisierenden Untersuchungen dar.

Die Reibpaarungen wurden darin bei vier verschiedenen tribologischen Belastungsintensitäten ( $B_t = p \cdot v$  –Werten, siehe Tabelle 1) steigender Intensität unter gleichen Randbedingungen hinsichtlich Reibwert und Verschleißverhalten untersucht. Dabei wurden  $p$  und  $v$  schrittweise erhöht.

**Tabelle 1** Versuchsparameter – tribologische Belastungsintensitäten

Nr.	$p$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$v$ [m/s]	$B_t = p \cdot v$ [W/mm <sup>2</sup> ]	Steigerungsfaktor $B_t$ bzgl. Nr.1	Steigerungsfaktor $B_t$ bzgl. Vorgänger
1	0,22	0,1	0,022	1	-
2	0,5	0,1	0,05	2,27	2,27
3	0,22	0,5	0,11	5	2,2
4	0,5	0,5	0,25	11,36	2,27

Die Steigerung der tribologische Belastungsintensität  $B_t$  kommt dabei, nahezu konstant, immer mehr als einer Verdopplung gleich (Faktor 2,2 – 2,27). Die Reibwerte für die Beurteilung wurden im Versuchszeitraum (22-24)h (Methode nach [8]) oder (2-0)h vor Versagen der Reibpaarung in einen Mittelwert überführt (Abb. 8).



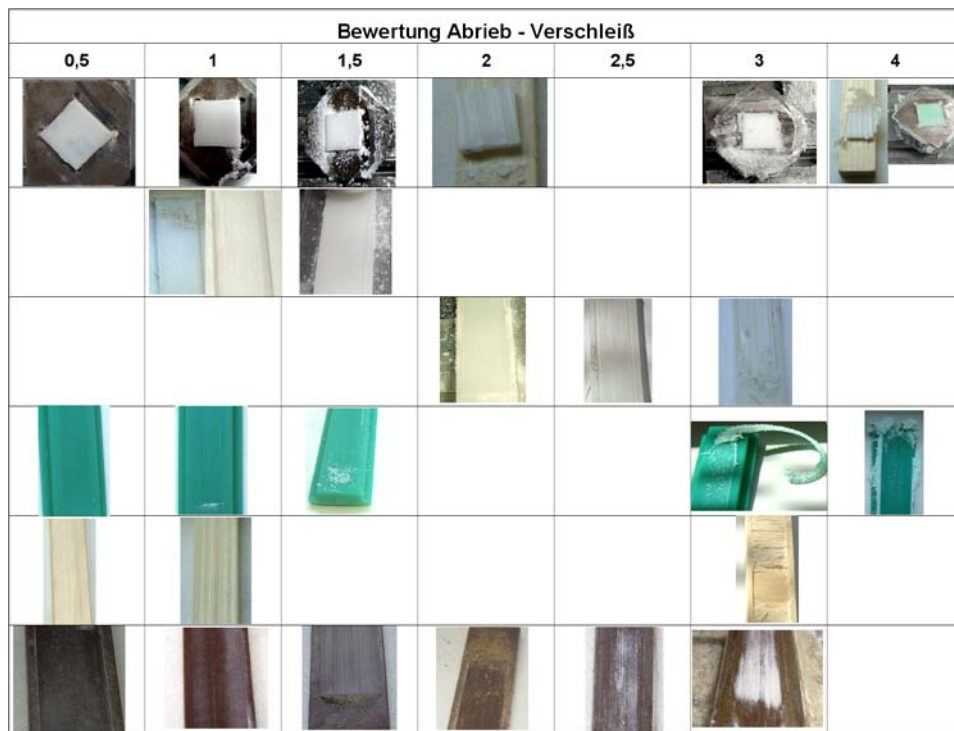
**Abb. 8** Verwendete Daten aus den Messwerten, verdeutlicht am Beispiel zweier Messkurven

Das bereits in Abb. 7 charakterisierte Einlaufverhalten wird dabei soweit wie möglich ausgeblendet und die darauf begründete Abweichung minimiert. Die Information über den charakteristischen Verlauf des Reibwertes geht dabei verloren [9]. Weiterhin wurde das Verschleißverhalten der Reibpaarung, bestehend aus Ober- und Unterprobe, getrennt mit einer vergleichenden optischen Methode begutachtet. Bei diesem Verfahren wird in acht Stufen der Abrieb und die Oberflächendeformation in ein Bewertungssystem gefasst (Abb. 9). Null (0) bedeutet dabei kein Verschleiß, drei (3) bildet die Unbrauchbarkeit der Reibpaarung durch übermäßigen Verschleiß nach 24h-Testzeit ab. Vier (4) verkörpert das Versagen der/des Reibpartner/s in der Reibpaarung vor Ablauf des 24h-Versuches durch übermäßigen Verschleiß (vgl. Kriterium 3). Die Schrittweite beträgt dabei 0,5 Wertungspunkte, um die notwendige Genauigkeit (hinsichtlich WPC) zu erreichen. Die ermittelten Werte wurden getrennt nach Reibung und Verschleiß ausgewertet. In einem zweiten Schritt wurden die Erkenntnisse in einen so genannten Tribologiewert zusammengefasst. Dieser Wert ist als dimensionslose Kennzahl durch ein gewichtetes Verhältnis aus dem Reibwert und den Verschleißwerten der Reibpaarung gekennzeichnet und bildet eine verbesserte Beurteilung dieser Paarungen für die tribologische Verwendung, da er sowohl den Reibwert als auch das Verschleißverhalten der Unter- und Oberprobe (also beider Reibpartner!) abbildet. Dabei sind geringere Tribologiewerte für eine Reibpaarung günstiger als hohe (Methode nach [10]).

Es gilt dabei für den allgemeinen Fall:

$$\text{Tribologiewert} = (\text{Reibwert}) + (\text{Verschleiß})$$

$$T = (C_1 \cdot \mu) + (C_2 \cdot V_U + C_3 \cdot V_O) \quad \text{Gleichung 6}$$



**Abb. 9** Bewertungssystem im Überblick (acht Stufen 0 - 4) Beispiele verschiedener Werkstoffe [10]

Dieser allgemein formulierte Ansatz wurde für die nachfolgend dargestellten Untersuchungen mit den Parametergrößen  $C_1 = 1$ ,  $C_2$  und  $C_3 = 0,1$  angewendet.

Das bedeutet, dass Reibwert und Verschleiß der Reibpaarung (bezüglich der Zehnerpotenz) gleichwertig in den Tribologiekennwert eingehen. Der Verschleißwert wird damit für die Praxis besser greifbar, da er als eine Art „Ersatzreibwert“ klassifiziert wird. Die Kennwerte für  $\mu$ ,  $V_U$ ,  $V_O$  wurden als Mittelwerte, resultierend aus zwei Versuchen pro Kennwert, für die verschiedenen Reibpaarungen bestimmt und ausgewertet. Stahl (Oberprobe) zeigte über alle Versuche keinen sichtbaren Verschleiß und wurde somit nicht in den Abbildungen zum Verschleißverhalten aufgenommen. Für die Berechnung des Tribologiewertes gilt dabei  $V_{O - Stahl} = 0$ .

Die 90° - Probenausrichtung wurde im Vorfeld als Versuchstandard aller Unterproben in Verbindung mit Kunststoff (PP, PE WPC) gewählt. Die aus den Ketten gewonnenen Oberproben besitzen eine Abmessung von [15x15] mm, die Dicke variiert zwischen 3 – 4 mm. Die Unterproben wurde in den Abmessung ([150x20xt] mm) verwendet, wobei t zwischen 3 und 10 mm liegt.

Bei der Auswertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass für Fichte die generelle Messung mit einer 90° Faserausrichtung sowie 0° bei Stahl (Oberprobe) nicht möglich war. Eine Überlastung zu Versuchsbeginn zerstörte die Proben. Aus diesem Grund wurden nur die Ergebnisse für die Experimente mit 0°-Proben bzgl. der Holzfaserrichtung und Kunststoff zum Vergleich angegeben. Bei den Untersuchungen an Gleitschienen aus PE-UHMW war keine Zuordnung der Fertigungsrichtung möglich (Gleitschienen vom Hersteller aus Platten gefräst). Aus diesem Grund wurde 0° hinsichtlich der „Betriebsrichtung“ im Praxiseinsatz gewählt. Allgemein gilt für die Deutung der Diagramme: je größer der Ordinatenwert, desto ungünstiger das jeweilige klassifizierte tribologische Verhalten.

Es wurden pro Parameter zwei Messungen durchgeführt. Die Datenpunkte der Mittelwerte wurden linear verbunden. Abweichungen wurde nur bei den Reibwerten und bei den Tribologiewerten (resultieren aus dem Anteil Reibwert) dargestellt. Bei der dargestellten Abweichung ist zu beachten, dass es sich um die jeweiligen Messwerte der beiden Einzelmessungen handelt.

Nachfolgend wurde schrittweise das tribologische Verhalten verschiedener Werkstoffe (siehe Tabelle 2) untersucht.

Alle Versuchsproben der verschiedenen Werkstoffe stammten dabei aus einer Charge und wurden hinsichtlich der Unterproben WPC, PP und PE im Technikum der Professur Kunststoffe im Spritzgussverfahren hergestellt (vgl. Abb. 6). Spritzgegossene Proben sind unter Laborbedingungen einfacher herstellbar, lassen aber keine komplette Übertragung des klassifizierten Verhaltens auf extrudierte Bauteile zu.

Tabelle 2 Untersuchte Werkstoffe

Nr:	Bezeichnung	Hersteller/Benennung	Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Bemerkungen
Oberproben, siehe Abb. 4				
1	Kunststoff	Bosch-Rexroth/VF60, Werkstoff Delrin 500 AL (von Du Pont), gleitmodifiziert	-	aus handelsüblichen Kunststofffingerketten
2	Stahl	Novonorm/SSE815-K325, Werkstoff: 1.4589, X5CrNiMoTi15-2	-	aus handelsüblichen Scharnierbandketten
Unterproben, siehe Abb. 4				
3	PE	Basell – PE6031M	0,97	Spritzgussplatte, vgl. Abb. 6, 90° Probenausrichtung Abmessungen [150x20x4]mm
4	PP	Basell PPRF300K	0,89	Spritzgussplatte, vgl. Abb. 6, 90° Probenausrichtung Abmessungen [150x20x4]mm
5	Fichte	unbekannt	0,41	Vollholz, aus handelsüblichen Brettern Untersuchungen 0° (faserlängs), Abmessungen [150x20x10]mm, Holzfeuchte von 9,4% (klimatisiert zu Versuchsbeginn)
6	PE UHMW	Murtfeld/„S-grün“	0,95	aus extrudierten Platten, Untersuchungen in 0° - „Betriebsrichtung“ vgl. Praxiseinsatz, Abmessungen [150x30x8]mm
7	WPC (PP/2,5)	WPC: 50mass%	1,02	Spritzgussplatte, vgl. Abb. 6, 90° Probenausrichtung (bei Kapitel 4.3.6 und 4.3.7 zusätzlich Verwendung von 0° Proben mit 2,5 % HV) Bezeichnung (Matrixwerkstoff/Anteil Haftvermittler in %), Nr 9 WPC (PE) enthält keinen Haftvermittler
8	WPC (PP/2,0)	Kunststoff/50mass% Holz	1,05	
9	WPC (PE)	Matrixmaterial: (siehe Nr. 3,4) Füllstoff: (Späne Jelu Fichte-Tanne, Feinheit 120f) Haftvermittler: (Kometra SCONTA TPPP 8112 FA)	1,05	

#### 4.3.2 Untersuchungen zum Stand der Technik

Eine Einordnung der Messmethodik und die Charakterisierung des bereits in Kapitel 1 angesprochenen Standes der Technik wurde an den an den Oberproben (Nr. 1, 2, siehe Tabelle 2) in Kombination mit den Unterproben (Nr. 3, 4, 5, siehe Tabelle 2) vorgenommen. Die resultierenden Ergebnisse sind für die Reibwerte (Abb. 10) und das Verschleißverhalten der Unter- (Abb. 11) und Oberproben (Abb. 12) sowie die Tribologiewerte (Abb. 13) nachfolgend dargestellt.

Bezüglich des Reibwertes wird deutlich, dass PP gegen Stahl tendenziell größere Werte als gegen Kunststoff generiert. Bei PE-UHMW wird bei einer tribologischen Belastungsintensität von 0,25 W/mm<sup>2</sup> und bei PE ab ca. 0,11 W/mm<sup>2</sup> ein umgekehrtes Verhalten deutlich. Fichte und PE zeigen gegen Kunststoff einen

nahezu konstanten Reibwert. Die Reibwerte von PE liegen bei vergleichbaren Reibpartnern tendenziell unter denen von PP. Die Streuungen der Reibwerte sind bei Kunststoff als Reibpartner kleiner als bei Stahl. Fichte und PE-UHMW besitzen unabhängig vom Reibpartner bei steigender Belastung sehr geringe Streuungen des Reibwertes. PP zeigt dagegen in Verbindung mit Stahl sehr große Streuungen.

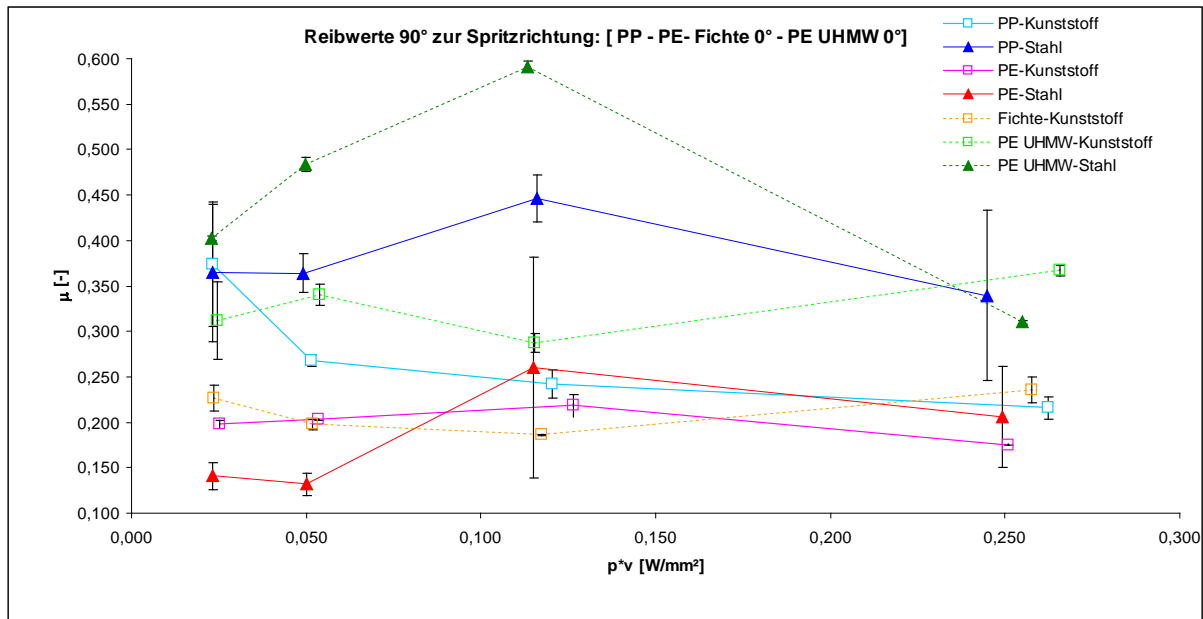


Abb. 10 Reibwerte PP (90°), PE (90°), Fichte (0°), PE-UHMW (0°) gegen Stahl – Kunststoff

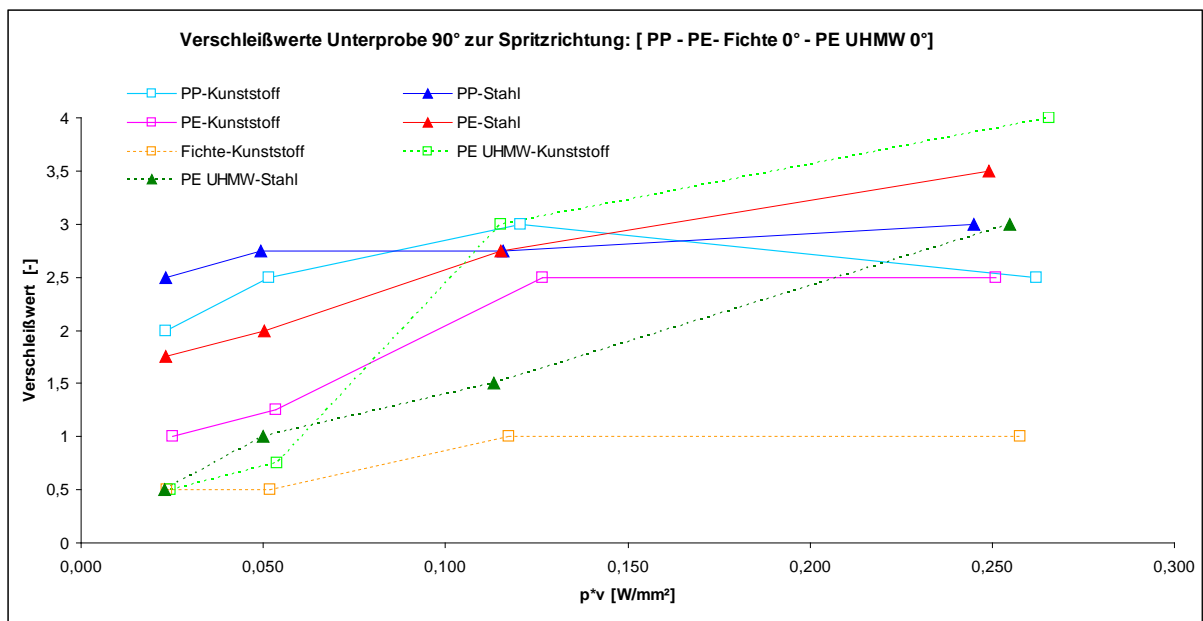
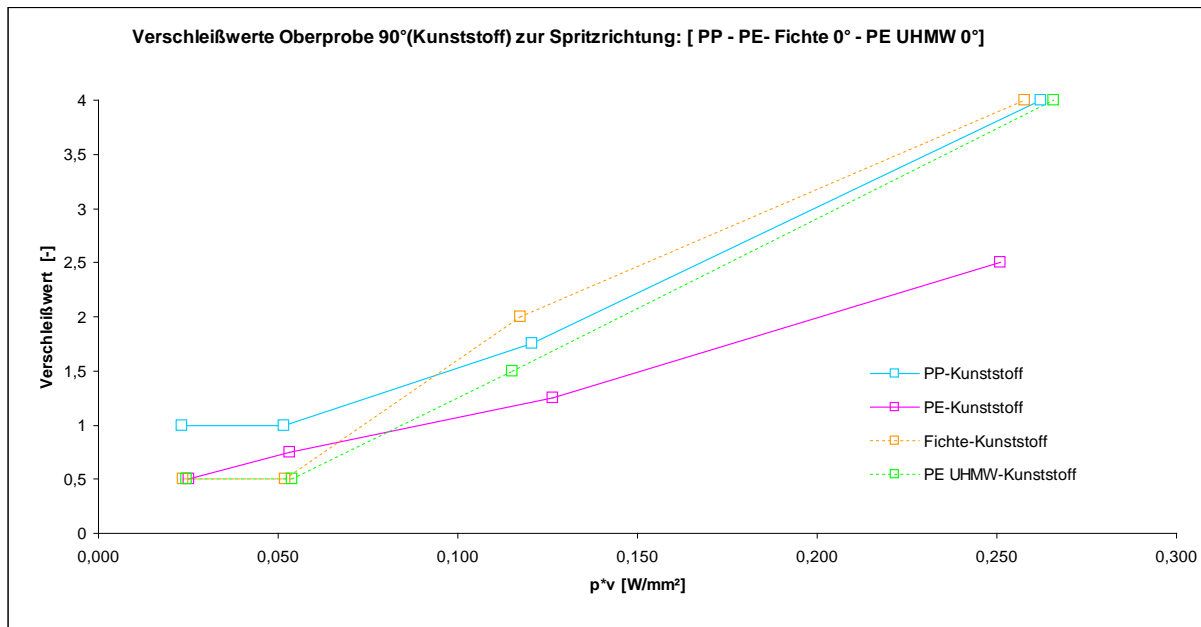


Abb. 11 Verschleiß Unterproben PP (90°), PE (90°), Fichte (0°), PE-UHMW (0°) gegen Stahl – Kunststoff

Die getesteten Kunststoffe zeigen bei steigenden tribologischen Belastungsintensitäten unabhängig vom Reibpartner das in Kapitel 1 beschriebene starke Verschleißverhalten.

Besonders bei 0,25 W/mm<sup>2</sup> gelangen die Materialien an ihren Grenzen (Verschleiß 2,5 bis 3 und größer). Besonders auffällig ist, dass PE und PE-UHMW nach sehr geringen Werten über 0,1 W/mm<sup>2</sup> einen sehr starken Anstieg des Verschleißes zeigen. Dies deutet auf einen tribochemischen Effekt zwischen POM und PP (z.B. ständiges „Verschweißen“ der Reibpartner) hin. Bei PE und PP wird gegen Stahl tendenziell höherer Verschleiß erreicht als gegenüber Kunststoff, wobei das

Verhalten bei PE-UHMW ausgeprägter ist. PE und PE-UHMW verschleifen gegenüber Stahl mit nahezu gleichem Verlauf, lediglich der Ordinatenwert ist verschoben. Dieses Verhalten rechtfertigt den Einsatz von PE-UHMW gegenüber Stahl (wegen des geringeren Verschleißes) und gibt Hinweise auf das Ausmaß der tribologischen Vorteile. Fichte zeigt gegen Kunststoff besonders bei höherer Belastung einen konstant geringen Verschleiß, der schon ab  $0,1 \text{ W/mm}^2$  deutlich unter denen der getesteten Kunststoffe liegt.



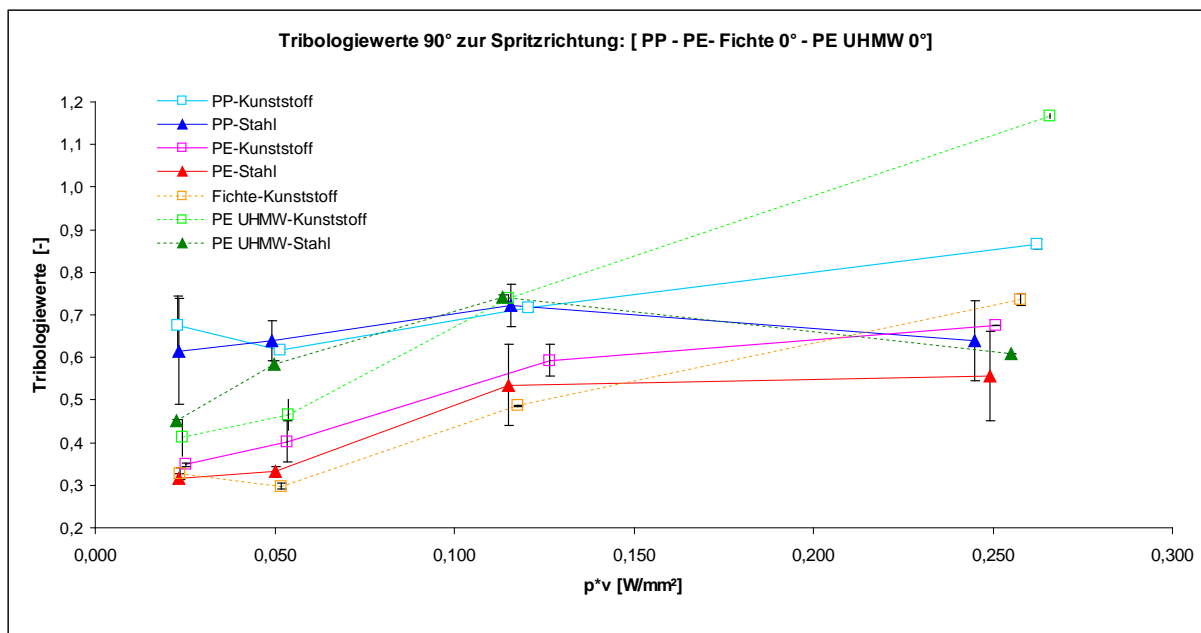
**Abb. 12** Verschleiß Oberprobe Kunststoff gegen PP (90°), PE (90°), Fichte (0°), PE-UHMW (0°)

Hinsichtlich des Verschleißes ist es wichtig, beide Reibpartner (Ober- und Unterprobe) zu betrachten. Oftmals tritt dabei der Effekt auf, dass ein Reibpartner besonders stark verschleißt und der Zweite dafür deutlich geringer (z.B. kein Verschleiß der Stahloberproben im kompletten Versuchsfeld). Kunststoff verschleißt gegenüber PE am geringsten, gegenüber Holz am stärksten.

Bei allen untersuchten Reibpartnern außer PE ist die Oberprobe vor dem Testablauf verschlissen. Bei geringeren Belastungen (bis  $0,05 \text{ W/mm}^2$ ) ist der Einfluss des Reibpartners auf die Oberprobe sehr gering. Hinsichtlich der Kunststoff Oberproben wird deutlich, dass alle Unterproben, außer PE, einen sehr starken Verschleiß bei steigender Belastung zur Folge haben. Bei einer tribologischen Belastungsintensität von  $0,25 \text{ W/mm}^2$  kann nicht mehr von einer technisch funktionierenden Reibpaarung ausgegangen werden. In wie weit dieses Verhalten der Oberprobe durch die Unterprobe beeinflusst wird, kann aus den Messungen nicht abgeleitet werden. Lediglich bei PE-UHMW kann zwischen dem starken Verschleiß der Unter- und Oberprobe ein direkter Zusammenhang unterstellt werden.

Eine für die Praxis relevante Beurteilung der Reibpaarung ist möglich, wenn Reibwert und Verschleiß in den Tribologiewert überführt werden. In Auswertung der Versuche wird deutlich, dass Fichte und PE das vorteilhafteste tribologische Verhalten (Tribologiewert) bis in Bereiche großer tribologischer Belastungsintensität gegenüber den Reibpartnern Kunststoff und Stahl besitzen, wobei Fichte geringere Streuungen aufweist. PP besitzt ein eher gleich bleibendes Verhalten, welches im Niveau (Ordinatenwert) über dem von PE liegt.

Hinsichtlich der Abweichungen spiegelt sich das Verhalten aus den Reibwerten wieder. Es wird angenommen, dass es zwischen den Polymeren und Stahl während des Reibkontaktes „unkontrolliert“ zum „Anhaften“ an der glatten Oberfläche des Stahles kommt und deshalb die Streuungen zunehmen.



**Abb. 13** Tribologiewerte PP (90°), PE (90°), Fichte (0°), PE-UHMW (0°) gegen Stahl - Kunststoff

Die Tribologie der (betrachteten) Kunststoffe beinhaltet jeweils ein komplexes System von Einflussfaktoren und Stellparameter. Die praxisorientierte vereinfachte Betrachtung der Reibpaarung über den Tribologiewert bietet dabei lediglich über die Wichtungsfaktoren ( $C_i$ , siehe Gleichung 6) die Möglichkeit einzelne Parameter (Reibwert oder Verschleiß des entsprechenden Reibpartners) in den Fordergrund zu stellen. Soll die Reibpaarung gezielt auf Verschleiß oder dynamischen Reibwert eines Reibpartners ausgerichtet werden, ist eine Einzelbetrachtung notwendig.

Der in Kapitel 1 dargelegte Ansatz, dass der anfängliche abrasive Verschleiß der polymeren Komponente als Schmiermittel wirkt und den Abrieb und den Reibwert der stärker tragenden Holzkomponente verringert konnte nach den Untersuchungen zum Stand der Technik weiter erhärtet werden.

Das Holz (Fichte) besitzt gegenüber Stahl einen sehr hohen Reibwert und Verschleiß (dynamische Messung des Reibwertes waren nicht möglich, Probe zerstört), gegenüber Kunststoff in Faserlängsrichtung 0° dagegen ein tribologisch positives Verhalten.

Es ist dadurch nahe liegend zu unterstellen, dass der Kunststoff Reibpartner längs entlang der Holzfasern (0° Ausrichtung) gleitet und dabei Kunststoffpartikel abgerieben werden. Reibwert und Verschleiß sinken bis zu einer gewissen tribologischen Belastungsintensität ( $p \cdot v$ ).

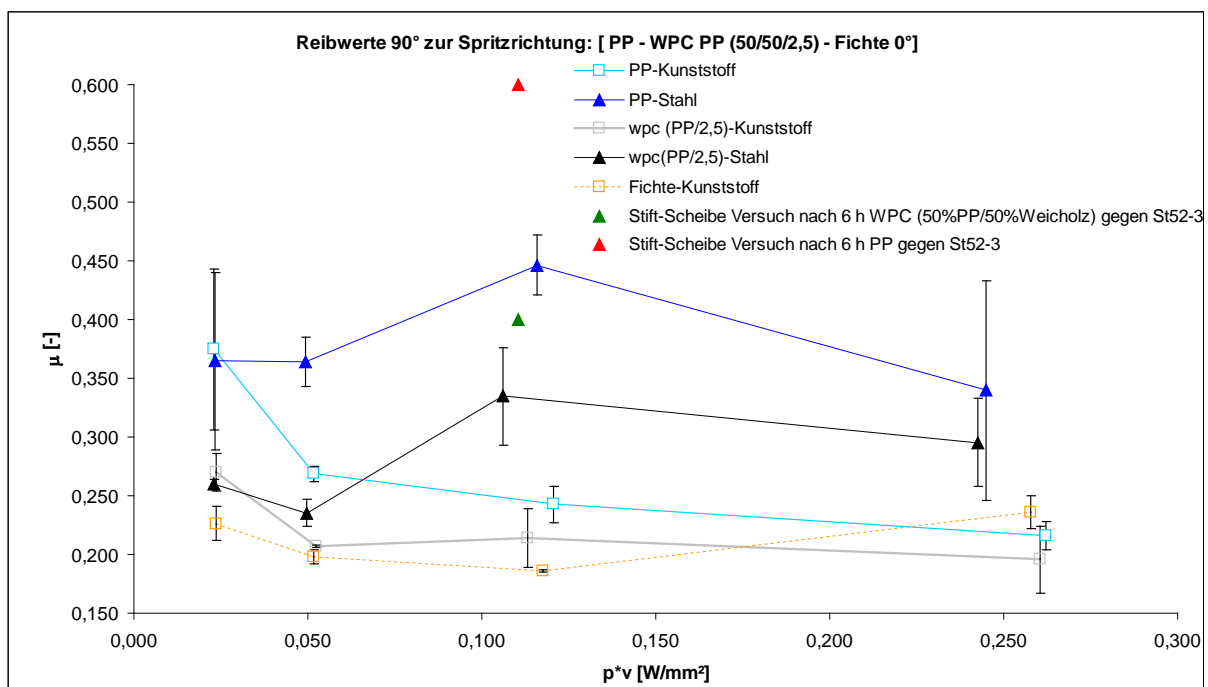
Das Holz „trägt“ und der Kunststoff „schmiert“, bis der Wärmestau in der Reibzone einen kritischen Wert übersteigt und der Kunststoff im oberflächennahen „Holzkunststoffverbund“ schmilzt bzw. mit der Oberprobe verklebt (siehe Abb. 12: Verschleißverlauf Unterprobe Fichte ab 0,11 W/mm<sup>2</sup>).

Im Übertragenen kann dies bedeuten, dass Kunststoff – Holz - Verbunde ein ähnliches Verhalten aufweisen sollten.

#### 4.3.3 Charakterisierung des tribologischen Verhaltens von WPC (PP-Matrix)

Die Charakterisierung des Verhaltens von WPC gegenüber dem Matrixmaterial (PP) und dem Füllstoffmaterial aus Fichten bzw. Tannenholzspänen erfolgte an vergleichbaren Oberproben (Nr. 1, 2 siehe Tabelle 2) in Kombination mit den Unterproben (Nr. 7 siehe Tabelle 2). Die Ergebnisse für PP und Fichte wurden aus dem vorangegangenen Kapitel übernommen. Die daraus resultierenden Ergebnisse

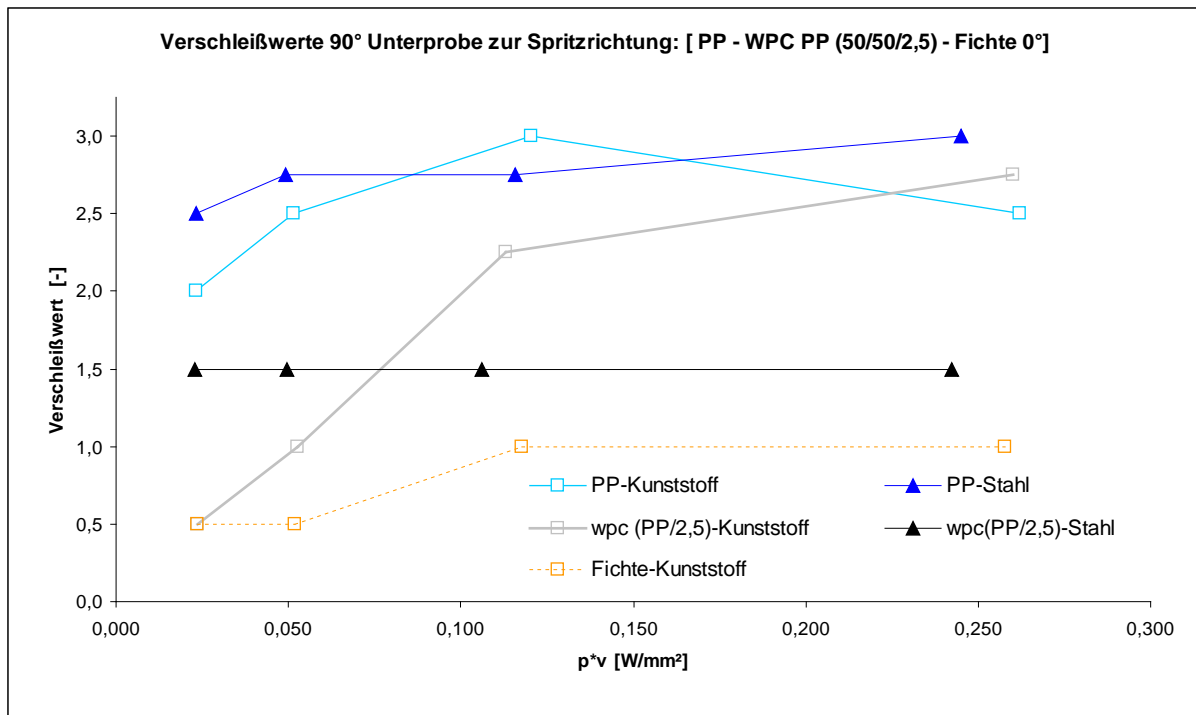
sind in den Abbildungen für den Reibwert (Abb. 14), Tribologiewert (Abb. 17), Verschleiß Unterproben (Abb. 15), Verschleiß Oberproben (Abb. 16) dargestellt. Bei den Reibwerten des WPC ist erkennbar, dass gegenüber beiden Reibpartnern (Kunststoff, Stahl) eine Verschiebung des Reibwertverlaufes über die gesamte Beanspruchungsbreite in tribologisch günstigere Bereiche erfolgt, wobei die Kurvenverläufe nahezu erhalten bleiben. Der Trend aus dem Vorversuch mit Stift-Scheibe wurde damit bestätigt und ist in Abb. 14 hinsichtlich der Einordnung der Ergebnisse ergänzend eingetragen. Bei Stahl werden die Streuungen geringer, bei Kunststoff ist diese Abnahme nur bei Belastungen bis  $0,05 \text{ W/mm}^2$  ersichtlich. Die Reibwerte gegen Stahl sind tendenziell mit steigender tribologischer Belastungsintensität größer. Bei  $0,25 \text{ W/mm}^2$  markieren die mittleren Reibwerte von Holz (Fichte) die untere Grenze des Reibwertspektrums. Diese Werte werden jedoch unter Beachtung der Streuungen von WPC, außer bei  $0,022 \text{ W/mm}^2$ , ebenfalls erreicht. Darauf aufbauend ist die These zulässig, dass der Holzkunststoffverbund mit 50 mass.% Holzpartikeln Fichte/Tanne ein annähernd vergleichbares Reibverhalten besitzt wie Vollholz (Fichte) faserlängs. Die Annahme des „stützenden Holzes“ und „schmierenden Kunststoffes“ wird durch diese Erkenntnis verfestigt.



**Abb. 14** Reibwert PP (90°), WPC (90°), Fichte (0°) gegen Kunststoff und Stahl, Reibwert WPC Voruntersuchung Stift Scheibe gegen Stahl (St52-3) nach 6h (vgl. **Abb. 2**)

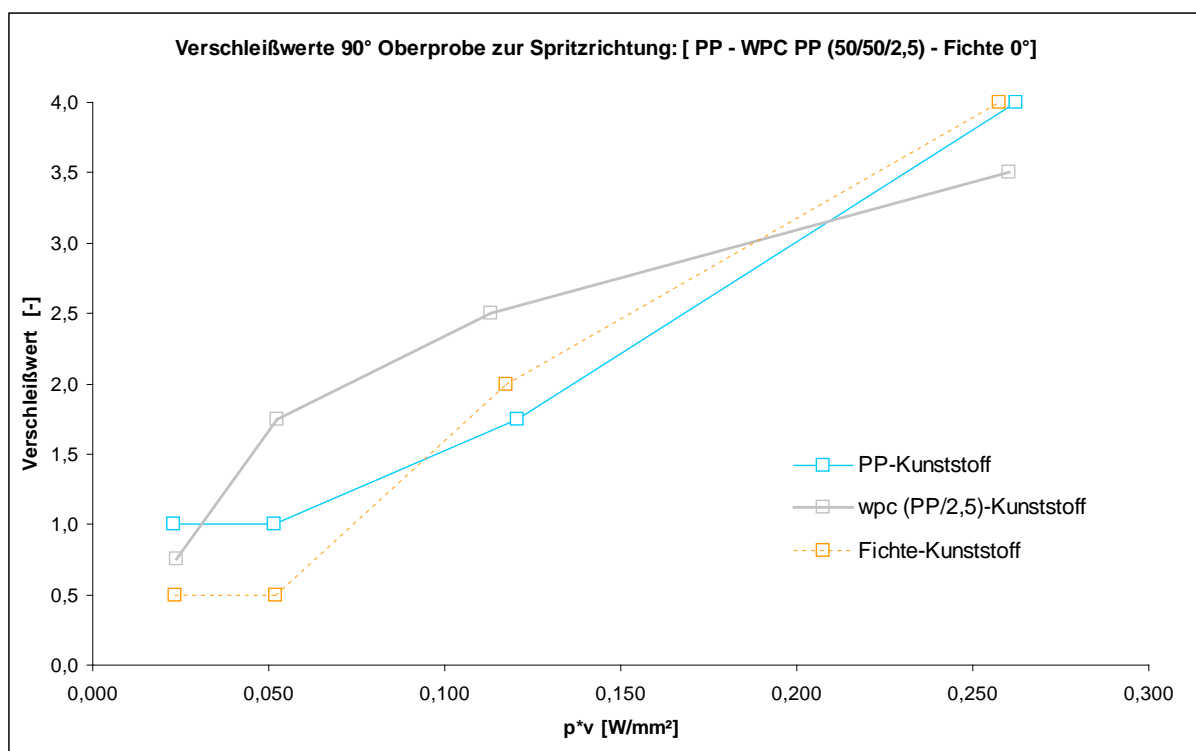
Hinsichtlich des Verschleißverhaltens der Unterproben wird deutlich, dass gegen Kunststoff und gegen Stahl geringere Werte als mit reinem PP erreicht werden. Lediglich bei  $0,25 \text{ W/mm}^2$  gegen Kunststoff ist der Verschleiß geringfügig größer. Besonders auffällig ist das konstante Verschleißverhalten gegen Stahl über das komplette Belastungsfeld. Gegen Kunststoff wird der Wert gegen „Stahl“ erst bei  $0,05 \text{ W/mm}^2$  erreicht und nachfolgend deutlich überschritten. Bei geringen tribologischen Belastungsintensitäten bis  $0,022 \text{ W/mm}^2$  gegen Kunststoff liegt der Verschleiß auf Niveau des Vollholzes (Fichte). Dieser Punkt stützt wiederum die Eingangs bei den Untersuchungen zum Stand der Technik formulierte Annahme der Funktionstrennung und dem damit einhergehenden „Verkleben“ des Verbundes bei höheren Belastungen, gekoppelt mit steigendem Verschleiß.





**Abb. 15** Verschleiß Unterprobe PP (90°), WPC (90°), Fichte (0°) gegen Kunststoff und Stahl

Wird der Verschleiß der Oberprobe Kunststoff gegen WPC betrachtet, so ist erkennbar, dass bei mittleren Belastungen deutlich mehr Verschleiß von der Oberprobe aufgenommen wird. Werden Verschleiß von Ober- und Unterprobe gemeinsam betrachtet, so ist nahe liegend, dass der geringere Verschleiß des WPC gegenüber Kunststoff hinsichtlich des Matrixmaterialies PP zwischen (0,05 - 0,1) W/mm<sup>2</sup> durch den größeren Verschleiß der Oberprobe erreicht wird.



**Abb. 16** Verschleiß Oberprobe Kunststoff gegen PP (90°), WPC (90°), Fichte (0°)

Weiterhin wird bei Betrachtung des Reibwertes und des Verschleißes die Abhängigkeit beider Betrachtungsebenen voneinander deutlich. Gerade gegen

Kunststoff wird der fallende Reibwert des WPC durch steigenden Verschleiß erkauft, was wiederum einerseits die These vom „schmierenden“ Kunststoff stützt und andererseits zeigt, dass die Polymere miteinander „Verkleben“. Gegenüber dem Stahl steigt der Reibwert bei steigender tribologischer Belastung, wohingegen der Verschleiß konstant ist. Die eingebrachte Energie wird dabei über eine erhöhte Wärmeentwicklung an der Oberprobe deutlich. Die Proben aus Stahl (hochlegiertem Edelstahl) waren nach 24h nicht mehr ohne Handschuhe zu bewegen und zudem weis-gelb verfärbt (Anlassfarbe), was unter den Versuchsbedingungen auf eine längere Temperatureinwirkung von über 100°C hindeutet. Das WPC besitzt somit eine höhere Wärmebeständigkeit als der reine Kunststoff des Matrixmaterials. Für eine bessere Übertragung der Einflüsse und Erkenntnisse hinsichtlich des tribologischen Verhaltens von WPC in die Praxis (z.B. in einer Gleitschiene), bietet sich die Betrachtung über den bereits definierten Tribologiewert an. Als ein „Ersatzreibwert“ bildet er Reibung und Verschleiß kombiniert ab.

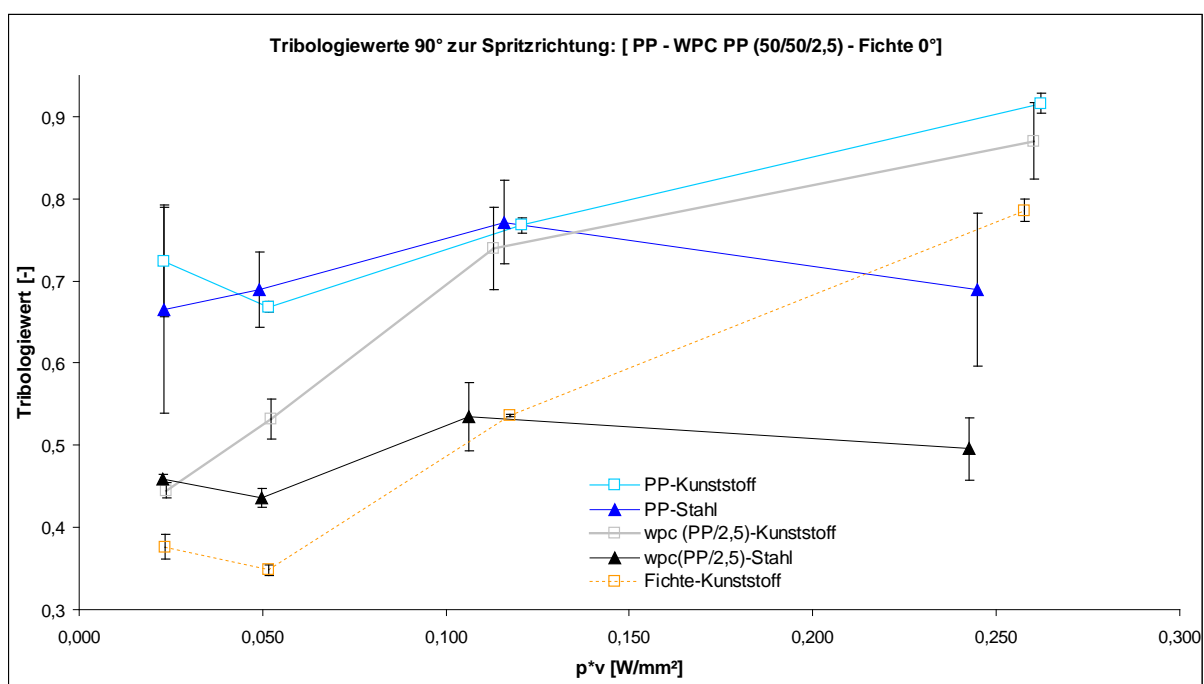


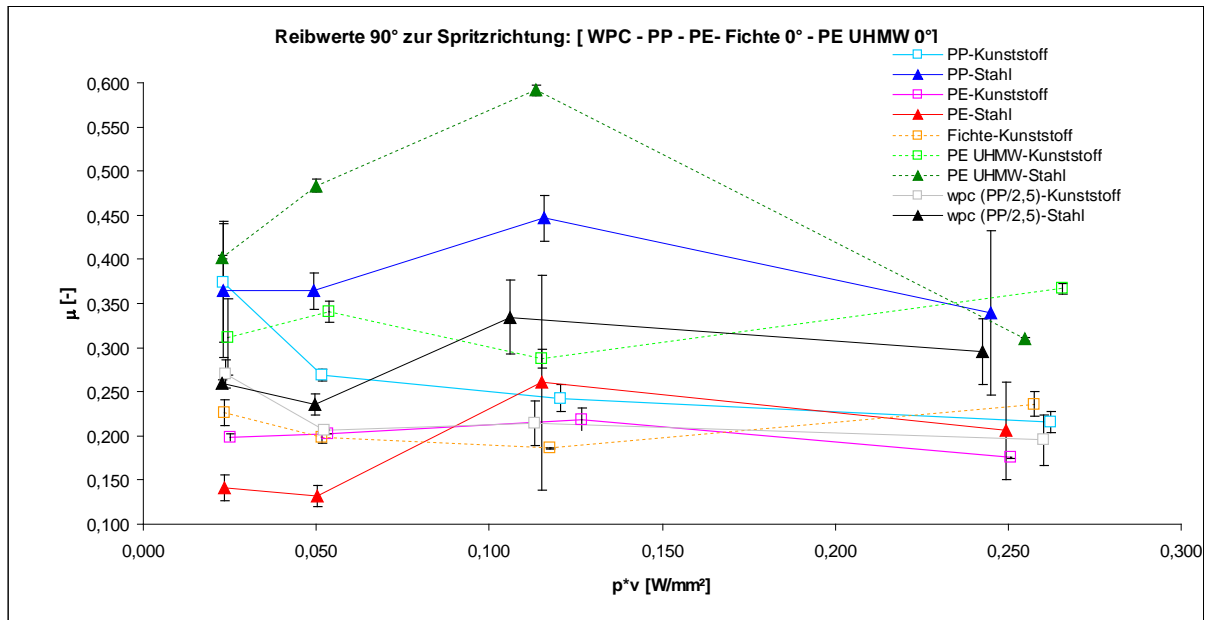
Abb. 17 Tribologiewert PP (90°), WPC (90°), Fichte (0°) gegen Kunststoff und Stahl

Aus den Tribologiewerten wird ersichtlich, dass die untersuchten WPC in der Praxis gegen Kunststoff und Stahl bis 0,05 W/mm<sup>2</sup> eine deutliche Verbesserung des Reibung- und Verschleißverhaltens bezüglich PP beinhalten. In Kombination mit Stahl und großen tribologischen Belastungsintensitäten bleibt dieser Aspekt über das ganze Belastungsspektrum erhalten. Zudem ist es durch den WPC möglich Stahl und Weichholz Fichte dynamisch - tribologisch über die Zeit zu kombinieren (vgl. gescheiterte Versuche Fichte 0°/90° - Stahl). Der vordergründige Einsatz des untersuchten WPC ist besonders gegen Stahl zu sehen. Gegen Kunststoff sind hinsichtlich Fichte 0° keine, bezüglich PP bis 0,05 W/mm<sup>2</sup> Vorteile nachweisbar.

#### 4.3.4 Einordnung der Ergebnisse WPC (PP-Matrix) in den Stand der Technik

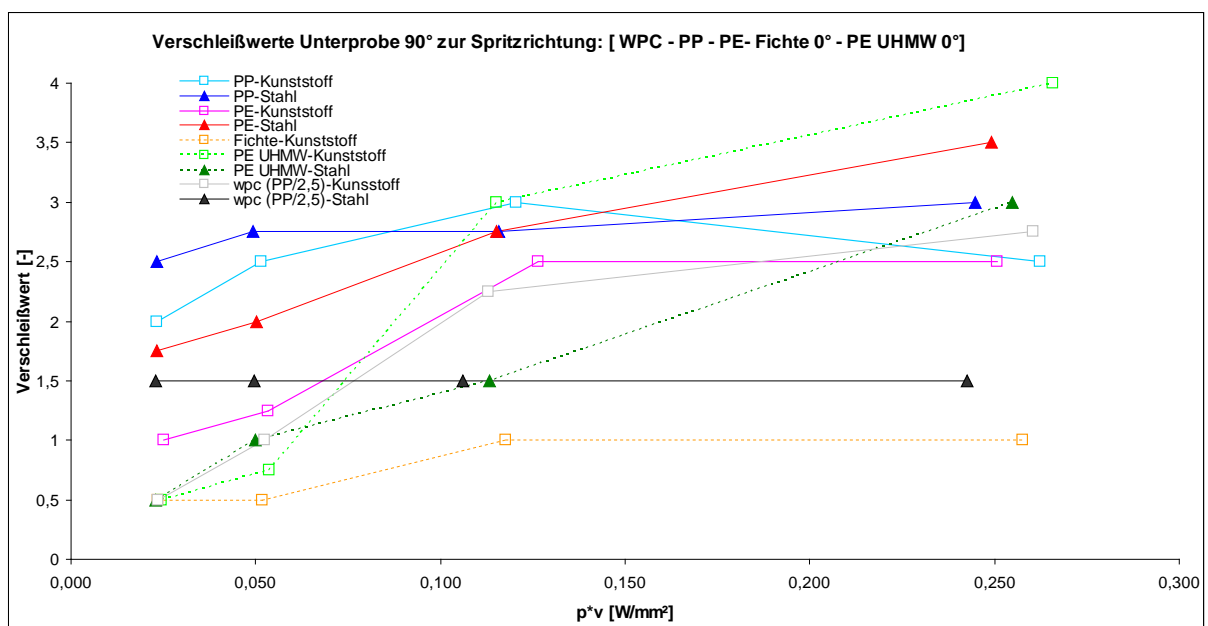
Die Ergebnisse bezüglich WPC (PP-Matrix) wurden nachfolgend zur Erhöhung der Anschaulichkeit in Zusammenhang mit dem bereits klassifizierten Stand der Technik aus Kapitel 0 gebracht. Die folgenden Darstellungen für Reibwert (Abb. 18), Tribologiewert (Abb. 21), Verschleiß Unterproben (Abb. 19) sowie Verschleiß Oberproben (Abb. 20) sind jeweils um die bekannten Kurven WPC (PP/2,5) ergänzt. Hinsichtlich der mittleren Reibwerte wird deutlich, dass PP, PE und WPC (PP-Matrix)

gegen Stahl nahezu das gleiche Verhalten im Verlauf aufweisen. Die Kurven sind lediglich hinsichtlich des Ordinatenwertes verschoben. Die Abweichungen des WPC (PP-Matrix) sind dabei über alle Messpunkte betrachtet am gleichmäßigsten, jedoch deutlich größer als bei PE-UHMW. Gegen Kunststoff ist kein einheitlicher Trend ableitbar. Es ist jedoch feststellbar, dass die Werte ab  $0,05 \text{ W/mm}^2$  denen von PE sehr ähnlich sind. Vor allem, wenn die Abweichungen mit betrachtet werden, ist bei allen untersuchten Kunststoffen, außer PE-UHMW ab  $0,1 \text{ W/mm}^2$  unter Beachtung der Abweichung, ein ähnlicher Reibwert erkennbar.



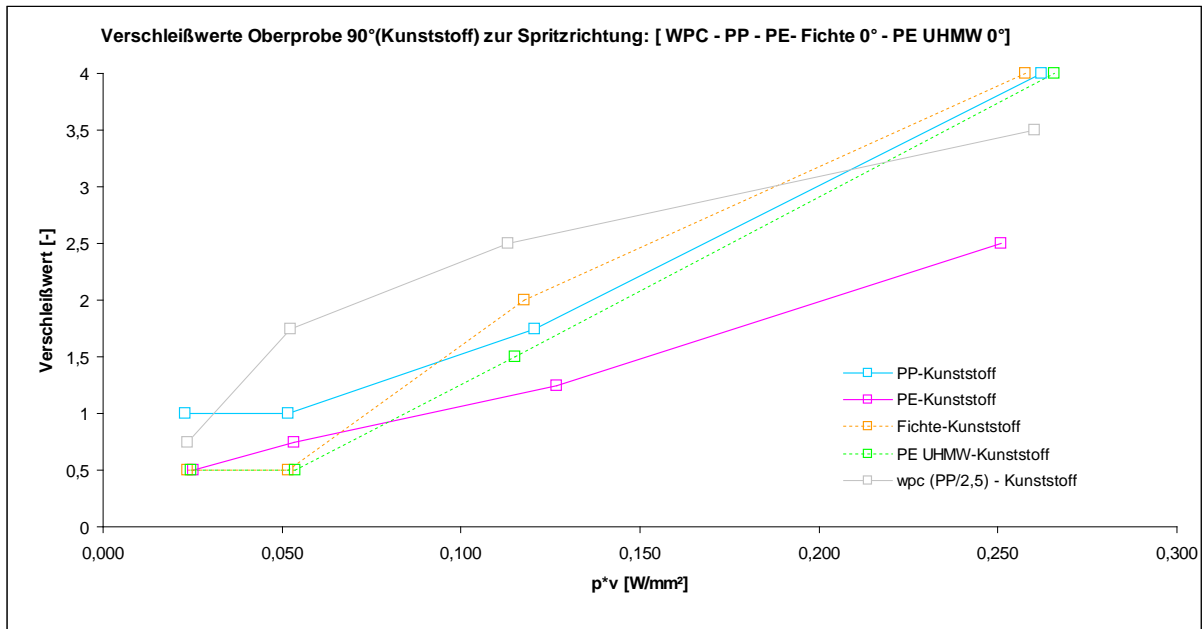
**Abb. 18** Reibwerte PP (90°), PE (90°), Fichte (0°), PE-UHMW (0°), WPC 2,5% (90°) gegen Kunststoff und Stahl

Der als Begründung in Kapitel 4.3.2 und 4.3.3 bereits dargestellte Aspekt des „schmierenden“ Kunststoffes wird damit in unterschiedlicher Ausprägung auch im Vergleich von PE, PP und WPC (PP-Matrix) deutlich.



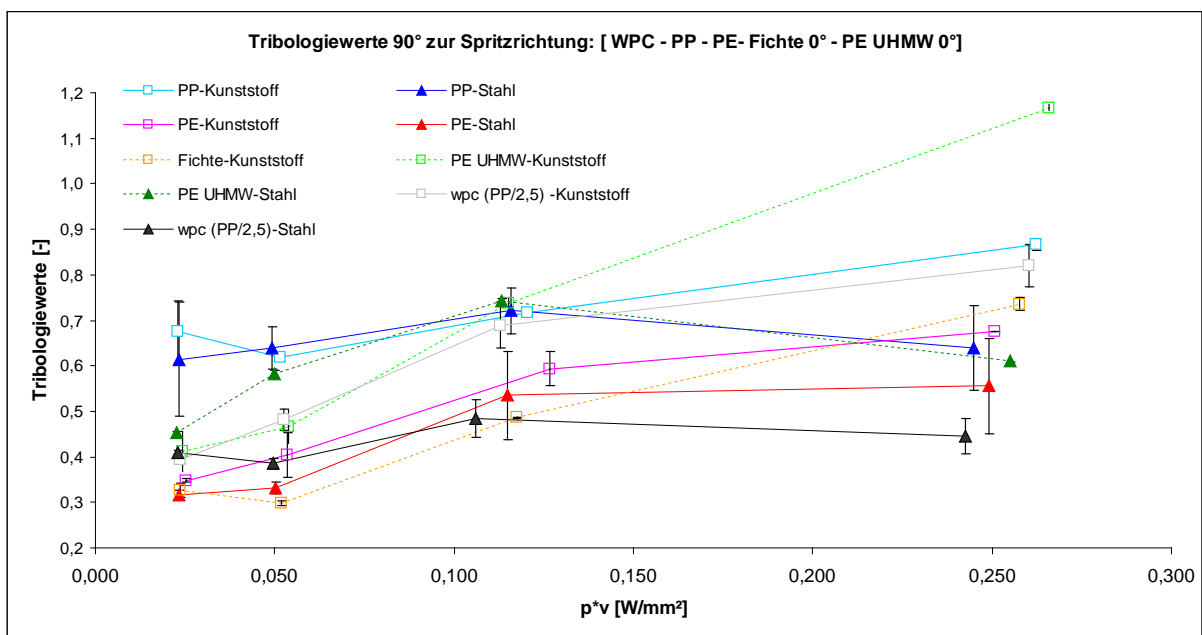
**Abb. 19** Verschleiß Unterprobe PP (90°), PE (90°), Fichte (0°), PE-UHMW (0°), WPC 2,5% (90°) gegen Kunststoff und Stahl

Hinsichtlich des Verschleißes der Unterproben gegen Stahl wird bei steigender tribologischer Belastungsintensität deutlich, dass WPC (PP-Matrix) Vorteile gegenüber PP und PE besitzt. Ab einem Wert von  $0,1 \text{ W/mm}^2$  wird zudem eine stark steigende Verbesserung gegenüber PE-UHMW deutlich. Gegenüber Kunststoff ist dieses Verhalten weniger ausgeprägt. PE-UHMW bietet bis  $0,05 \text{ W/mm}^2$ , PE bei  $0,25 \text{ W/mm}^2$  ein günstigeres Verschleißverhalten. Die Werte von Vollholz (Fichte) liegen gegen Kunststoff dabei so niedrig, dass von einem ähnlichen deutlich positiven Verhalten wie von WPC (PP-Matrix) gegen Stahl gesprochen werden kann.



**Abb. 20** Verschleiß Oberprobe Kunststoff gegen PP (90°), PE (90°), Fichte (0°), PE-UHMW (0°), WPC 2,5% (90°)

Die Betrachtung der Verschleißwerte der Oberprobe (Kunststoff) zeigen deutliche Vorteile gegen PE. Besonders bei steigenden tribologischen Belastungsintensitäten werden deutliche Vorteile gegenüber den anderen Materialien erreicht.



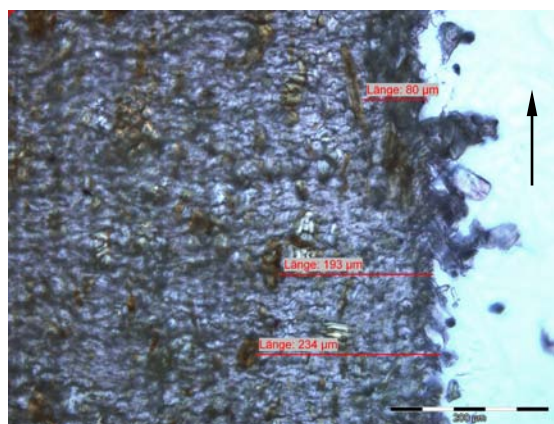
**Abb. 21** Tribologiewert PP (90°), PE (90°), Fichte (0°), PE-UHMW (0°), WPC 2,5% (90°) gegen Kunststoff und Stahl

Der Tribologiewert zeigt hinsichtlich der praktischen Relevanz des Reibungs- und Verschleißverhaltens, dass gegenüber Stahl bei tribologischen Belastungen über  $0,1 \text{ W/mm}^2$  hinsichtlich der mittleren Reibwerte Vorteile von WPC (PP-Matrix) gegenüber ungefüllten Kunststoffen auftreten. Werden die Abweichungen mit betrachtet, sind diese Vorteile gegenüber PE praktisch nicht mehr existent. Im niedrig belasteten Bereich ist PE günstiger gegenüber Stahl. Es ist jedoch erkennbar, dass WPC (PP-Matrix) eine geringere Abweichungsbreite besitzt.

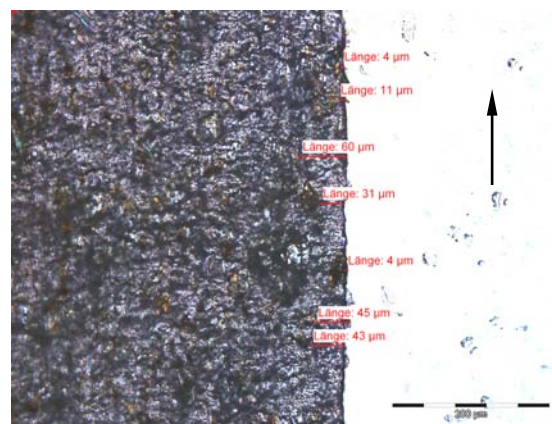
In Bezug auf den Reibpartner Kunststoff bietet sowohl PE und Fichte ein vorteilhafteres Verhalten. Für den Praxiseinsatz wird das Resümee aus Kapitel 4.3.3 bestätigt. WPC (PP-Matrix) werden technisch sinnvoll gegen Stahl eingesetzt. Die Ergebnisse von PE lassen die These zu, dass dieses Matrixmaterial ein günstigeres tribologisches Verhalten in Zusammenhang mit Holz im WPC ergibt.

#### 4.3.5 Tribologisches Verhalten von WPC (PP-Matrix) – These zum Wirkmechanismus

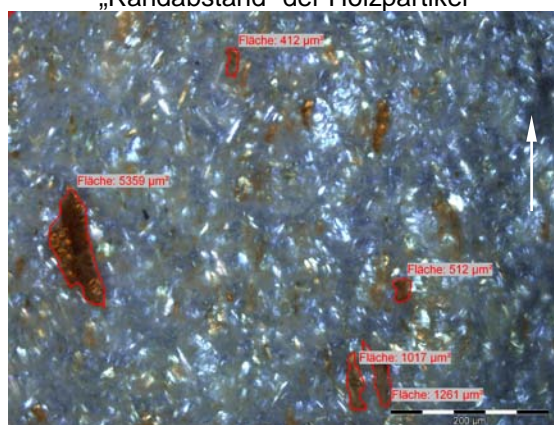
Die Mikroskopieaufnahmen (Abb. 22) zeigen eine charakteristische WPC-Probe (Probe 24, WPC PP 50/50/2,5,  $0^\circ$  Ausrichtung hinsichtlich Spritzrichtung, siehe Pfeilrichtung) unter polarisiertem UV-Auflicht. Diese wurde unter der Belastung  $B_t=0,022 \text{ W/mm}^2$  geprüft und anschließend mikroskopiert. Es wurden die Größe und die Verteilung der Partikel, sowie deren Randabstand im tribologisch beanspruchten und unbeanspruchten Bereich untersucht. Dabei war optisch feststellbar, dass die Partikel nahezu gleich verteilt sind aber keine ausgesprochene Orientierung in Spritzrichtung auftritt [11]. Weiterhin ist eine ganz dünne „Haut“ aus Kunststoff im und außerhalb des Bereiches der Beanspruchung nachweisbar.



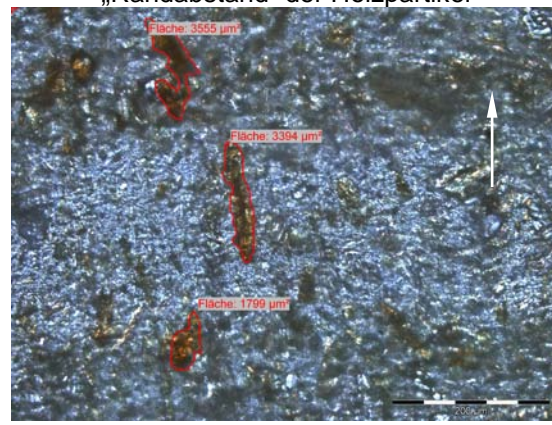
„Randabstand“ der Holzpartikel



„Randabstand“ der Holzpartikel



Größe, statistische Verteilung Holzpartikel beanspruchter Bereich Probenmitte



Größe, statistische Verteilung Holzpartikel unbeanspruchter Bereich Probenende

**Abb. 22** Mikroskopie WPC - Probe, Versuch 24 [12]

Mit dieser Erkenntnis und den Ergebnissen aus Kapitel 4.3.2 und 4.3.3 lässt sich für den tribologischen Wirkmechanismus von WPC (mit PP-Matrix) folgende These aufstellen:

- Phase I:

Der Holzfüllstoff erhöht die Temperatur- und Druckstabilität des Verbundmaterials bei steigender tribologischer Belastungsintensität. Bei diesbezüglich geringen Belastungen wird die dünne Kunststoffhaut weniger schnell verschlissen.

- Phase II:

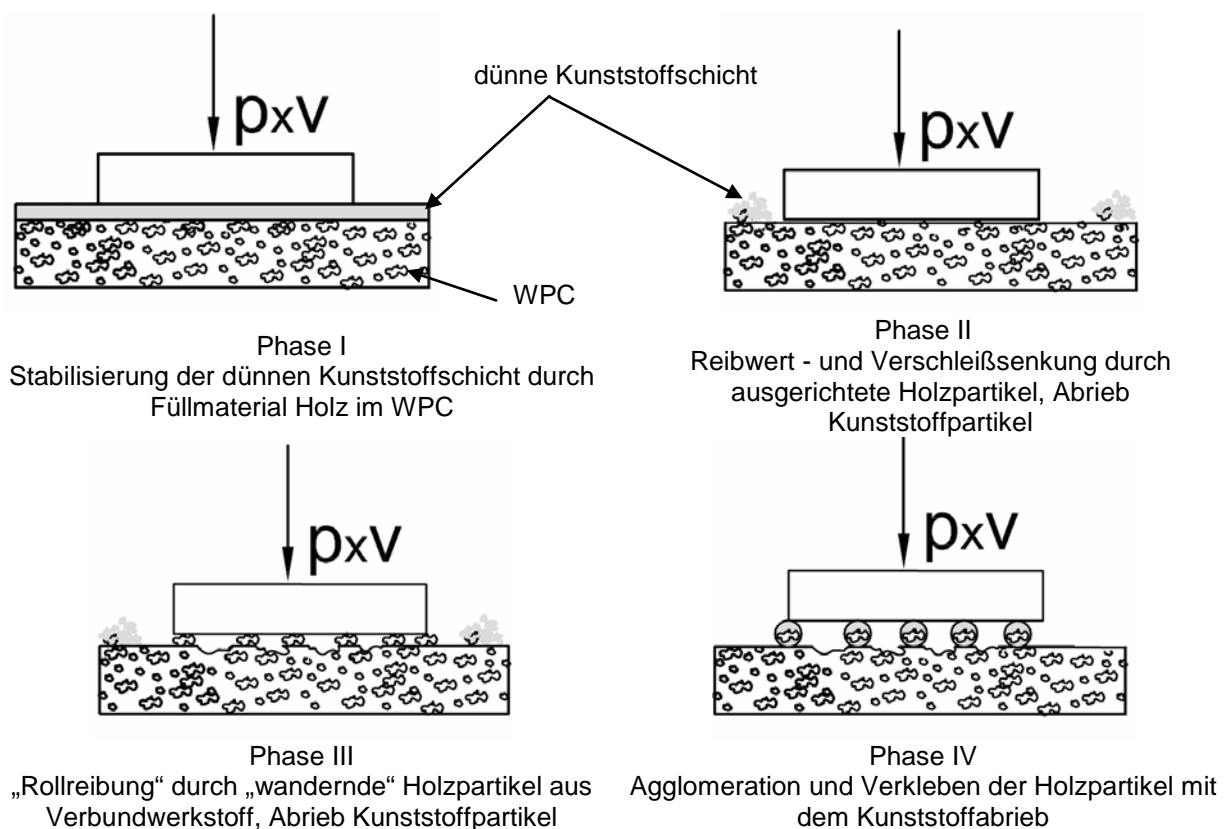
Die in 0° Richtung (Beanspruchungsrichtung) orientierten Holzpartikel senken dabei parallel oder während des Abtrags der dünnen Kunststoffschicht den Reibwert und Verschleiß des WPC (vgl. Vollholz - Fichte).

- Phase III:

Bei höheren tribologischen Belastungsintensitäten werden große Holzpartikel, vorzugsweise mit 90°-Ausrichtung, im Verlauf der Beanspruchung aus dem Verbund herausgerissen. Ihr Reibwiderstand ist größer als die Haftung im Verbundwerkstoff (Reibwiderstand, vgl. gescheitete Versuche mit 90° Fichteproben und Kunststoff bzw. 0 und 90° bei Stahlpartner). Anschließend „rollen“ diese in der Gleitpaarung ab und werden dabei zu einem großen Teil langsam aus der Reibpaarung befördert („Wandern“ der Partikel). Dabei senken sie den Reibwert durch Rollreibung (vgl. Ausrutschen auf Sand).

- Phase IV:

Die kleinen Abrasivteilchen aus Kunststoff werden bei beginnendem Verkleben (Aufschmelzen) durch die Holzpartikel agglomeriert und stützen damit wiederum den Effekt der Agglomeration und der Rollreibung. Die Reibpaarung verklebt weniger, da das notwendige Material agglomeriert wurde. Ein stärkeres Verkleben der Reibpaarung und damit ihr Versagen sind bei noch größeren tribologischen Belastungsintensitäten möglich (Reibschweißen).



**Abb. 23** These Wirkmechanismus Reibungs - und Verschleißverhalten WPC schematisch

Je nach Größe der Belastungsintensität entsteht nach „Abschluss“ jeder Phase eine Art „stationärer Zustand“, die Reibpaarung ist somit für die anliegende konstante Belastung „eingelaufen“. Alle Phasen, besonders das „Herausreißen“ und „Agglomerieren“, sind nicht konkret fassbar bzw. verwischen in der Praxis des einzelnen Versuches ineinander. Die Phasen sind somit als Trends zu betrachten, die mit großer Wahrscheinlichkeit bzw. als Hauptmerkmal in verschiedenen tribologischen Belastungsabschnitten ( $p \cdot v$  - Intervallen) in der dynamischen Reibpaarung auftreten. Die Abweichungen der Messwerte in den Diagrammen lassen sich dadurch teilweise erklären. Die aufgestellte These wird sowohl durch das konstante Verschleißverhalten von WPC gegenüber Stahl als auch mit dem vergleichsweise steilem Anstieg des Verschleißes gegenüber Kunststoff (vgl. Abb. 15) gestützt. Die Oberprobe aus Kunststoff beschleunigt dabei den zeitlichen Verlauf, weil sie mehr Material zum Verkleben bereitstellt als Stahl und damit parallel ein „Herausreißen“ der Holzpartikel aus dem WPC unterstützt. Der Verlauf des Tribologiewertes (Abb. 17) fasst die These gut zusammen, da an der Kurve von Stahl der „stationäre Zustand“ im Zusammenspiel von Reibung und Verschleiß bei höheren Belastungen erkennbar wird. Hinsichtlich der recht detaillierten Vorstellung des Wirkmechanismus zum Reibungs- und Verschleißverhalten von WPC bleibt festzustellen, dass es sich nur um ein Modell handelt, welches in der dargestellten Form dem Aussagegehalt der Untersuchungen vorgeht. Bei den nachfolgend dargestellten Ergebnissen sind erste diesbezüglich relevant erscheinende Aspekte angeführt. Für die abschließende Verifikation sind weitere Analysen erforderlich.

#### 4.3.6 Einfluss der Spritzrichtung bei WPC (PP-Matrix)

Dem Einfluss der Spritzrichtung auf das Reibverhalten liegt die Annahme zu Grunde, dass es beim Füllen der Kavität des Spritzgusswerkzeuges zu einer Ausrichtung der Holzpartikel kommt und daraus Unterschiede resultieren. Bei den mechanischen Eigenschaften sind diese Unterschiede nachweisbar [11]. In wie weit ein markanter Unterschied zwischen den Spritzrichtungen ( $0^\circ$  -  $90^\circ$ ) hinsichtlich der tribologischen Eigenschaften vorliegt ist fraglich. Neben den Versuchen zur  $90^\circ$  Probenausrichtung wurden  $0^\circ$  - Proben (Nr. 7 siehe Tabelle 2) getestet und vergleichend für den Reibwert (Abb. 24), den Tribologiewert (Abb. 27), den Verschleiß der Unterproben (Abb. 25) sowie den Verschleiß der Oberproben (Abb. 26) nachfolgend dargestellt.

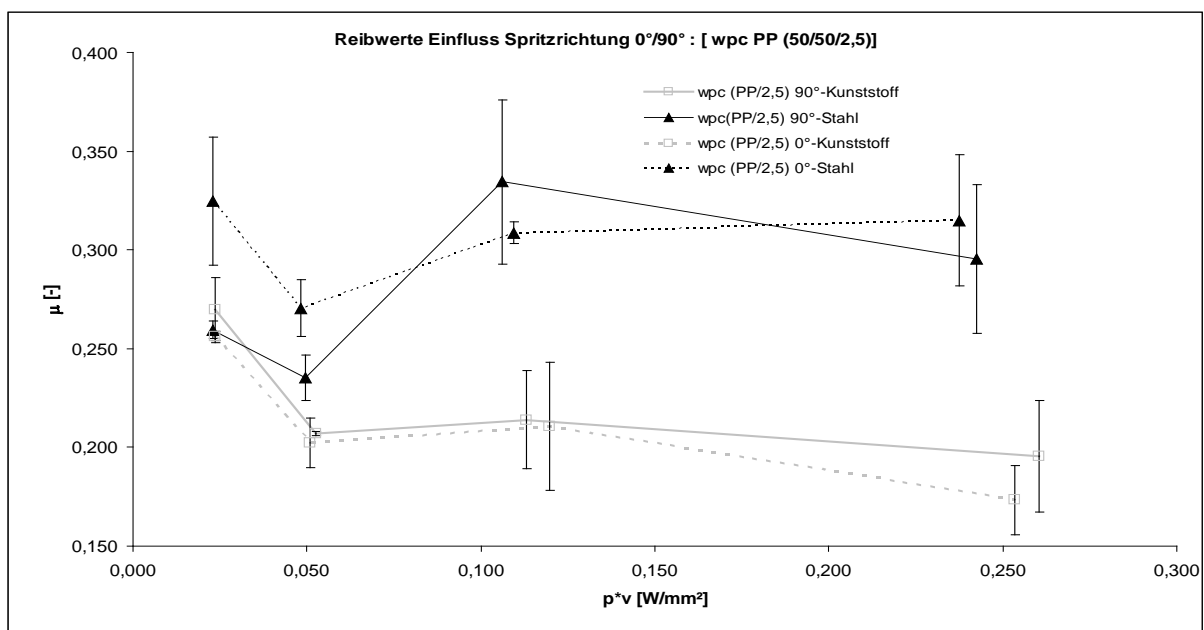


Abb. 24 Reibwert, WPC ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ), gegen Kunststoff und Stahl

Die Reibwerte sind unter Beachtung der Abweichungen gegen Kunststoff gleich, gegen Stahl sind bis  $0,05 \text{ W/mm}^2$  Vorteile für die  $90^\circ$  - Ausrichtung erkennbar. Hinsichtlich des Verschleißes des WPC (Unterprobe) ist gegenüber Stahl ein deutlicher Unterschied bei  $0,022 \text{ W/mm}^2$  erkennbar (Einfluss vgl. Vollholz  $0^\circ$  - Ausrichtung). Im weiteren Verlauf wird das stabile Verhalten des Verbundes mit  $90^\circ$  - Orientierung im Grund bestätigt. Mit Kunststoff als Reibpartner wird mit  $0^\circ$  - Ausrichtung bis  $0,1 \text{ W/mm}^2$  ein höherer Verschleißwert erreicht, im Anschluss liegen geringere Werte als bei  $90^\circ$  - Ausrichtung vor.

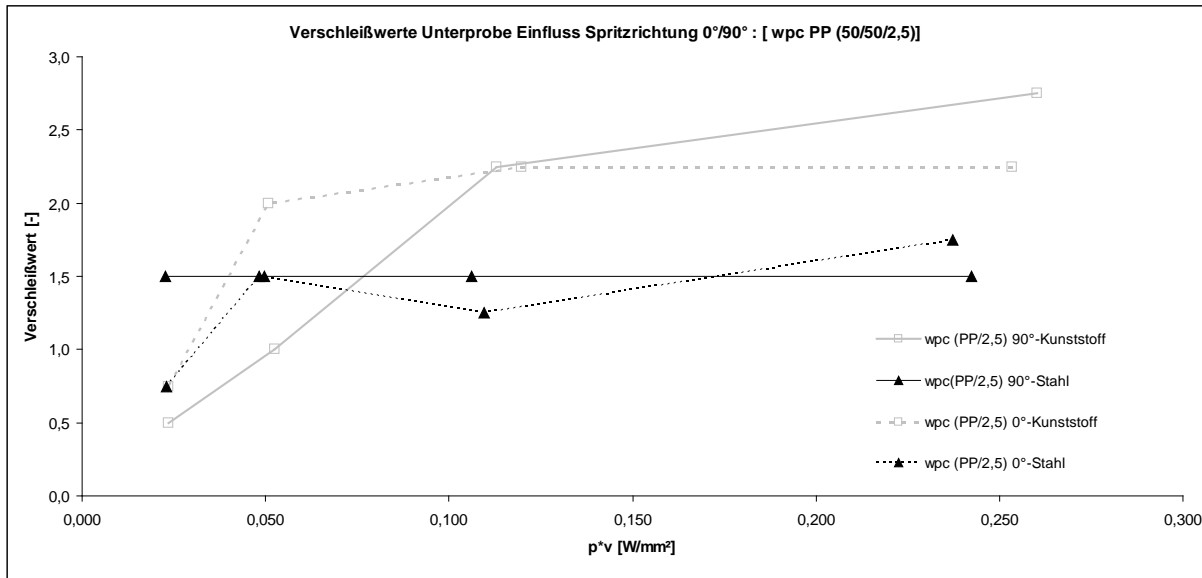


Abb. 25 Verschleiß Unterprobe WPC ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ), gegen Kunststoff und Stahl

Das Verschleißverhalten der Unterprobe gegen Kunststoff stützt die These zum Wirkmechanismus somit nur bei Belastungen über  $0,1 \text{ W/mm}^2$ . Bei einer Korrelation hinsichtlich der These würde der charakterisierte Verlauf einen höheren Verschleiß bei  $90^\circ$  Proben bedeuten. Ein Ansatz für eine mögliche Erklärung ist in der Interaktion der beiden Kunststoffe POM und PP zu sehen.

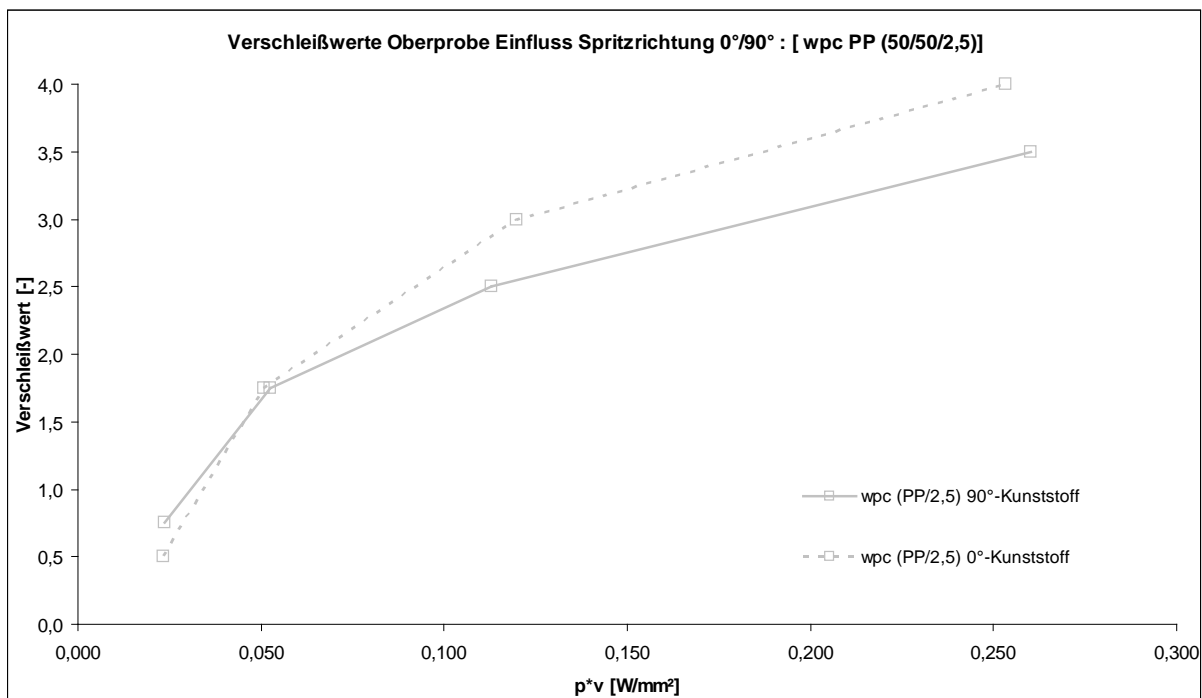


Abb. 26 Verschleiß Oberprobe Kunststoff gegen WPC ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ )



Das Verschleißbild der Oberprobe stützt die These des Wirkmechanismus im Wesentlichen. Die 0° - Ausrichtung verschleißt mehr als die 90° - Orientierung. Die Unterprobe 0° ist theoretisch „stabiler“ (weniger Herausreisen der Holzpartikel aus dem Verbund). Die Belastung wird über den Gegenkörper Kunststoff abgebaut.

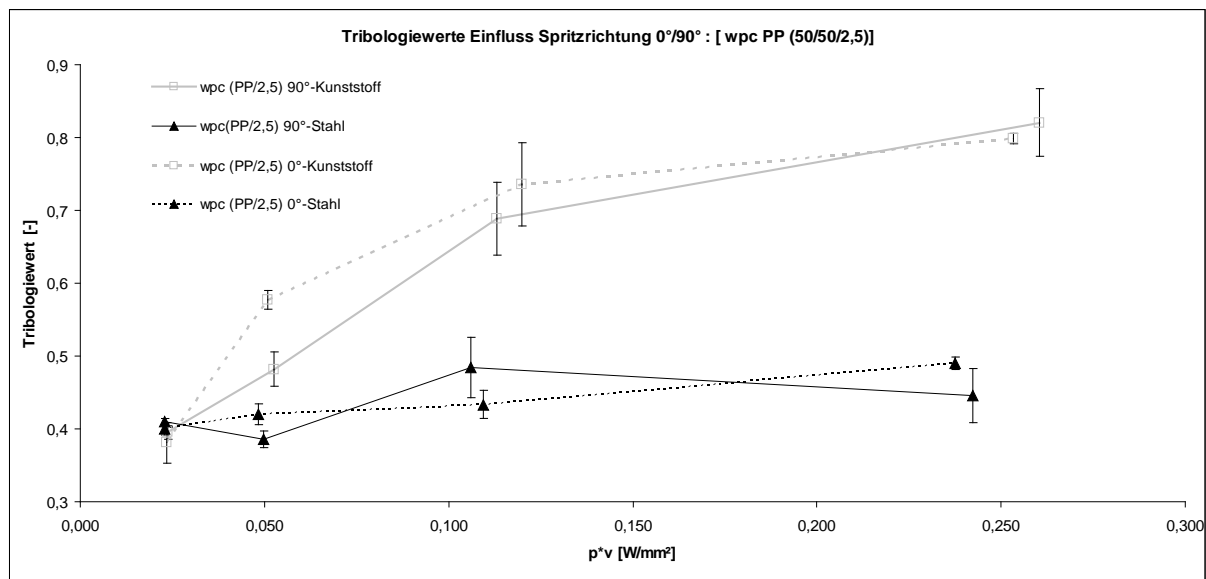


Abb. 27 Tribologiewert, WPC (0° und 90°), gegen Kunststoff und Stahl

Die Tribologiewerte zeigen, dass unter Beachtung der Abweichungen die charakterisierten Unterschiede des tribologischen Verhaltens hinsichtlich der Spritzrichtung für die Praxis von untergeordneter Bedeutung bzw. praktisch nicht haltbar sind. Lediglich bei  $0,05 \text{ W/mm}^2$  ist ein Unterschied nachweisbar, da die Werte außerhalb der gemessenen Abweichungen liegen. Die 0° - Ausrichtung ergibt dabei sowohl bei Stahl als auch bei Kunststoff ein ungünstigeres Verhalten. Bei  $0,022 \text{ W/mm}^2$  ist der Tribologiewert nahezu unabhängig vom Reibpartner, was die praktische Relevanz bei niedrigen Belastungen weiter einschränkt. Eine Erweiterung dieser Aussage auf extrudierte Proben ist naheliegend, auf Basis der vorhandenen Daten aber nicht möglich.

#### 4.3.7 Einfluss der Wasseraufnahme hinsichtlich der Spritzrichtung bei WPC (PP-Matrix)

Bei der Verarbeitung von Holz in WPC wird dem Naturprodukt Holz soviel wie möglich Wasser entzogen. Die Verarbeitungsfeuchte liegt optimalerweise unter 1%. Nach der Verarbeitung ist das Holz im WPC bestrebt, diese Differenz über die Zeit auszugleichen. Der Verbundwerkstoff nimmt, je nach Holzart und Anteil Holz im Werkstoff, Wasser aus der Umgebung bei gleichzeitiger Volumenänderung auf. Dieser Prozess ist hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften problematisch, da er meist zu einer unerwünschten Minderung der Kennwerte führt. Hinsichtlich der tribologischen Eigenschaften sind noch keine Erkenntnisse bekannt. Um eine sehr große Wasseraufnahme zu erreichen, ohne dabei durch Temperaturänderung den Kunststoff zu verändern (Kochtest), wurden Unterproben mit 0° und 90° Ausrichtung (Nr. 7 siehe Tabelle 2) vergleichbar zu denen der vorangegangenen Betrachtungen nach einer Wasserlagerung von 135 Tagen und einer charakteristischen Wasseraufnahme (siehe Abb. 28) im Mittel von 4,0% nach Abtrocknen der Oberflächen tribologisch untersucht. Eine Übertragung der Ergebnisse auf Umgebungen mit verschiedenen Luftfeuchtigkeiten ist dadurch nicht möglich.

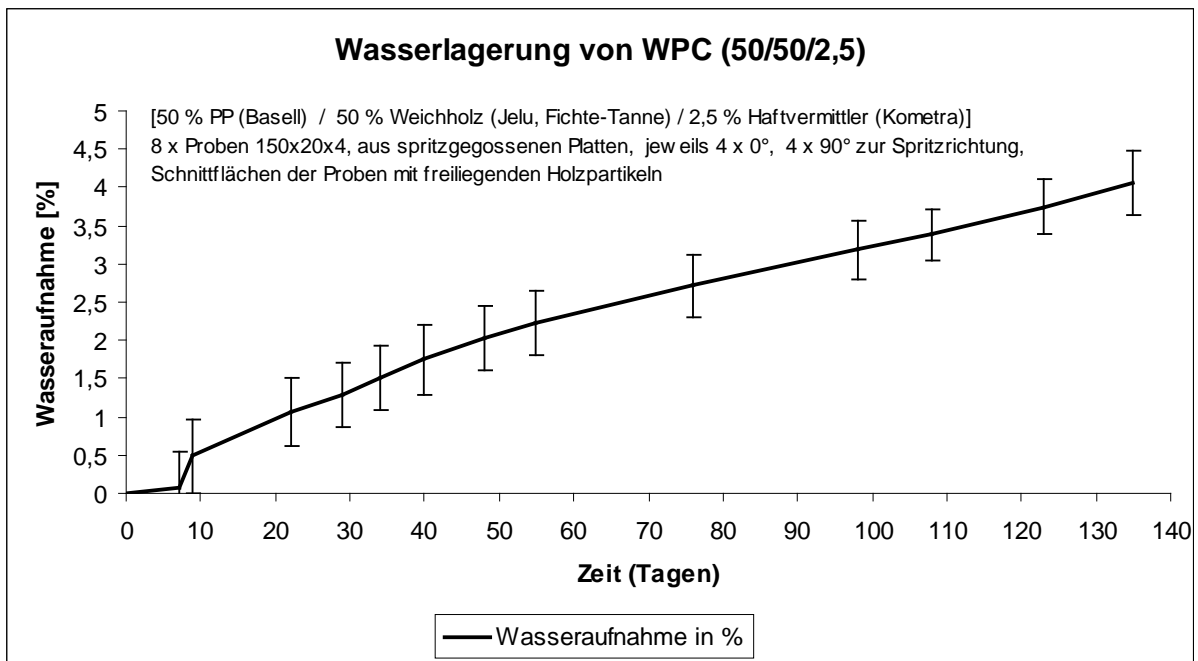


Abb. 28 Verlauf der Wasserlagerung von WPC - Proben (PP-Matrix), mit Standardabweichungen

Den Versuchen liegt die bestätigte Annahme (Abb. 28) zu Grunde, dass Wasser bei ständiger Einwirkung in den Verbund eindringt. Dabei quellen die Holzpartikel (Volumenänderung). In Folge dessen ist es möglich, dass der Verbundwerkstoff an Festigkeit verliert und das Wasser als Weichmacher für den Kunststoff wirkt. Die Auswertung der tribologischen Untersuchungen beinhaltet zwei Schritte.

Im ersten Schritt wurden die Betrachtungen bezüglich eines Unterschiedes in der Spritzrichtung für wassergelagerte Unterproben (0°, 90°, vgl. Nr. 7, Tabelle 2) durchgeführt. Im zweiten Schritt wurden die erhaltenen Ergebnisse mit denen der ungelagerten Proben aus Kapitel 4.3.6 verglichen. Die Ergebnisse von Schritt 1 sind für Reibwert (Abb. 29), Tribologiewert (Abb. 32), Verschleiß der Unterproben (Abb. 30), und Verschleiß der Oberproben (Abb. 31) nachfolgend dargestellt.

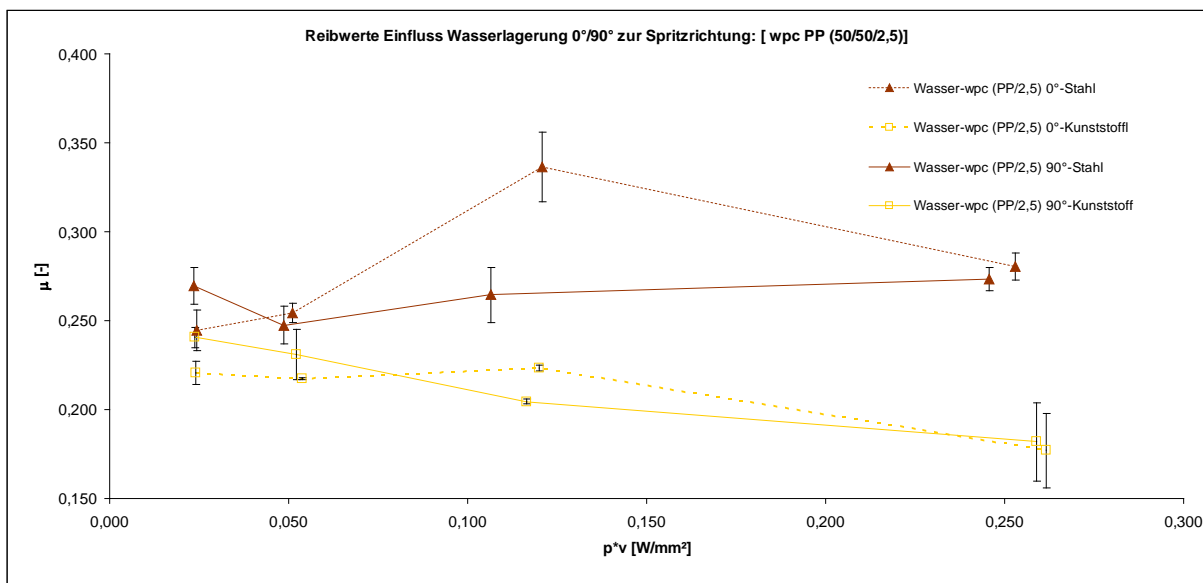
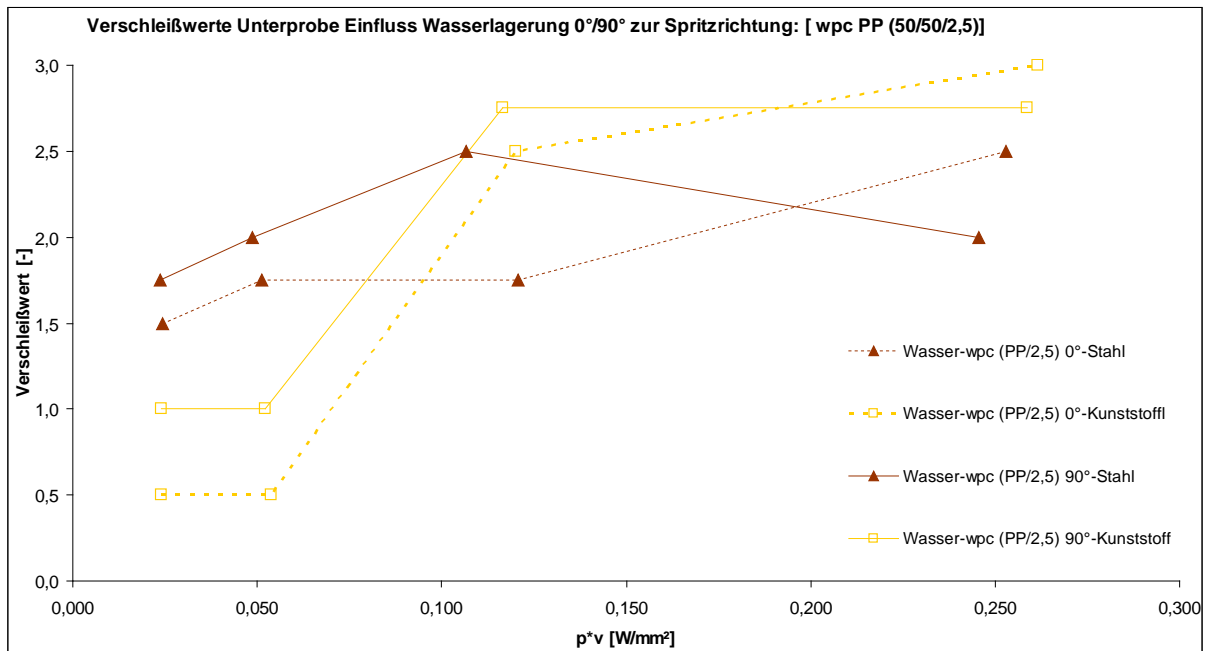


Abb. 29 Reibwert WPC (0° und 90°), bei Wasserlagerung gegen Kunststoff und Stahl

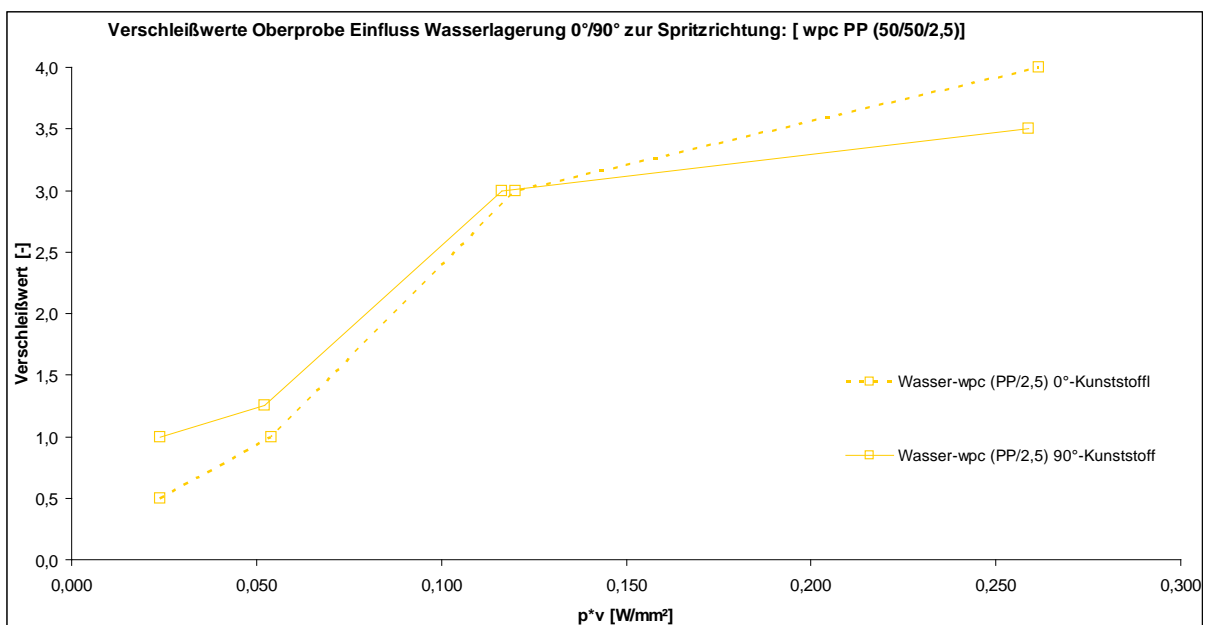
Der Reibwerte sind bei der Wasserlagerung gegen beide Reibpartner bis  $0,11 \text{ W/mm}^2$  abhängig von der Spritzrichtung. Unter Beachtung der Abweichungen sind bei  $0,022 \text{ W/mm}^2$  geringere Reibwerte bei 0° - Ausrichtung nachweisbar. Bei Belastungen

größer  $0,11 \text{ W/mm}^2$  ist kein Unterschied feststellbar. Bei beiden Reibpartnern folgen die Reibwerte der wassergelagerten dem tendenziellen Kurvenverlauf (steigend - fallend) der ungelagerten Proben.



**Abb. 30** Verschleiß Unterprobe WPC ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ) bei Wasserlagerung, gegen Kunststoff und Stahl

Beim Verschleißverhalten der Unterproben ist erkennbar, dass die  $0^\circ$  - Ausrichtung bis zu einer tribologischen Belastungsintensität von  $0,11 \text{ W/mm}^2$  weniger verschleißt. Bis  $0,25 \text{ W/mm}^2$  verkehrt sich dieses Verhalten ins Gegenteil.

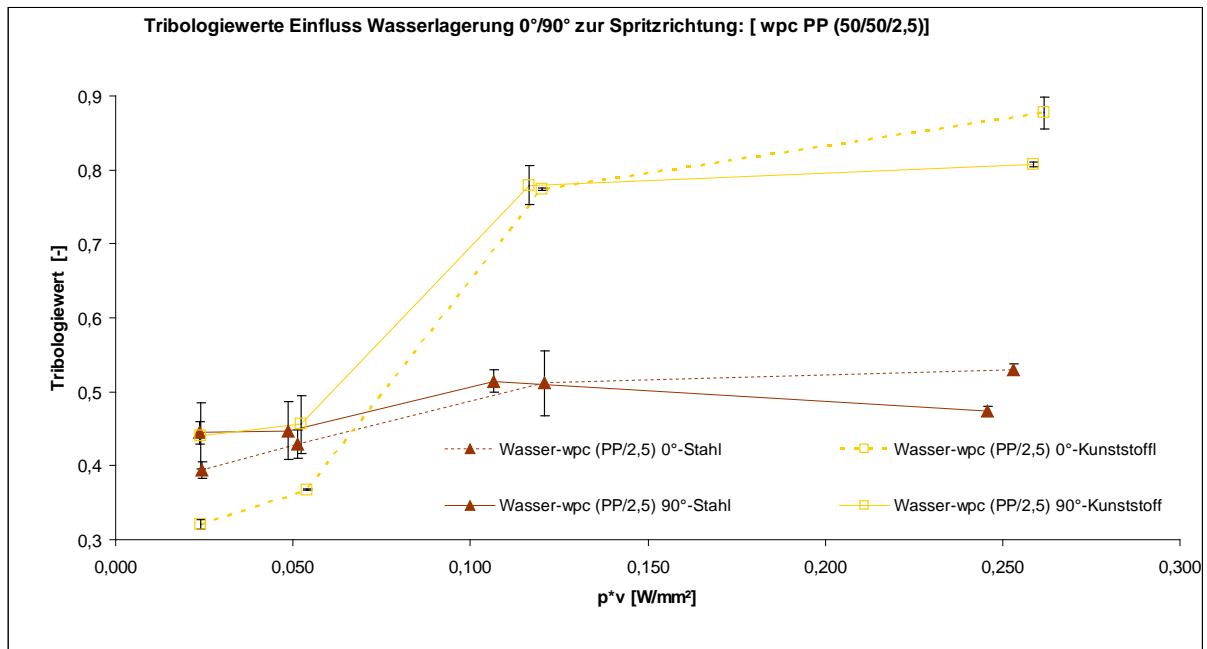


**Abb. 31** Verschleiß Oberprobe Kunststoff gegen WPC ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ) bei Wasserlagerung

Der Verschleiß der Oberprobe Kunststoff bildet ein nahezu identisches Verhalten ab. Der Wert  $0,11 \text{ W/mm}^2$  stellt dabei einen „Wendepunkt“ dar.

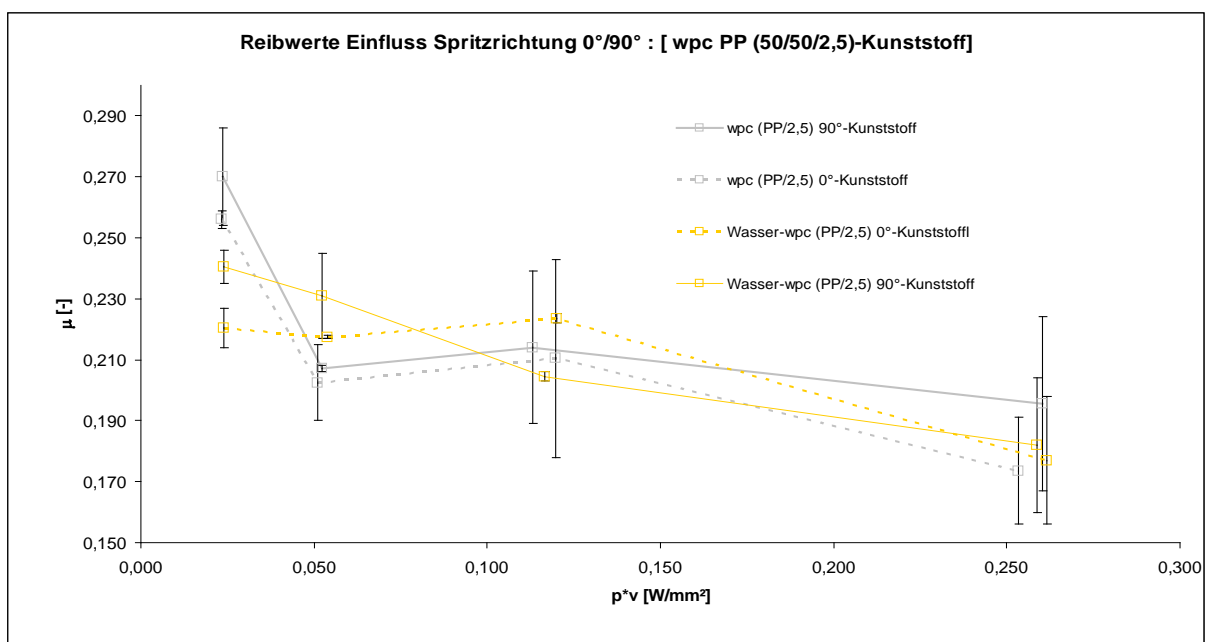
Eine Erklärung dafür kann nach aktuellem Kenntnisstand nicht gegeben werden. Das Verschleißverhalten der Ober- und Unterprobe stützt bis zu  $0,11 \text{ W/mm}^2$  den in Kapitel 4.3.5 unterstellten Wirkmechanismus (Phase II). Beim Reibwert ist dies nur bis  $0,05 \text{ W/mm}^2$  gegeben. Praktisch relevant und deutlich genug ausgeprägt (Beachtung der Abweichungen) ist ein Unterschied nur gegen Kunststoff bis  $0,11$

$W/mm^2$  und Stahl und Kunststoff ab  $0,25 W/mm^2$ , wie der Tribologiewert zeigt. Bei  $0,11 W/mm^2$  ist, analog des Verschleißes der Oberprobe, der noch zu erklärende „Wendepunkt“ vorhanden.



**Abb. 32** Tribologiewert, WPC (0° und 90°) bei Wasserlagerung, gegen Kunststoff und Stahl

Es ist im Vergleich zu Kapitel 4.3.6 feststellbar, dass eine Wasserlagerung die These zum Wirkmechanismus deutlicher stützt. Es liegt die Vermutung nahe, dass ein Quellen der Holzpartikel deren abrasiven Eigenschaften in den Vordergrund rückt. Im zweiten Schritt wurden die Ergebnisse der Untersuchung der Wasserlagerung mit den bereits bekannten Ergebnissen aus Kapitel 4.3.6 (keine Wasserlagerung) verglichen. Durch den Vergleich sollten die im Vorfeld aufgezeigten Ansätze für die Untersuchungen untermauert oder widerlegt und dem Einfluss einer Wasserlagerung charakterisiert werden. Die Ergebnisse sind in für den Reibwert (Abb. 33 - Abb. 34), den Tribologiewert (Abb. 39 - Abb. 38), den Verschleiß der Unterproben (Abb. 35 - Abb. 36) sowie den Verschleiß der Oberproben (Abb. 37) dargestellt.



**Abb. 33** Reibwert WPC (0° und 90°) mit und ohne Wasserlagerung, gegen Kunststoff

Beim Reibwert gegen Kunststoff ist bis  $0,05 \text{ W/mm}^2$  sowohl bei  $0^\circ$  als auch bei  $90^\circ$  - Ausrichtung ein Unterschied im Reibwert feststellbar. Die Ausprägungen sind bei  $90^\circ$  jedoch deutlicher, was die These vom Wirkmechanismus grundlegend stützt. Bei höheren Belastungen sprechen die Abweichungen gegen einen eindeutigen Trend. Bei  $0,022 \text{ W/mm}^2$  ist der Reibwert der wassergelagerten Proben kleiner, bei  $0,05 \text{ W/mm}^2$  größer, ab  $0,11 \text{ W/mm}^2$  passen sich die Kurvenverläufe an. Eine mögliche Erklärung liefert die Annahme, dass das gespeicherte Wasser im WPC langsam in die Reibpaarung vordringt und eine Art „Gleitfilm“ bildet. Ab  $0,05 \text{ W/mm}^2$  kompensiert der Einfluss der gequollenen Holzpartikel des Wassereinfluss.

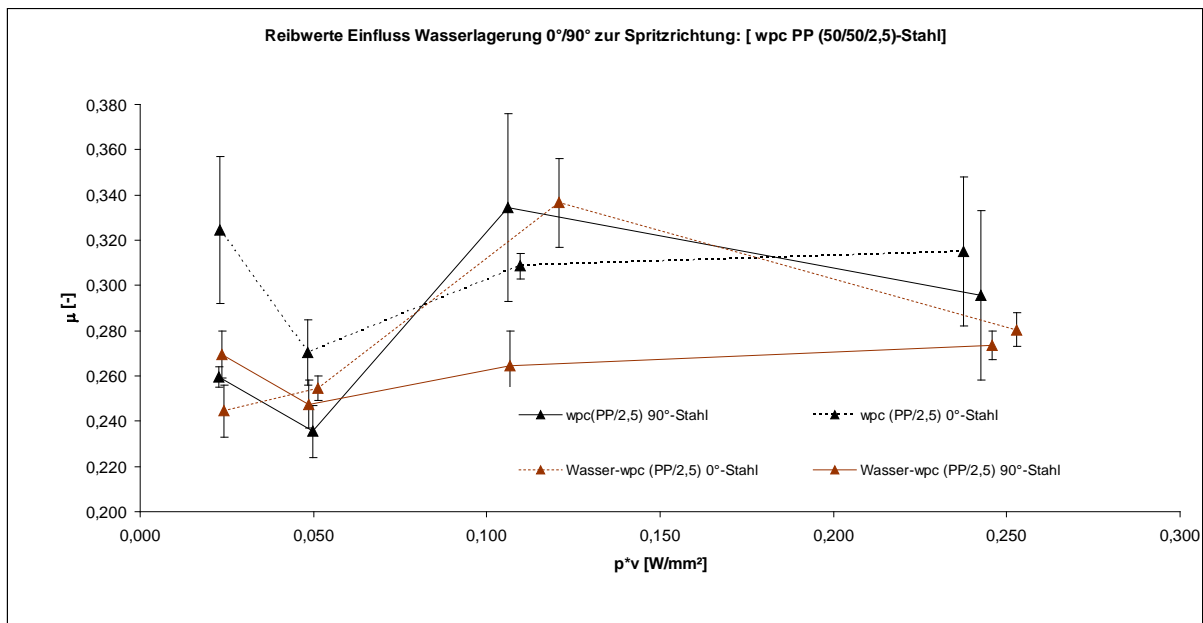


Abb. 34 Reibwert WPC ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ) mit und ohne Wasserlagerung, gegen Stahl

Bei  $90^\circ$  - Ausrichtung gegen Stahl ist bei  $0,11 \text{ W/mm}^2$ , bei  $0^\circ$  - nur bei  $0,022 \text{ W/mm}^2$  ein den Reibwert senkender Einfluss außerhalb der Abweichungen bezüglich der Wasserlagerung feststellbar.

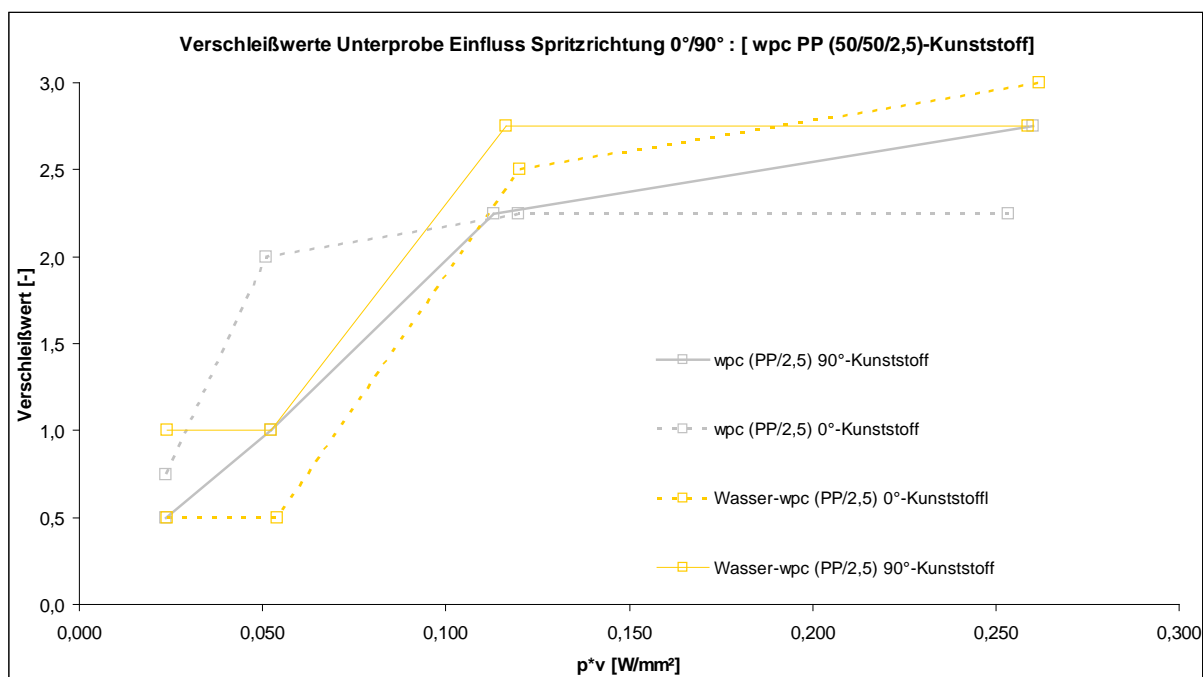


Abb. 35 Verschleiß Unterprobe WPC ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ) mit und ohne Wasserlagerung, gegen Kunststoff

Beim Verschleiß der wassergelagerten WPC - Unterproben gegen Kunststoff ist bei 90° - Ausrichtung und 0,022 W/mm<sup>2</sup> bzw. 0,11 W/mm<sup>2</sup> eine Zunahme feststellbar. Bei 0° - Ausrichtung ist der Verschleiß der wassergelagerten Proben bis 0,11 W/mm<sup>2</sup> niedriger. Das Verschleißverhalten gegen Kunststoff und Stahl stützt die These zum Wirkmechanismus. Die gequollenen Holzpartikel sind, wenn die Wirkung des „Gleitfilms“ aus Wasser nachlässt, leichter aus der Oberfläche zu reißen.

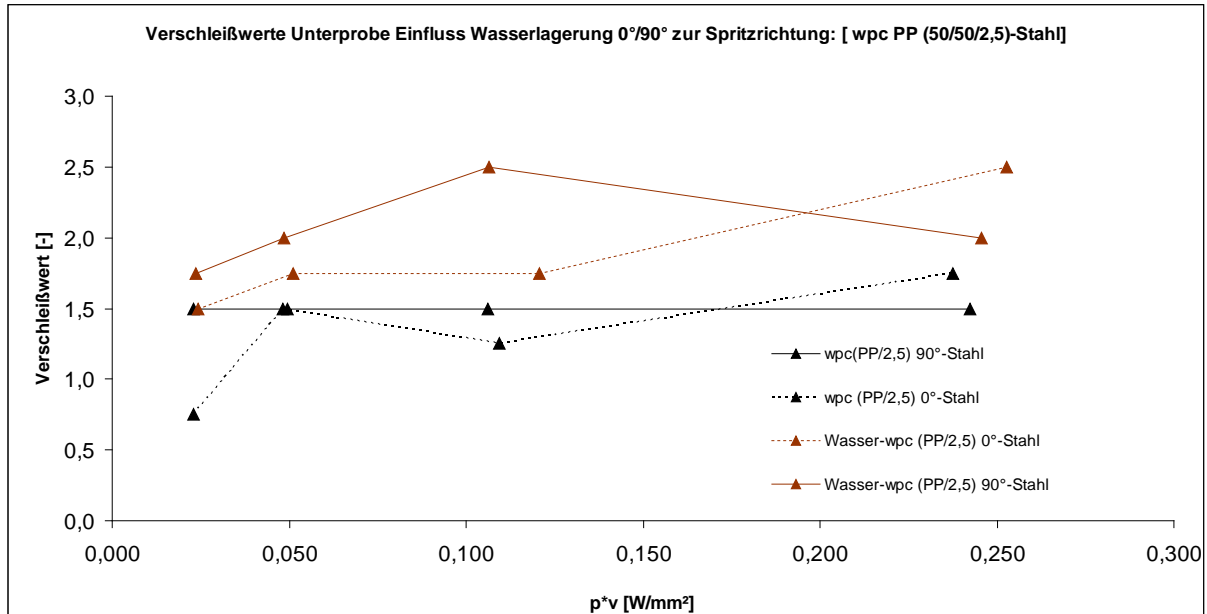


Abb. 36 Verschleiß Unterprobe WPC (0° und 90°) mit und ohne Wasserlagerung, gegen Stahl

Der Verschleiß von WPC (PP-Matrix) gegen Stahl zeigt bei beiden Ausrichtungen einen eindeutigen Trend zu größerem Verschleiß bei Wasserlagerung. Bis auf 0,25 W/mm<sup>2</sup> liegt der Verschleiß der 0° - Ausrichtung unter der von 90°, was die These vom Wirkmechanismus hinsichtlich des Einflusses der Partikelorientierung stützt.

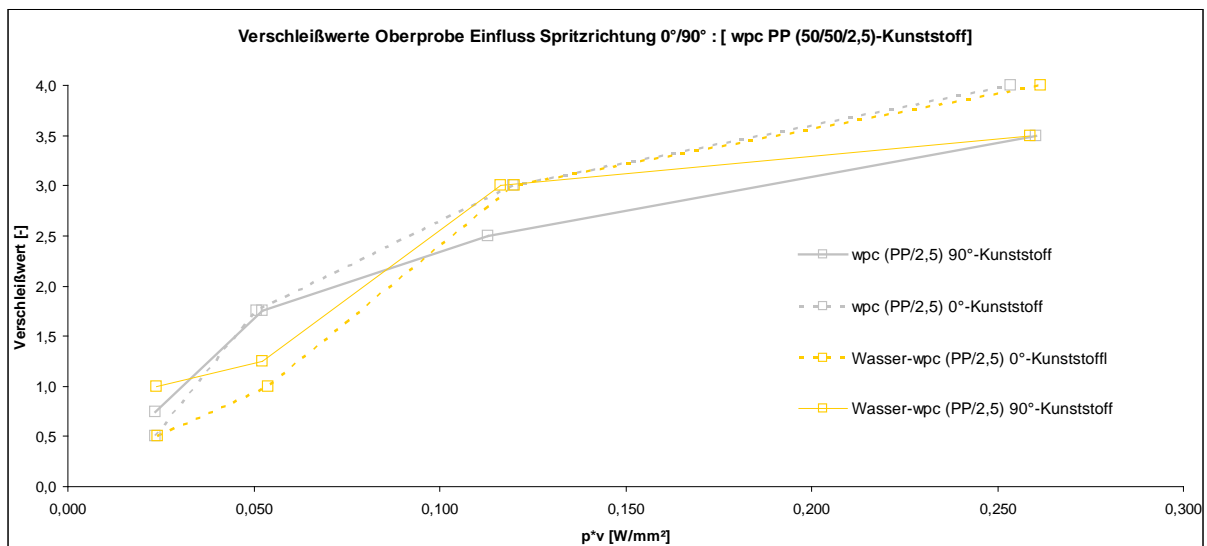
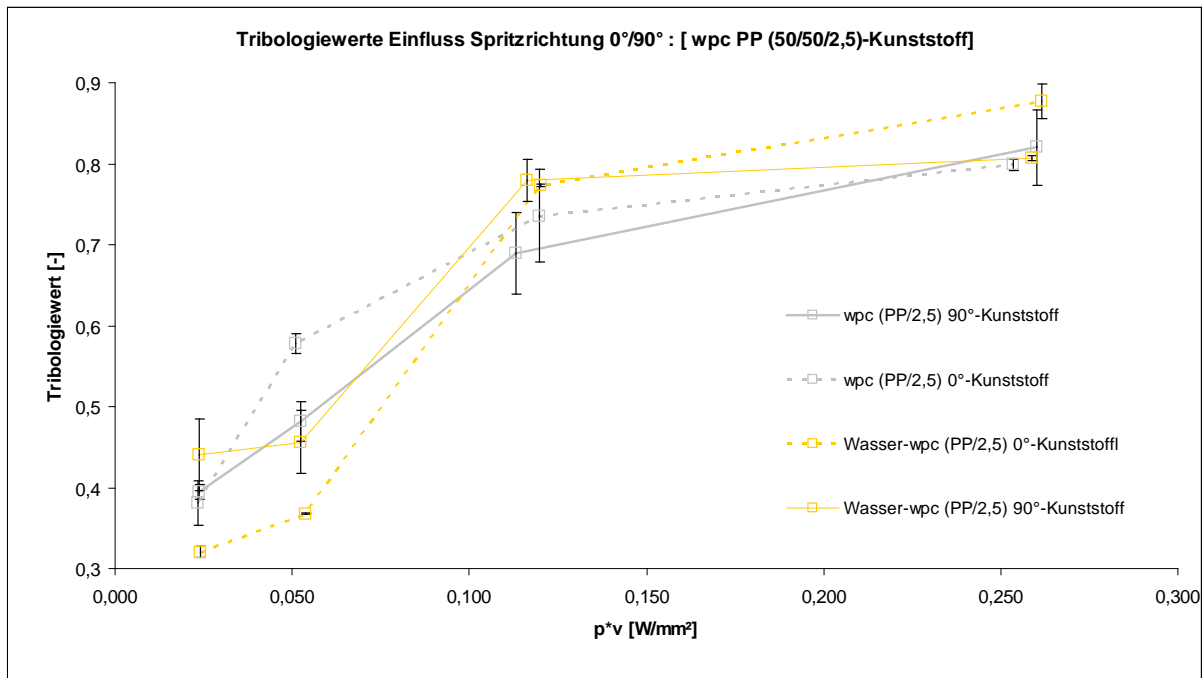


Abb. 37 Verschleiß Oberprobe Kunststoff gegen WPC (0° und 90°) mit und ohne Wasserlagerung

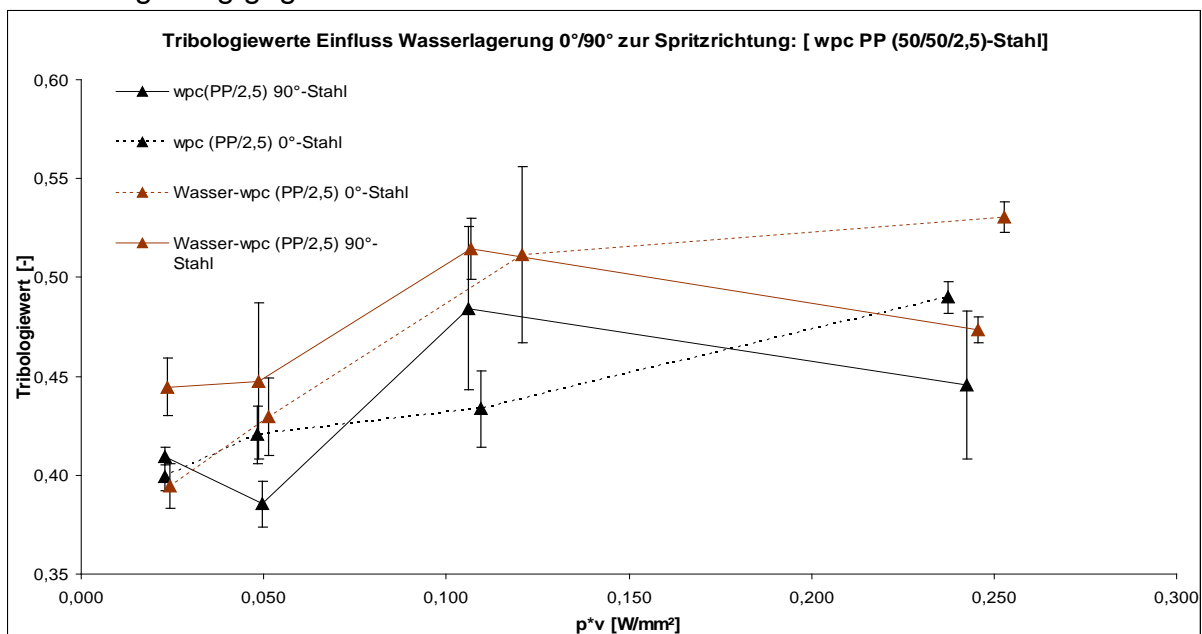
Hinsichtlich des Verschleißes der Oberprobe Kunststoff gegen WPC (PP-Matrix) wird deutlich, dass bei der 90° - Ausrichtungen kein einheitlicher Trend nachweisbar ist. Bei (0,022 und 0,11) W/mm<sup>2</sup> wird ein größerer Verschleiß der Oberproben mit der Wasserlagerung der Unterproben erreicht. Bei der 0° - Ausrichtung wird bis 0,05 W/mm<sup>2</sup> weniger Material von der Oberprobe abgetragen. Die These vom

Wirkmechanismus und die Vorstellung vom „Gleitfilm“ aus Wasser werden an der Stelle nur bedingt gestützt, da die 90° - Ausrichtung mit Wasserlagerung nur bei 0,05 W/mm<sup>2</sup> weniger Verschleiß an der Oberprobe produziert als ohne Wassereinfluss. Es wäre möglich, dass die Wassermoleküle selbst während des Reibversuches mit dem der Oberprobe reagieren und das Verschleißergebnis dadurch verändert wird.



**Abb. 38** Tribologiewert WPC (0° und 90°) mit und ohne Wasserlagerung gegen Kunststoff

Der praktisch relevante Einfluss einer Wasserlagerung, abgebildet durch den Tribologiewert, ist gegen Kunststoff bei 90° - Ausrichtung in Anbetracht der Abweichungen, mit der Ausnahme bei 0,11 W/mm<sup>2</sup> nicht gegeben. Bei 0°-Ausrichtung stellt der Wert 0,11 W/mm<sup>2</sup> eine Art „Wendepunkt“ dar. Bei tribologischen Belastungen kleiner 0,11 W/mm<sup>2</sup> sinkt der Tribologiewert. Bei 0,25 W/mm<sup>2</sup> steigt dieser, was auf die negative Wirkung des Wassers im Verbund bei höheren Belastungen hindeutet. Die These vom Wirkmechanismus wird durch die Wasserlagerung gegen Kunststoff nicht unterstützt.



**Abb. 39** Tribologiewert WPC (0° und 90°) mit und ohne Wasserlagerung gegen Stahl

Der praktisch relevante Einfluss des Wassers ist gegen Stahl unter Beachtung der Abweichungen bei 0° - Ausrichtung ab 0,11 W/mm<sup>2</sup>, bei 90° - Ausrichtung bis 0,11 W/mm<sup>2</sup> durch einen größeren Tribologiewert gegeben. Werden die Ergebnisse bezüglich einer Wasserlagerung auf die tribologischen Eigenschaften von WPC (PP-Matrix) hinsichtlich grundlegender Trends zusammengefasst (Tabelle 3) so wird deutlich, dass ein Einfluss vorhanden ist.

**Tabelle 3** grundlegende Trends (vereinfachte Zusammenfassung der Ausprägung des Einflusses) einer Wasserlagerung auf des Reibungs - und Verschleißverhalten von WPC (PP-Matrix)

Parameter	Reibwert, gegen		Verschleiß		Tribologiewert	
	Stahl	Kunststoff	Unterprobe		Oberprobe	
			Stahl	Kunststoff	Stahl	Kunststoff
Einfluss Wasser bzgl. Spritzrichtung Vergleich 90° gegen 0°	<b>90°</b> 0,022 W/mm <sup>2</sup> >, 0,11 W/mm <sup>2</sup> <		<b>90°</b> bis 0,11 W/mm <sup>2</sup> , < dann >		<b>90°</b> bis 0,11 W/mm <sup>2</sup> , > <b>dann &gt;</b>	<b>90°</b> ab 0,11 W/mm <sup>2</sup> , <
genereller Einfluss Wasser ( <b>W</b> ) Vergleich wassergelagerte gegen ungelagerte Proben	<b>90°W</b> 0,11 W/mm, < <b>0°W</b> 0,022 W/mm <sup>2</sup> >	<b>0°/90°W</b> 0,022 W/mm <sup>2</sup> < 0,05 W/mm <sup>2</sup> >	<b>0°/90°W&gt;</b>	<b>90°W</b> (0,022 und 0,11) W/mm <sup>2</sup> > <b>0°W</b> bis 0,05 W/mm <sup>2</sup> < ab 0,11 W/mm <sup>2</sup> >	<b>90°W</b> (0,022 und 0,11)W/mm <sup>2</sup> > <b>0°W</b> 0,05 W/mm <sup>2</sup> <	<b>90°W</b> bis 0,11 W/mm <sup>2</sup> > <b>0°W</b> ab 0,11 W/mm <sup>2</sup> >

Legende bzgl. Kennwert: > kleiner, < größer, - kein Einfluss

Tabelle 3 ermöglicht zudem folgende Erkenntnisse:

Der unterstellte Einfluss ist abhängig vom Reibpartner, der Spritzrichtung und der tribologischen Belastungsintensität.

Hinsichtlich des Tribologiewertes wird klar, dass in den vorliegenden Untersuchungen bei 0,11 W/mm<sup>2</sup> ein Belastungspunkt („Wendepunkt“) existiert, an dem grundlegende Veränderungen im tribologischen Verhalten hinsichtlich aller Parameter (Reibpartner, Wasserlagerung, Spritzrichtung) auftreten.

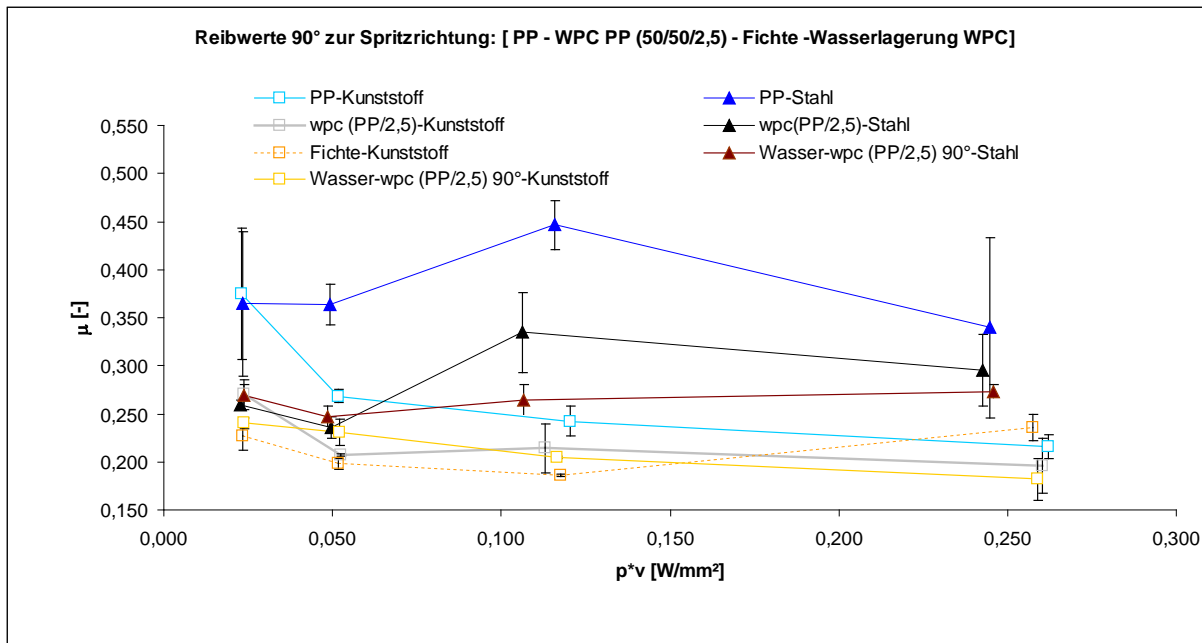
Es wird darüber hinaus deutlich, dass die Oberproben Kunststoff und Stahl hinsichtlich der Spritzrichtung sowie in Verbindung mit einer Wasserlagerung des WPC (PP-Matrix) bei einer getrennten Betrachtung von Reibungs - und Verschleißverhalten ein grundlegend vergleichbares Verhalten aufweisen. Dabei treten die Änderungen im charakteristischen Verlauf (Richtung der Werteabweichung) an vergleichbaren Messpunkten auf. Bezüglich des Reibwertes ist kein einheitlicher Trend ableitbar.

Hinsichtlich des Abriebes bei WPC (Unterproben) wird durch die Wasserlagerung tendenziell der Verschleiß erhöht, besonders bei Stahl als Reibpartner.

Für eine bessere Abschätzung des Einflusses einer Wasserlagerung hinsichtlich eines Praxiseinsatz von WPC sind die Messwerte für den Reibwert (vgl. Abb. 40), den Verschleiß der Unterproben (vgl. Abb. 41) und den Tribologiewert (vgl. Abb. 42) vergleichend zu ungelagerten WPC und PP bzw. Fichte (vgl. Diagramme Kapitel 4.3.3) dargestellt.

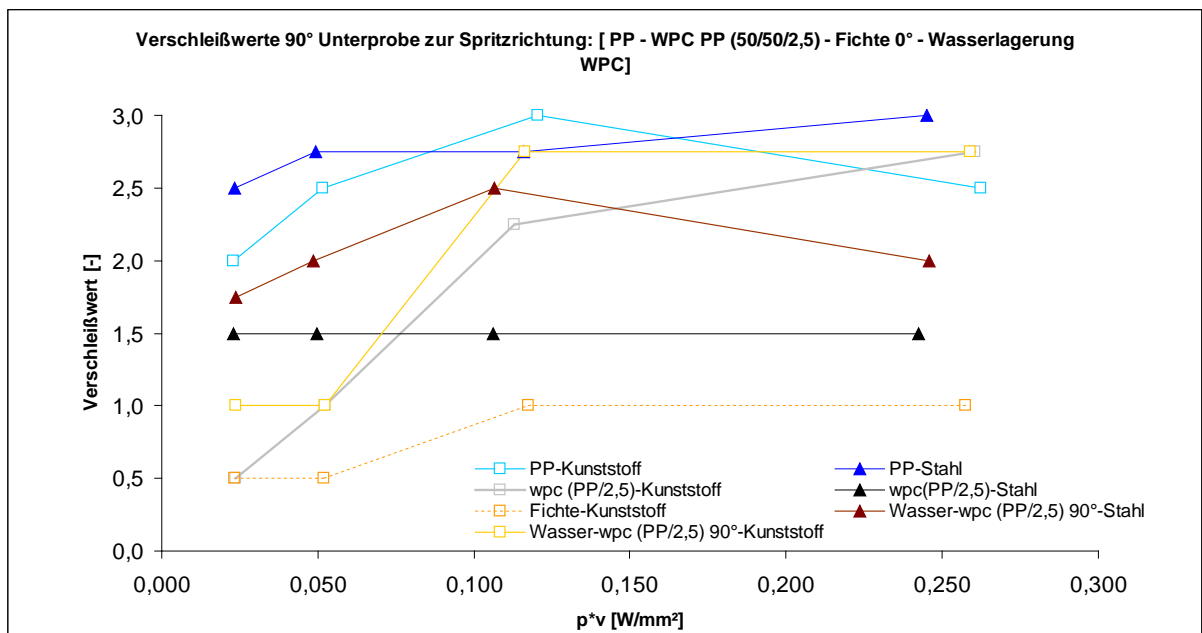
Beim Reibwert ist gegen Stahl eine vorteilhafte Glättung des Verlaufes feststellbar.





**Abb. 40** Reibwert PP (90°), WPC (90°), wassergelagerter WPC (90°), Fichte (0°) gegen Kunststoff und Stahl

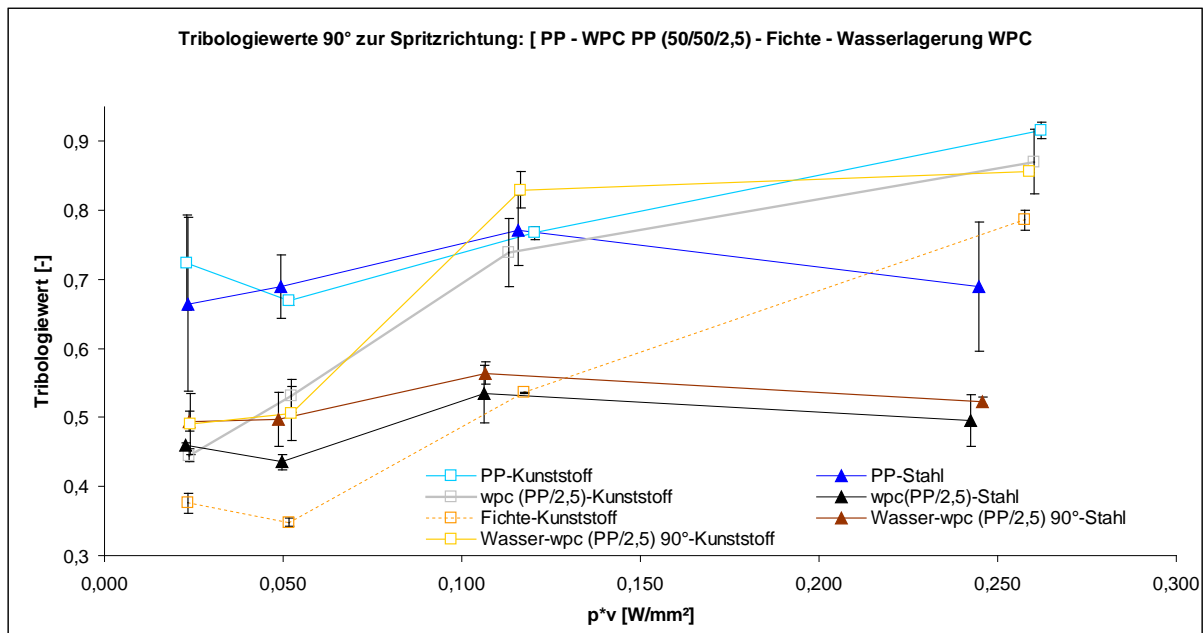
Der Trend wassergelagerte Proben hin zu höherem Verschleiß ist gegen Kunststoff kritischer als gegen Stahl und erreicht dabei ab 0,11 W/mm<sup>2</sup> die Werte von PP.



**Abb. 41** Verschleiß Unterprobe PP (90°), WPC (90°), wassergelagerter WPC (90°), Fichte (0°) gegen Kunststoff und Stahl

Die Tribologiewerte zeigen, dass die auftretenden Veränderungen des tribologischen Verhaltens von WPC (PP-Matrix) nach einer Wasserlagerung, sowohl gegen Stahl, als auch gegen Kunststoff nachweisbare Unterschiede erbringen. Weiterhin offenbaren die Ergebnisse die Notwendigkeit eine Differenzierung hinsichtlich tribologischer Belastung und Reibpartner. Vereinfachte Aussagen für die Anwendung in der Praxis sind nach dem aktuellen Kenntnisstand nur begrenzt möglich. Mit steigender tribologischer Belastungsintensität führt eine Wasserlagerung tendenziell zu höherem Materialabrieb und -verschleiß. Das in Kapitel 4.3.3 für die Praxis dargestellte Resümee, dass der vordergründige Einsatz des untersuchten WPC besonders gegen Stahl zu sehen ist, hat weiterhin

Bestand. Bis zu einer tribologischen Belastungsintensität von  $0,05 \text{ W/mm}^2$  werden gegen Stahl durch die Wasserlagerung ungünstiger Tribologiewerte erreicht, ab  $0,1 \text{ W/mm}^2$  liegen diese Werte innerhalb der Abweichungen der WPC-Vergleichsproben und unter denen von PP.



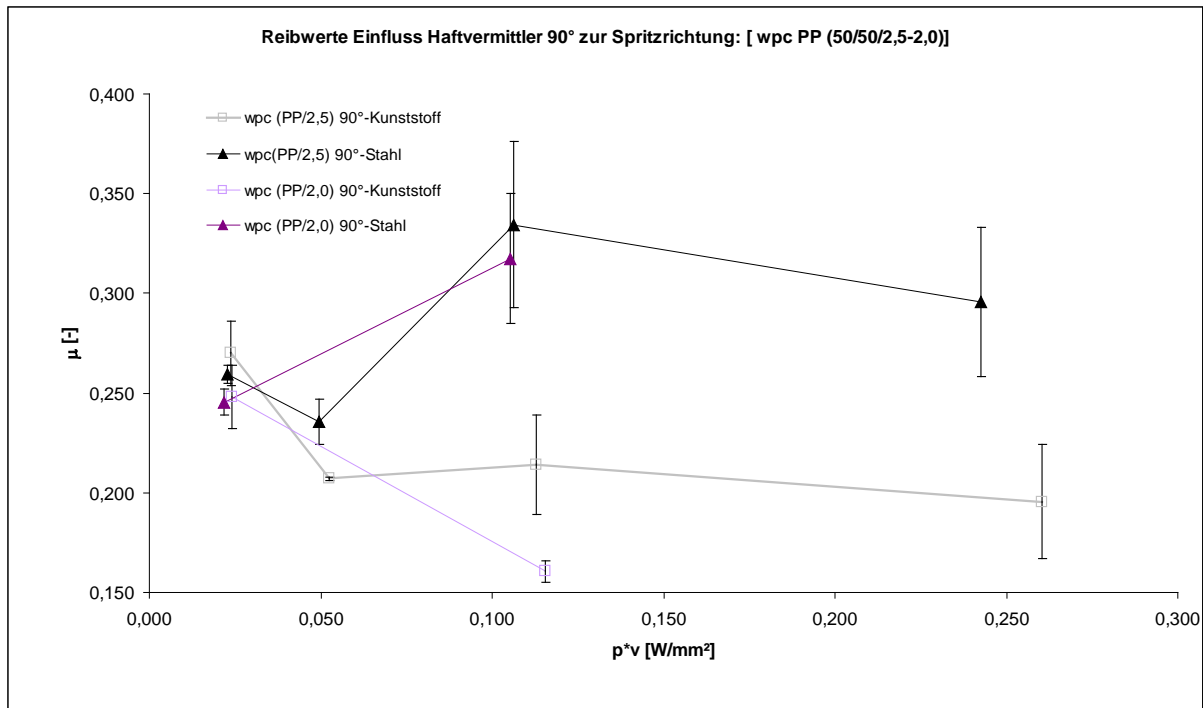
**Abb. 42** Tribologiewert PP (90°), WPC (90°), wassergelagerter WPC (90°), Fichte (0°) gegen Kunststoff und Stahl

Eine Erklärung zum charakterisierten tribologischen Verhalten des WPC (PP-Matrix), stellt der Ansatz eines „Gleitfilmes“ aus Wasser dar. Das Wasser wird dabei aus dem Verbund gepresst und senkt, abhängig von der Größe der tribologischen Belastungsintensität die Reibwerte. Durch das Wasser im Holzverbund und die damit verbundene Quellung der Holzpartikel wird parallel der Verschleiß erhöht. Es ist in diesem Zusammenhang naheliegend, dass der Effekt des „Gleitfilmes“ durch den Einfluss der gequollenen Holzpartikel im Verbund überlagert bzw. kompensiert wird. Die erhaltenen Messwerte sind somit ein Mischzustand aus beiden Effekten, der durch die vorliegenden Untersuchungen nicht exakt getrennt werden kann.

#### 4.3.8 Einfluss des Haftvermittlers bei WPC (PP-Matrix)

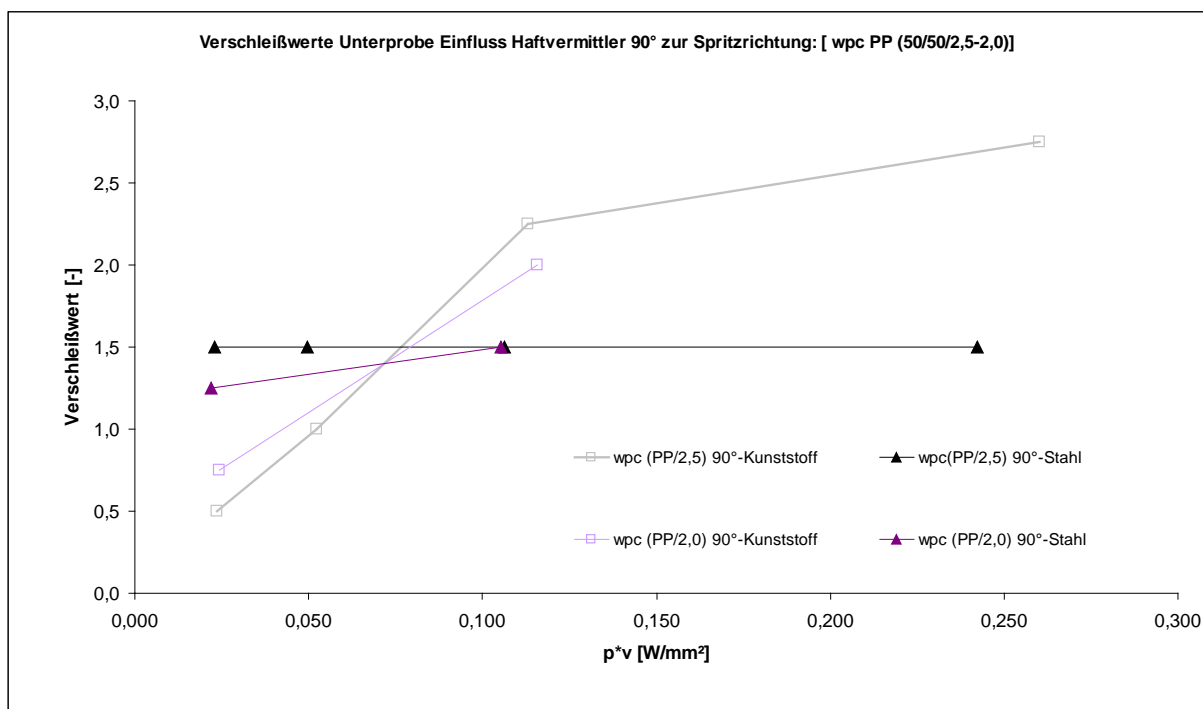
Der Einfluss des Haftvermittlers auf das tribologische Verhalten von WPC (PP-Matrix) wurde an Proben mit 2,5% Haftvermittler (Nr. 7, siehe Tabelle 2, Werte siehe Kapitel 4.3.3) bzw. 2,0% Haftvermittler (Nr. 8, siehe Tabelle 2) in einer verkürzten Versuchsmatrix ( $0,022$  und  $0,11 \text{ W/mm}^2$ , vgl. Tabelle 1) untersucht. Die Ergebnisse sind für den Reibwert (Abb. 43), den Tribologiewert (Abb. 46), den Verschleiß der Unterproben (Abb. 44) und den Verschleiß der Oberproben (Abb. 45) nachfolgend dargestellt.

Für den Reibwert gegen Stahl ist bei  $0,022 \text{ W/mm}^2$ , gegen Kunststoff bei  $0,11 \text{ W/mm}^2$  ein Einfluss feststellbar. Gegen Kunststoff ist dabei eine deutlichere Minderung des Reibwertes nachweisbar.



**Abb. 43** Reibwert WPC (2,0% und 2,5%) 90° - Ausrichtung gegen Kunststoff und Stahl

Bezüglich des Verschleißverhaltens ist gegenüber Stahl nur bei 0,022 W/mm<sup>2</sup> ein Einfluss erkennbar. Bei Kunststoff als Reibpartner wird gegenüber WPC (PP-Matrix, 2,0% HV) bei 0,022 W/mm<sup>2</sup> mehr Verschleiß, bei 0,11 W/mm<sup>2</sup>, weniger Verschleiß produziert. Das Verschleißverhalten zeigt, dass ein geringerer Haftvermittleranteil in der Struktur des WPC (PP-Matrix) gegen Stahl mit steigender tribologischer Belastungsintensität größeren, gegen Kunststoff geringeren Verschleiß erzeugt. Weitere Untersuchungen über das ganze Belastungsspektrum müssen abschließend klären, ob die festgestellten Unterschiede einen nachweisbaren Trend darstellen.



**Abb. 44** Verschleiß Unterprobe WPC (2,0% und 2,5%) 90° - Ausrichtung gegen Kunststoff und Stahl

Die Oberprobe Kunststoff zeigt bei Belastungen von 0,11 W/mm<sup>2</sup> gegen den WPC mit geringerer Haftvermittlerkonzentration ein geringerer Verschleiß.

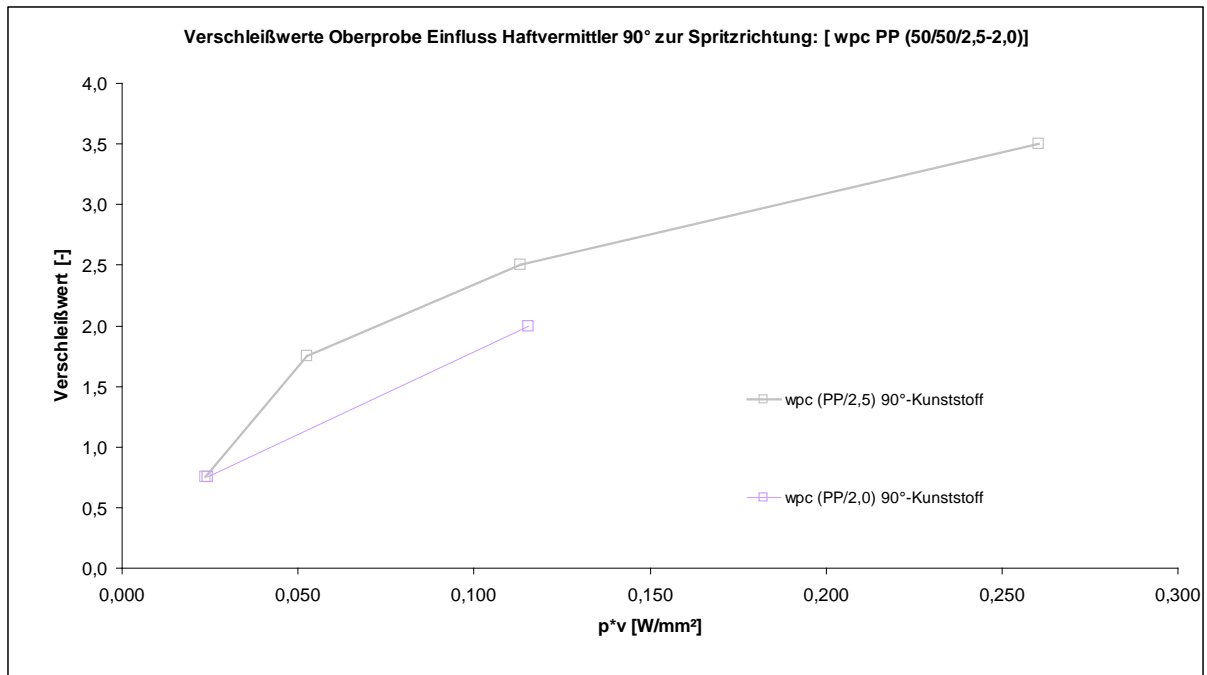


Abb. 45 Verschleiß Oberprobe Kunststoff gegen WPC (2,0% und 2,5%) 90° - Ausrichtung

Der Tribologiewert verdeutlicht, dass ein praktischer relevanter Einfluss der verminderten Konzentration des Haftvermittlers gegen Stahl nur bei  $0,022 \text{ W/mm}^2$  nachweisbar ist. Gegen Kunststoff werden bei  $0,11 \text{ W/mm}^2$  geringere Tribologiewerte, bei geringeren Streubreiten erreicht und damit deutlichere Unterschiede aufgezeigt. Der Einfluss des Dichteunterschiedes der verwendeten Werkstoffe Nr. 7 und Nr. 8 von 3% (aufgrund des veränderten Haftvermittleranteils) auf die erhaltenen Ergebnisse, ist noch ungeklärt.

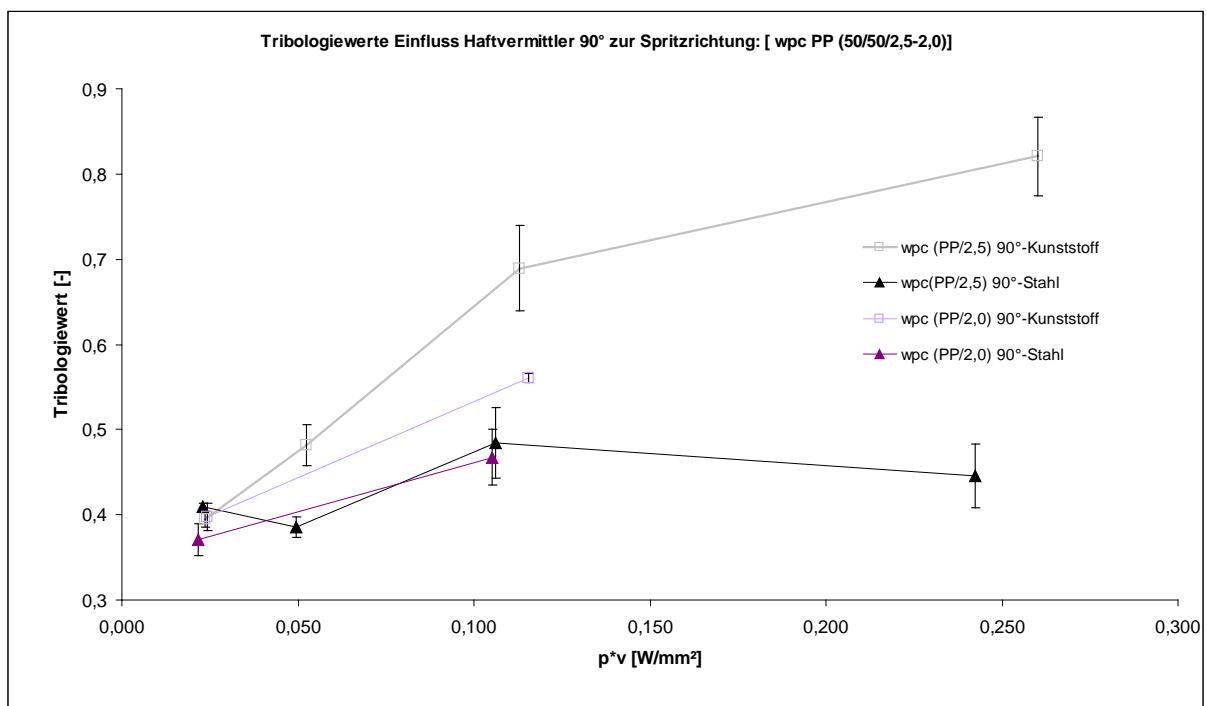
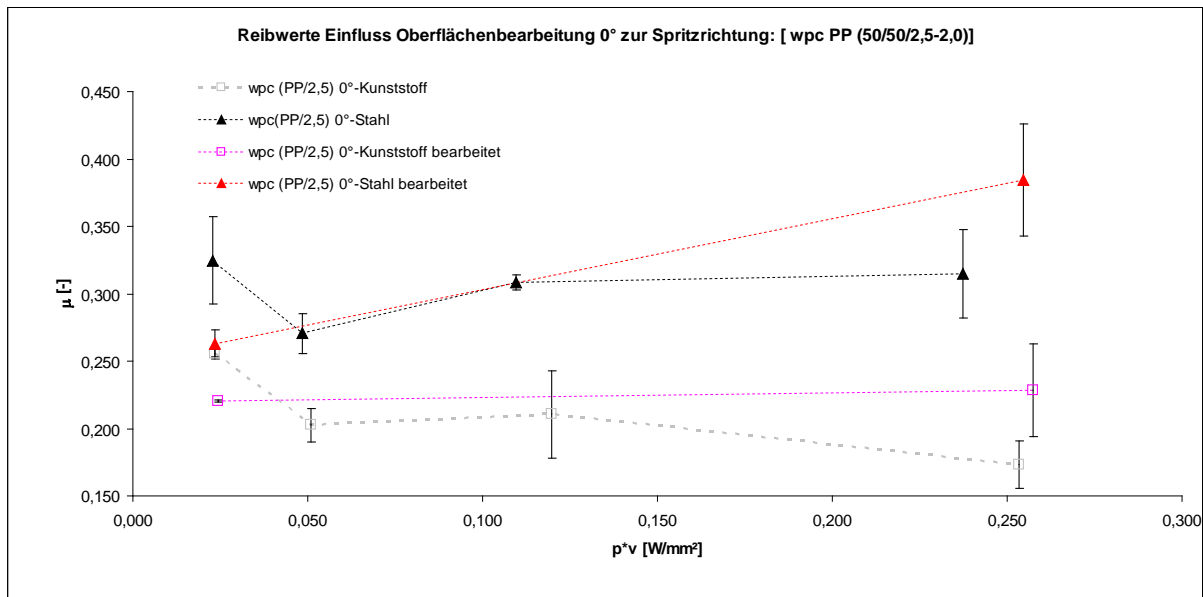


Abb. 46 Tribologiewert WPC (2,0% und 2,5%) 90° - Ausrichtung gegen Kunststoff und Stahl

Die dargestellten Ergebnisse geben Raum für die These, dass ein geringerer Anteil Haftvermittler im WPC (PP-Matrix) das tribologische Verhalten gegen Kunststoff bei größeren tribologischen Belastungen deutlich verbessert und damit das Einsatzspektrum (vgl. Resümee Kapitel 4.3.3) in der Praxis erweitert.

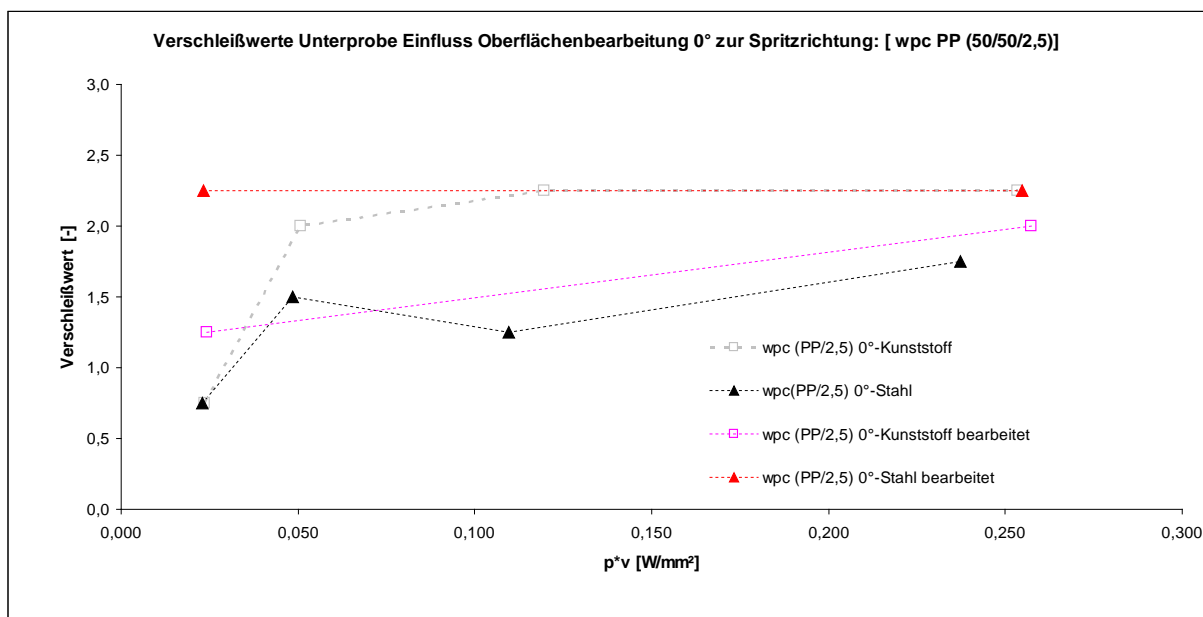
### 4.3.9 Einfluss der Oberflächenbearbeitung bei WPC (PP-Matrix)

Der Einfluss einer Oberflächenbearbeitung auf die tribologischen Eigenschaften des WPC (PP-Matrix) wurde unter Verwendung der bereits getesteten WPC-Proben mit 0°- Ausrichtung (Nr. 7, siehe Tabelle 2, Vergleichswerte siehe Kapitel 4.3.6) untersucht. Diese Proben wurden mit einem Walzenstirnfräser (Durchmesser 63 mm, 5 Zähne, Drehzahl  $n=180$ , Vorschub 50mm/min) überfräst, um eine stark aufgeraute Oberfläche zu erhalten. Damit sollte die ungünstige mechanische Bearbeitung einer Gleitschiene abgebildet werden. Die Belastungsmatrix wurde auf (0,022 W/mm<sup>2</sup> und 0,25 W/mm<sup>2</sup>, vgl. Tabelle 1) verkürzt. Die resultierenden Ergebnisse sind für den Reibwert (Abb. 47), den Tribologiewert (Abb. 50), den Verschleiß der Unterproben (Abb. 48) den Verschleißes der Oberproben (Abb. 49) nachfolgend dargestellt.



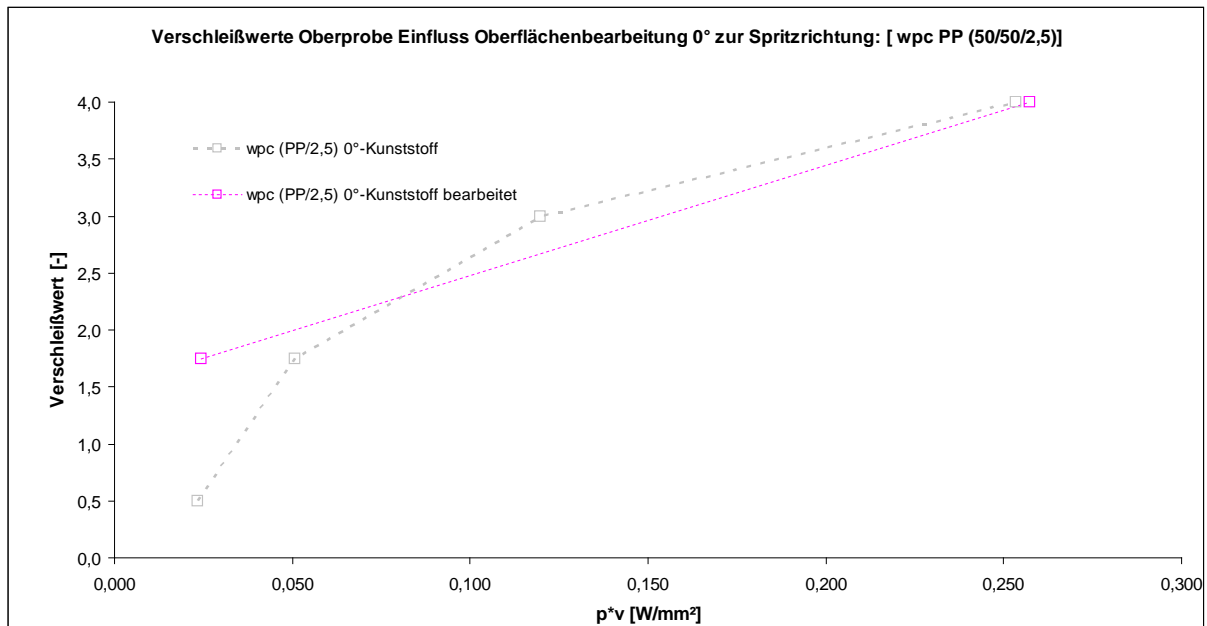
**Abb. 47** Reibwert WPC 2,5% Haftvermittler, 0° - Ausrichtung, bearbeitet/unbearbeitet, gegen Kunststoff und Stahl

Hinsichtlich der Reibwerte ist feststellbar, dass die vorgenommene Oberflächenbearbeitung diese unabhängig vom Reibpartner (Oberprobe) bei 0,022 W/mm<sup>2</sup> senkt und bei 0,25 W/mm<sup>2</sup> erhöht.



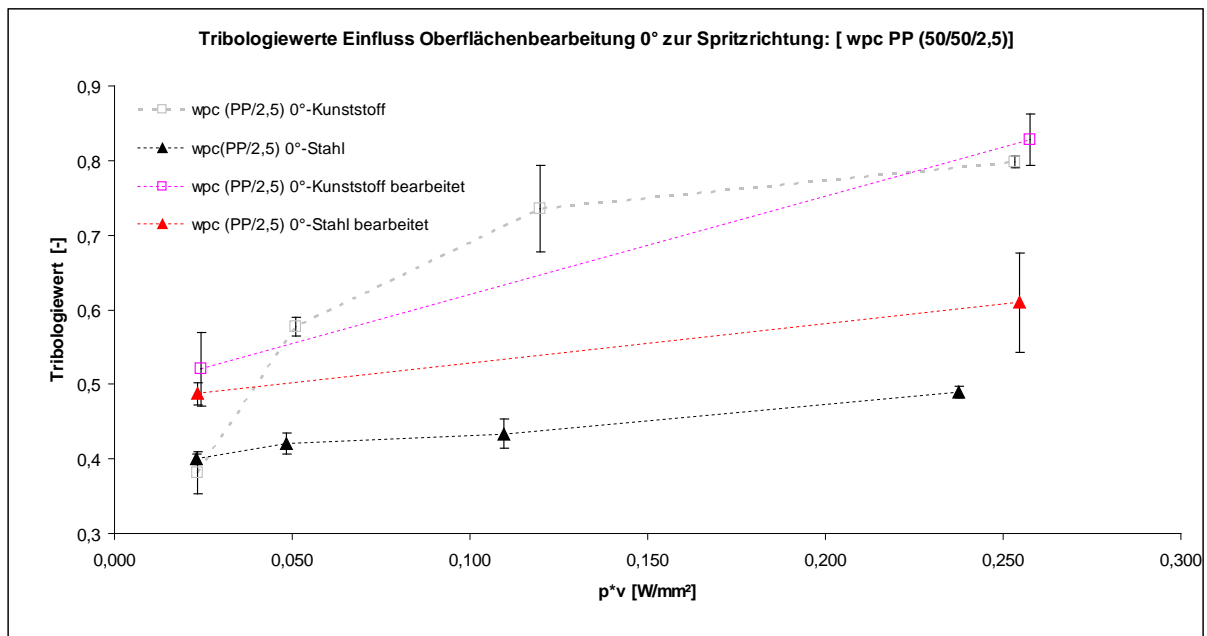
**Abb. 48** Verschleiß Unterprobe WPC 2,5% Haftvermittler, 0° - Ausrichtung, bearbeitet/unbearbeitet, gegen Kunststoff und Stahl

Der Verschleiß des bearbeiteten WPC (PP-Matrix) wird gegen Stahl wesentlich erhöht. Gegen Kunststoff ist bei  $0,022 \text{ W/mm}^2$  mehr und  $0,25 \text{ W/mm}^2$  weniger Verschleißes nach einer Bearbeitung feststellbar.



**Abb. 49** Verschleiß Oberprobe Kunststoff gegen WPC 2,5% Haftvermittler, 0° - Ausrichtung, bearbeitet/unbearbeitet

Beim Kunststoffreibpartner (Oberprobe) spiegelt sich die Bearbeitung des WPC Reibpartners bei  $0,022 \text{ W/mm}^2$  durch höheren Verschleiß wieder.



**Abb. 50** Tribologiewert WPC 2,5% Haftvermittler, 0° - Ausrichtung bearbeitet/unbearbeitet, gegen Kunststoff und Stahl

Die unvorteilhafte Auswirkung einer Oberflächenbearbeitung des WPC (PP-Matrix) mit dem Resultat einer stark aufgerauten Oberfläche wird beim Tribologiewert deutlich. Besonders gegen Stahl, aber auch gegen Kunststoff (bei  $0,022 \text{ W/mm}^2$ ) ist von einer derartigen Oberflächenbearbeitung abzuraten.

Für eine abschließende Bewertung der Auswirkung einer Oberflächenbearbeitung sollten noch weitere Untersuchungen über das komplette Belastungsspektrum mit verschiedenen Oberflächenrauheiten durchgeführt werden.

### 4.4 Tribologisch vorteilhafte Matrixmaterialien bei WPC (Vergleich PP-PE)

Die Basis der Betrachtungen sind die Ergebnisse aus Kapitel 4.3.4, welche für PE einen geringem Reibwert und hohen Verschleiß ergaben. Unter der Annahme, dass sich durch den Zusatz von Holzpartikeln der Verschleiß und der Reibwert reduzieren, wurde WPC ohne Haftvermittler (Nr. 9, Tabelle 2) in einer verkürzten Versuchsmatrix (vgl. Tabelle 1) bis  $0,11 \text{ W/mm}^2$  untersucht. Die Ergebnisse sind für den Reibwert (Abb. 18), für den Tribologiewert (Abb. 21), für den Verschleiß der Unterproben (Abb. 19) und den Verschleiß der Oberproben (Abb. 20) nachfolgend dargestellt.

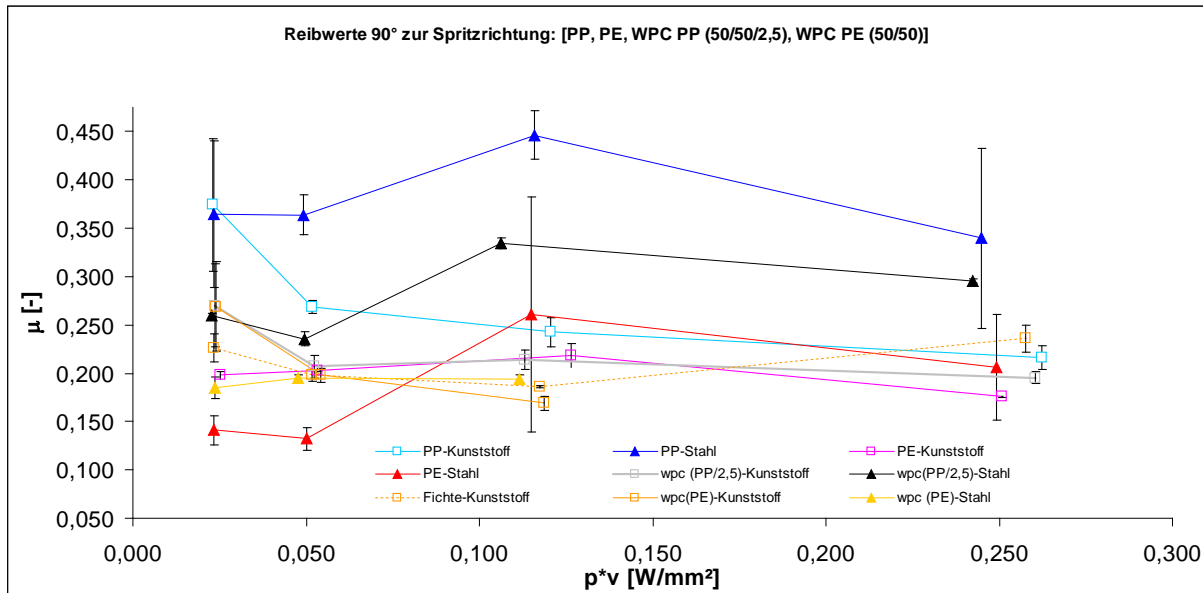


Abb. 51 Reibwerte PP (90°), PE (90°), WPC PP 2,5% (90°), WPC PE (90°) gegen Kunststoff und Stahl

Die Reibwerte gegen Stahl im Vergleich zu PE werden aufgrund der Abweichungen des PE nicht nachweisbar verbessert. Bei Belastungen bis  $0,055 \text{ W/mm}^2$  ist PE günstiger. Der Holzfüllstoff senkt die Streubreite hinsichtlich des Reibwertes bei WPC mit PE-Matrix. Die Werte des WPC (PE-Matrix) gegen Stahl sind kleiner als mit PP-Matrix. Das Verhalten gegenüber Kunststoff ist erst ab  $0,1 \text{ W/mm}^2$  verschieden gegenüber WPC (PP-Matrix), wobei die PE-Matrix wiederum ein deutliches günstigeres Verhalten mit niedrigerem Reibwert außerhalb der Streubreite besitzt.

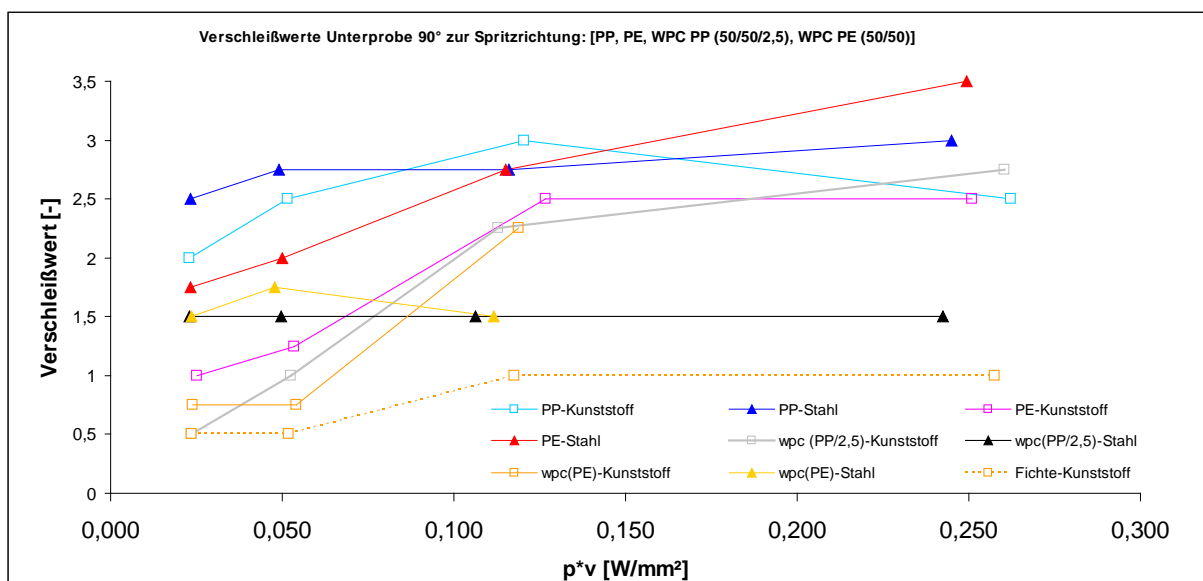
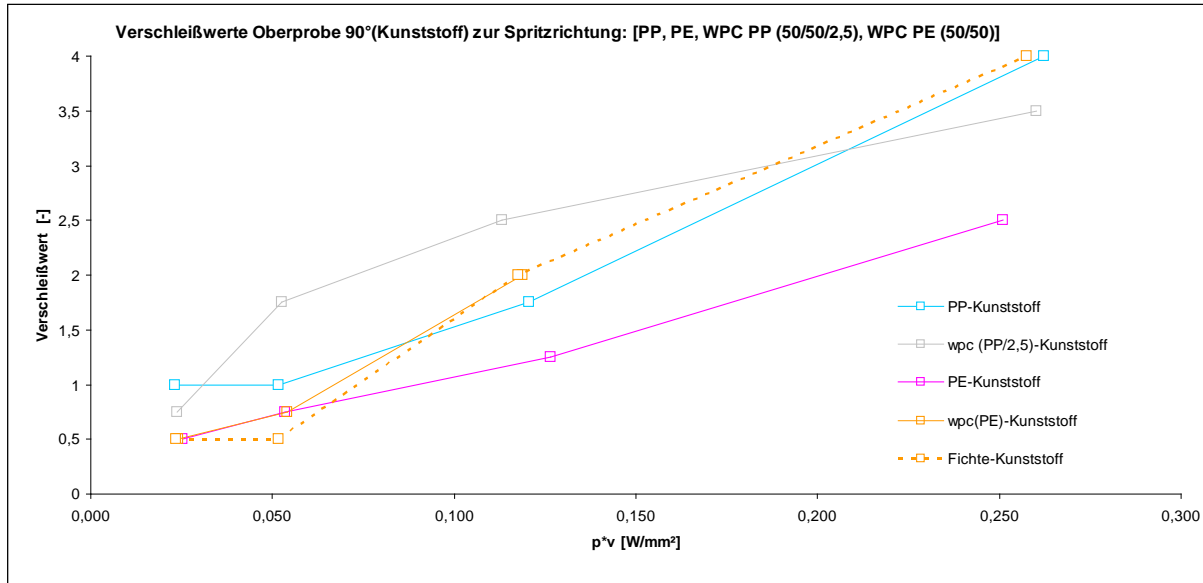


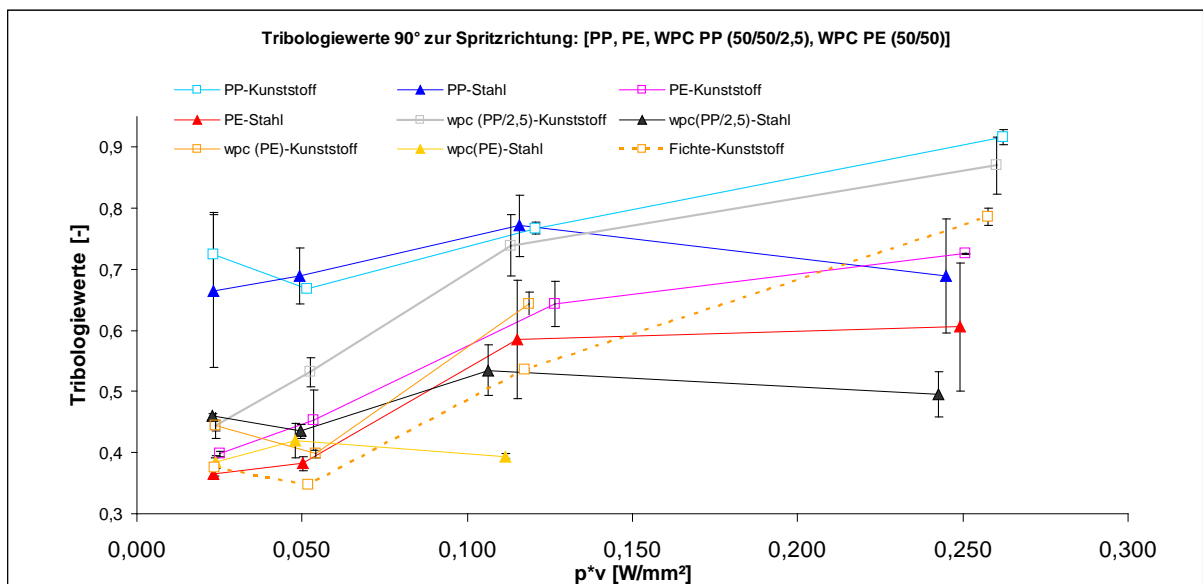
Abb. 52 Verschleiß Unterprobe PP (90°), PE (90°), WPC PP 2,5% (90°), WPC PE (90°) gegen Kunststoff und Stahl

Bezüglich des Verschleißes der WPC-Proben mit PE-Matrix ist gegenüber Stahl eine deutliche Verbesserung gegenüber PE nachweisbar. Gegenüber Kunststoff werden bis  $0,11 \text{ W/mm}^2$  stetig abnehmende Vorteile erreicht. Hinsichtlich der Oberprobe Kunststoff kann bis  $0,05 \text{ W/mm}^2$  von einem identischen Verhalten zu Fichte ausgegangen werden. Bis zu  $0,11 \text{ W/mm}^2$  nimmt der Verschleiß stark zu, bleibt aber unter den vergleichbaren Werten von WPC (PP-Matrix).



**Abb. 53** Verschleiß Oberprobe Kunststoff gegen PP (90°), PE (90°), WPC PP 2,5% (90°), WPC PE (90°)

Der Tribologiewert zeigt die in Summe praktisch relevanten Veränderungen der PE zur PP-Matrix. Gegen Kunststoff sind diese innerhalb der Streuungen hinsichtlich reinen PE. Die Kurve von WPC (PP-Matrix) wird dabei unterschritten. Deutliche Vorteile ergeben sich hinsichtlich des Reibpartners Stahl. Bei  $0,1 \text{ W/mm}^2$  wird der Wert von PE und WPC (PP-Matrix) deutlich unterboten.



**Abb. 54** Tribologiewert PP (90°), PE (90°), WPC PP 2,5% (90°), WPC PE (90°) gegen Kunststoff und Stahl

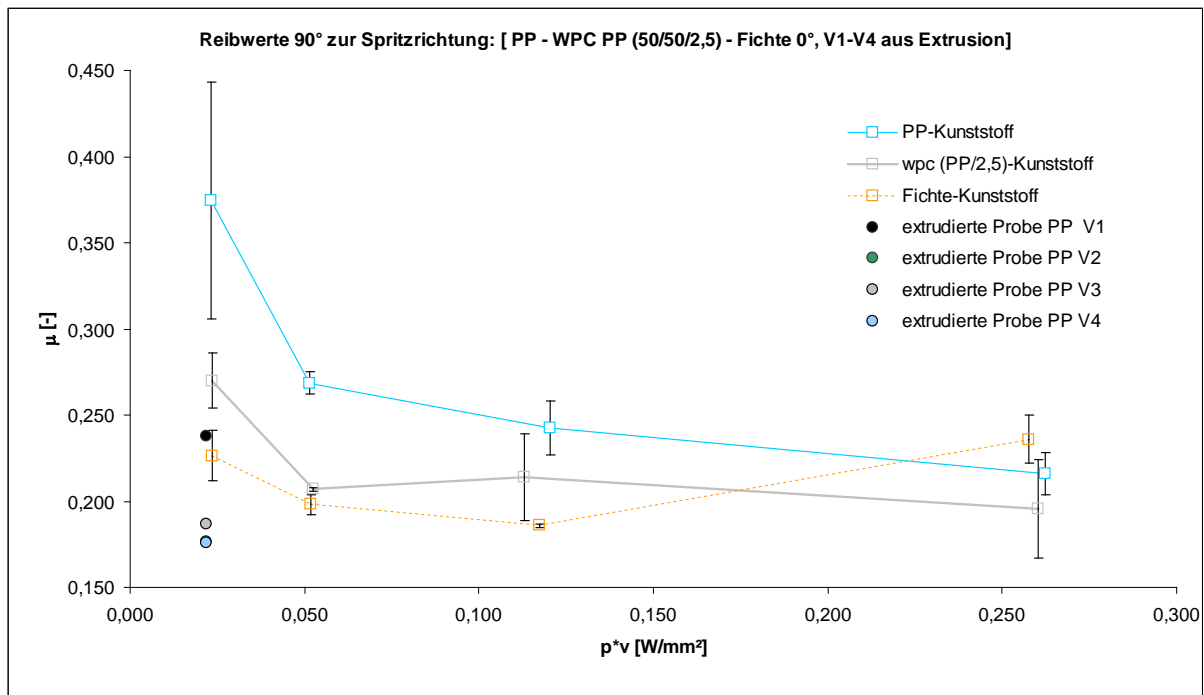
Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass hinsichtlich einer tribologischen Belastung bis zu einer Belastung von  $0,11 \text{ W/mm}^2$  PE das bessere Matrixmaterial gegenüber PP darstellt. Tendenziell ähnliche Aussagen zu höheren Belastungen ( $0,25 \text{ W/mm}^2$ ) sind auf Basis der Daten lediglich interpretierbar.



#### 4.5 Tribologisch vorteilhafter Fertigungsprozess bei WPC (Vergleich Spritzguss - Extrusion)

Für eine erste Abschätzung hinsichtlich eines tribologisch vorteilhaften Fertigungsprozesses wurden die Werte der Vorversuche mit extrudierten WPC (PP-Matrix) nach 20h vgl. Abb. 7 mit den Ergebnissen der Proben hinsichtlich der Reibwerte aus dem Spritzguss (Abb. 55) verglichen.

Bei der Auswertung wird deutlich, dass die Werte aus der Extrusion bei einer tribologischen Belastungsintensität von  $0,022 \text{ W/mm}^2$  selbst in zwei Gruppen streuen.



**Abb. 55** Reibwerte PP (90°), WPC PP 2,5% (90°), WPC PP aus Extrusion (**Abb. 7**) nach 24h gegen Kunststoff

Während V1 auf Niveau des Vollholzes Fichte in 0° - Ausrichtung liegt, unterbieten V2 - V4 diesen Wert deutlich. Diese Erkenntnis ist um so erstaunlicher, wenn beachtet wird, dass Bereiche des dynamischen Reibwertes unter 0,2 aktuell nur von aktiv gleitmodifizierten, mit Schmierstoff gefüllten Polymeren erreicht werden, bis deren „Schmierstoffdepots“ aufgebraucht sind.

Die Ergebnisse beinhalten jedoch keine Aussagen zum Verschleiß zu den Abweichungen oder hinsichtlich höherer tribologischer Belastungsintensitäten. Weiterhin ist der Einfluss der Verarbeitungsparameter und Verarbeitungshilfen (Gleitmittel) ungeklärt.

Die vorliegenden Ergebnisse sind als Basis für weitere Untersuchungen zu sehen. Eine Verallgemeinerung der Daten bzw. die Ableitung von Aussagen für die Verwendung in der Praxis sind nicht möglich.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Untersuchungen zum tribologischen Verhalten von WPC mit PP- und PE-Matrix stützen sich auf Messungen sowie auf Beobachtung und deren phänomenologische Interpretation nach Eintreten eines als „stationären Zustand“. Der Beobachtungszeitraum für diesen Zustand wurde von 22 - 24h Testzeit bzw. 2h vor dem vorzeitigen Versagen der Reibpaarung auf Grund von Erfahrungswerten definiert.

Zur besseren Einordnung der Ergebnisse wurden zudem vergleichende Untersuchungen an anderen Kunststoffen und den Einzelbestandteilen von WPC durchgeführt.

Die eingangs formulierte Ansatz, dass die polymere Komponente als Schmiermittel den Abrieb und die Reibungszahl der stärker tragenden Holzkomponente senkt konnte prinzipiell am Beispiel von WPC mit PP und PE -Matrix nachgewiesen werden. Es ist dabei jedoch zu beachten, dass Holz in Vorzugsfaserrichtung (siehe Messungen mit Fichte, 0°) unter Umständen ein vorteilhafteres Verhalten aufweisen kann. Der Ansatz ist somit nicht allgemeingültig.

Die standardmäßige Gleitmodifikation des Delrins (Oberprobe Kunststoff) stellt zudem einen aktuell nicht abschätzbaren Einfluss auf die Untersuchungen dar.

Die Unterteilung des unterstellten Wirkmechanismus in vier Phasen liefert eine nahe liegende, aber nicht hinsichtlich aller untersuchten Aspekte befriedigende, Erklärung der erhaltenen Ergebnisse.

Für eine grundlegende Aussage zur Verwendung von WPC in einem tribologisch hochbelasteten Maschinenteil der fördertechnischen Praxis (Gleitschiene) scheint der aktuelle Kenntnisstand und die vereinfachte Betrachtung über den vorgestellten Tribologiewert ausreichend. Die darin enthaltene vergleichende optische Bewertung des Verschleißverhaltes stellt den im wissenschaftlichen Sinne „weicheren Teil“ des Kennwertes dar.

Im Gegensatz zum dynamischen Reibwert  $\mu$  liegen dem Verschleißwert keine konkreten, „harten“ Messwerte zu Grunde. Dieser Aspekt hat weniger Einfluss auf die klassifizierten Unterschiede der Werkstoffe untereinander, erschwert aber eine Übertragung auf andere Messreihen ohne vergleichende Untersuchungen.

Parallel zu den vorliegenden ersten Ergebnissen hinsichtlich der Einflüsse verschiedener Parameter bei WPC (PP-Matrix) auf die tribologischen Eigenschaften und deren Wertigkeit, werden für den Praktiker konkrete Ansätze aufgezeigt die den Werkstoff „beherrschbar“ und bis zu einem gewissen Punkt „einstellbar“ machen. Eine vereinfachte Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse liefert Tabelle 4. Es wird deutlich, dass sich die charakteristischen dynamischen Gleitreibwerte  $\mu$  [-] und, daran gekoppelt, der typische Verschleißwert tribologisch hochbelasteter polymerer Gleitelemente (Unterproben) in Funktion des Reibpartners (Oberproben) durch geeigneten Holzzusatz mehr oder weniger deutlich verringern lassen. Darauf aufbauend ist der Einsatz von WPC mit PP und unter Nutzung des aufgezeigten Trends für PE-Matrix in Gleitschienen sowie unter Beachtung des Reibpartners wissenschaftlich vertretbar.

Der Einsatz von WPC (PP-Matrix) ist dabei vordergründig gegen Stahl sinnvoll. Für eine vorteilhafte Verwendung gegen Kunststoff stellt eine Verminderung des Haftvermittleranteils eine noch zu überprüfende Möglichkeit dar das tribologische Verhalten zu verbessern.

Für eine Verallgemeinerung der aufgezeigten Aspekte auf alle WPC (verschiedene Mixturbestandteile, Zusätze, Herstellungsparameter) oder Reibpartner sind die vorliegenden Daten nicht geeignet. Die durchgeführten vergleichenden Messungen zeigen an Beispielen einen Trend für den Füllstoff Holz in PP - oder PE-Matrizes.

Die aufgezeigten Rückkopplungen und Einflüsse (Wasser, Haftvermittler, Spritzrichtung, Oberflächenbearbeitung) zum Reibpartner (Oberproben) liefern den Ansatz für weiterführende charakterisierende Studien und Arbeiten hinsichtlich der vorteilhaften Gestaltung von holzpartikelgefüllten Gleitelementen und angepassten Reibpartnern, die besonders für deren Einsatz in der Praxis von Bedeutung sind. Es sei an dieser Stelle noch einmal besonders auf das unterschiedliche Verhalten von „Stahl“ und „Kunststoff“ in Verbindung mit WPC (PP-Matrix) hingewiesen (Abb. 17 und Abb. 21), welches bei einem Einsatz in Fördersystemen zu beachten ist. Bei

Förderketten aus Kunststoff können bei höheren tribologischen Belastungsintensitäten Probleme auftreten.

**Tabelle 4** grundlegender Trend (vereinfachte Zusammenfassung der Ausprägung der Einflüsse) Reibungs- und Verschleißverhalten von WPC (PP-Matrix)

Parameter	Reibwert, gegen		Verschleiß			Tribologiewert	
	Stahl	Kunststoff	Unterprobe		Oberprobe	Stahl	Kunststoff
			Stahl	Kunststoff			
Einfluss Spritzrichtung 0°/90° Kapitel 4.3.6 Vergleich 90° gegen 0°	90° bis 0,05 W/mm <sup>2</sup> <	-	90° 0,022 W/mm <sup>2</sup> >	90° bis 0,11 W/mm <sup>2</sup> < dann >	90° ab 0,05 W/mm <sup>2</sup> >	90° 0,05 W/mm <sup>2</sup> <	
Einfluss Wasser bzgl. Spritzrichtung Kapitel 4.3.7 Vergleich 90° gegen 0°	90° 0,022 W/mm <sup>2</sup> >, 0,11 W/mm <sup>2</sup> <		90° bis 0,11 W/mm <sup>2</sup> , < dann >		90° bis 0,11 W/mm <sup>2</sup> , > dann >	90° ab 0,11 W/mm <sup>2</sup> , <	90° bis 0,11 W/mm <sup>2</sup> , > dann <
genereller Einfluss Wasser (W) Kapitel 4.3.7 Vergleich wassergelagerte gegen ungelagerte Proben	90°W 0,11 W/mm <sup>2</sup> , < 0°W 0,022 W/mm <sup>2</sup> >	0°/90°W 0,022 W/mm <sup>2</sup> < 0,05 W/mm <sup>2</sup> >	0°/90°W >	90°W (0,022 und 0,11) W/mm <sup>2</sup> > 0°W bis 0,05 W/mm <sup>2</sup> < ab 0,11 W/mm <sup>2</sup> >	90°W (0,022 und 0,11)W/mm <sup>2</sup> > 0°W 0,05 W/mm <sup>2</sup> <	90°W bis 0,11 W/mm <sup>2</sup> > 0°W ab 0,11 W/mm <sup>2</sup> >	90°W 0,11 W/mm <sup>2</sup> > 0°W bis 0,11 W/mm <sup>2</sup> < dann >
Einfluss Haftvermittler Kapitel 4.3.8 Vergleich (2,5 gegen 2) %	2% 0,022 W/mm <sup>2</sup> <	2% 0,11 W/mm <sup>2</sup> <	2% 0,022 W/mm <sup>2</sup> <	2% 0,022 W/mm <sup>2</sup> > 0,011 W/mm <sup>2</sup> <	2% 0,011 W/mm <sup>2</sup> <	2% 0,022 W/mm <sup>2</sup> <	2% 0,011 W/mm <sup>2</sup> <
Einfluss Oberflächenbearbeitung Kapitel 4.3.9 Vergleich bearbeitet (b) gegen unbearbeitete Proben	b 0,022 W/mm <sup>2</sup> < 0,025 W/mm <sup>2</sup> >		b >	b 0,022 W/mm <sup>2</sup> > 0,025 W/mm <sup>2</sup> <	b 0,022 W/mm <sup>2</sup> >	b >	b 0,022 W/mm <sup>2</sup> >

Legende bzgl. Vergleichskennwert: > kleiner, < größer, - kein Einfluss

Weiterhin ist anzumerken, dass die Betrachtung über die tribologische Belastungsintensität  $B_t$  ( $p \cdot v$  - Wert) zwar die Abhängigkeit bei einem höheren „Gesamtenergieeintrag“ abbildet, jedoch keine Rückschlüsse auf die einzelnen Parameter ( $p$  und  $v$ ) zulässt. Es ist somit durchaus möglich, dass gleiche  $p \cdot v$  - Werte, erzeugt durch unterschiedliche Pressungen  $p$  und Geschwindigkeiten  $v$ , ein abweichendes Reibungs- und Verschleißverhalten generieren. Dieser Punkt scheint vor allem dann plausibel, wenn alle aufgeführten Kurvenverläufe dahingehend interpretiert werden. Bei PE, PP und WPC (beispielhaft siehe Abb. 51, Abb. 52, Abb. 54, bzw. Kapitel 4.3.7) ist bei den Reibverläufen eine Stufe von (0,05 auf 0,11) W/mm<sup>2</sup> erkennbar, die mit der Erhöhung der Reibgeschwindigkeit um den Faktor 5 bei gleichzeitiger Verminderung der Flächenpressung um Faktor 2 zusammenfällt. Zudem erhält die Interpretation des „Wendepunktes“ bei den Kurvenverläufen in Zusammenhang mit der Wasserlagerung (Kapitel 4.3.7) einen weiteren Interpretationsansatz.

Offen bleibt in wie weit das Langzeitgleitreibungsverhalten des WPC über die 24h hinaus die dargestellten Ergebnisse bestätigt.

Für die weitere Forschungstätigkeit erscheint es sinnvoll, dass hinsichtlich der tribologischen Aspekte von WPC schwerpunktmäßig an folgenden Punkten gearbeitet wird:

- Praxistest erster Prototypen in Fördersystemen
- weiterführende Charakterisierung der PE-Matrix in Verbindung mit der Übertragung der Erkenntnisse vom Spritzguss auf die Extrusion
- verbesserte Klassifizierung des Verschleißes, Weiterentwicklung der optischen Methode
- Finden eines vorteilhaften Fertigungsprozesses
- weitere Untersuchungen von Einflussgrößen auf die tribologischen Eigenschaften
  - Mixturbestandteile WPC (Haftvermittler) und Verarbeitungszusätze (z.B. Gleitmittel)
  - Verarbeitungsparameter
- Betrachtungen zu Klimaeinflüssen und dem Einfluss von Alterungserscheinungen
- Charakterisierung des Kurzzeitverhaltens bis zum „stationären Zustand“ zur besseren Klassifizierung des Wirkmechanismus des Verschleißes
- Erweiterung der optischen Methode zur Begutachtung des Verschleißes (Energetische Betrachtungsweise)
- Betrachtungen zum Langzeitgleitreibungsverhalten – Finden der Grenzwerte der Belastbarkeit
- vergleichende Untersuchungen zu den Eigenschaftsprofilen von wassergelagerten Proben WPC ,PP, PE,PE UHMW, Klären der Unterschiede
- Einflüsse von Flächenpressung  $p$  und Geschwindigkeit  $v$  als Einzelparameter
- physikalisch-chemische Betrachtung der Ergebnisse (Oberflächenenergien, Beziehungen zwischen Atomen, Molekülen in der Reibpaarung)

## 6 Danksagung

Die Verfasser bedanken sich bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) für die Bereitstellung der für die Untersuchungen notwendigen finanziellen Mittel.

Weiterhin sei an dieser Stelle Prof. Dr.-Ing. Klaus Nendel (TU Chemnitz, Professur Fördertechnik) und Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde (TU Chemnitz, Professur Kunststoffe) für die Betreuung sowie Dr.-Ing. Jens Sumpf (TU Chemnitz, Professur Fördertechnik), Dr.-Ing. Hendrik Kaden (TU Chemnitz, Professur Fördertechnik) und Dipl.-Ing. Arndt Schumann (TU Chemnitz, Professur Fördertechnik) für die fachliche Diskussion gedankt.

## 7 Quellen und Anmerkungen

[1] Qualitätsgemeinschaft Holzwerkstoffe e. V.: Qualitäts- und Prüfbestimmungen für Terrassendecks aus Holz-Polymer-Werkstoffen, S7 ff (Fassung: 04.02.2009).

[2] Klysov, Anatole A.: Wood-Plastic Composites; John Wiley&Sons. Inc; New Jersey; 2007, S369 ff.

[3] DIN 51097: Bestimmung der rutschhemmenden Eigenschaft Nassbelastete Barfußbereiche, 11/1992.

[4] Ludwig Mader: Elektrotechnik Datenblatt FLOOR SLIDE CONTROLFSC 2000print, <http://www.m-elt.de/melt-downloads/fsc2000print/FSC%202000-Folder->

Ger.pdf?phpMyAdmin=ecd63a4243c19d8388e87f4381d80316, Zugriff am 06.07.2009.

[5] Gehde, Michael; Clauß, Brit: 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.

[6] Nendel, Klaus; Mitzschke, Frank: Kunststoffgleitpaarungen in der Fördertechnik – Methoden zur Messung von Reibungswerten, Logistic Journal 09/2006, [http://www.elogistics-journal.de/archiv/2006/september/614/index\\_html#d53e89](http://www.elogistics-journal.de/archiv/2006/september/614/index_html#d53e89).

[7] Eichhorn, Sven; Claus, Brit: Holzverbundwerkstoffe in der Fördertechnik - kombinierte Trag- und Gleitelemente, Tagungsbericht zum 4. Fachkolloquium der WGTL an der Technischen Universität Chemnitz, Posterausstellung, Chemnitz, 2008.

[8] Erfahrungswerte der Professur Fördertechnik, im Wesentlichen arbeitet durch Nendel, Klaus; Mitzschke, Frank siehe [6], Sumpf, Jens; Kaden, Hendrik.

[9] Die Verfasser behalten sich vor zu diesem Thema nach kompletter Auswertung aller Datensätze eine gesonderte Veröffentlichung vorzulegen.

[10] Schumann, Arndt; Eichhorn, Sven; Sumpf, Jens: Reibungs- und Verschleißbewertung von Kunststoff-Gleitpaarungen, Kunststoff Magazin 11/2009, Verlag Hoppenstedt

[11] Diese Erkenntnis deckt sich nicht mit Ergebnissen aus statischen Zugversuchen, in denen eine deutliche Anhängigkeit der Steifigkeit und Festigkeit (ca. 25%) von der Spritzrichtung festgestellt wurde.

[12] Clauß, Brit; Gehde, Michael; Nendel, Klaus; Eichhorn, Sven: Entwicklung und Herstellung von kombinierten WPC-Trag- und Gleitelementen für die Fördertechnik (Use of WPC for components in conveying systems ), 7. Internationales Symposium "Werkstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen", 09.-10. September 2009, Erfurt, <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2009/0154>.