

## 4.3 **Rad aus WPC (Wood Polymer Composite) zum Einsatz in der Fördertechnik**

Referent: Dr.-Ing. Sven Eichhorn<sup>1</sup> ([sven.eichhorn@mb.tu-chemnitz.de](mailto:sven.eichhorn@mb.tu-chemnitz.de))  
Dr.-Ing. Brit Clauß<sup>2</sup>,  
B.Sc. Ann-Kathrin Harsch<sup>1</sup>,

Institut für Fördertechnik und Kunststoffe (ifk), Deutschland  
1: TU Chemnitz, Professur Fördertechnik  
2: TU Chemnitz, Professur Kunststoffe

### 1 Einleitung / Kurzfassung

Es wird die Bauteilentwicklung für ein Rad aus WPC (Wood Polymer Composite) vorgestellt. Das Rad ist der Demonstrator für eine WPC-Radbauweise zur Anwendung in der Intralogistik. Das Rad hat eine Lastgrenze von 150kg. Es werden statisch-mechanische Untersuchungen zu verschiedenen Materialrezepturen und Radkonstruktionen vorgestellt. Ergänzend werden tribologische Versuche von ausgewählten Rädern dargestellt, um die Praxistauglichkeit des Demonstrators und der Bauweise abzuschätzen.

A component- and material development for a wheel made from WPC (Wood Polymer Composite) is presented. The wheel is the demonstrator for a WPC-wheel design for the use in the intralogistics. The wheel has a load limit of 150kg. Static-mechanical investigations of different material compositions and wheel designs are presented. Tribological investigations of selected wheels are shown, to give an estimation of the prototype's usability and the effectiveness of the general wheel design.

### 2 Ausgangspunkt

#### 2.1 Anwendungsfall und Zielstellung

##### 2.1.1 Anwendungsfall

Übergeordnetes Ziel ist die Entwicklung der sogenannten Green Logistics Plant – GLP in der Intralogistik. [1] Die Intralogistik ist ein Teilgebiet der Fördertechnik. Die Motivation WPC einzusetzen und die etablierten Bauweisen zu verändern ist durch wirtschaftliche, technische und ökologische Aspekte gekennzeichnet. [2]

Aufbauend auf der in Abb. 1 dargestellten Abgrenzung zum Begriff einer Rolle, wurde die Bauweise für ein Rad in der Fördertechnik (Radbreite  $l$  / Durchmesser  $d \leq 1,5$ ) aus WPC angestrebt. Die Bauweise sollte bis zu einer Belastung  $\leq 1500\text{kg}$  (ca.  $15.000\text{N}$ ) den Einsatz als Rad oder Bandage in intralogistischen Anwendungen ermöglichen. Für erste praxisrelevante Aussagen wurde an der Umsetzung eines Demonstratorbauteils (Demonstrators) mit  $d = 84\text{mm}$  und  $l = 40\text{mm}$  ( $l/d \approx 1/2$ ) mit einer maximalen Belastung von  $150\text{kg}$  (ca.  $1.500\text{N}$ ) gearbeitet.

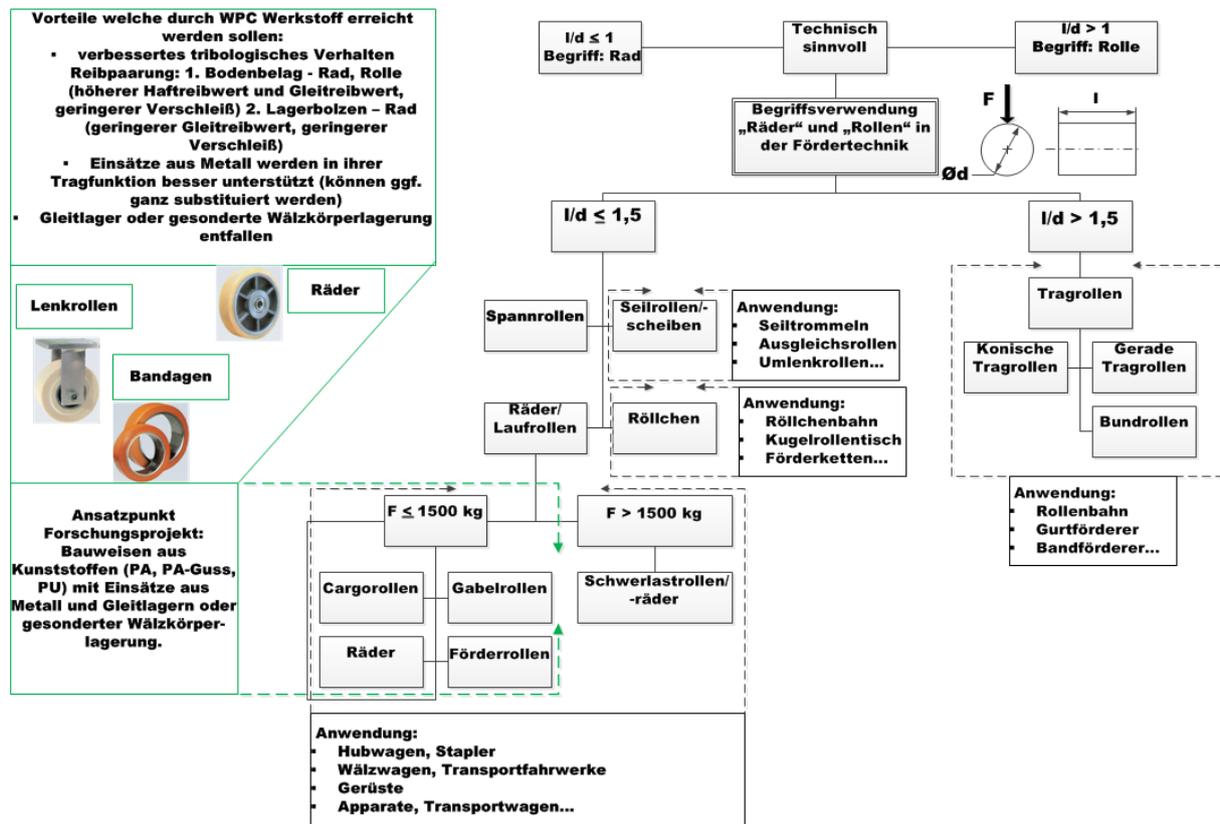


Abb. 1: Begriffliche Unterscheidung Rad / Rolle, angestrebter Einsatzbereich WPC-Rad (grüne Umrandung)

## 2.1.2 Zielstellung

Es wurde eine anwendungsnahe Entwicklung und Evaluierung des WPC-Rades fokussiert, um den Vergleich zu handelsüblichen Referenzbauteilen aus PA und PP herzustellen. Dadurch sollte eine erste Abschätzung der technischen Leistungsfähigkeit von WPC-Rädern in technischen Anwendungen ermöglicht werden. Folgende Teilziele wurden angestrebt:

- Entwicklung einer prinzipiell in der Bauteilgröße und Belastbarkeit skalierbaren Konstruktion. Diese sollte sich für das Spritzgussverfahren eignen, um die wirtschaftliche Fertigung in der Großserie zu ermöglichen.
- Entwicklung eines Rades aus einem hohen Anteil nachwachsender Rohstoffe in handelsüblichen  $l/d$ -Verhältnissen bis zu einer Belastungsgrenze von 1.500kg (ca. 15.000N).
- Verzichten auf Lagereinsätze in den Rädern wie z. B. Kugellager aus Metall oder speziellen Gleitlagern aus technischen Kunststoffen.
- Senkung der Herstellungskosten durch Verminderung des Kunststoffanteiles und unter Beibehaltung der technischen Leistungsfähigkeit der Räder.
- Nutzung der Verstärkungswirkung der Holzelemente (Partikel, Fasern), um die mechanischen Kennwerte der Räder soweit möglich zu steigern.
- Überprüfung der Anwendbarkeit von Recyclinggummi in WPC-Rezepturen für die Anwendung in WPC-Rädern.
- Erreichen eines vorteilhaften tribologischen Verhalten des WPC-Rades als Spagat zwischen:

- Reibpaarung 1: Bodenbelag - WPC-Rad  
→ Zielstellung: geringer Verschleiß bei möglichst geringem Rollwiderstand, Erschweren des Wegrutschens durch hohen Haft- und Gleitreibwert
  - Reibpaarung 2: metallischer Lagerbolzen – Nabe WPC-Rad  
→ Zielstellung: geringer Verschleiß bei geringem Rollwiderstand durch geringeren Gleitreibwert
8. Erreichen eines einschätzbaren tribologischen Verhaltens und Reduzierung des Verschleißes über die gesamte Lebensdauer hinweg
  9. Erhöhung der Lebensdauer gegenüber Rädern nach dem Stand der Technik.
  10. Erhöhung der thermischen Stabilität im Dauereinsatz gegenüber Rädern nach dem Stand der Technik.
  11. Bestimmen der Einsatzgrenzen des Demonstrator-WPC-Rades in Bezug auf mechanische und tribologische Belastungen im Dauerlauf (Labortest) im Vergleich zum Stand der Technik.
  12. Realisierung eines Demonstrator-Rades komplett aus WPC bestehend, mit ( $l/d = 40/84 \approx 1/2$ ), für Belastungen bis 150kg (ca. 1.500N). Mit diesem Demonstrator sollen erste Erfahrungen für die skalierbare Konstruktion bis 1.500kg (ca. 15.000N) erarbeitet werden, um die Leistungsfähigkeit der WPC-Bauweise besser einschätzen zu können.

## 2.2 Stand der Technik

Räder und Rollen (vgl. Abb. 1) aus Kunststoff werden häufig in Mehrkomponentenbauweise gefertigt. Dabei unterstützen Einsätze aus Metall (Stahl, Grauguss, Sphäroguss, Aluminiumdruckguss die Tragfähigkeit der Kunststoffnabe im Bereich des Lagerbolzens. [3] Für ein günstiges tribologisches Verhalten der Reibpaarung Boden-Rad wird häufig eine Kunststoffbandage aus einem tribologisch vorteilhaften Material verwendet. Die polymeren Komponenten der Räder und Rollen bestehen vorwiegend aus den Kunststoffen PA, PA, PUR sowie PP und POM. Es werden häufig Spritzgussbauteile verwendet. Einfachere Varianten werden im Gießverfahren (z. B. PA-Guss) gefertigt. Spritzgussbauteile aus WPC sind mit einem maximalen Holzanteil von ca. 50mass% umsetzbar. [5]

Räder aus WPC werden bereits als Nischenprodukt für Gartenmöbel und Spielzeuge vermarktet. [4] Neben der Formstabilität bis 120°C wird auch von einem sehr guten Abrasionsverhalten ausgegangen.[4] Bei größerem Raddurchmesser liegt der Grenzlastbereich der Räder bei ca. 25kg (ca. 250N). WPC unterliegen der thermischen Alterung. [6]

## 3 Umsetzung

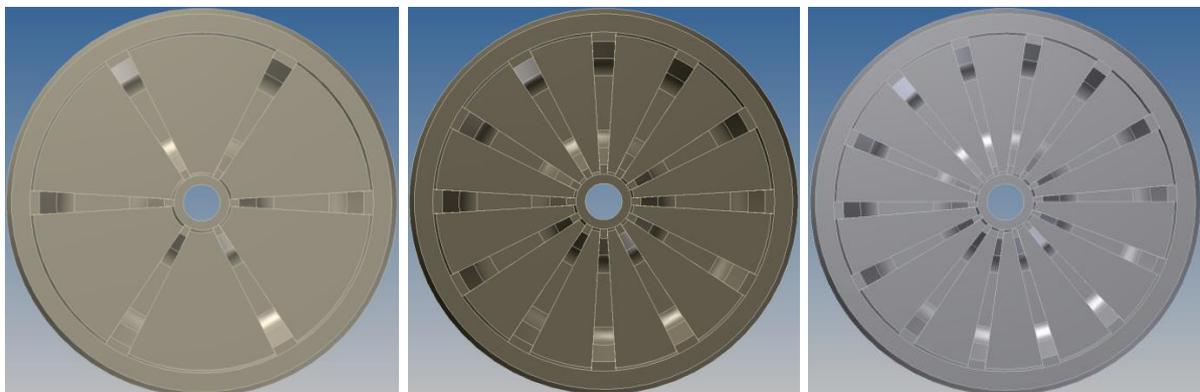
### 3.1.1 Konzept zur Konstruktion

Aufbauend auf den Erfahrungen zur Entwicklung eines kompletten Trag- und Gleitprofils aus WPC für ein Hängesystem (vgl. [1]) und dem Stand der Technik aus Kapitel 2.2, wurde davon ausgegangen, dass sich die tribologischen und mechanischen Vorteile des Werkstoffes WPC in einem Rad nutzen lassen.

Für das konstruktive Konzept des Rades wurden folgende Bedingungen festgelegt.

1. Der Außendurchmesser des Rades beträgt 84mm in der Mitte. Die Laufflächen fallen schräg um  $3,3^\circ$  nach außen hin ab, so dass sich eine trapezförmige Lauffläche bzw. ein dachartiges Laufprofil ergibt.
2. Die Radbreite beträgt 40mm.
3. Für das WPC-Rad wurden Spritzgussvarianten für das Ein- und Zweikomponentenverfahren angestrebt. Beim Zweikomponentenverfahren (2K-Verfahren) wurde für den Außenbereich des Rades inklusive dessen Lauffläche eine mit Recycling-Gummi angereicherte WPC-Rezeptur oder ein WPC mit Anteilen Thermoplastischen Elastomers (TPE) in einer Schichtdicke von 4,5mm angedacht.
4. Aus Punkt 1 und 3 resultiert die Radnabe mit einem Durchmesser von 75mm. Für sie wurde ein WPC mit maximalem Füllgrad vorgesehen, um maximale mechanisch Kennwerte des Rades zu ermöglichen.
5. Der Durchmesser des Bolzens im Inneren der Nabe beträgt 8mm.
6. Beim Einkomponentenverfahren (1K-Verfahren) wurde das Konzept der Nabe aus dem 2K-Verfahren für das ganze WPC-Rad übernommen. Der Außendurchmesser der Radnabe beträgt deshalb von 75mm statt 84mm.
7. Die Geometrie sollte für weitere Baugrößen mittels Baureihenentwicklung skalierbar sein.

Für beide Verarbeitungsvarianten wurde die Radnabe mit Speichen versehen, um die Bauteilsteifigkeit des Rades zu steigern. Abb. 2 zeigt verschiedene konstruktive Varianten des WPC-Rades mit verschiedener Anzahl an Speichen.



a) 6 Speichen

b) 12 Speichen

c) 14 Speichen

Abb. 2: Konstruktive Varianten des WPC-Rades mit variabler Anzahl von Speichen

Die messbare Bauteilverformung des Rades bei praxisrelevanter Lasteinleitung resultiert vordergründig aus:

1. der Abplattung im Bereich der lokalen Kontaktzone der Lauffläche mit dem Bodenbelag.
2. der Verformung aus der Lochleibungsbeanspruchung im Kontaktbereich des Bolzens mit der Radnabe.
3. der Verformung, die eine Geometrieänderung des Rades von rund zu oval bewirkt. Dadurch erhöhen sich der Rollwiderstand des Rades und die Walkarbeit. Ein Teil dieser Arbeit wird dissipiert, und damit das Rad erwärmt.

Die Versteifung der Radkonstruktion durch Speichen, wie in Abb. 2 dargestellt, soll die Bauteilverformungen aus der Lochleibungsbeanspruchung und der Geometrieänderung reduzieren. Auf die Verformung durch Abplattung besteht ein geringer Einfluss.

Für den technischen Vergleich verschiedener Räder wurden die Bauteilsteifigkeit, die Verformung bei der Lastgrenze von 1.500N und die maximale Belastungskraft im statischen Lastfall als mechanische Kennwerte zur Evaluierung definiert.

Der Entwicklungsschwerpunkt für das tribologische Verhalten des Rades wurde auf die Reibpaarung 1: Bodenbelag - WPC-Rad im Außenbereich des Rades gelegt. Durch den 2K-Spritzguß ist die dazu notwendige Funktionstrennung für die tribologischen Randbedingungen in der Radkonstruktion möglich. Für eine erste Bewertung des tribologischen Verhaltens wurden Laborversuche gegen einen Bodenbelag aus Stahl festgelegt. Als tribologisches Bewertungskriterium wurde der Radverschleiß im Außenbereich des Rades durch Pittigbildung definiert. Für die Reibpaarung 2: metallischer Lagerbolzen – Nabe WPC-Rad wurde aufbauend auf dem Stand der Technik (vgl. [7]) von einem technisch vorteilhaften tribologischen Verhalten bei WPC ausgegangen. Eine detaillierte Analyse dieses tribologischen Verhaltens war im zweiten Schritt des Konzeptes vorgesehen.

Für eine erste Einschätzung der Praxistauglichkeit wurden die Dimensionsstabilität und Dauergebrauchsfähigkeit, gekennzeichnet durch eine vierwöchige Wasserlagerung bei Raumtemperatur (RT) und eine thermische Beanspruchung bei 100°C über vier Wochen, angedacht.

### 3.1.2 Materialentwicklung und Materialprüfung

Aufbauend auf die Erfahrungen aus [1] und [3] und dem Stand der Technik zum Spritzguss von WPC wurden drei Rezepturen mit PP (Polypropylen)- Matrix entwickelt. Es resultierte für:

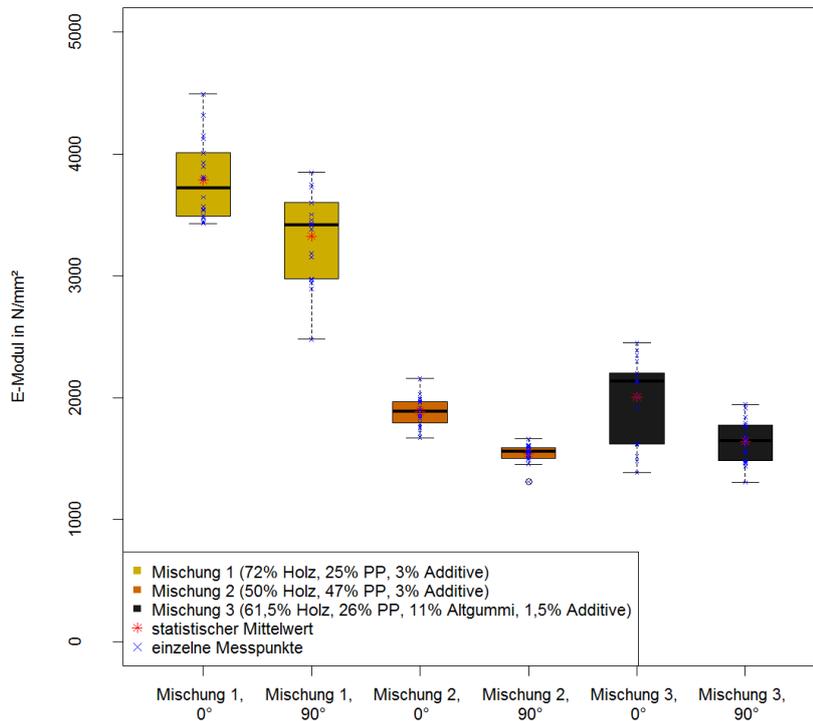
- Mischung 1: 72mass% Holz / 25mass% PP / 3mass% Additiv
- Mischung 2: 50mass% Holz / 47mass% PP / 3mass% Additiv
- Mischung 3: 61,5mass% Holz / 26mass% PP / 11mass% Altgummi / 1,5mass% Additiv

Diese drei Materialmischungen wurden bemustert und Platten mit Zentralanguss hergestellt. Aus diesen Platten wurden Proben für Biege- und Druckversuche entnommen. Dabei wurde die Ausrichtung der Proben in längs (0°) und quer (90°) unterschieden. Die Probenentnahme orientierte sich am tatsächlich auftretenden Schmelzefluss und der damit einhergehenden Orientierung der Füllstoffpartikel beim Spritzgießen. Die 0°-Proben wurden aus der Längsachse, mittig der langen Seite der Platten und die 90°-Proben senkrecht dazu, am Rand, entnommen. Die Materialfeuchten wurden mittels Darrtrockenverfahren bestimmt.

Für die Auswertung wurden die Messreihen als Standardboxplot mit 1,5 x Interquartilsrange (IQR) genutzt. Und dazu die Mittelwerte (roter Stern) und die einzelnen Messwerte (blaues Kreuz) angegeben.

Bei der Auswertung wurden die Einflüsse aus der Prüfmaschine mittels Maschinenkennlinie aus der Verformung korrigiert.

### Vergleich der Biege-E-Moduln hinsichtlich Spritzgussrichtung und Materialmischung



### Vergleich der berechneten Biegefestigkeiten hinsichtlich Spritzgussrichtung und Materialmischung

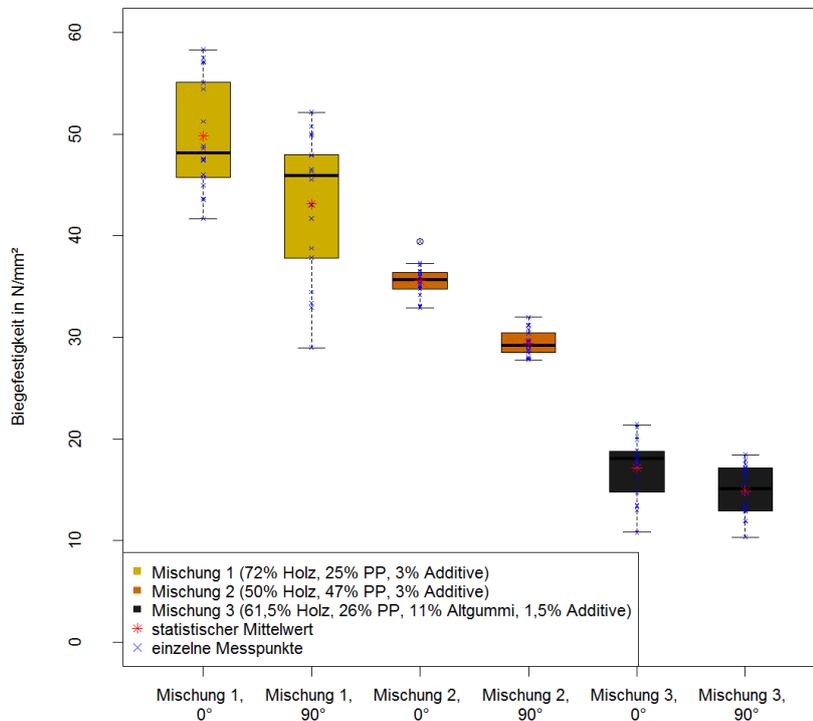


Abb. 3: Dreipunkt-Biege-E-Moduln und Biegefestigkeiten der WPC-Rezepturen

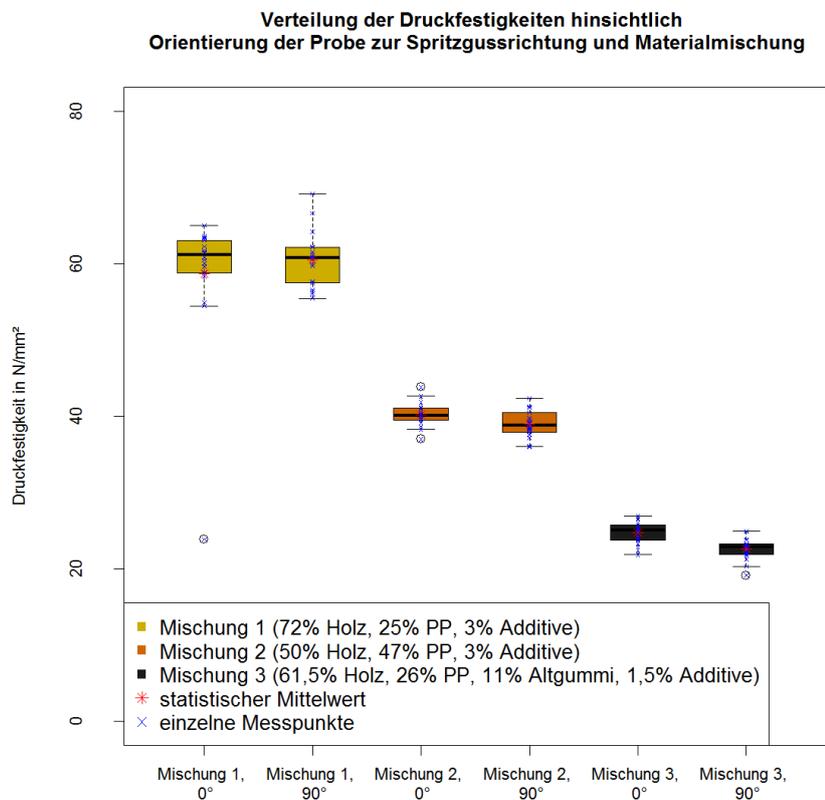
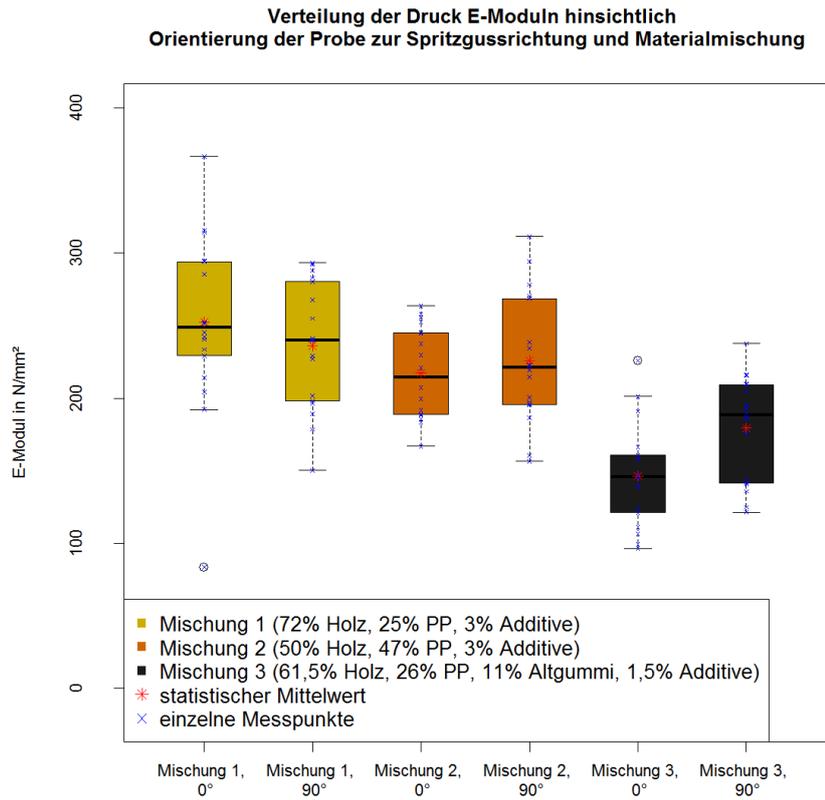


Abb. 4: Druck-E-Moduln und Druckfestigkeiten der WPC-Rezepturen

Der Dreipunktbiegeversuch wurde in Anlehnung an DIN 178, mit einer Prüfgeschwindigkeit von 2mm/min, bei einer Stützweite von 60mm durchgeführt. Die Probengeometrie betrug: Länge / Breite / Dicke = 80mm / 10mm / 3mm. Die Lasteinleitung erfolgte in Dickenrichtung (Plattenbelastung). Die Materialfeuchten resultierten für Mischung 1 zu:  $3,45 \pm 0,2\%$ , für Mischung 2 zu:  $1,6 \pm 0,1\%$  und für Mischung 3 zu:  $3,45 \pm 0,08\%$ . Abb. 3 stellt den Dreipunkt-Biege-E-Modul und die Bruchspannung (lineares Modell) mit Schubeinfluss vergleichend dar.

Der Druckversuch wurde nicht normkonform durchgeführt, weil die Druckfestigkeit und der Druck-E-Modul an einer jeweils identischen Probe, aus einem Versuch bestimmt wurden. Die Versuchsgeschwindigkeit wurde mit 1 mm /min festgelegt. Die Probengeometrie betrug: Länge / Breite / Dicke = 40mm / 5mm / 3mm. Die Lasteinleitung erfolgte in Breitenrichtung (Scheibenbelastung). Die Materialfeuchten resultierten für Mischung 1 zu:  $3,9 \pm 1,2\%$ , für Mischung 2 zu:  $1,6 \pm 0,1\%$  und für Mischung 3 zu:  $3,3 \pm 0,6\%$ . Abb. 4 stellt den Druck-E-Modul und die Bruchspannung bei Druck (lineares Modell) vergleichend dar.

Die Mischung 1 und 2 wurden für die Bemusterung von WPC-Rädern übernommen.

Mischung 1, mit maximalem Holzanteil, ist nach dem Stand der Technik nicht zu einem Bauteil spritzgießbar. Aus ihr resultieren aber vermutlich hohe mechanische Eigenschaften im WPC-Rad. Mischung 2 ist zu einem Bauteil verarbeitbar, bei vermutlich geringeren mechanischen Eigenschaften des WPC-Rades

Bei Mischung 3 wurde der PP-Anteil auf 50mass% und der Anteil Recyclinggummi auf 10mass% reduziert. Der Holzanteil wurde auf 40mass% erhöht. Der Anteil Additiv wurde mit 1,5mass% auf die gesamte Grundmischung aus PP, Holz und Recyclinggummi bemessen. Durch die Veränderung der Mischung sollten die mechanischen Eigenschaften steigen und deren Verarbeitbarkeit zum Bauteil garantiert werden.

### 3.1.3 WPC-Radtypen

Es wurden vier Bemusterungen durchgeführt und vier verschiedene WPC-Radtypen hergestellt. Konstruktiv wurde die Speichendicke bei gleicher Speichenanzahl (vgl. Abb. 2: c) variiert. Dabei wurde das Wanddickenverhältnisse für den Spritzguss von WPC am konkreten Demonstratorbauteil des WPC-Rades in zwei Dicken untersucht. Durch die Bemusterung sollte festgestellt werden:

1. ob die „dicken Speichen“ praktisch mit hohem Füllgrad herstellbar sind.
2. in wie weit aus deutlich dickeren Speichen bessere mechanische Eigenschaften resultieren als aus „dünnen Speichen“, obwohl die Fehlerwahrscheinlichkeit für Lunker o. Ä. bei den dicken Speichen steigt.

Dazu wurde die angedachte 2K-Radgeometrie im 1K-Verfahren bemustert, ohne den Außendurchmesser des Rades zu erhöhen. Die resultierende Lauffläche ist dadurch sehr dünnwandig.

Die Materialmischungen wurden aus der Materialentwicklung in eine veränderte Darstellung übertragen. Die Angaben wurden um den Anteil des Additivs reduziert. Bei den WPC-Rädern erfolgte die Nomenklatur nach folgendem Schema: Holzanteil - Anteil Matrix (PP) – Anteil Recyclinggummi. Tabelle 1 fasst die bemusterten WPC-Radtypen in einer Übersicht zusammen.

Tabelle 1: Übersicht bemusterte WPC-Radtypen

Nr.	Materialmischungen	konstruktives Detail	Radtyp	Bemusterung
1	WPC 50-47-00, WPC 72-25-00	keine Speichen	1	1
2	WPC 50-40-10, WPC 50-47-00, WPC 72-25-00	dünne Speichen	2	2
3	WPC 50-47-00	dünne Speichen, Bandage aus TPE	2	2b (2K- Variante)
4	WPC 72-25-00	dicke Speichen	3	3
5	WPC 50-40-10, WPC 50-47-00,	dicke Speichen, Bandage aus TPE	4	3b (2K- Variante)
6	WPC 72-25-00	dicke Speichen	3	4

Abb. 5 zeigt die vier umgesetzten WPC-Radtypen. Im Spritzguss wurde im 1K und 2K-Verfahren einseitig und zentral angespritzt.



Abb. 5: WPC-Radtypen 1 bis 4 aus verschiedenen WPC-Rezepturen

Abb. 6 zeigt WPC-Räder aus dem 1K-Spritzguss mit sichtbarem Anguss an der Vorderseite.



Abb. 6: WPC-Radtyp 2 der 2-ten Bemusterung aus verschiedenen WPC-Rezepturen

Abb. 7 zeigt WPC-Räder aus dem 2K-Spritzguss. Durch das einseitige Anspritzen füllt sich die Vorderseite komplett mit der zweiten Komponente.



Abb. 7: WPC-Radtyp 4 der 3-ten Bemusterung mit TPE-Bandage aus verschiedenen WPC-Rezepturen – Darstellung von Vorderseite und Rückseite

Aus der Bemusterung wird deutlich, dass aus der Mischung mit 72 mass% Holzanteil ein WPC-Rad mit dicken Speichen im Spritzguss hergestellt werden kann. Auf der Lauffläche der Räder mit dicken Speichen, ohne Bandage sind in einigen Bereichen zwischen den Speichen helle Stellen erkennbar. Diese deuten auf Bindenähte und damit verbundene Inhomogenität des Materials in der Verarbeitung hin.

Die TPE Bandage des WPC-Rades (vgl. Abb.7) haftet auf der WPC-Nabe. Es gibt keine Ablöseerscheinungen nach der Fertigung. Eine Bandage aus WPC mit Altgummianteil konnte nicht umgesetzt werden.

Für die weitere Entwicklung des WPC-Rades im 1K- und 2K-Verfahren wurden sowohl das zweiseitige Anspritzen der Nabe auf der Vorder- und Rückseite, als auch das Anspritzen an mehreren Punkten der Lauffläche fokussiert.

Eine Bandage aus der Mischung mit Altgummi konnte nicht umgesetzt werden.

## 3.2 Versuche

### 3.2.1 Lagerungsversuch bei vergleichsweise extremen Klimaten

Die Analyse des WPC-Raddurchmessers nach vier wöchiger Wasserlagerung bei Raumtemperatur zeigte eine maximale Quellung von 1,4% bei einer Wasseraufnahme von maximal ca. 12%. Nach der Temperaturlagerung von 100°C über vier Wochen waren die Räder leicht verfärbt. Aus der Quellung des WPC-Rades lässt sich anwendungsabhängig eine Einschränkung der Dauergebrauchsfähigkeit für die Bauweise ableiten. Die Verfärbung nach der Temperaturbelastung ist technisch unbedenklich.

### 3.2.2 Statisch-mechanischer Druckversuch

Folgende Radvarianten wurden im statischen Druckversuch geprüft:

- PP\_100-00-00 (Referenzrad aus PP mit Kugellager aus Stahl und Lagerabdeckung bzw. Lasteinleitungsbereich des Bolzens in das Kugellager aus PP),
- WPC\_50-40-10 (Anteil von 50mass% Holz und 10mass% Altgummi),
- WPC\_50-47-00 (50mass% Holz),
- WPC\_72-25-00 (72mass% Holz, dünne Speichen),

- WPC\_72-25-40 (72mass% Holz, dicke Speichen),
- WPC\_72-25-4T (72mass% Holz, dicke Speichen, vier Wochen bei 100°C),
- WPC\_72-25-4W (72mass% Holz, dicke Speichen, vier Wochen im Wasser).

Beim Druckversuch erfolgte die anwendungsgerechte Lasteinleitung in die Nabe. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 1 mm/min. Es wurden fünf Proben pro Radvariante geprüft. Die Materialfeuchte der Räder ohne klimatische Lagerung wurde mittels Darrtrockenmethode materialunabhängig mit 3,72 +/- 0,09 % bestimmt. Die Räder der Wasserlagerung hatten eine Materialfeuchte von 15,72 +/- 0,09 %. Die Räder der Temperaturlagerung hatten eine Materialfeuchte von 0 %.

Abb. 8 zeigt die resultierenden Kraft-Verformungskurven aus dem Druckversuch der Räder. Der Versuch wurde bei 10.000N Kraftgrenze manuell gestoppt.

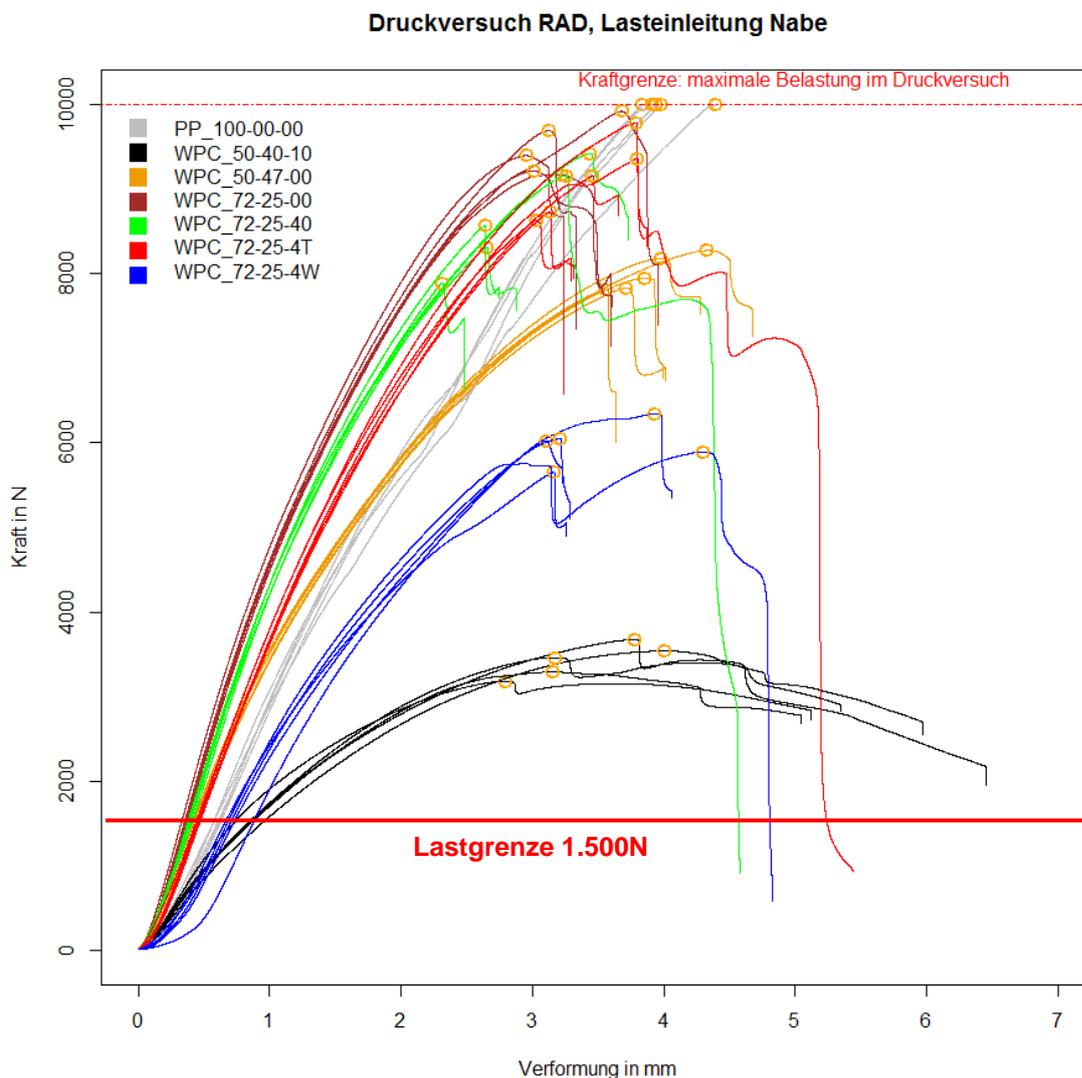


Abb. 8: Ermittelte Kraft-Verformungskurven verschiedener Räder aus PP und WPC

Abb. 8 zeigt, dass alle Räder die definierte Lastgrenze von 1500N (ca. 150kg) überschreiten aber nur die PP-Räder die Grenze bei 10.000N erreichen. Alle WPC-Räder versagen vorher. Die WPC-Räder mit den dünnen Speichen und 72mass% Holz (dunkelbraune Kurven) besitzen die größte Steifigkeit. Die Räder mit dicken

Speichen (grüne Kurven) liegen etwas darunter. Mit weiterem Abstand folgen die Räder aus Temperaturlagerung (rote Kurven). Diese sind bis ca. 4.000N Belastung vergleichbar mit den Rädern aus 50mass% Holz (orange Kurven). Die Räder aus PP (graue Kurven) besitzen eine deutlich reduzierte Steifigkeit. Diese werden von den WPC-Rädern aus der Wasserlagerung (blaue Kurven) und den WPC-Rädern mit Anteil Altgummi (schwarze Kurven) unterschritten.

Abb. 9 illustriert beispielhaft die weitere Auswertung des Kraft-Verformungsverlaufes. Es wurde die maximale Kraft, die Steifigkeit und die Verformung bei 1.500N (Lastgrenze, vgl. Kapitel 2.2.2, Punkt 12) bestimmt. Die gemessene Kurve (graue Kurve) wurde um die Maschinenkennlinie korrigiert, um nur die reale Verhalten des Rades (schwarze Kurve) zu nutzen. Das Maximum der Kraft und der Verformung dieser Kurve wird mit dem orangenen Kringel markiert. Die Lastgrenze von 1.500N mit resultierender Verformung wird durch den roten Kringel markiert. Die Bauteilsteifigkeit des Rades wird durch die grüne Gerade markiert. Deren Anstieg wird durch den blauen und grünen Kringel markiert. Der blaue Kringel, als erster Punkt für die Bestimmung der Bauteilsteifigkeit, ist der erste korrigierte Wert der Kraft-Verformungskurve (ca. 42N). Der grüne Kringel ist der 300-ste korrigierte Messpunkt. Er markiert den zweiten Punkt für die Bestimmung der Bauteilsteifigkeit. Er liegt ca. im Bereich bis ca. 0,25mm Gesamtverformung des Rades.

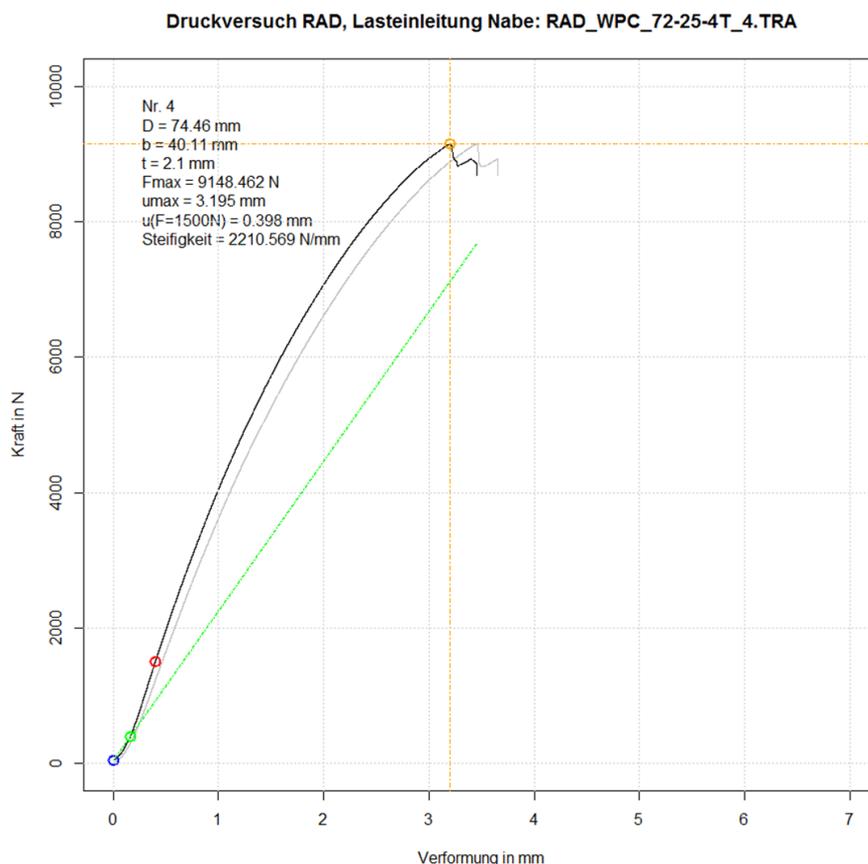


Abb. 9: Illustration der Auswertung des Druckversuches mittels ausgewählter Kraft-Verformungskurve eines WPC-Rades (72mass% Holz, nach Temperaturlagerung)

Die resultierenden Kennwerte sind in Abb. 10 zusammenfassend dargestellt.

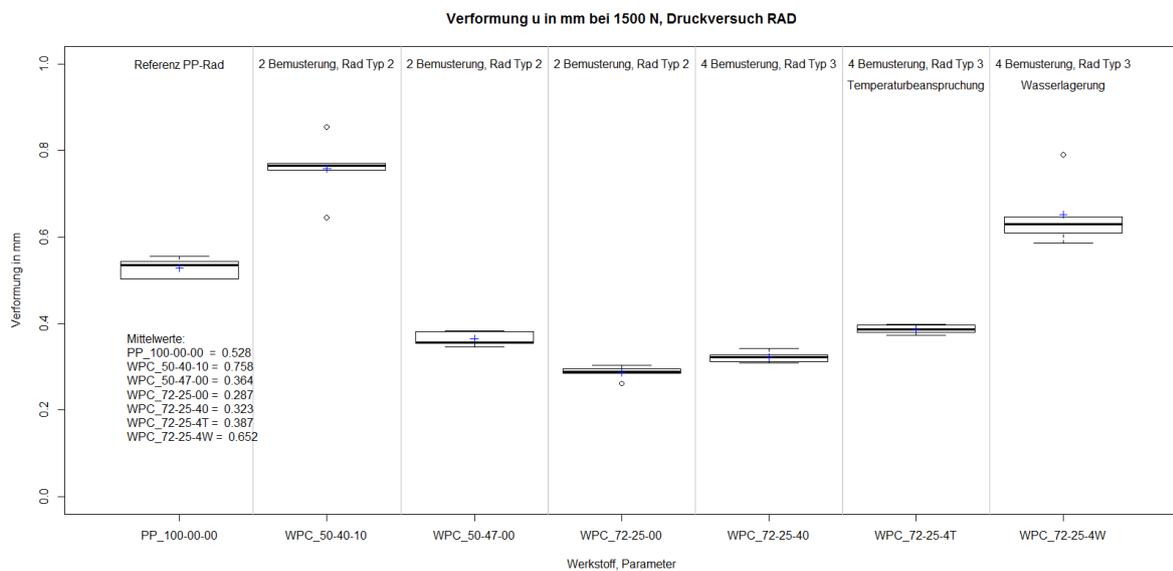
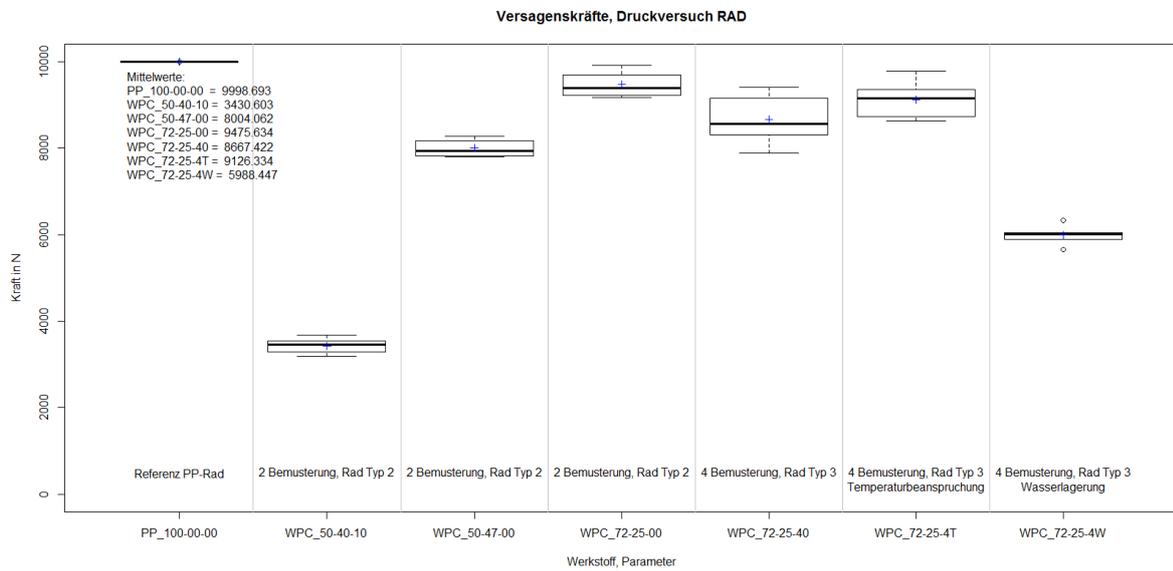
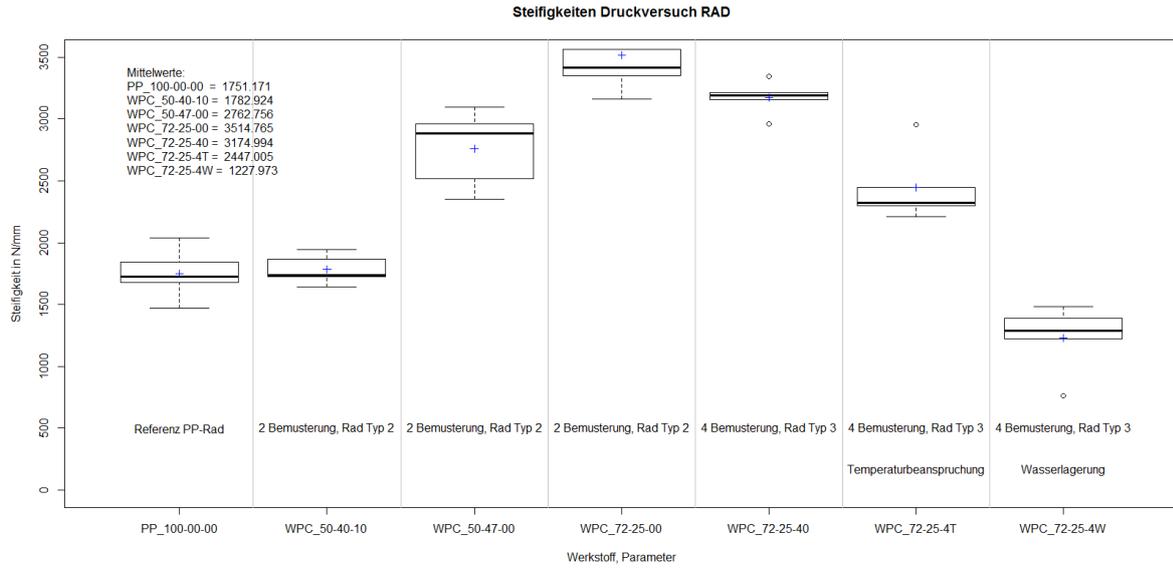


Abb. 10: Steifigkeiten, Versagenskräfte und Verformungen der Räder bei 1.500N im Druckversuch mit Krafteinleitung in die Nabe, n = 5, Mittelwert = blaue Kreuze

Abb. 10 untermauert die Aussagen zu Abb. 8. Die Versagenskräfte des PP-Referenzrades wurden von keinem WPC-Rad erreicht.

Die Steifigkeit des WPC-Rades mit Altgummianteil liegt auf dem Niveau des Referenzrades aus PP. Die Steifigkeit des WPC-Rades nach der Wasserlagerung liegt im Mittel bei ca. 70% der des Referenzrades. Die maximale Steifigkeit des WPC-Rades mit den dünnen Speichen beträgt im Vergleich zum Referenzrad ca. 200%. Das WPC-Rad mit den dicken Speichen liegt bei ca. 182% der Referenz. Nach einer Temperaturlagerung beträgt die Steifigkeit 141% bezgl. der Referenz. WPC-Räder mit 50mass% Holzanteil sind im Mittel bei 159% der Steifigkeit des PP-Rades.

Die Verformung der Räder bei 1.500N ist bezüglich des Referenzrades aus PP beim WPC-Rad mit Altgummianteil mit ca. 144% am größten. Das Rad mit 72mass% Holzanteil und dünnen Speichen liegt bei 54% der Verformung der PP-Referenz. Bei 72mass% und dicken Speichen resultieren 61% der Referenzverformung. Nach einer Temperaturlagerung beträgt die Verformung 73%, bei Wasserlagerung 124% bezogen auf die Referenz. WPC-Räder mit 50mass% Holzanteil haben im Mittel 69% der Referenzverformung.

Für den Abfall der Steifigkeit zwischen den verschiedenen Speichendicken wurden, wie bereits in der Beschreibung zu Abb. 5 - 7 aufgeführt, Bindenähte vermutet. Abb. 11 zeigt die Bestätigung der Vermutung mittels mikroskopischer Analyse.

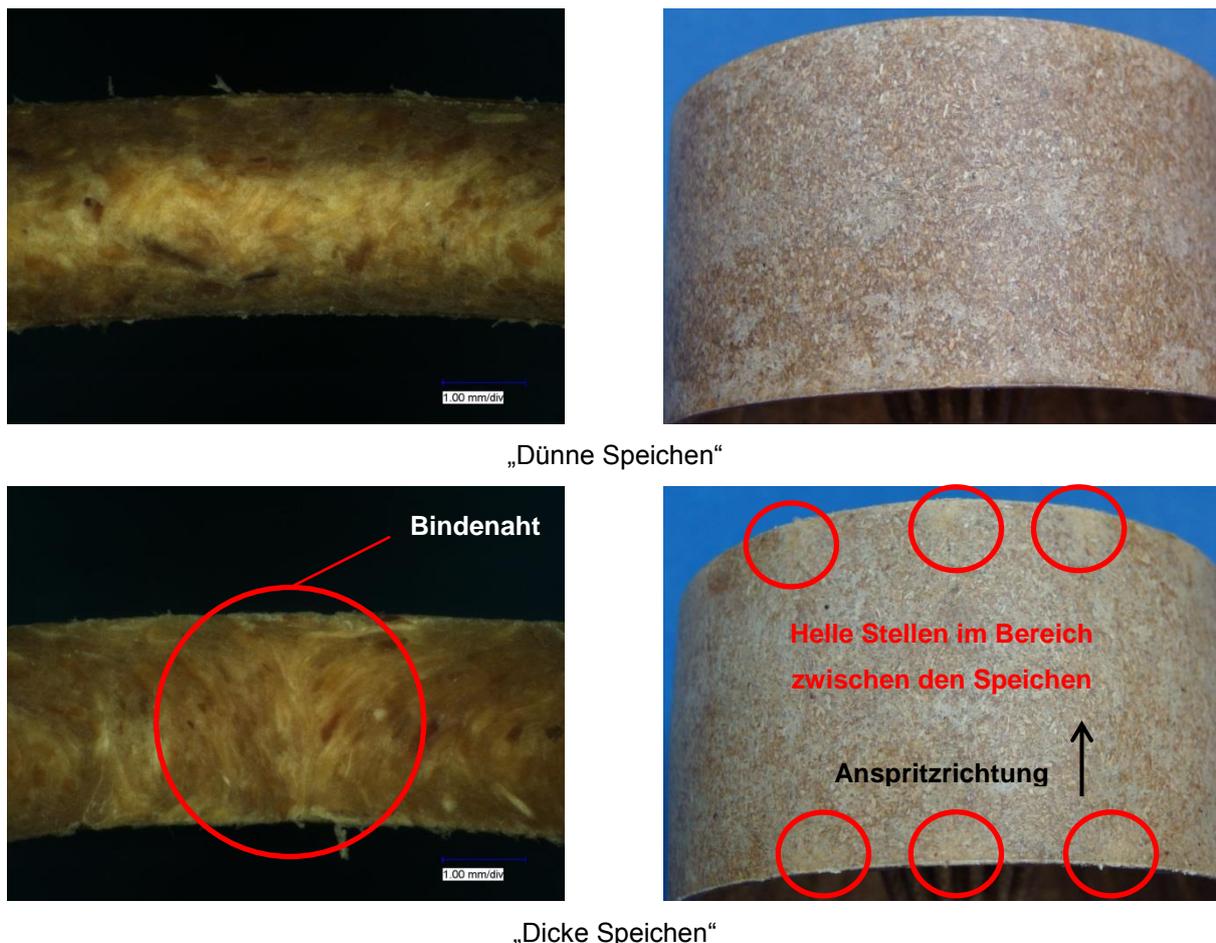


Abb. 11: Draufsicht und Querschnitt der Lauffläche des WPC-Radtypen 2 und 3 mit 72mass% Holzanteil bei verschiedener Speichendicke

Alle Räder wurden ohne Bandage geprüft, um eine bessere Vergleichbarkeit untereinander zu gewährleisten. Es ist zu erwarten, dass bei Verwendung einer Bandage eine Steifigkeitsreduzierung durch größere Abplattung der Lauffläche bei Belastung erfolgt.

Alle WPC-Räder zeigten ein deutliches Versagen durch Abplattung des Radkörpers und lochleibungsbedingten Nabenbruch im Lasteinleitungsbereich. Dabei ist in eine Rissbildung parallel und senkrecht zur Krafrichtung zu unterscheiden. Das lochleibungsbedingte Versagen in der Nabe der PP Räder zeichnete sich vordergründig als duktile Verformung ab. Die Restverformung der Lauffläche bei den PP-Rädern war im Gegensatz zu den WPC-Rädern kaum sichtbar.

### 3.2.3 Kontaktmechanische Modellierung

Abb. 12 zeigt die kontaktmechanische Modellierung des WPC-Rades vom Radtyp 2 (dünne Speichen) mit 72mass% Holzanteil, um die Kraft-Verformungskurve analytisch zu beschreiben. Als Ansatz wurde ein Modell für die Abplattung von Kunststoffrädern (nach Kunz, [8]) verwendet und der Bauteilreaktion der WPC-Räder der ersten Bemusterung mit 72mass% Holzanteil gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass sowohl mit dem Ansatz nach Kunz als auch mit einer Modifikation dessen keine ausreichend genauen Ergebnisse resultieren. Die analytische Beschreibung von Kunz ist ursprünglich nur für die Abplattung von Rädern gedacht. Die Abbildung der kompletten Bauteilreaktion eines WPC-Rades ist damit nicht exakt genug möglich.

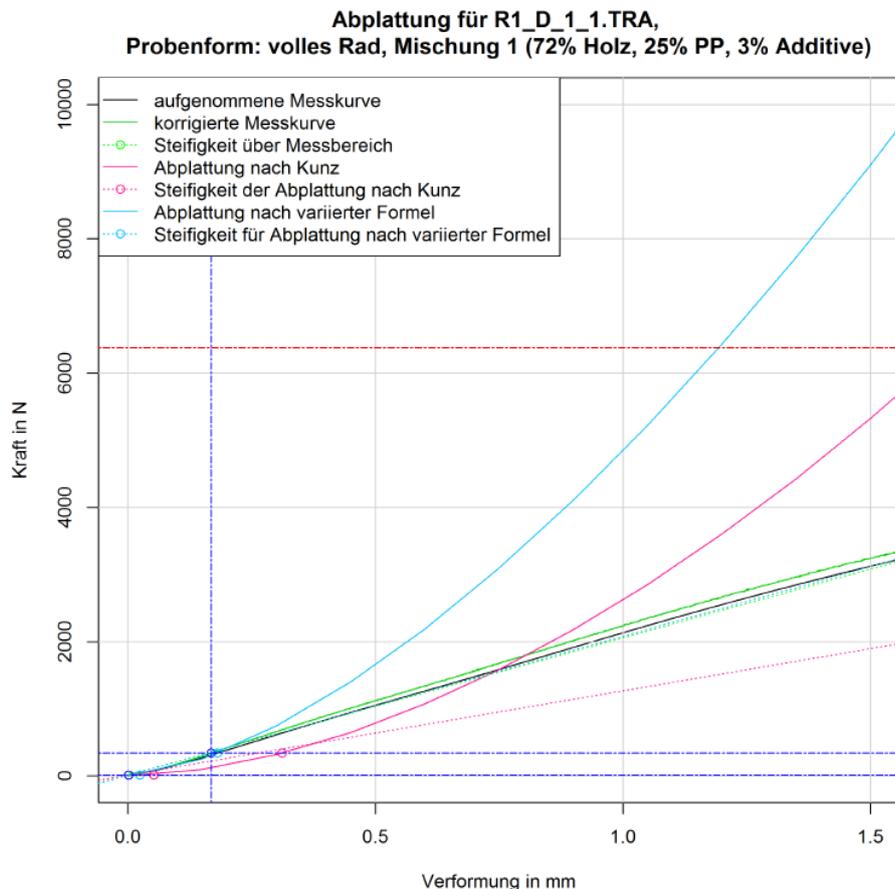


Abb. 12: Kontaktmechanische Modellierung der Abplattung von Radtyp 2

### 3.2.4 Tribologischer Dauerlauftest auf einem Rollenprüfstand

Für eine Bewertung des tribologischen Verhaltens wurden Dauerlaufversuche auf einem Rollenprüfstand (vgl. Abb. 13) nach Putzke [9] im Labormaßstab durchgeführt.

Es wurden folgende Räder in vier verschiedenen Versuchsgruppen geprüft:

- Referenzrädern aus PP, Versuchsgruppe: PP
- WPC-Rädern, Typ 3 mit Bandage aus TPE (3. Bemusterung, dicke, Speichen, 50mass% Holzanteil): Versuchsgruppe: WPC-TPE
- zwei Chargen WPC-Räder ohne Bandage (3. Bemusterung, dicke Speichen, 72mass% Holzanteil)
  - Charge 1 ca. 8 Wochen nach der Verarbeitung geprüft, Umgebungstemperatur ca. 30°C Versuchsgruppe: WPC-Charge 1
  - Charge 2 ca. 20 Wochen nach der Verarbeitung geprüft, Umgebungstemperatur ca. 20°C, Versuchsgruppe: WPC-Charge 2

Die Räder wurden durch einen Stahlbolzen in einer gabelförmigen Halterung am Prüfstand fixiert und mit 750N Normalkraft belastet. Sie rollten oszillierend mit einer Amplitude von 0,9m und einer mittleren Geschwindigkeit von 0,5m/s auf einer glatten Stahlplatte ab. Durch den im Vergleich zur Amplitude geringeren Montageabstand kam es zu anteiligen Überschneidungen der Abrollwege der einzelnen Räder auf der Lauffläche. Probe 1 konnte dadurch ggf. Probe 2 beeinflussen. Die Räder der Versuchsgruppen PP, WPC-TPE und WPC-Charge 1 wurden gemischt geprüft, d. h. es wurden jeweils Proben aus verschiedenen Versuchsgruppen auf dem Versuchstand montiert

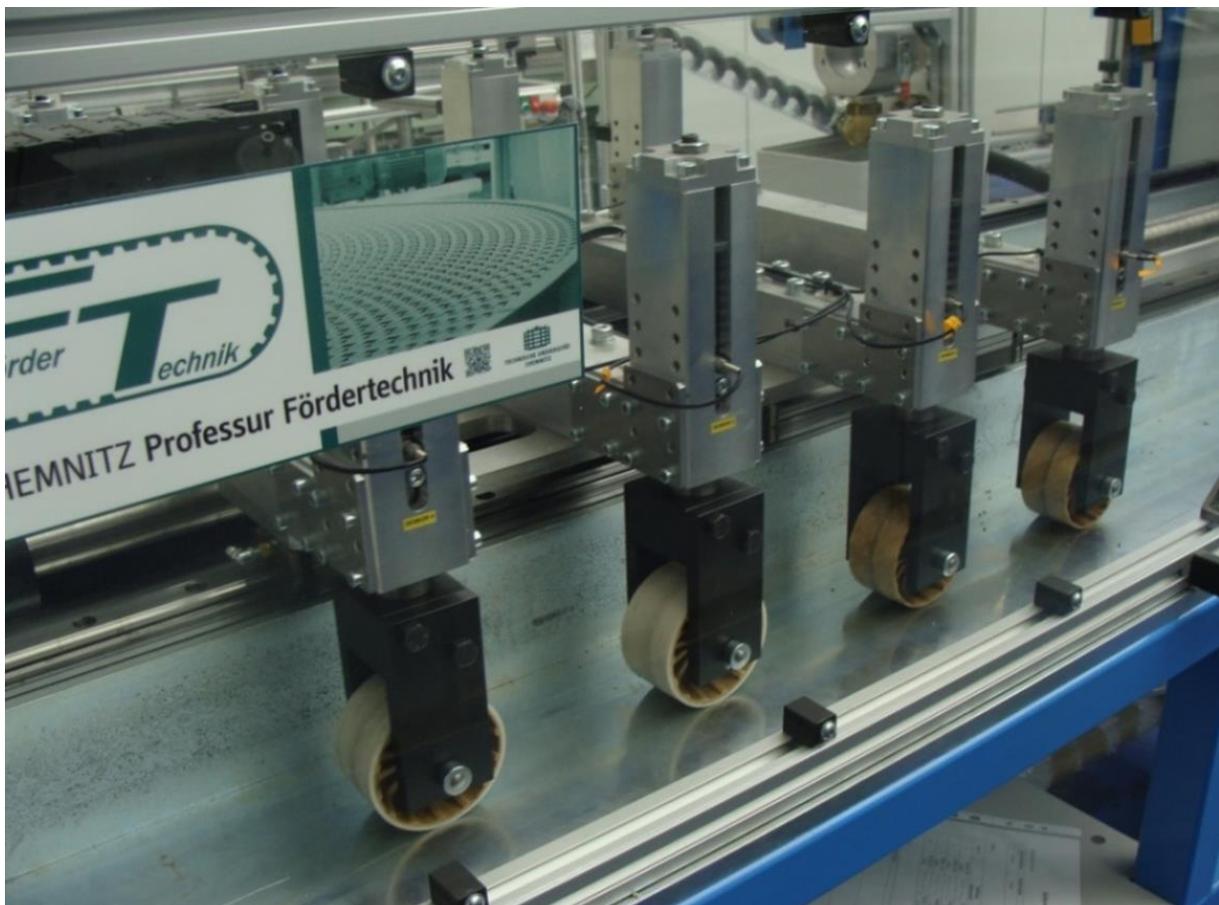


Abb. 13: Dauerlauftest von WPC-Rädern auf dem Rollenprüfstand nach Putzke [9]

Als tribologisches Bewertungskriterium wurde das totale Materialversagen in der Lauffläche der Räder durch Pittingbildung definiert. Leichter Abrieb, Verfärbungen oder Verschleißspuren wurden als zulässig angesehen. Der Verschleiß wurde turnusmäßig geprüft.

Die Versuchsgruppen hatten eine unterschiedliche Probenanzahl. Für PP wurde mit  $n = 3$ , für WPC-TPE mit  $n = 2$  und für die Gruppen WPC-Charge 1 und 2 mit  $n = 10$  geprüft. Abb. 14 zeigt beispielhafte Schadensbilder die den Versuchsabbruch bedingten.



a) Referenz PP: 18084m

b) WPC-TPE: 3990m

c) WPC-Charge 1: 16831m

Abb. 14: Verschleißbilder verschiedener Räder nach dem Versuchsende

Die Bandage aus TPE versagte bereits nach sehr geringen Laufweg, indem sie sich großflächig vom WPC-Rad ablöste (vgl. Abb. 14. b). Das TPE der Bandage wurde thermisch überlastet. Die PP-Räder und die Räder aus WPC versagten durch Pittingbildung mit daraus resultierendem Abrieb.

Abb. 15 fasst die ermittelten Laufwege zusammen. Die Ergebnisse streuen stark.

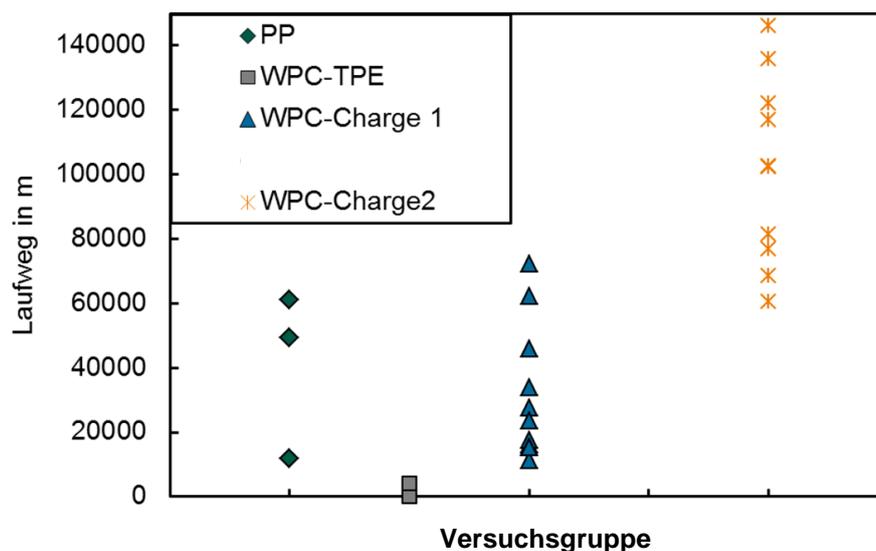


Abb. 15: Ergebnisse des Dauerlauftestes von verschiedenen Rädern

Für die Streuungen werden drei mögliche Gründe vermutet:

- Die turnusmäßige Überprüfung des Verschleißes. Kritische Schäden an den Rädern wurden deshalb ggf. erst nach größeren Laufwegen bemerkt.
- Die anteilige Überschneidungen der Abrollwege einzelnen Proben während des Dauerversuches. Dadurch wird ggf. der Abrieb von Probe 1 durch Probe 2 aufgesammelt.
- Den wechselnden klimatischen Bedingungen während des Versuches. Die Außentemperatur bei der Prüfung von Versuchsgruppe PP, WPC-TPE und WPC-Charge 1 war im Vergleich zu WPC-Charge 2 um ca. 10°C im Mittel höher. Die Räder der WPC-Charge 2 erwärmten sich deshalb langsamer während des Versuches. Dadurch wird die thermische Belastung reduziert und damit die Haltbarkeit bzw. die Laufwege erhöht.

Abb. 15 zeigt, dass nur die Versuchsgruppe WPC-Charge 2 im Mittel größere Laufwege erreicht als das PP-Rad. Es wird vermutet, dass vordergründig der bereits beschriebene Temperatureffekt dafür verantwortlich ist und die Lagerzeit von untergeordneter Bedeutung ist. Im Ergebnis des Dauerlauftestes wird von einer vergleichbaren technischen Eignung bei rollender Beanspruchung ausgegangen.

#### **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Die statisch-mechanischen Versuche haben gezeigt, dass die WPC-Räder mit 50 und 72mass% Holz steifer sind und sich weniger verformen als die Referenz aus PP mit Kugellager aus Stahl. Das Ziel die maximale Belastungskraft der WPC-Räder über die Referenz zu steigern wurde nicht erreicht. Die WPC-Räder mit einem Anteil Altgummi sind technisch schlechter als die Referenz. Die dafür verwendete Rezeptur muss grundlegend weiterentwickelt werden.

Es wurde festgestellt, dass eine Wasserlagerung der WPC-Räder mit 72mass% Holzanteil kritischer für die mechanischen Kennwerte ist als die Temperaturlagerung bei 100°C.

Im Dauerlauftest konnten keine Vorteile für die Räder in WPC-Bauweise festgestellt werden. Der Einfluss aus klimatischen Randbedingungen ist zu groß für eine eindeutige Aussage. Die aus der Temperaturveränderung resultierende veränderte thermische Alterung scheint einen zu großen Einfluss zu besitzen.

Aus dem Temperatureinfluss beim Dauerversuch und der Temperaturlagerung im statischen Versuch wird deutlich, dass thermische Belastungen des WPC einen großen Einfluss auf die Material- und Bauteileigenschaften über die Zeit besitzen. Die gilt unabhängig von WPC-Rädern auch für andere technische Zusammenhänge, z. B. Trenn- und Fügeprozesse (vgl. [10]). Zukünftige Materialentwicklungen zur Anwendung in Rädern sollten die thermische Alterung des WPC deutlich reduzieren.

Die Reduzierung der mechanischen Kennwerte aufgrund von Bindenähten bei Radvarianten mit Holzanteil von 72mass% und dicken Speichen ist messbar. Durch eine Kombination aus verbesserter Rezeptur und Veränderungen im Spritzgießprozess wird davon ausgegangen, dass WPC-Räder mit hohem Holzanteil ohne Fehlstellen umsetzbar sind. Dadurch werden die mechanischen Eigenschaften des WPC-Rades weiter verbessert.

Für die Kombination aus WPC und TPE zum Einsatz als Bandage im Außenbereich des WPC-Rades besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

## 5 Dank

Die Verfasser bedanken sich bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung der Forschungsarbeiten im Projekt: Erhöhung der Tragfähigkeit von Rädern für Fördersysteme durch Einsatz von WPC im Zeitraum 08/2012 bis 07/2014.

Weiterer Dank gilt den Projektpartnern, der Carl Müller GmbH & Co. KG, Lüdenscheid (Spritzguss, Werkzeugentwicklung) und der Weroform GmbH, Schwäbisch Hall (Materialentwicklung) für die Zusammenarbeit. Besonderer Dank gilt Frau Dipl.-Ing. C. Schubert für die Anregungen, die konstruktive Kritik, die Expertise zur thermischen Alterung und die Unterstützung bei der Mikroskopie.

## 6 Literatur

- [1] Eichhorn, S. et al.: Entwicklung eines kompletten Trag- und Gleitprofils aus WPC (Wood Polymer Composite) für ein Hängefördersystem, Tagungsband Technomer 2013, 23. Fachtagung über die Verarbeitung und Anwendung von Polymeren, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-129718>, S. 1
- [2] Eichhorn, S. et al.: Nachhaltigkeit und Energieeffizienz in der Intralogistik durch neue Systemkomponenten, Tagungsband "Intelligent vernetzte Arbeits- und Fabrikssysteme - VPP2012 - Vernetzt planen und Produzieren & Symposium Wissenschaft und Praxis", S. 239-248, ISSN 0947-2495, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-99946> S., S. 2
- [3] Wehking, K.-H. et al.: Abschlussbericht Forschungsprojekt InnoRad – Erhöhung der Lebensdauer von Rädern und Rollen aus Polyurethan
- [4] Kuhn, J.: Uralan Kunststoffverarbeitung GmbH, ECURLAN: <http://www.uralan.de/de/ecurlan.aspx>, letzter Zugriff 09/2015
- [5] Cathrin Schröder (2013): Verfahrenstechnische Entwicklung zum Hinterspritzen von Echtholz furnieren mit Wood-Plastic-Composite (WPC), Dissertation, Universität Paderborn, ISBN 978-3-8440-2188-8, Shaker Verlag, S. 12
- [6] Specht Klaus (2007): Holz- und hanffaserverstärktes Polypropylen in der Spritzgießverarbeitung Faseraufschluss- und Verbundaufbereitungsverfahren, Haftvermittler, Alterungsverhalten. Dissertation, Universität Kassel, S.154 - 156
- [7] Eichhorn, S.; Clauß, B., Charakterisierende Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten von WPC 21. Technomer - Fachtagung über die Verarbeitung und Anwendung von Polymeren, 12. bis 14. November 2009. - Chemnitz: TU, Hausdruckerei, 2009, Seite 57, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-200901840>
- [8] Kunz, Johannes (2010): Kunststoff-Laufmantelrollen und ihre kontaktmechanische Auslegung. IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung, Rapperswill
- [9] Putzke, Enrico et al. (2013): Anwendungsgerechte Gestaltung und Prüfung Kunststoffrollen, TECHNOMER, 23. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren, 14.-15. November 2013, Chemnitz, S. 71
- [10] C. Schubert, A. Rüppel, K. Nendel, H-P. Heim (2015): Beständigkeit von Gleich- und Mischmaterialschweißverbindungen aus Wood Plastic Composite (WPC) S. holztechnologie 56 (2015) Ausgabe 6, 24 - 30