

Watersorption - Wasseraufnahme von Wood Plastic Composites

C. Burgstaller

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

43/2011

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Watersorption - Wasseraufnahme von Wood Plastic Composites

Dr. Christoph Burgstaller,
B. Priller, BSc, Ing. A. Gösweiner, Ing. H. Ladner,
Ing. K. Moser, C. Hainberger, F. Hartl, C. Maticka
Transfercenter für Kunststofftechnik GmbH (TCKT)

Dr. Martin Sonntag,
Dr. K. Fischer, Dr. S. Schmidt, DI (FH) P. Glaser,
DI (FH) C. Adler, S. Ikrai, S. Marx-Guschall
Rehau AG

Wels, Mai 2011

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT. Sie wurde im Jahr 2000 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT sollen durch Forschung und Technologieentwicklung innovative Technologiesprünge mit hohem Marktpotential initiiert und realisiert werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in FABRIK DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse – seien es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Homepage www.FABRIKderZukunft.at und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Methodik.....	10
2.1. Materialien	12
2.2. Holzbehandlung.....	13
2.3. Holzcharakterisierung	13
2.4. Verbundherstellung.....	14
2.5. Verbundcharakterisierung.....	15
3. Ergebnisse des Projektes und Interpretation	17
3.1. Wassertransportverhalten in WPC.....	17
3.2. Grundlegende Zusammenhänge zwischen Rezeptur und Wasseraufnahme	19
3.3. Behandlungen zur Verringerung der Wasseraufnahme	26
3.4. Behandlungen der Holzpartikel zur Wasseraufnahmereduktion und vergleichende Bewertung	35
4. Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen	36
4.1. Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie.....	37
4.2. Ausblick und Empfehlungen	40
5. Literaturverzeichnis	41
6. Anhang.....	42

Kurzfassung

Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (Wood Plastic Composites, WPC) sind Verbunde, die aus Holzpartikeln, einer thermoplastisch verarbeitbaren Matrix und Additiven bestehen. Diese Materialklasse, welche in den letzten Jahren zunehmende Aufmerksamkeit von Industrie und Forschung erhalten hat, weist Vorteile hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, der Verarbeitung und der Kosten auf. Ein gravierender Nachteil von WPC ist es jedoch, dass durch den Celluloseanteil Wasser in den Verbund aufgenommen wird, was sich negativ auf die Dimensionsstabilität, die mechanischen Eigenschaften und die Beständigkeit gegenüber biologischem Befall auswirkt.

Die derzeit angewandten Methoden zur Unterdrückung der Wasseraufnahme, nämlich Beschichten oder Coaten der Bauteile, sowie die chemische Modifizierung der Holzpartikel mittels Acetylierung, weisen Nachteile auf, welche den vermehrten Einsatz von WPC in diversen Anwendungen verhindern. Das Beschichten oder Lackieren versiegelt einen Bauteil zwar, jedoch verliert man dadurch den Vorteil der einfacheren Handhabung eines WPC gegenüber klassischen Holzwerkstoffen. Weiters sind solche Behandlungen kostenintensiv in der Herstellung und auch vom Endanwender müssen diese Behandlungen intervallweise wiederholt werden. Das Acetylieren der Holzspäne ist zwar eine effektive Methode zum Unterdrücken der Wasseraufnahme, allerdings ist der Prozess sehr teuer, was den Gesamtverbund ebenfalls extrem verteuert, wodurch der WPC eines seiner Hauptvorteile, nämlich der guten Kosteneffektivität beraubt wird. Weiters werden durch die Acetylierung auch die mechanischen Eigenschaften beeinträchtigt, wodurch sich diese Behandlung eigentlich nicht mehr rechnet.

Die Zielsetzung in diesem Projekt war es, die Mechanismen der Wasseraufnahme in den Verbund und die Transportmechanismen innerhalb aufzuklären. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden Methoden zur Modifizierung des Holzes entwickelt, welche die Wasseraufnahme unterdrücken. Das Hauptaugenmerk wurde bei diesen Behandlungen auf die Effektivität hinsichtlich der Wasseraufnahme und Kosten sowie auf die Einfachheit der Verfahren gelegt. Es war zwar Ziel des Projektes, die Grundlagen der Sorption zu erforschen, jedoch sollen die gewonnenen Ergebnisse auch für spätere Anwendungen nutzbar sein.

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Behandlungen untersucht, wobei die vielversprechendsten die thermische Behandlung sowie die Behandlung mit Anhydriden und Duromeren waren. Gerade die thermische Behandlung überzeugt durch die Einfachheit im Einsatz, und auch durch die relativ geringen Kosten. Für noch effizientere Unterdrückung der Wasseraufnahme, sowohl bei extrudierten als auch bei spritzgegossenen WPC eignen sich die beiden anderen Behandlungen (mit Anhydriden bzw. mit Duromeren), allerdings sind hier etwas höhere Rohmaterialkosten in Kauf zu nehmen, welche allerdings durch die geringen Dosierungen von wenigen Prozent auf den Holzanteil gesehen keinen allzu großen Faktor ausmachen – vor allem wenn dadurch verschiedene Probleme in der Anwendung beseitigt werden.

Durch die in diesem Projekt erarbeiteten Ergebnisse wird aufgezeigt, wie es durch relativ einfache Mittel möglich ist, die Wasseraufnahme von WPC zu verringern, wodurch sich viele zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten erschließen lassen, die bisher durch das Wasseraufnahmeverhalten nicht mit WPC realisiert werden konnten.

Abstract

Wood Plastic Composites (WPC) are composite materials, consisting of wood particles, a thermoplastically processable matrix as well as some additives. This materials class, which gained increasing interest from industry and research over the last years, shows advantages in terms of processing and cost issues. A major drawback of WPC is the water uptake due to the cellulose incorporated in the composite, which results in reduced dimensional stability, mechanical properties and resistance against biological decay.

The methods for suppressing the water uptake, which are currently available, are painting or coating the composites or the chemical modification of the wood particles themselves via acetylation. These methods show several drawbacks, which exclude such WPC from several applications. With coating a structural part is sealed off against water uptake, but with this method the advantage of easier handling is lost, compared with the usual wood materials. Furthermore, such treatments are expensive in processing, as well as there is a need to repeat this treatment several times over the life cycle, resulting in increased effort for the user. The method of acetylating the wood particles is an effective method of suppressing the water uptake, but this method is very expensive due to the fact that in this process much solvent is involved, which has to be reprocessed, thus denying the cost effectiveness of WPC. Furthermore the acetylation reduces the mechanical properties of the composites. Therefore this method is not paying off anymore for this application.

The aim of the project was to investigate and clarify the mechanisms of water sorption and transport in the composite, and, based on these results, to find methods for treating the wood to suppress the water uptake. The main focus for the treatment methods was on the effectiveness of suppression in combination with good processability and cost effectiveness of the treatment processes. Although the aim of the project was the research about the water sorption mechanisms, there should be the possibility of utilizing the project results for future application.

In the scope of the project many different treatment methods were investigated, where the most promising ones are the thermal treatment as well as the treatments with anhydrides and thermosets. Especially the thermal treatment yields very satisfying results due to the simple application and the relatively low costs. For further reduction of water uptake, both the treatments with anhydrides as well as thermosets are very effective, although one has to pay the higher raw material cost. Nevertheless these are relatively low, due to the low dosages of few percent related to the wood share, and furthermore these treatments will pay off due to the reduction of problems in the different applications.

The results from this project show, that it is possible to reduce the water uptake of WPC with quite simple methods. With that it is possible to use WPC in applications which were not accessible until now due to the water absorption properties of WPC.

1. Einleitung

Wood Plastic Composites (WPC) oder auch Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe, sind Verbunde aus Holzpartikeln oder anderen cellulosischen Materialien, einer thermoplastisch verarbeitbaren Matrix und verschiedenen Additiven. Die Motivation für den Einsatz von Holzpartikeln (oder auch Holzmehl oder Holzfasern) in Kunststoffen war zu Beginn vor allem, die wesentlich teurere Polymermatrix zum Teil durch die sehr günstigen Holzpartikel zu „verdünnen“, um daraus einen Preisvorteil zu generieren. Schon bald zeigte sich jedoch, dass das Holzmehl auch positive Eigenschaftsverbesserungen im Kunststoff erbrachte, weswegen die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auch gezielt auf diese Eigenschaftsverbesserungen ausgerichtet wurden.

Die ersten industriell entwickelten Produkte auf der Basis von WPC sind extrudierte Profile für Terrassenbeläge, sogenannte Deckings (Abbildung 1). Der Markt für solche Deckings, als Ersatz für Holzbeläge, ist regional unterschiedlich groß. Während in den USA schon seit vielen Jahren ein großer Markt besteht, und auch in Japan und China in den letzten Jahren ein großer Aufschwung am Markt zu spüren war, haben sich die WPC erst in den Jahren 2009 – 2011 in Europa einen merklichen Aufschwung erlebt.



Abbildung 1: Extrudierte Profile aus WPC (Quelle: Rehau AG, D)

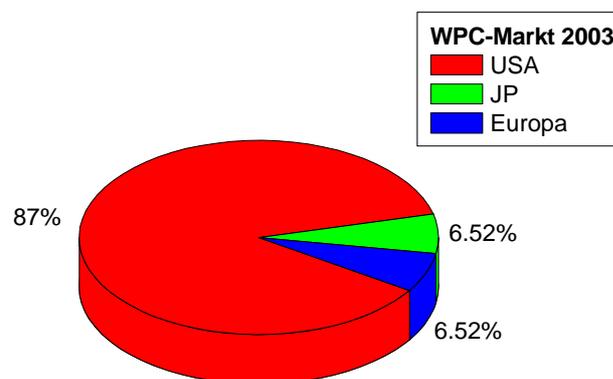


Abbildung 2: Weltmarkt für WPC im Jahr 2003 (Gesamt 460.000 t/a, nach [1], veränderte Abbildung)

Die Probleme, die nun mit WPC und insbesondere Deckings, assoziiert sind, lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- 1) eine begrenzte Bewitterungsstabilität aufgrund der Kombination Holz und Polymer
- 2) eine eher geringe Schlagzähigkeit, was bei Schlagbeanspruchung problematisch ist
- 3) die durch das Holz vorhandene Wasseraufnahme und die damit verbundenen Probleme hinsichtlich der Dimensionsstabilität und auch dem Auswaschen von durch die Bewitterung abgebauten Holzinhaltstoffen

Während diese Probleme durchaus durch eine Anpassung der Rezeptur, z.B. durch die Reduktion des Holzanteils, in den Griff zu bekommen wären, ist das aber oft vom Endkonsumenten nicht gewünscht, da hier vor allem Eigenschaften wie die Haptik und Optik für den Endkunden eine Rolle spielen. Die derzeit bekannten Verfahren zur Unterdrückung der Wasseraufnahme lassen sich grob in drei Hauptarten aufteilen.

Die erste Variante ist eine **Reduktion des Holzanteils im Verbund**. Durch den geringeren Holzanteil wird einerseits absolut gesehen weniger Wasser aufgenommen, und andererseits wird durch die bessere Ummantelung der Holzpartikel auch die Wasserwegsamkeit reduziert. Diese Möglichkeit birgt jedoch zwei gravierende Nachteile. Einerseits ist der Kostenfaktor im Wood Plastic Composite (neben manchen Additiven) das Polymer, welches durch den ständig steigenden Rohölpreis ebenfalls immer teurer wird, und bei geringer Zugabe von Holz werden die Kosten für die Herstellung des Verbundes nicht mehr durch die Kostenersparnis durch die Reduktion des Polymeranteils getragen. Andererseits ist für manche Anwendung eine holzähnliche Optik und Haptik erwünscht, was durch Holzanteile unter 40 Gew.-% sicherlich nicht mehr in zufriedenstellendem Maße gegeben ist.

Als weitere Möglichkeit zur Reduktion der Wasseraufnahme bietet sich ein **Überziehen mit einer wasserundurchlässigen Schicht** an, wie z.B. ein Lackieren oder die in der Kunststoffindustrie gebräuchlichen Methoden der Co-Extrusion oder des Zweikomponenten-Spritzguss. Das Lackieren oder Anstreichen jedoch reduziert den Nutzwert für den Endanwender, da intervallweise neue Schichten des Anstrichs aufgebracht werden müssen, und beraubt den WPC eines Vorteils gegenüber den Holzwerkstoffen, welche in der Außenanwendung den stärksten Konkurrenten darstellen. Beim Co-Extrusionsverfahren (Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Profil-Co-Extrusion) wird z.B. ein Verbund, welcher extrudiert wird, mit einer Außenschicht aus Kunststoff im gleichen Schritt überzogen, wobei das Aufschmelzen und Plastifizieren in einem zweiten Extruder erfolgt, welche neben der Hauptextrusionsanlage angeordnet ist. Dieser zweite Extruder speist das Extrusionswerkzeug seitlich mit der Deckschicht. Man erhält so ein mehrschichtig aufgebautes Profil, welches die unterschiedlichen Eigenschaften der Deck- und Zwischenlage kombiniert. Diese Methode zur Reduktion der Wasseraufnahme von WPC wird teilweise auch schon in der Anwendung (z.B. in den USA) getestet, jedoch verliert man mit den üblichen Deckschichten, welche oft auch eingefärbt sind, die Holzoptik und Haptik. Zusätzlich ergibt sich die wesentlich schwerwiegendere Frage, was passiert, wenn diese Deckschicht verletzt wird, was einerseits durch Beschädigungen und andererseits durch die Montage von Bauteilen durch Schrauben, Schneiden und Sägen unvermeidbar ist. Genau an diesen Stellen kann Wasser in den Verbund eindringen, und durch das damit verbundene Aufquellen werden neue Risse und Fehlstellen erzeugt, durch welche wiederum Wasser eindringen kann, wodurch der Verbund beschädigt wird und seine Funktion nicht mehr einwandfrei erfüllen kann.

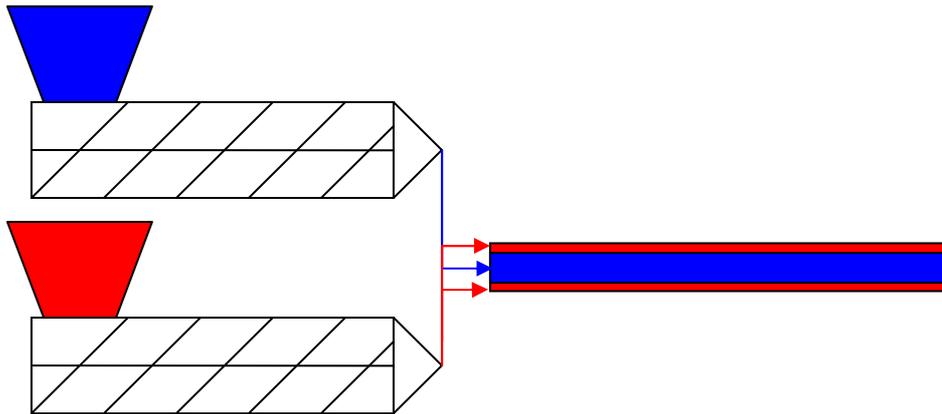


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Profil-Co-Extrusion

Die dritte mögliche Vorgehensweise ist eine **chemische Modifikation** des Holzes, durch Verfahren wie z.B. die Acetylierung des Holzes. In der einschlägigen Literatur finden sich viele Publikationen zu diesem Thema, die Wasseraufnahmefähigkeit der Zellulose durch Veresterung mit Säureanhydriden zu unterbinden, jedoch weisen alle diese Methoden gravierende Nachteile auf. Einerseits wird durch die Modifizierung meist die Haftung des Polymers an den Holzpartikeln nicht verbessert, und andererseits werden die Holzpartikel durch die Behandlung sehr teuer. Letzteres liegt daran, dass diese Umsetzungen in Lösungsmitteln durchgeführt werden, und Suspensionen von Holzmehl nur dann im Prozess verarbeitbar sind, wenn das Flottenverhältnis, d.h. das Verhältnis von Holz zu Lösungsmittel sehr gering ist (d.h. kleiner als 1:10). Dieses meist organische Lösungsmittel muss nach der Reaktion wieder abgetrennt und aufgearbeitet werden, wodurch immense Kosten entstehen.

Diese drei grundlegenden Möglichkeiten weisen gravierende Nachteile auf, sei es durch die Veränderung der Eigenschaften des Verbundes, durch nicht gesicherte Haltbarkeit bzw. Lebensdauer und zu guter Letzt durch die sehr hohen Kosten für manche dieser Verfahren. Gerade die Kosten jedoch werden sehr schnell zum K.O.-Kriterium für einen Werkstoff bei dem Versuch, diesen für eine neue Anwendung einzusetzen, da die am Markt etablierten Verbunde durch deren langjähriges Bestehen schon sehr kostenoptimiert sind.

Vorarbeiten zum Thema gibt es in der Literatur durchaus, jedoch sind diese Untersuchungen für sich eher rudimentär, und auch für viele verschiedene Systeme durchgeführt, weswegen auch kein wirklicher Vergleich hinsichtlich der Effizienz der Behandlungen angestellt werden kann.

Im Bereich der Transportmechanismen gibt es ein paar gute Publikationen zum Thema, welche sich jedoch auch zumeist mit faserverstärkten Verbunden unterschiedlichster Provenienz befassen, und daher auch aus diesen keine klare Systematik für die Bearbeitung zum Thema gewonnen werden kann. Eine Arbeit von Bledzki und Faruk [2] beschäftigt sich unter anderem mit dem Einfluss eines Haftvermittlers auf die Wasseraufnahme von WPC. Durch die Anwesenheit des Haftvermittlers wird die Wasseraufnahme reduziert, was auch mit den Beobachtungen anderer Autoren übereinstimmt. Stark zeigte in einer Publikation die Abhängigkeit der Wasseraufnahme von WPC vom Holzgehalt und der Umgebungsfeuchte, wobei hier auch die ersten Ansätze zur systematischen Beschreibung dieser verschiedenen Effekte zu finden sind [3]. Betrachtungen zum Diffusionsverhalten von naturfaserverstärkten Polypropylen und WPC sind in einer Arbeit von Espert *et al.* publiziert [4]. In dieser Arbeit wird insbesondere auf das Diffusionsverhalten der Verbunde eingegangen, und die Einteilung in die Diffusionsfälle nach dem Fick'schen Gesetz. Auch Steckel *et al.* beschäftigen sich mit dem Diffusionsverhalten von WPC [5]. In diesem Artikel wird vor allem auf unterschiedliche

Holzgehalte und Oberflächenvorbehandlungen und deren Einfluss auf die Wasseraufnahme eingegangen. Auch andere Arbeiten beschäftigen sich mit der Diffusion von Wasser in WPC [6]. Somit liegen die mathematischen Grundlagen für die verschiedenen Betrachtungen vor und müssen für neue Arbeiten nicht neu abgeleitet werden.

Nichtsdestotrotz kann aus der bisher vorliegenden Literatur keine schlüssige Gesamtfolgerung zum Wassertransportverhalten in WPC abgeleitet werden. Zusätzlich gibt es auch nur wenige Arbeiten zum Thema der Reduktion der Wasseraufnahme. Daher war die Zielsetzung in diesem Projekt in folgende zwei Hauptteile gegliedert:

Zum Einen ging es darum, die **Mechanismen der Wasseraufnahme** im Verbund mittels geeigneter Testmethoden aufzuklären, wobei besonders die physikalische Natur, d.h. Geometrie und Verteilung der Partikel im Verbund berücksichtigt werden soll. Des Weiteren sind hier Einflüsse wie Ausrichtung der Holzpartikel, Resistenz des Polymers gegen Wasseraufnahme und Diffusion sowie die generelle Zusammensetzung zu nennen. Andererseits sollten auf Basis dieser Ergebnisse **Strategien zur Verringerung bzw. Unterdrückung der Wasseraufnahme** im Verbund erarbeitet werden, wobei bei diesem Punkt in Hinblick auf eine spätere (nicht im Rahmen des Projektes angestrebte) Verwertung das Hauptaugenmerk auf eine relativ einfache Durchführbarkeit, eine ökologisch verträgliche Methode und ein angemessenes Kosten-Nutzen-Verhältnis gelegt wird.

Die Kapitel im vorliegenden publizierbaren Ergebnisbericht greifen im Folgenden die Thematik der Zielsetzung auf, d.h. es wird zuerst die erarbeitete und angewandte Methodik beschrieben und anschließend die durch die an die Methodik angepassten Versuche gewonnenen Ergebnisse.

2. Methodik

Bei der Methodenauswahl wurde zur Überprüfung der Effektivität verschiedener Behandlungen ein schrittweises Verfahren erarbeitet, um einerseits verschiedene Analysenmethoden anwenden zu können, und andererseits eine effiziente Vorauswahl von wirksamen Additiven treffen zu können. Dieses Verfahren ist im Folgenden beschrieben:

Behandlung von Holzprüfkörpern

Hierbei werden quadratische Holzprüfkörper (50 x 50 x 5 mm³) mit den verschiedenen Agenzien behandelt. An diesen Prüfkörpern können einerseits Wasseraufnahmeprüfungen durchgeführt werden, und andererseits auch infrarotspektroskopische Untersuchungen sowie die Bestimmung der Oberflächenenergie. Aus diesen Ergebnissen lassen sich Rückschlüsse auf die prinzipielle Umsetzbarkeit von Holz mit verschiedenen Reagenzien ziehen, sowie durch die Ergebnisse der Spektroskopie und der Oberflächenenergie auf eventuelle chemisch-physikalische Veränderungen der Oberfläche, welche den Verbund z.B. durch eine Veränderung der Grenzflächeneigenschaften zwischen Holz und Matrixpolymer beeinflussen können.

Behandlung von Holzspänen

Hierbei werden kleine Mengen (< 1 kg) von Holzspänen (ein für das Projekt ausgewählter „Standard-Span“) mit den jeweiligen Verfahren behandelt. Im Unterschied zu den Festholzprobekörpern kann bei den Spänen eigentlich nur das Wasserrückhaltevermögen bestimmt werden. Dieses gibt die Menge an Wasser an, welche die Späne nach Lagerung im Wasser und anschließender Zentrifugation in Bezug zum Ausgangsgewicht aufgenommen haben. Aus diesen Ergebnissen lassen sich Rückschlüsse auf die Qualität der Umsetzung bzw. auf die Anwendbarkeit eines Verfahrens ziehen. Zusätzlich kann an dem Kaltwasserextrakt der pH-Wert bestimmt werden, um so die mit Wasser extrahierbaren Stoffe zu kontrollieren. Dies ist besonders bei den Umsetzungen mit Anhydriden von großem Interesse, da bei einer Umsetzung zu kovalenten chemischen Bindungen bei der Kaltwasserextraktion der pH-Wert kaum beeinflusst werden sollte.

Verbundherstellung

Aus den behandelten Spänen, Polymer und Additiven wird mittels Compoundierung (gleichlaufender Doppelschneckenextruder Thermo Prism TSE24HC, Schneckendurchmesser 24 mm, mit gravimetrischer Dosierung) bei 200°C Masstemperatur und anschließender Kühlung der Schmelzestränge im Wasserbad ein Granulat hergestellt, welches nach einem Vortrocknungsschritt mittels konventioneller Spritzgussmaschine (Engel VC80) zu Universalprüfkörpern nach ISO-3167 verarbeitet wird. An diesen Prüfkörpern werden sowohl mechanische Eigenschaften (Zugeigenschaften, ISO-527, Schlagbiegeeigenschaften ISO-179, u.a.) als auch die Wasseraufnahme bestimmt. Weitere Untersuchungen betreffen mikroskopische Charakterisierungen (Lichtmikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie), spektroskopische Untersuchungen (FTIR, ATR-FTIR), Oberflächeneigenschaften (Oberflächenspannung bzw. -energie) und thermische Eigenschaften (Thermogravimetrie, Wassergehalt nach Karl Fischer).

Für diese Untersuchungen wurde eine Standardrezeptur mit 50 Gew.-% Standardholzpartikel, 3 Gew.-% Haftvermittler und 47 Gew.-% Polymer (hauptsächlich Polypropylen) festgelegt. Diese Rezeptur hat den Vorteil, dass die Wasseraufnahme ausreichend schnell stattfindet, sie noch ausreichend gut verarbeitbar ist und zudem auch die benötigten Mengen an umgesetzten Holzpartikeln in ausreichendem Umfang herstellbar sind.

Detektion der Wassersorptionsfront

Hierbei geht es um die ortsabhängige Bestimmung des Wassergehaltes in einem Verbund. Hierzu werden die Verbunde für eine bestimmte Zeit unter Wasser gelagert, anschließend mittels Mikrotom aufgeschnitten, wobei die Schnitte der jeweiligen Position zugeordnet werden können. Diese Schnitte werden dann in dichten Probenbehältern bis zur Analyse gelagert. Als Analysemethoden kommen sowohl die coulometrische Wasseranalyse nach Karl Fischer als auch verschiedene thermische Methoden wie die Thermogravimetrie oder die dynamische Differenzialkalorimetrie in Frage. Aus diesen Ergebnissen kann man die Feuchtigkeitsverteilung in einem Verbund ableiten, woraus wiederum Rückschlüsse auf die Wassertransportmechanismen gezogen werden können.

Zur Auswertung der Wasseraufnahmekurven wurde auch ein einfaches exponentielles Modell angewandt, um die Kurvenverläufe mit so wenigen Parametern wie möglich, welche auch alle eine physikalisch zuordenbare Bedeutung haben, zu Beschreiben [7]. Dieses Modell ist in Gl. 1 dargestellt.

$$\frac{m_t - m_0}{m_0} = C_2 (1 - e^{-C_1 t}) + C_3 \quad (1)$$

wobei der Term links des Gleichheitszeichens die reduzierte Massenzunahme ist, t die Lagerzeit im dementsprechenden Klima, C_1 ist die Wasseraufnahmerate in h^{-1} , C_3 die Ausgangsfeuchte und C_2 die Feuchtigkeitszunahme bis zur Sättigung.

Dieses Modell hat den Vorteil, dass eine maximale Sorptionsrate aus dem Produkt der Konstanten C_1 und C_2 und eine Sättigungskonzentration aus der Summe der Konstanten C_2 und C_3 bestimmt werden können. Somit kann man mittels zweier Parameter die Kurvenform beschreiben, und kann so Materialien hinsichtlich ihres Wasseraufnahmeverhaltens gut vergleichen.

2.1. Materialien

Die im Rahmen des Projekts verwendeten Materialien sowie deren charakteristische Eigenschaften sind im Folgenden angegeben. Die eingesetzten Polypropylentypen sind in Tabelle 1 angegeben. Der sehr breite Eigenschaftsbereich wurde deswegen ausgewählt, da aus Voruntersuchungen hervorgeht, dass auch der Verarbeitungsprozess – d.h. Extrusion oder Spritzguss – einen sehr großen Einfluss auf das Wasseraufnahmeverhalten hat. Des Weiteren wurde eine kommerzielle Type eines Haftvermittlers (ein mit Maleinsäure gefropftes Polypropylen) mit einem Maleinsäureanhydridgehalt von ca. 1 Gew.-% und einer Viskosität von etwa 280 cm³/10 min (bei 190°C und 2,16 kg) verwendet, um Unterschiede in der Polarität der Holzpartikel und der Polypropylenmatrix zu überbrücken.

Tabelle 1: Im Rahmen des Projekts verwendete Polypropylentypen

Material	MFR [g/10min] ^a	typische Anwendungen
Polypropylen-Homopolymer	0,25	Extrusionstype
	2	
	8	Allrounder
	55	Spitzgusstype
	120	

^a ... laut Datenblatt Hersteller, ermittelt bei 230°C und 2,16 kg nach ISO-1133

Die im Rahmen des Projekts verwendeten Holzspäne, welche beim Kick-Off-Meeting als Standard definiert wurden, sind Weichholzspäne mit einer mittleren Länge von ca. 700 µm und einer mittleren Breite von 350 µm. Die charakteristische Verteilung der Holzpartikel ist in der Auswertung der Siebanalyse in Abbildung 4 dargestellt.

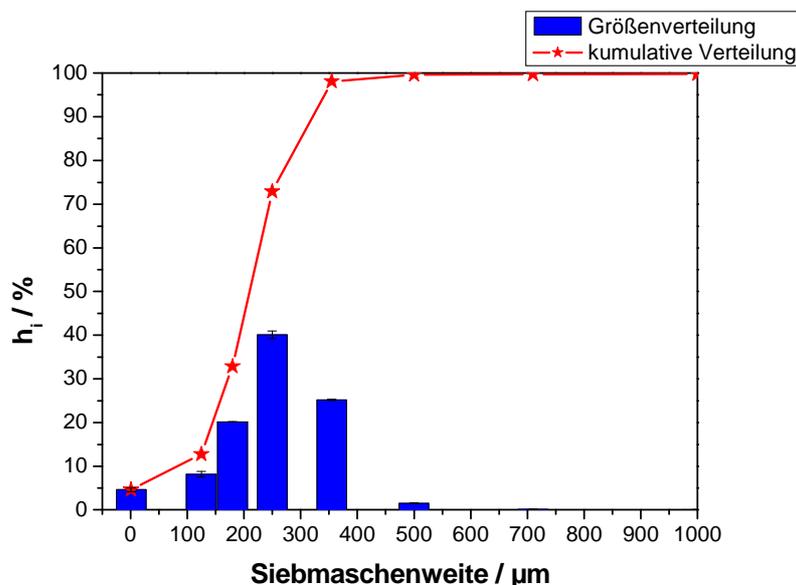


Abbildung 4: Korngrößenverteilung aus der Siebanalyse des im Projekt festgelegten Standard-Spans

Als Additive zur Reduktion der Wasseraufnahme wurden nun verschiedene Agenzien ausgewählt (Tabelle 2). Dabei wurde, neben der prinzipiellen Effektivität, auch berücksichtigt, ob die eingesetzten Additive ein adäquates Preis-Leistungsverhältnis aufweisen. Zusätzlich war es auch wichtig, keine

hochtoxischen Additive einzusetzen, da dies in krassem Widerspruch zur generellen Ausrichtung der WPC als biobasierende Materialien steht.

Tabelle 2: Im Projekt verwendete Agenzien zur Behandlung bzw. Behandlungsmethoden

Klasse	Additiv	Beschreibung
Kunststoff bzw. -additiv	EVA	Ethylen-Vinyl-Acetat hoher Fließfähigkeit
	EVA-MAH	EVA modifiziert mit Maleinsäureanhydrid
	EMA	Ethylen-Acryl-Copo
	Verarbeitungshilfsmittel	aliphatische Aminoester
	Verarbeitungshilfsmittel	Calciumstearat
	Harz	Duromer
	Schmelzkleber	leichtfließendes Polyamid
Chemikalien	MAH-PP	Haftvermittler
	MSA	Maleinsäureanhydrid
	BSA	Bernsteinsäureanhydrid
	Wasserglas	Natriumsilikat
Holzschutz	PEG	Polyethylenglykol
	Holzschutzlasur	industrielles Produkt
	enzymatische Behandlung thermische Behandlung	experimentelles Produkt

2.2. Holzbehandlung

Die Holzbehandlung im Projekt wurde auf unterschiedliche Arten durchgeführt. Bei den ersten Untersuchungen wurden die Späne mit dem Additiv gemischt und in einem Trockenschrank auf die gewünschte Reaktionstemperatur gebracht. Nach einer Reaktionszeit von ca. 1 h wurden die Späne in einem Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt und für die weiteren Versuche in luftdichten Kunststoffbeuteln aufbewahrt.

Um größere Mengen (d.h. im Bereich von 2 – 50 kg) herstellen zu können, wurde für die weiteren Versuche ein Heiz-Kühl-Mischer verwendet, bei welchem der Mantel mittels Öltemperierung auf die gewünschte Temperatur gebracht wurde. Die Verweilzeit im Heiz-Kühl-Mischer betrug zwischen 15 – 30 Minuten. Anschließend wurden die Späne wiederum abgekühlt und abgepackt.

2.3. Holzcharakterisierung

Zur Charakterisierung der behandelten Holzspäne wurde vornehmlich das Wasserrückhaltevermögen bestimmt. Hierbei wurden ca. 5 g genau eingewogen, in einem Baumwolltuch verpackt und für 24 h unter Wasser gelagert. Anschließend wurde das Ganze zentrifugiert und danach die Späne (ohne Verpackung) rückgewogen. Die Differenz der Auswaage (m_A) und der Einwaage (m_E) in Relation zur Einwaage (m_E) wird in Prozent ausgedrückt und beschreibt das Wasserrückhaltevermögen (Gl. 2).

$$WRV = \frac{m_A - m_E}{m_E} \cdot 100 \quad (2)$$

Dieser Parameter sollte, wenn eine Behandlung zur Reduktion der Wasseraufnahme erfolgreich ist, unter dem Wert der unbehandelten Späne liegen. Der einzige Nachteil bei dieser Methode ist, dass nicht zwischen an der Oberfläche absorbiertem und in die Holzfaser aufgenommenem Wasser unterschieden werden kann. Diesem Umstand lässt sich jedoch auch durch andere Untersuchungsmethoden nicht abhelfen.

2.4. Verbundherstellung

Zur Verbundherstellung wurden die Materialien im gleichlaufendem Doppelschneckenextruder, mit 24 mm Schneckendurchmesser, bei einer Masstemperatur zwischen 190 – 210 °C und einem Durchsatz von ca. 8 kg/h compounding. Die Materialzuführung erfolgte über eine gravimetrische Dosieranlage, wobei das Matrixpolymer sowie die Additive in die Einzugszone des Extruders dosiert wurden, und die Holzspäne erst später, etwa in der 4. Zone des Extruders, mittels eines Side-Feeders in die bereits geschmolzene Masse zugeführt wurden (Abbildung 5). Die gemischte Schmelze wurde über eine Extruderdüse in Strängen durch ein Wasserbad geleitet und anschließend mittels eines Stranggranulators zu Granulat geschnitten. Dieses Granulat wurde vor der weiteren Verarbeitung auf eine Gesamtfeuchte unter 1 % getrocknet.

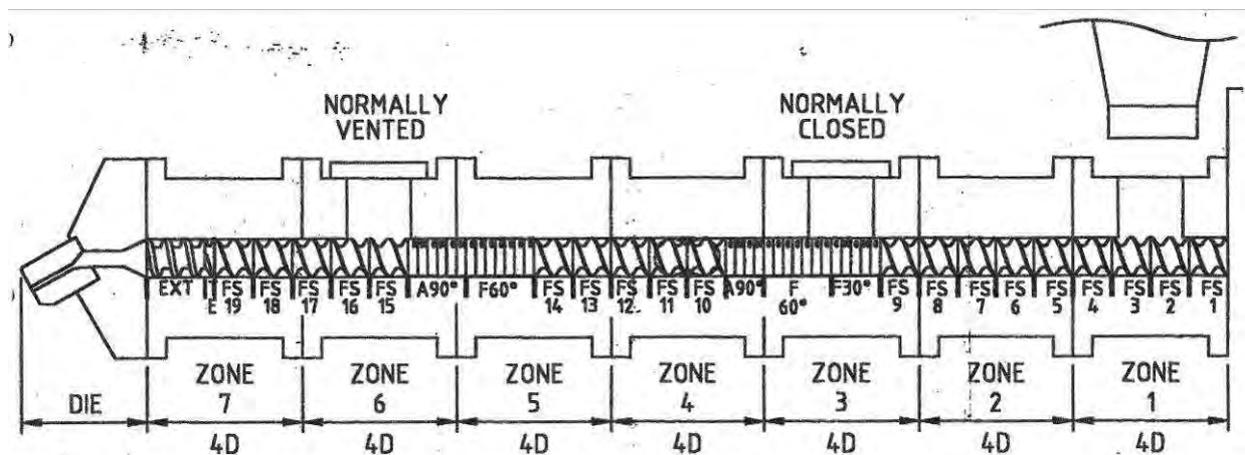


Abbildung 5: Schnittzeichnung des verwendeten Extruders TSE 24HC (Quelle: Betriebsanleitung Thermo Prism)

Im nächsten Schritt erfolgte dann die Prüfkörperherstellung mittels Spritzguss. Hierzu wurde eine konventionelle Spritzgussmaschine (80 t Schließkraft) mit einem nach ISO-527 ausgelegtem Prüfkörperwerkzeug verwendet. Die so hergestellten Prüfkörper wurden vor der mechanischen Charakterisierung im Normklima (23°C, 50% relative Luftfeuchte) für mindestens 88 h gelagert. Zur Herstellung der prismatischen Prüfkörper (80x10x4 mm³) für die Schlagbiegeprüfungen wurde eine pneumatische Stanze verwendet (Abbildung 6).



Abbildung 6: Spritzgegossene Universalprüfkörper (li) und daraus ausgestanzte prismatische Prüfkörper (re) aus WPC

2.5. Verbundcharakterisierung

Zur mechanischen Charakterisierung der hergestellten Verbunde wurden sowohl statische (in diesem Fall die Zugprüfung) wie auch dynamische Verfahren (hier die Schlagbiegeprüfung) angewandt, da in einer zukünftigen Anwendung sowohl statische Belastungen als auch Schlageinwirkung vorkommen. Im Folgenden werden nun die verschiedenen Verfahren beschrieben. Alle Verbunde wurden vor den mechanischen Prüfungen für mindestens 88 h bei 23 °C und 50% relativer Luftfeuchte gelagert.

Der uniaxiale Zugversuch (nach ISO 527) wurde mittels Universalprüfmaschine (Abbildung 7, Zwick Roell Z20) an Universalprüfkörpern durchgeführt, wobei der E-Modul mit einer Querschnittsgeschwindigkeit von 1 mm/min bestimmt wurde, und anschließend die Prüfkörper mit 5 mm/min bis zum Bruch geprüft wurden. Aus diesem Versuch erhält man den E-Modul (E in MPa), die Zugfestigkeit (σ_{Max} in MPa) und die Dehnung beim Kraftmaximum (ϵ in %).



Abbildung 7: Prüfaufbau für den Zugversuch

Die Schlagzähigkeit nach Charpy wurde an prismatischen Prüfkörpern sowohl ungekerbt (ISO 179eU) als auch gekerbt (Abbildung 8, ISO 179eA) mit einem Pendelschlagwerk (Zwick Roell 5113.300) ermittelt. Das Einbringen der Kerbe erfolgte mittels einer Präzisionskreissäge und dem dazugehörigen

Sägeblatt für die Kerbenform A. Die Pendelgröße wurde so gewählt, dass die zum Bruch benötigte Energie 20 – 80% der maximalen Schlagenergie des Pendels beträgt. Die somit ermittelten Werte sind die Schlagzähigkeit (a_{CUe}) und die Kerbschlagzähigkeit (a_{CNe}) nach Charpy in kJ/m^2 .

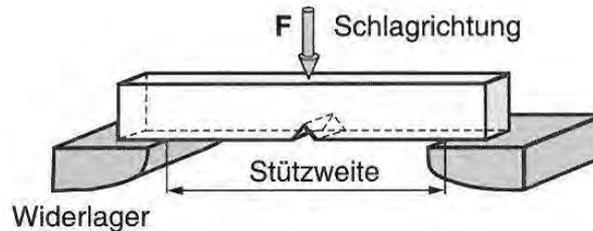


Abbildung 8: Prinzip des Kerbschlagbiegeversuchs nach Charpy [8]

Die Wasseraufnahme der Verbunde wurde durch Lagerung der prismatischen Prüfkörper bei 23°C in deionisiertem Wasser bestimmt. Hierzu wurden jeweils 3 prismatische Prüfkörper beschriftet, gewogen und unter Wasser gelagert. Nach verschiedenen Lagerzeiten (2 h, 24 h, 7 d, 28 d, ...) wurden die Prüfkörper aus dem Wasser genommen, oberflächlich abgetrocknet, anschließend gewogen und wiederum unter Wasser gelagert. Der Kurvenverlauf der Gewichtszunahme wurde mittels eines einfachen Kurvenfitmodells (Gl. 1) ausgewertet. Um auch die Realität der Wasseraufnahme besser beschreiben zu können, wurden die Proben analog der Wasseraufnahme auch bei zwei weiteren Luftfeuchtigkeiten bei 23°C gelagert, nämlich 50% (im Klimaschrank) und 75% (über gesättigter wässriger Natriumchloridlösung). Die Auswertung erfolgte analog der Lagerung unter Wasser.

Weitere an den Verbunden durchgeführte Untersuchungen waren die Licht- sowie die Rasterelektronenmikroskopie, die Infrarotspektroskopie sowie die Ermittlung der thermischen Eigenschaften mittels Thermogravimetrie (ISO-11358). Diese Ergebnisse werden im Rahmen dieses Berichts soweit angeführt, soweit diese der Erklärung der Beobachtungen dienen.

Zusätzlich wurde, um den Wassertransport innerhalb der Verbunde zu untersuchen, auch eine kombinierte Methode aus Mikrotomie und Wasseranalyse nach Karl Fischer angewandt. Hierzu wurden Verbunde unter Wasser gelagert und danach mit dem Mikrotom zu Dünnschnitten ($50\ \mu\text{m}$ dick) weiterverarbeitet. An diesen Schnitten wurde im Anschluss mittels der coulometrischen Karl-Fischer-Methode [9] der Wassergehalt bestimmt und gegen die Position aufgetragen. Somit erhält man eine orts aufgelöste Feuchtigkeitsbestimmung, welche genaueren Aufschluss über die Wassertransportvorgänge im Verbund gibt.

3. Ergebnisse des Projektes und Interpretation

3.1. Wassertransportverhalten in WPC

Die ortsaufgelöste Karl-Fischer-Methode bietet einen guten Ansatz, um den Wassertransport im Verbund betrachten zu können. Wie in Abbildung 9 zu erkennen ist, sinkt die Feuchtigkeit mit der Schnitttiefe ab. Dies erklärt sich dadurch, da die prismatischen Prüfkörper über die Stirnflächen durch das Ausstanzen aus dem Universalprüfkörper keine schützende Kunststoffschicht besitzen, und daher an diesen Positionen wesentlich mehr Wasser aufnehmen kann als über die Mantelfläche. Zusätzlich ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Holzgehalt auch die Menge an Wasser ansteigt, was auf der Hand liegt, da nur das Holz im Verbund Wasser aufnehmen kann.

Aus dem zeitlichen Verlauf über einen Verbund, beispielhaft in Abbildung 10 dargestellt, kann man sehen, dass mit steigender Lagerzeit wiederum die Verbundfeuchte ansteigt. Während beim Verbund nach 10 d Wasserlagerung noch kein wirklicher Trend zu erkennen ist, sieht man dass der Verbund nach 30 bzw. 70 d das typische Bild zeigt, bei welchem in der Randschicht mehr Wasser enthalten ist als in den weiter innen liegenden Schichten. Aus dieser Abbildung ist auch gut zu erkennen, dass die Detektion von Wasser prinzipiell problematisch ist, da hier durch das Schneiden mit dem Mikrotom sicherlich eine gewisse Abweichung vom wahren Wert erzeugt wird, bzw. auch die Methode an sich eine gewisse inhärente Messabweichung besitzt. Nichtsdestotrotz ist die Methode ausreichend gut geeignet, um den Wasseraufnahmeverlauf aufzuklären.

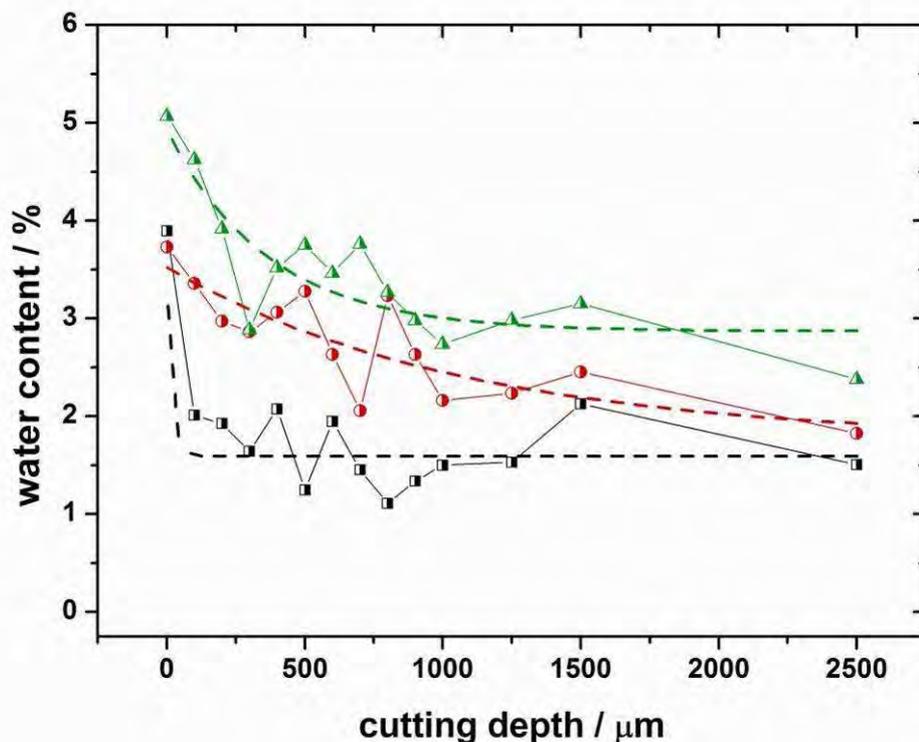


Abbildung 9: Ortsaufgelöster Wassergehalt für WPC mit 20 (□, schwarz), 40 (●, rot) und 60 (▲, grün) Gew.-% Holz in PP nach 30 Tagen Wasserlagerung

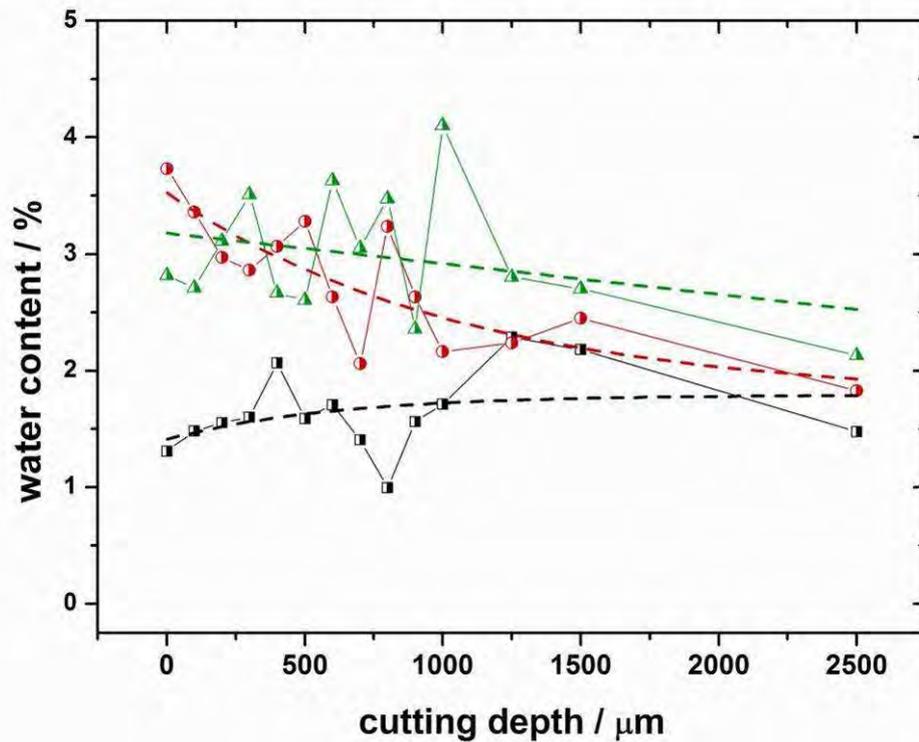


Abbildung 10: Ortsaufgelöster Wassergehalt für WPC mit 40 Gew.-% Holz in PP nach 10 Tagen (□, schwarz), 30 Tagen (●, rot) und 70 Tagen (▲, grün) Wasserlagerung

Diese Ergebnisse werden auch durch die speziellere Auswertung der üblichen Wasserlagerung bestätigt (Abbildung 11). Bei dieser Art der Auftragung werden die Gewichtszunahmen auf den Endwert bezogen, wodurch die anfängliche, d.h. lineare Steigung der Kurve mit dem Fick'schen Diffusionsmodell auswertbar ist. Dies wurde hier durch einen einfachen linearen Fit ($\log(y) = k \log(x) + d$) bewerkstelligt. Aus der Steigung k kann nun der Diffusionsfall bestimmt werden – ist $k = 0,5$, so ist die Wasseraufnahme in den Verbund über die Grenzfläche Verbund-Wasser der limitierende Faktor (Fall I), ist die Steigung $k = 1$, so ist der Transport im Verbund, d.h. die Weiterleitung des Wassers der limitierende Faktor (Fall II). Betrachtet man nun die ermittelten Werte für k , so sieht man, dass beim Verbund mit 20 Gew.-% eher der Fall I vorliegt, d.h. die Aufnahme in den Verbund ist die Begrenzende, während mit steigendem Holzgehalt sich die Wasseraufnahme immer mehr in den Bereich des Fall II verschiebt. Dies erklärt sich durch die immer höheren Anteile an Holz an der verletzten Grenzfläche, weswegen der Weitertransport des Wassers im Verbund erschwert wird, da die Holzpartikel gut in der Polypropylenmatrix verteilt sind, und somit die Wasserwege von einem Holzpartikel zum nächsten durch die Matrix unterbrochen werden, was die Transportgeschwindigkeit verringert.

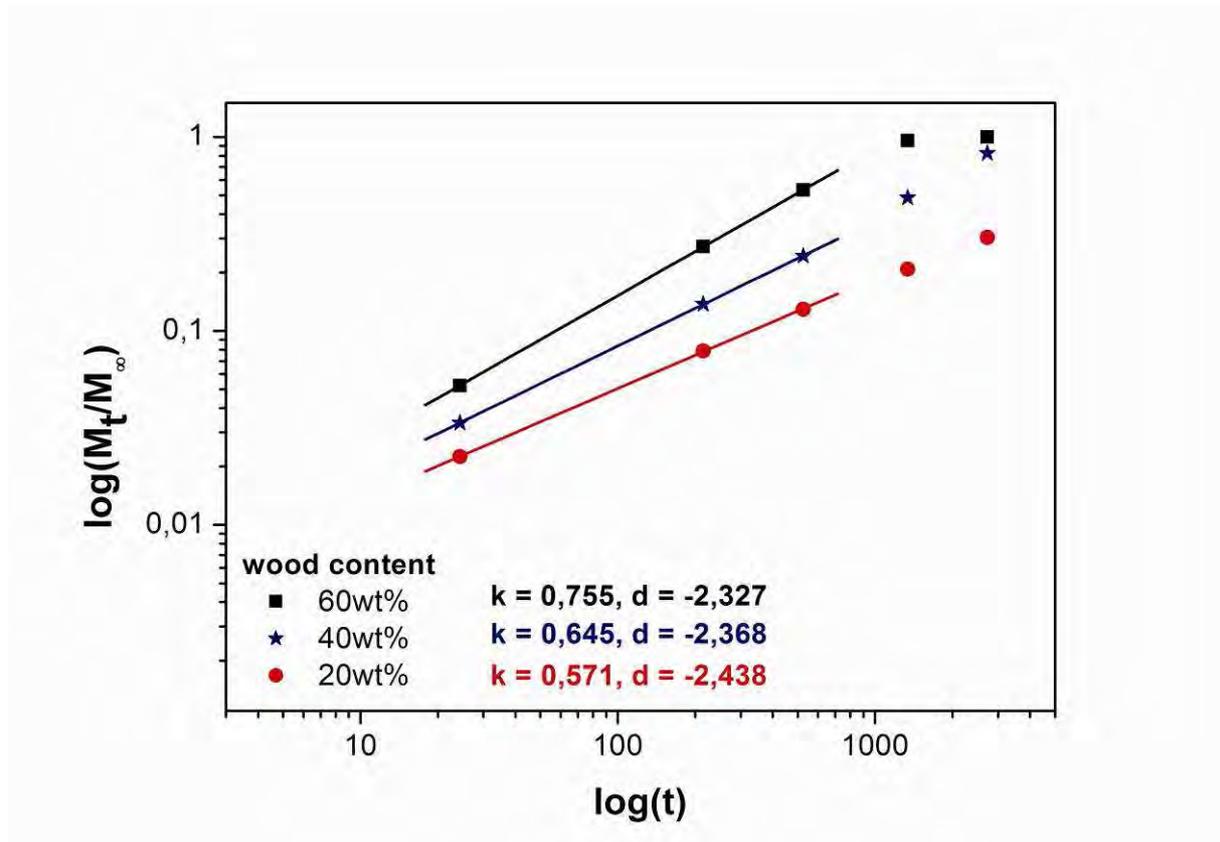


Abbildung 11: Auswertung der Wasseraufnahme von WPC mit unterschiedlichen Holzgehalten zur Ermittlung der Diffusion nach Fick

Die Problematik bei der vorliegenden Auswertung ist nun, dass das Erreichen der Ausgleichsfeuchte beim WPC abhängig vom Holzgehalt sehr lange dauert, und somit diese Methode für schnelle Auswertungen nicht geeignet ist. Daher wurde im Rahmen des Projekts ein einfaches Kurvenfitmodell angewandt (Gl. 1), welches den Kurvenverlauf gut beschreibt und als Ergebnis sowohl die Ausgleichsfeuchte als auch die maximale Sorptionsrate angibt.

3.2. Grundlegende Zusammenhänge zwischen Rezeptur und Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahmekurven von WPC mit verschiedenen Holzgehalten sind in Abbildung 12 dargestellt. Diese Verläufe werden nun mit dem angegebenen Modell gefittet, und die so erhaltenen Parameter gegen den Holzgehalt aufgetragen.

Im Fall der maximalen Sorptionsrate k_{Max} (Abbildung 13) sieht man, dass diese mit dem Holzgehalt ansteigt, wobei hier bei einem Holzgehalt von etwa 60 Gew.-% ein dramatischer Anstieg (ähnlich einer Perkolationschwelle) zu verzeichnen ist. Nach Meinung des Autors zeigt dies die Risiken bei dem teilweise in der Industrie vertretenem Ansatz, möglichst viel Holz in einen Verbund zu packen, um den Rohmaterialpreis zu reduzieren – für einen geringfügig reduzierten Rohmaterialpreis handelt man sich schwere Probleme mit der Wasseraufnahme und allen assoziierten Effekten, wie etwa der Dimensionsstabilität ein.

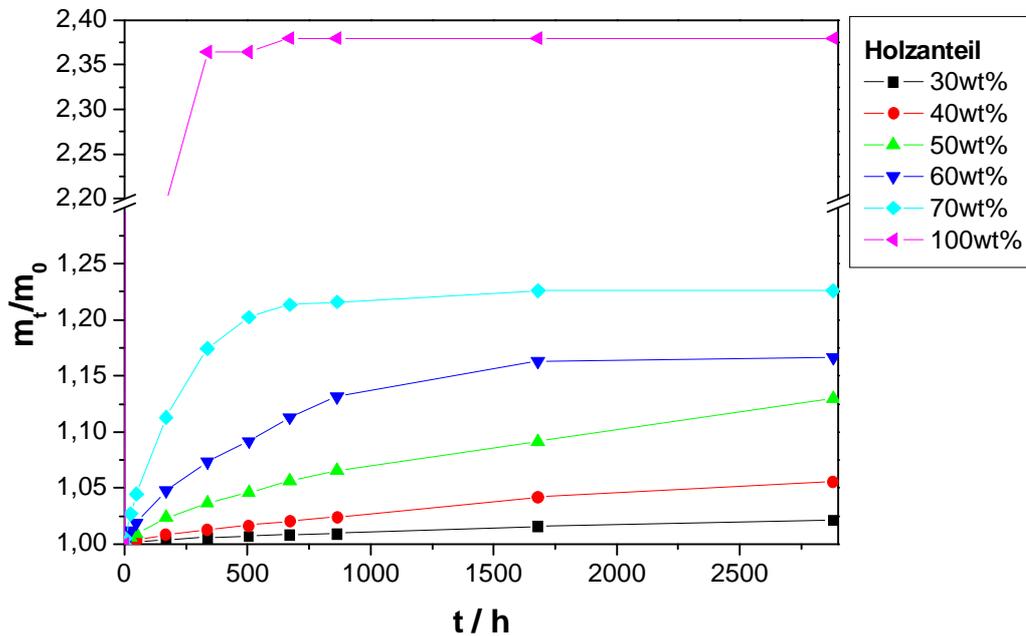


Abbildung 12: Wasseraufnahmeverlauf von WPC mit 30 – 70 Gew.-% Holz und Vollholz im Vergleich

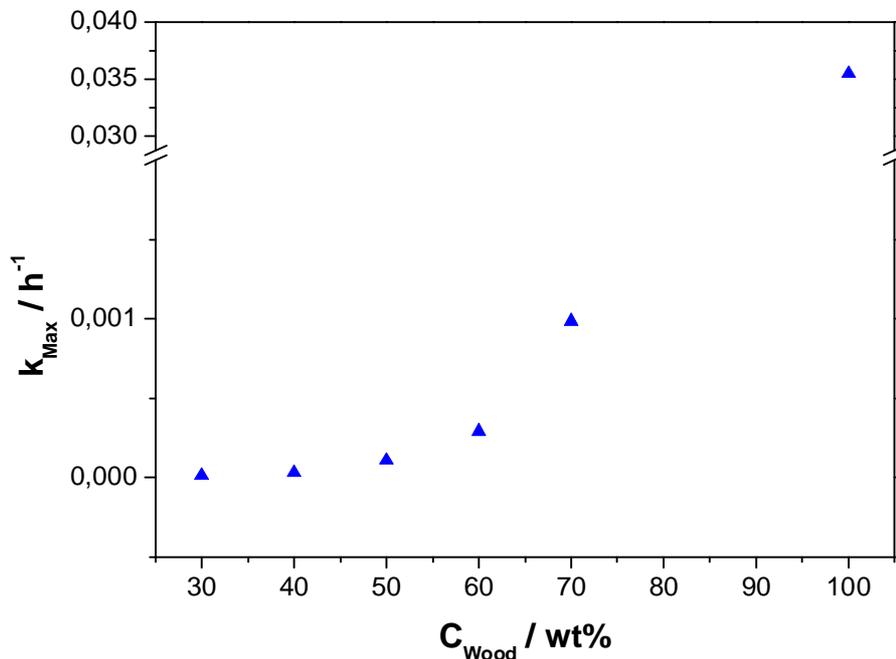


Abbildung 13: Maximale Sorptionsrate k_{Max} in Abhängigkeit vom Holzgehalt von auf PP basierenden WPC

Die Sättigungskonzentration C_{Sat} des Wassers im Verbund gegenüber dem Holzgehalt ist in Abbildung 14 dargestellt. Wiederum ist zu erkennen, dass C_{Sat} mit dem Holzgehalt ansteigt, hier jedoch (für die WPC) linear. Berechnet man daraus die auf das Holz bezogene Feuchte, so erhält man zwischen 28 – 32% Feuchte, was dem Literaturwert des Fasersättigungspunkts von Weichholz ohne Kern [10] sehr gut entspricht. Der Fasersättigungspunkt ist jener Wert, bei dem Holz genau so viel Wasser

aufgenommen hat, wie in das Material selbst (d.h. in die Zellwand) absorbiert werden kann, ohne jedoch äußerlich anhaftendes Wasser anzulagern. Dieser Zusammenhang mit dem Fasersättigungspunkt zeigt jedoch auch, dass für die Verbesserung der Wasseraufnahme von WPC nicht nur die umhüllende Matrix von Bedeutung ist, welche die Wasseraufnahmegeschwindigkeit reduziert, sondern auch der Holzgehalt bzw. die Holzeigenschaften selbst, weswegen eine Modifizierung unumgänglich ist.

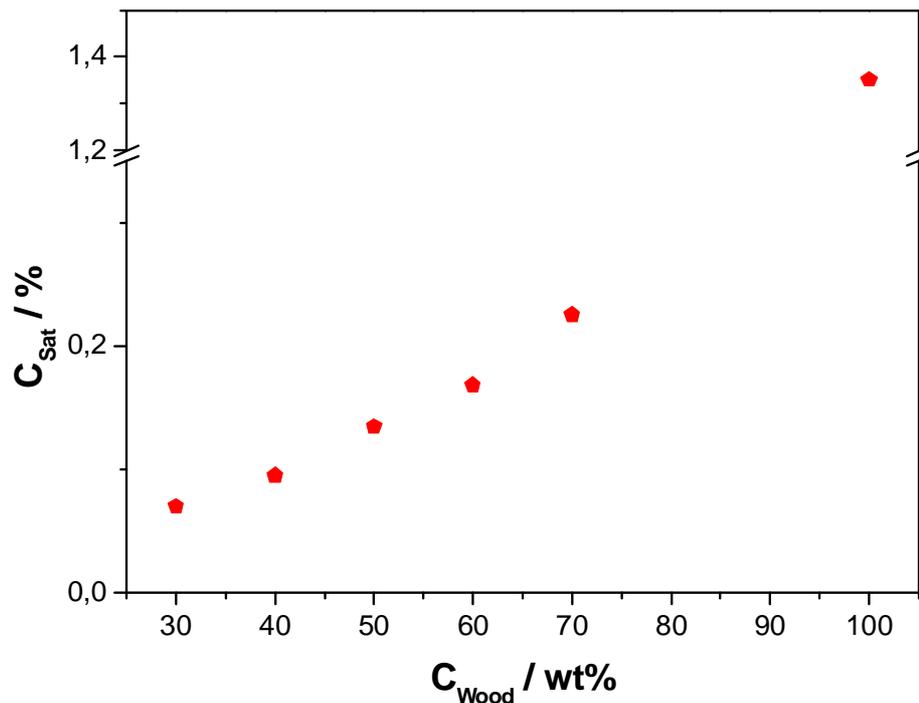


Abbildung 14: Sättigungskonzentration an Wasser C_{Sat} in Abhängigkeit vom Holzgehalt von auf PP basierenden WPC

Aus diesem Modell zum Kurvenfit lässt sich außerdem durch einfache Umformung und Ableitung noch der Wert $t_{0,99}$ ableiten, was dem Zeitpunkt vom Erreichen von 99% der Sättigungsfeuchte entspricht. Trägt man diesen Wert gegen den Holzgehalt auf (Abbildung 15), so sieht man, dass ein WPC mit 50 Gew.-% Holz bis zur Sättigung zwischen 5000 und 6000 h unter Wasser gelagert werden muss, was ca. einem dreiviertel Jahr entspricht, während ein Verbund mit 70 Gew.-% Holz bereits nach etwa 1000 h (ca. 7 Wochen) seinen Sättigungszustand erreicht hat. Das andere Extrem hier ist der Verbund mit 30 Gew.-% Holz, welcher etwa 30.000 h bis zur Sättigung gelagert werden muss, was etwa **3,5 Jahren (!)** entspricht.

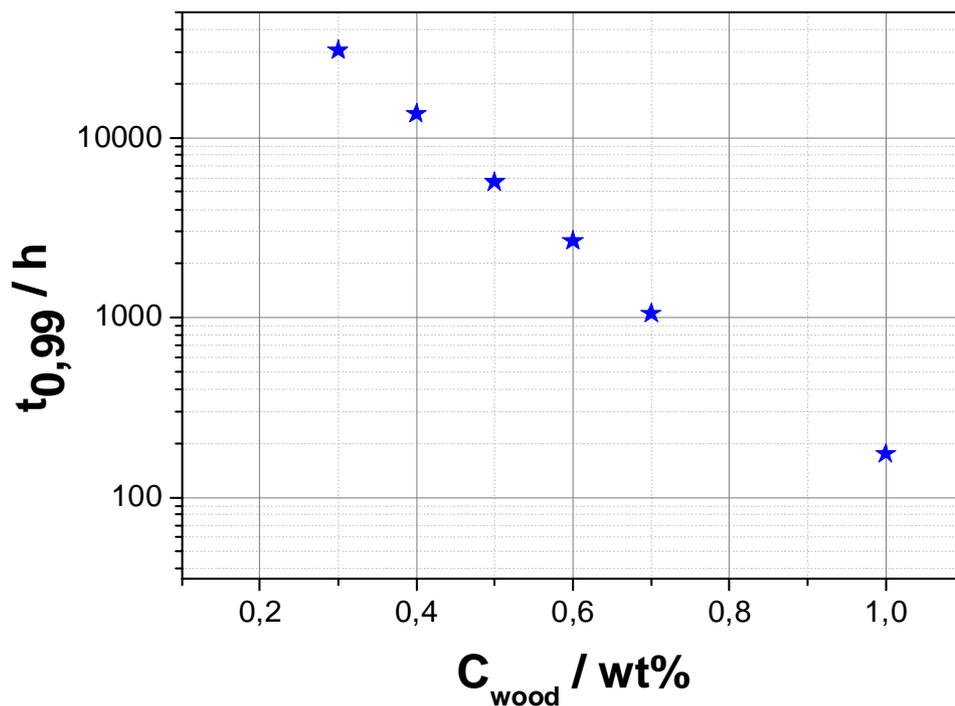


Abbildung 15: Zeitdauer bis zum Erreichen von 99% der Sättigungsfeuchte (bei 23°C unter Wasser) von WPC (30 – 70 Gew.-% Holz) und Vollholz (Weichholz) im Vergleich

Lagert man nun die Verbunde bei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten (Abbildung 16), so sieht man, dass die Wasseraufnahme mit der Umgebungsfeuchte steigt. Dies ist insoweit leicht erklärbar, da die treibende Kraft für die Wasseraufnahme in den Verbund der Gradient zwischen dem Feuchtegehalt im Verbund und der Umgebung ist, d.h. bei niedrigeren Umgebungsfeuchten ist dieser Gradient und somit auch die treibende Kraft geringer. Die Kurvenform an sich bleibt gleich, die absoluten Werte unterscheiden sich jedoch um Zehnerpotenzen von jenen aus der Wasserlagerung.

Da die Korrelationen gleich bleiben, was auch schon zum Teil in der Fachliteratur von Stark bestätigt wird [3], werden im weiteren Verlauf dieses Berichts nur mehr die Ergebnisse aus der Wasserlagerung diskutiert.

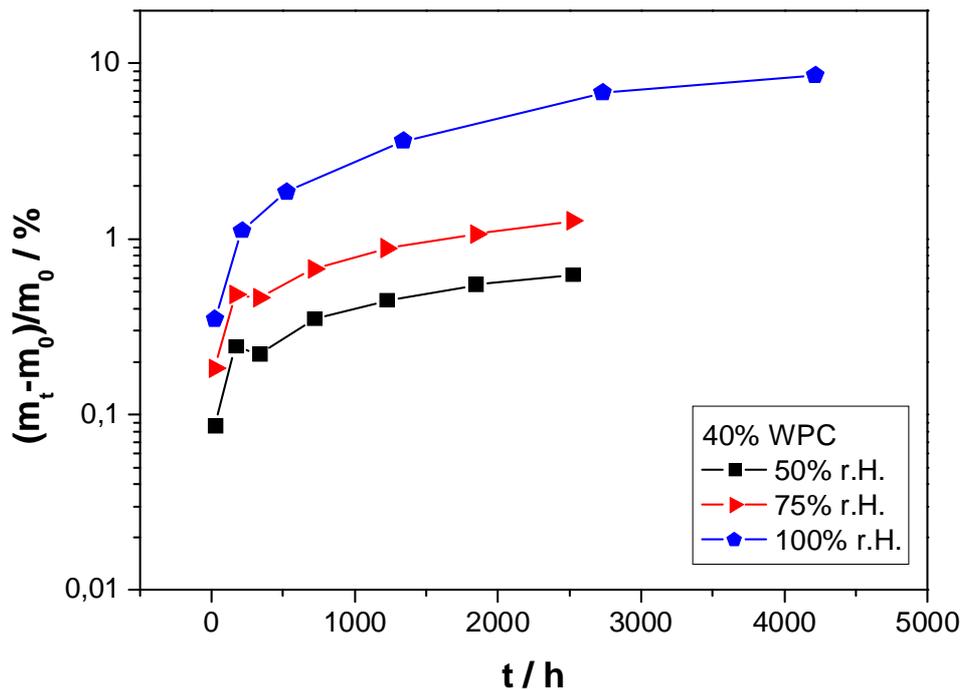


Abbildung 16: Wasseraufnahme von WPC bei verschiedenen Umgebungsfeuchten

Auch die Komponenten der Rezeptur haben großen Einfluss auf die Wasseraufnahme der WPC. Im Fall der PP-Matrix zeigt sich eine Abhängigkeit von der Viskosität des Polymers (Abbildung 17) – je dünnflüssiger die Matrix, desto mehr Wasser wird aufgenommen. Nach Meinung des Autors kann dieser Umstand durch zwei Effekte erklärt werden. Einerseits schwindet PP nach der Verarbeitung umso mehr, je höher die Viskosität (d.h. je geringer der MFR) ist. Durch die höhere Schwindung wird auch ein höherer Gegendruck auf die durch die Wasseraufnahme aufquellenden Holzpartikel ausgeübt, was in einer reduzierten Wasseraufnahme resultieren kann. Andererseits kann auch die Wasserdampfdurchlässigkeit der Polypropylentype, welche wiederum von der Viskosität (und somit auch von der Kettenlänge) abhängt, ein Einflussfaktor sein. Eine detailliertere Aussage bedarf allerdings weiterer Untersuchungen, welche im Projekt deswegen nicht durchgeführt wurden, da die Unterschiede zwischen den PP-Typen, welche für das jeweilige Verarbeitungsverfahren geeignet sind (d.h. Extrusions- bzw. Spritzgusstype), nicht allzu groß sind.

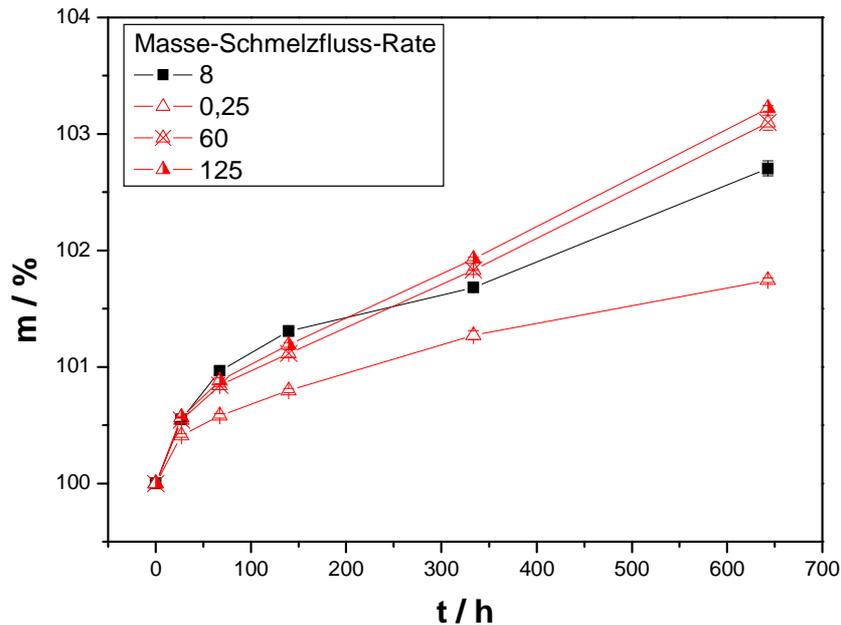


Abbildung 17: Wasseraufnahme von WPC mit 50 Gew.-% Holz in Abhängigkeit von der Viskosität der eingesetzten Polypropylentype

Nachdem die Sättigungsfeuchte für die verschiedenen WPC wie in Abbildung 14 dargestellt mit dem Holzgehalt korreliert, ist zum Vergleich der verschiedenen Formulierungen in Abbildung 18 nur mehr die maximale Sorptionsrate k_{Max} dargestellt. Es ist wiederum zu erkennen, dass diese mit steigendem Holzgehalt stark ansteigt. Zusätzlich sieht man, dass feine Holzpartikel im Verbund im Bereich unter etwa 40 Gew.-% Holz weniger schnell Wasser aufnehmen, jedoch ab 50 Gew.-% Holz wesentlich schneller als die Verbunde mit groben Holzpartikeln. Dies liegt daran, dass die feinen Holzpartikel zu Beginn prozentuell weniger an der Oberfläche präsent sind, jedoch durch die höhere spezifische Oberfläche schon bei geringeren Holzgehalten eine erhöhte Wasserwegsamkeit im Verbund aufweisen, wodurch auch die Wasseraufnahme beschleunigt wird.

Vergleicht man die Wasseraufnahmegeschwindigkeit von Weichholz- mit Hartholzpartikeln mit vergleichbaren geometrischen Abmessungen im Verbund, so sieht man, dass letztere etwas weniger schnell Wasser aufnehmen, was sich aus der dichteren Zellstruktur des Hartholzes gegenüber dem Weichholz erklärt.

Auch der Haftvermittler, welcher zur Überbrückung des Polaritätsunterschiedes zwischen der polaren Holzoberfläche und der apolaren Polypropylenoberfläche eingesetzt wird, beeinflusst die Wasseraufnahme (Abbildung 19) – durch die Anwesenheit des Haftvermittlers wird die maximale Sorptionsrate k_{Max} reduziert, was sich durch die verbesserte Anbindung zwischen Holz und Matrixpolymer und die daraus resultierenden reduzierten Angriffsmöglichkeiten für die Wassermoleküle erklärt.

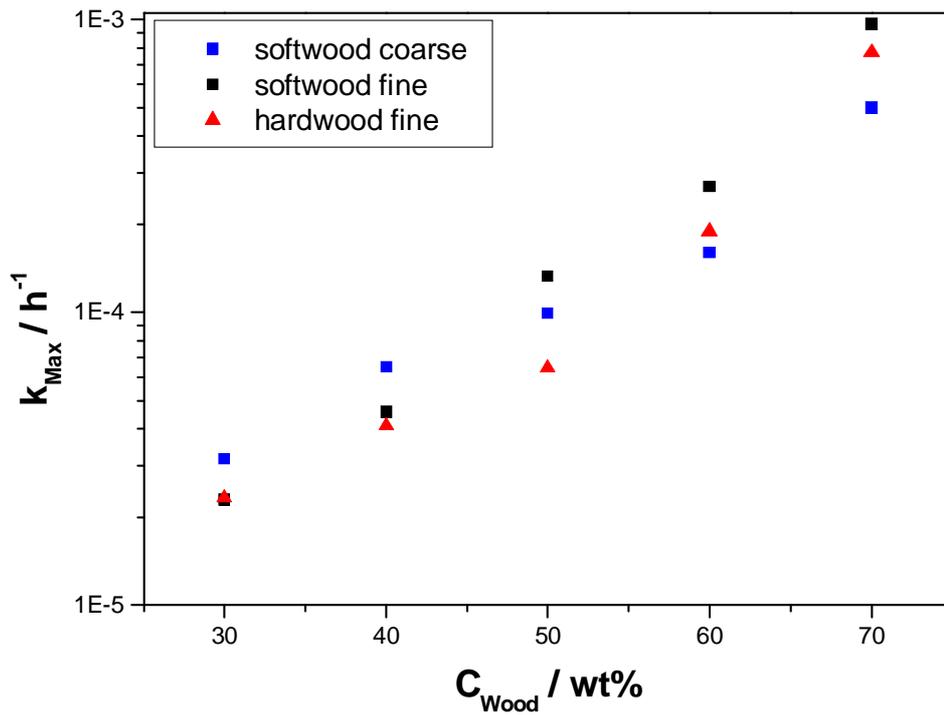


Abbildung 18: Maximale Sorptionsrate von WPC in Abhängigkeit von Holzgehalt, Holztype und Holzfeinheit

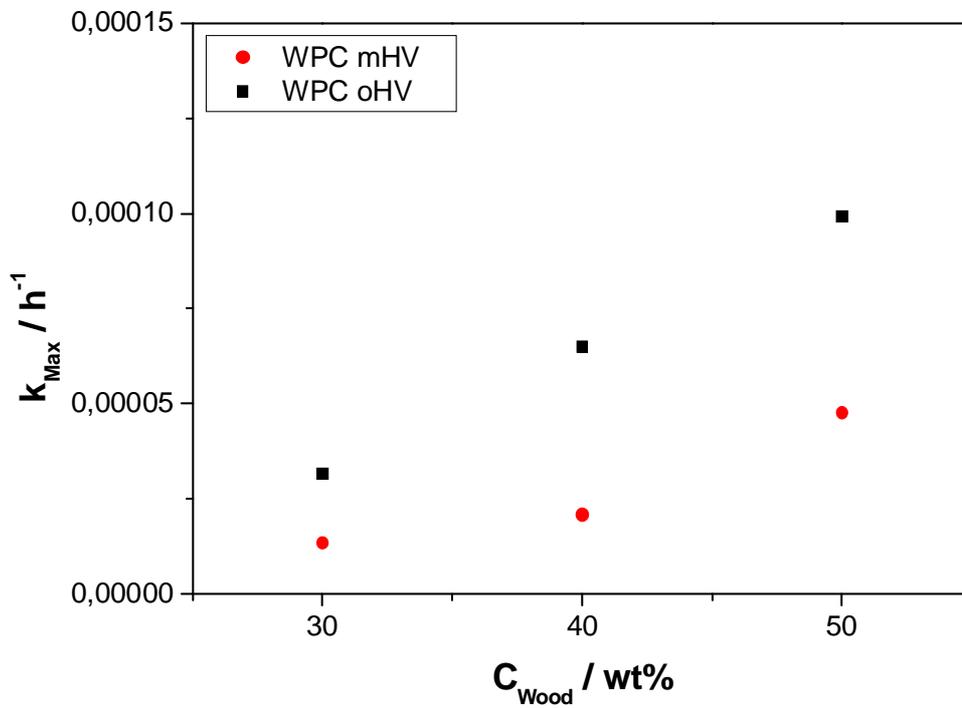


Abbildung 19: Maximale Sorptionsrate von WPC in Abhängigkeit von Holzgehalt und Haftvermittlerkonzentration

3.3. Behandlungen zur Verringerung der Wasseraufnahme

Zur Verringerung der Wasseraufnahme von WPC wurden verschiedene Methoden in Erwägung gezogen, welche aus den Bereichen Kunststoff und Additive, Chemikalien und Holzschutz ausgewählt wurden (Tabelle 2). Zur Überprüfung der prinzipiellen Tauglichkeit wurden Holzplättchen aus Weichholz (Fichte, 50x50x5 mm³) als Probekörper zur Oberflächenbehandlung verwendet.

Bei den Holzschutzbehandlungen, d.h. bei der enzymatischen Behandlung sowie der Behandlung mittels Holzschutzlasur wurden keine signifikanten Unterschiede in den Infrarotspektren der Holzoberfläche oder auch der Oberflächenenergie ermittelt. Nichtsdestotrotz wurden diese Behandlungen auch in der nächsten Phase weiter untersucht. Bei der thermischen Behandlung zeigen die Infrarotspektren der Oberfläche der Prüfkörper (Abbildung 20) eine Reduktion des Peaks zwischen 3000 – 3500 cm⁻¹, welcher die Schwingungen der freien (bzw. auch der mittels H-Brücken gebundenen) Hydroxylgruppen repräsentiert, wobei diese Reduktion mit steigender Behandlungstemperatur steigt. Dies zeigt, dass durch die thermische Behandlung ein Teil der Hydroxylgruppen intramolekulare Wasserstoffbrückenbindungen eingeht, wodurch diese Hydroxylgruppen nicht mehr für freies Wasser zugänglich sind.

Im Fall der anderen Behandlungen war es durch FTIR-Spektroskopie leider nicht möglich, Unterschiede zwischen behandelten und unbehandelten Holzprüfkörpern festzustellen, wie hier am Beispiel der Anhydride in Abbildung 21 dargestellt ist.

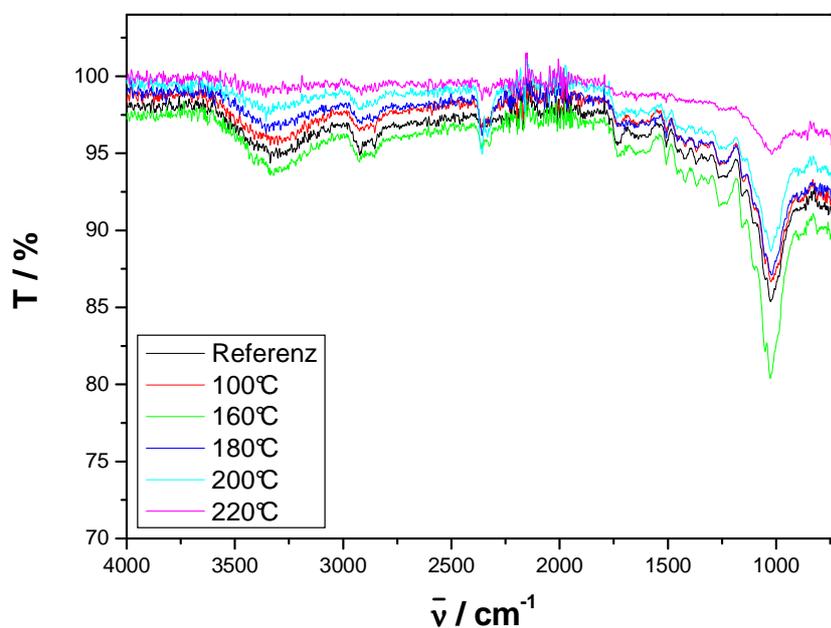


Abbildung 20: ATR-FTIR Spektren der mit unterschiedlichen Temperaturen behandelten Holzprüfkörper

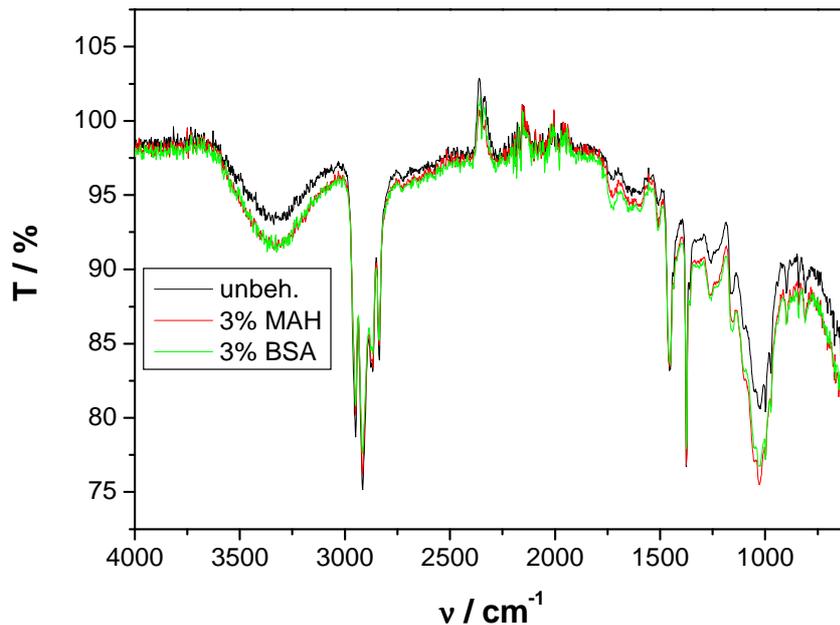


Abbildung 21: ATR-FTIR Spektren der mit unterschiedlichen Anhydriden behandelten Holzprüfkörper

Im Fall der Chemikalien zur Behandlung zeigte sich, dass sowohl die Anhydride als auch das Natriumsilikat und das Polyethylenglykol in das Holz einzogen. Selbiges gilt für die Gruppe der untersuchten Kunststoff-Additive, bis auf die beiden Verarbeitungshilfsmittel sowie den Schmelzkleber, welche sich, eventuell aufgrund der Viskosität oder auch der chemischen Struktur, nicht in zufriedenstellender Weise mit der Holzoberfläche verbunden hatten und damit auch nicht mehr weiter untersucht wurden. Bei den Polymeren EVA, EVA-MAH und EMA-GMA blieb zwar ein Teil der aufgetragenen Menge als erkalteter „Tropfen“ nach der Behandlung auf den Probekörpern zurück, aber es zeigte sich eine gute Benetzung, weswegen diese Materialien ebenfalls weiter untersucht wurden.

Im nächsten Schritt wurde dann das Wasserrückhaltevermögen (WRV) von mit den jeweiligen Methoden vorbehandelten Standard-Spänen untersucht. Wie in Abbildung 22 dargestellt ist, sinkt das WRV mit steigender Behandlungstemperatur, was ebenfalls wiederum auf die intramolekularen H-Brücken hinweist. Auch die Umsetzung mit PEG (Abbildung 23) reduziert das Wasserrückhaltevermögen zum Teil beträchtlich. Die weiteren, oben genannten Behandlungen reduzierten diese Eigenschaft ebenfalls, mit Ausnahme der Holzschutzlasur, wobei in diesem Fall wahrscheinlich die Konzentration eine Rolle spielt. Die bei den verschiedenen Versuchen zugesetzte Menge war allerdings zuletzt schon sehr hoch (ca. 30%), und wurde daher nicht mehr weiter untersucht.

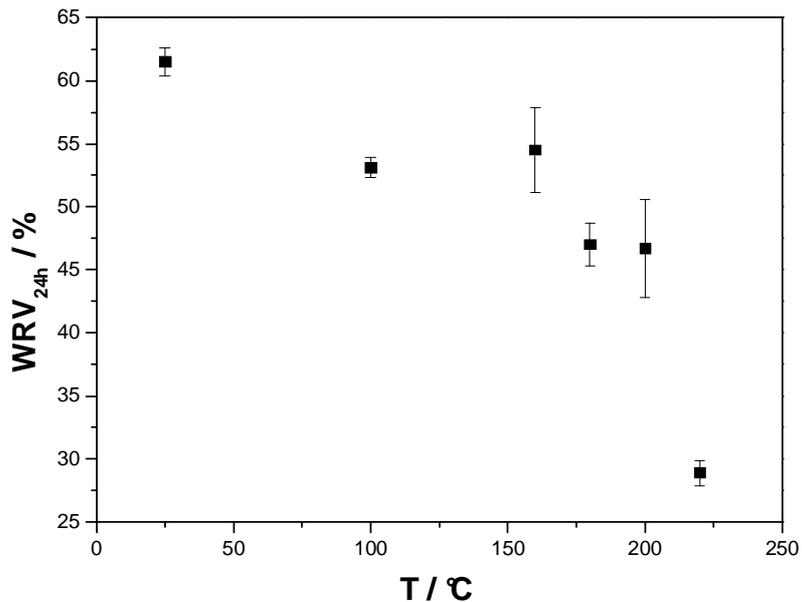


Abbildung 22: Wasserrückhaltevermögen von thermisch behandelten Holzspänen

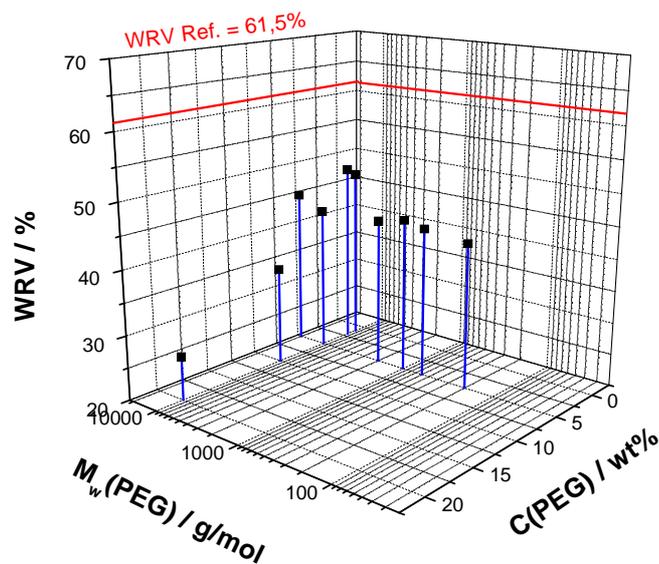


Abbildung 23: Wasserrückhaltevermögen von PEG in Abhängigkeit vom Molekulargewicht und der eingesetzten Konzentration

Im folgenden Schritt wurden dann WPC nach der festgelegten Standard-Rezeptur mit den behandelten Spänen hergestellt, um die Wasseraufnahme im Verbund zu untersuchen. Wie sich zeigt, reduziert die enzymatische Behandlung die Wasseraufnahme des Verbundes (Abbildung 24). Allerdings ist hier anzumerken, dass eine enzymatische Behandlung von Holz sehr aufwändig ist, und daher für die industrielle Herstellung von WPC aufgrund der Preissteigerung des Holzes eher nicht in Frage kommt.

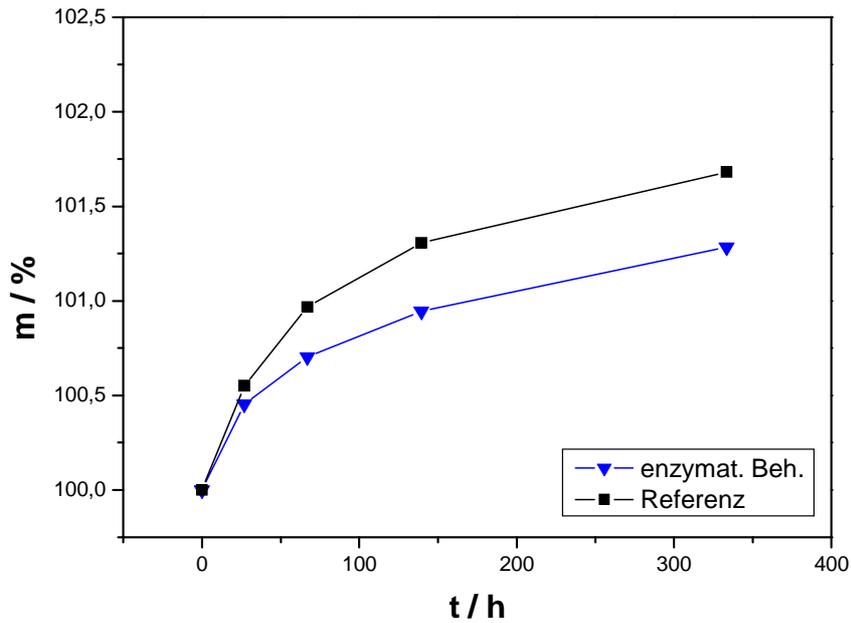


Abbildung 24: Auswirkung der enzymatischen Behandlung auf die Wasseraufnahme von WPC mit 50 Gew.-% Holz

Die Auswirkungen der thermischen Behandlung sind in Abbildung 25 dargestellt. Wiederum zeigt sich, wie beim WRV, eine Reduktion der Wasseraufnahme mit steigender Behandlungstemperatur. Auch die mechanischen Eigenschaften (Abbildung 26) werden nur in geringem Maß beeinflusst, was dieser Behandlungsmethode sehr interessant macht.

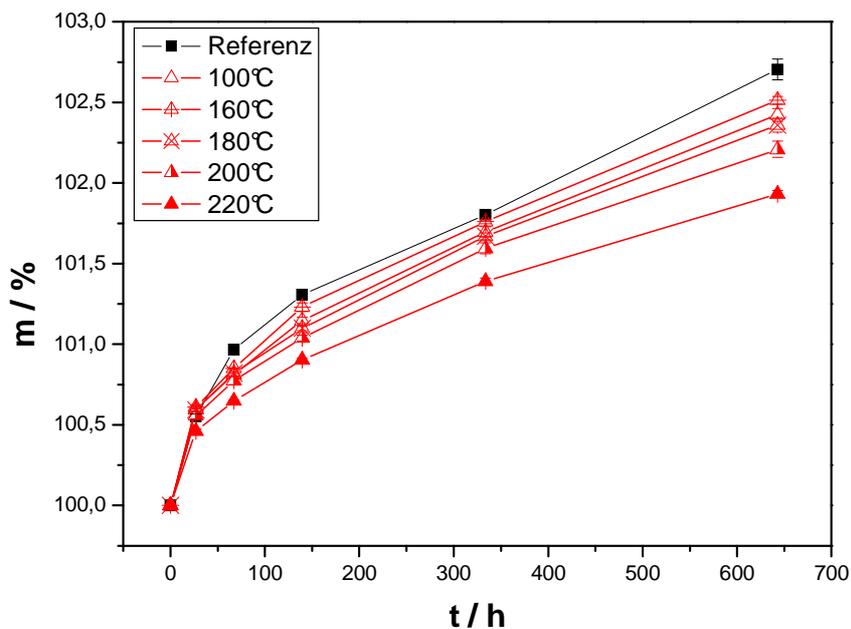


Abbildung 25: Auswirkung der thermischen Behandlung auf die Wasseraufnahme von WPC mit 50 Gew.-% Holz

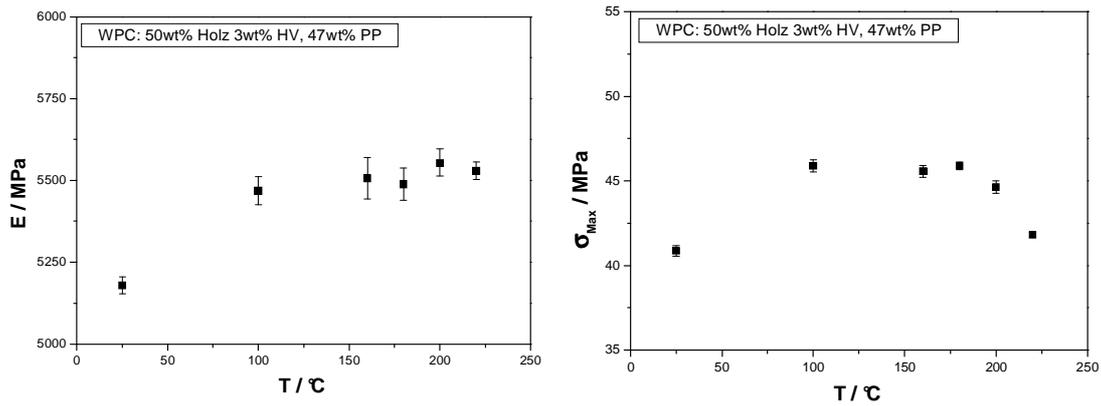


Abbildung 26: Mechanische Kennwerte der WPC mit thermisch behandeltem Holz und deren Abhängigkeit von der Behandlungstemperatur

Bei der chemischen Behandlung mit den Anhydriden zeigen die Verbunde ebenfalls eine Reduktion der Wasseraufnahme im Verbund (Abbildung 27), welche wahrscheinlich durch die Umsetzung der freien Hydroxylgruppen mit den Anhydriden zu Estern darstellt. Als zusätzlich vorteilhaft erweist sich der Umstand, dass die Behandlung die mechanischen Kennwerte der Verbunde nur in geringem Ausmaß beeinflusst (Abbildung 28) – der E-Modul verringert sich de facto gar nicht und die Festigkeit und Schlagzähigkeit werden nur um etwa 5% reduziert, was durch die verringerte Wasseraufnahme sehr gut kompensiert wird.

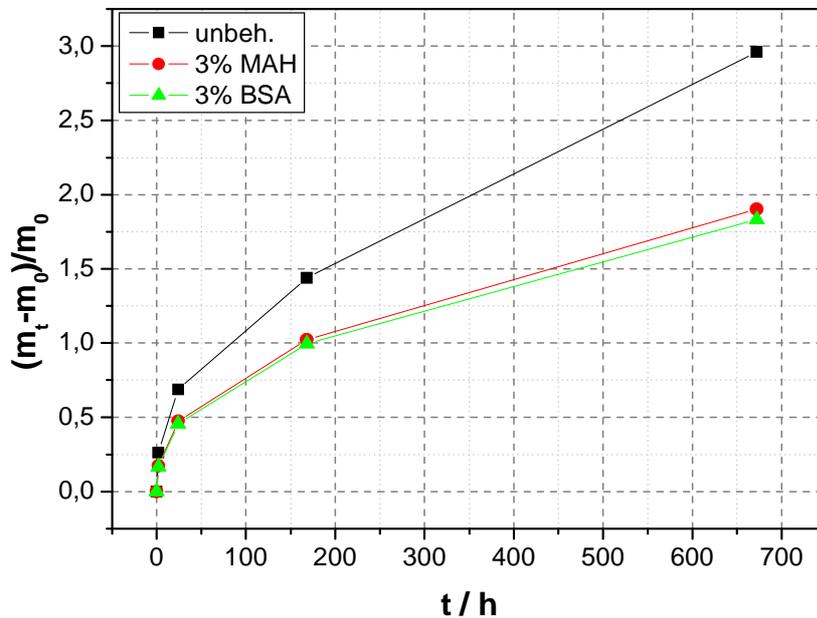


Abbildung 27: Auswirkung der Behandlung mit Anhydriden auf die Wasseraufnahme von WPC mit 50 Gew.-% Holz

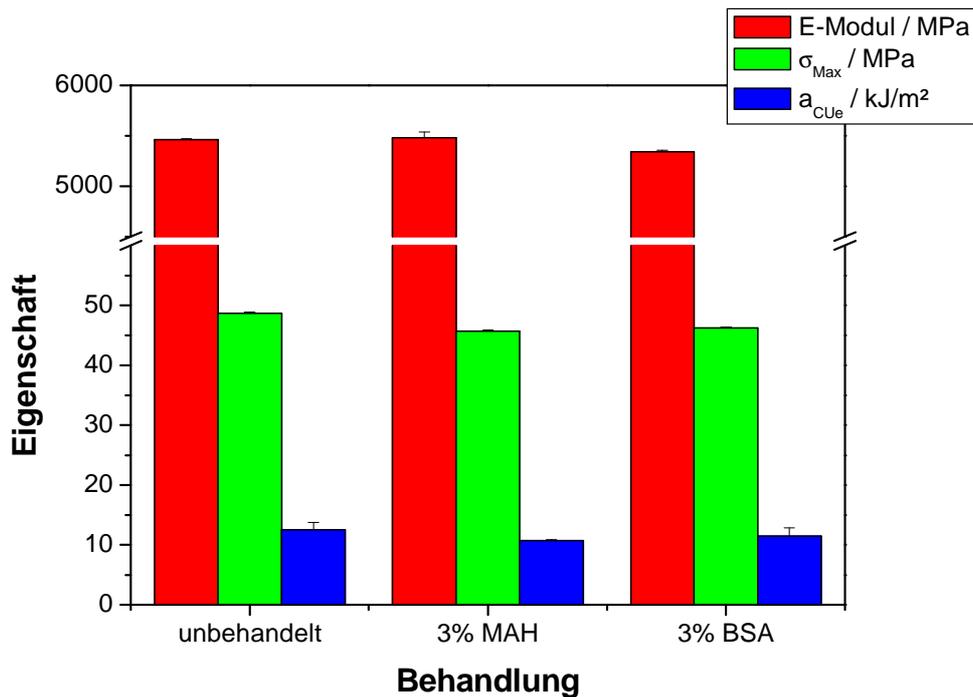


Abbildung 28: Mechanische Kennwerte der WPC mit 50% mit Anhydriden behandeltem Holz

Die Behandlung mit Polyethylenglykol zeigt zwar bei den Spänen eine reduzierte Wasseraufnahme, jedoch ergibt sich der gegenteilige Effekt im Verbund (Abbildung 29). Dieser Effekt ist wahrscheinlich dadurch zu erklären, dass das PEG während der Verarbeitung der Späne zum Verbund durch die hohen Temperaturen aus dem Holz ausgetrieben wird und somit eine erhöhte Wasserwegsamkeit im Verbund vorliegt.

Durch die Behandlungen mit EVA, EMA und EVA-MAH wurde die Wasseraufnahme der Verbunde nur geringfügig verbessert (Abbildung 30). Da diese Veränderungen in diesen Fällen so gering ausfielen, wurden diese Additive nicht weiter untersucht.

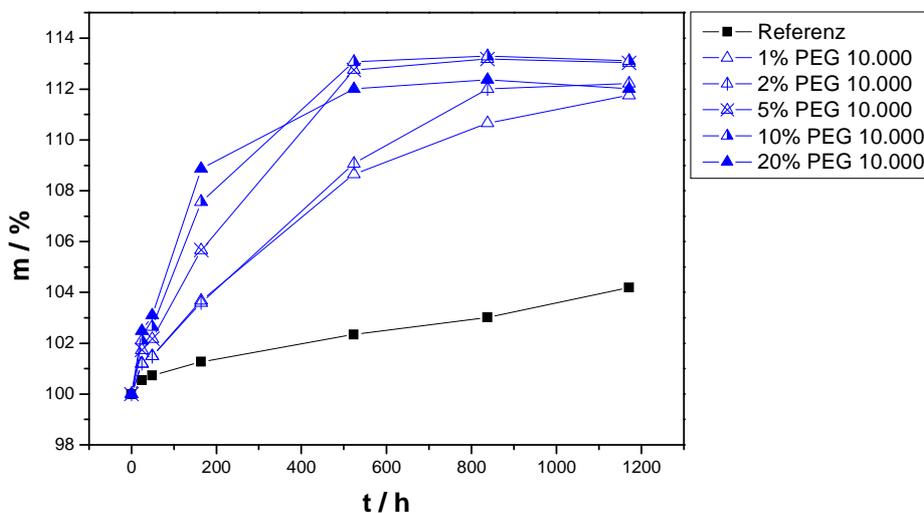


Abbildung 29: Auswirkung der Behandlung mit Polyethylenglykol auf die Wasseraufnahme von WPC mit 50 Gew.-% Holz

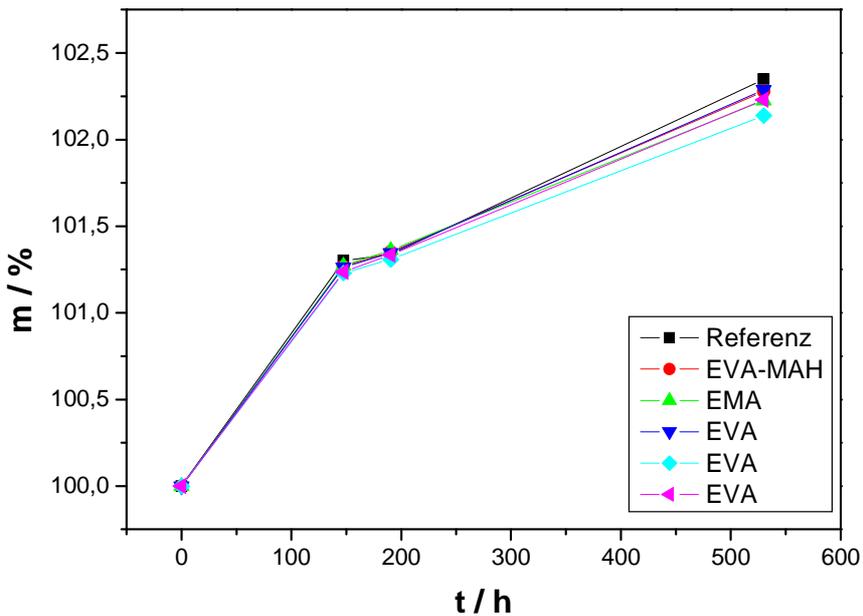


Abbildung 30: Auswirkung der Behandlung mit EVA, EVA-MAH und EMA auf die Wasseraufnahme von WPC mit 50 Gew.-% Holz

Auch die Behandlung des Holzes mit Natriumsilikat erbrachte nicht den gewünschten Erfolg, wie in Abbildung 31 abgelesen werden kann. Daher wurde dieses Additiv ebenfalls nicht weiter untersucht.

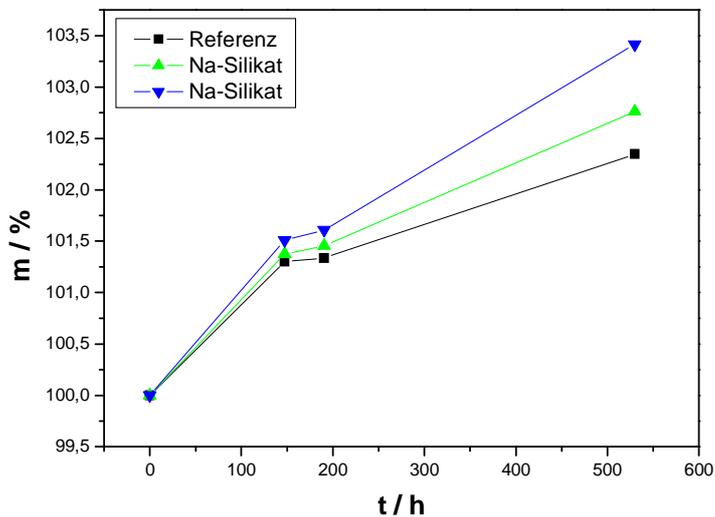


Abbildung 31: Auswirkung der Behandlung mit Natriumsilikat auf die Wasseraufnahme von WPC mit 50 Gew.-% Holz

Eine sehr effektive Behandlung ist jene mit Harzen, wie in Abbildung 32 dargestellt ist. Die Wasseraufnahme wird um bis zu 40% reduziert, wobei die mechanischen Eigenschaften (Abbildung 33) nahezu unverändert bleiben.

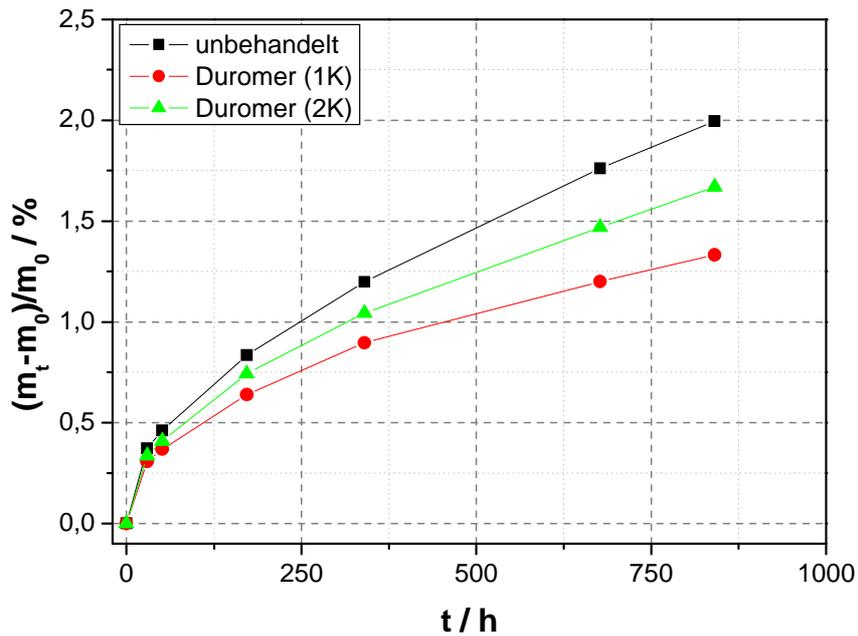


Abbildung 32: Auswirkung der Behandlung mit Duromeren auf die Wasseraufnahme von WPC mit 50 Gew.-% Holz

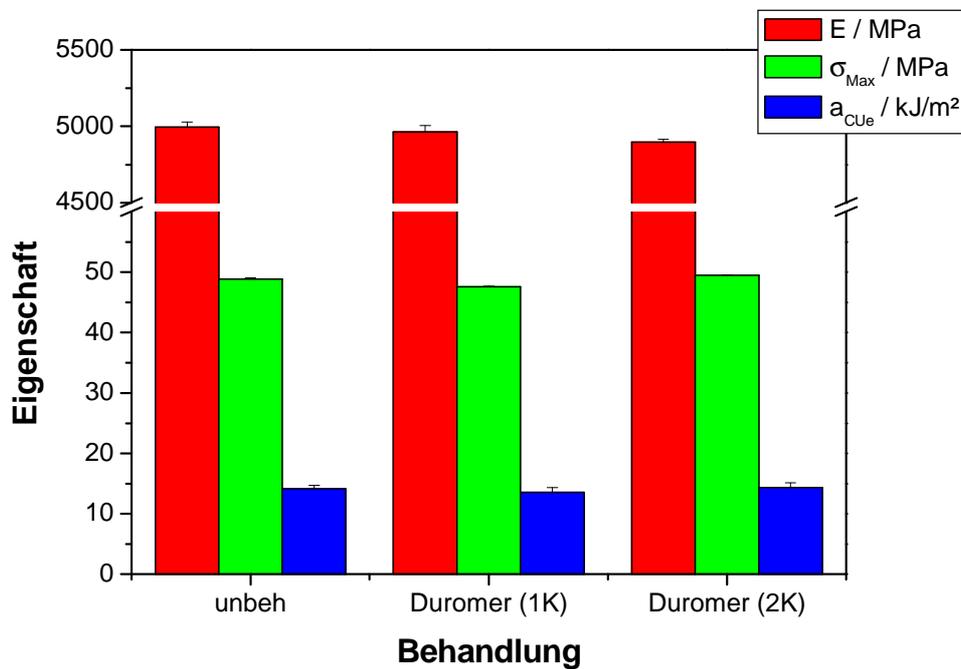


Abbildung 33: Auswirkung der Behandlung mit Duromeren auf die mechanischen Eigenschaften von WPC mit 50 Gew.-% Holz

Um die aus den vorhergegangenen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse zu verifizieren, wurde beim Projektpartner ein Extrusions-Anlagenversuch zur Herstellung von Hohlkammerprofilen mit behandelten Spänen durchgeführt. Hierbei wurden unbehandelte Späne als Referenz eingesetzt, sowie mit MAH, Harz und thermischer Behandlung vorbehandelte Späne (Abbildung 34).

Es zeigte sich, dass alle Behandlungen sehr effizient die Wasseraufnahme reduziert haben (Abbildung 35). Zusätzlich ist hier anzumerken, dass die extrudierten Profile aufgrund des geringeren Drucks im Prozess (im Vergleich zum Spritzguss) auch eine höhere Wasseraufnahme als die spritzgegossenen Proben aufweisen. Somit wurde hier gezeigt, dass auch mit geringem zusätzlichem Aufwand die Wasseraufnahme von WPC stark verringert werden kann, und somit auch die Produktqualität erheblich verbessert wird.

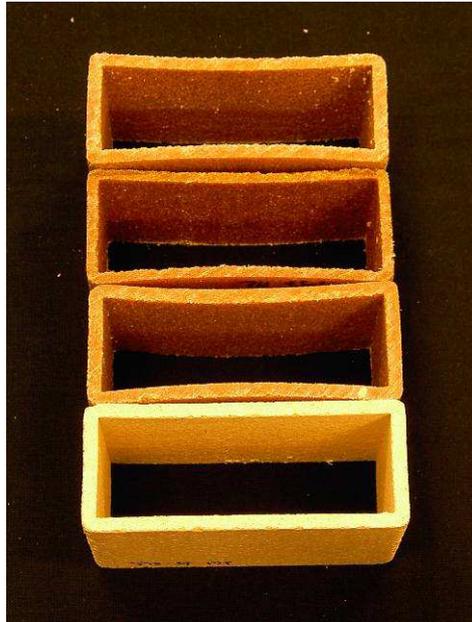


Abbildung 34: Im Anlagenversuch hergestellte Hohlkammerprofile mit thermische behandelten Spänen, mit MAH behandelten Spänen, mit Harz behandelten Spänen sowie mit einer Referenzrezeptur (von oben nach unten)

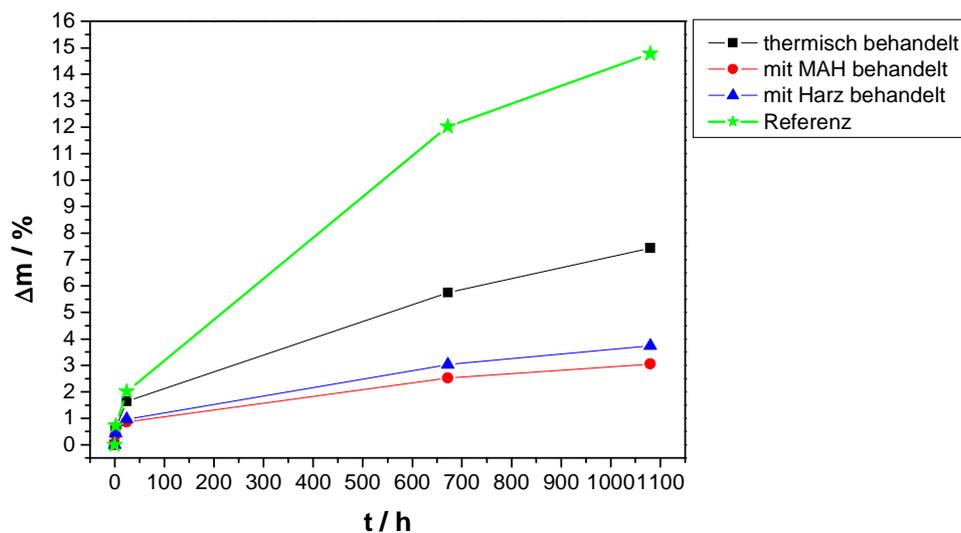


Abbildung 35: Einfluss der Spänevorbereitung auf die Wasseraufnahme von extrudierten Profilen

3.4. Behandlungen der Holzpartikel zur Wasseraufnahmereduktion und vergleichende Bewertung

Wie im vorangegangenen Abschnitt angeführt, gibt es nun verschiedenen Wege, die Wasseraufnahme zu reduzieren. Diese unterscheiden sich einerseits in ihrer Effizienz, was den Absolutwert der Reduktion betrifft, allerdings auch hinsichtlich des Einflusses auf die mechanischen Eigenschaften und den Preis. Zur Vereinfachung werden in diesem Abschnitt nur die drei Behandlungen betrachtet, welche auch für den Anlagenversuch ausgewählt wurden, da für diese auch wirklich vergleichbare Ergebnisse (z.B. hinsichtlich Prüfkörperherstellung und Verarbeitung zum Verbund) eben aus diesem Versuch vorliegen. Betrachtet man nun die in Tabelle 3 angeführten Eigenschaften, so sieht man, dass die Behandlung mit Anhydrid zwar die höchste Reduktion der Wasseraufnahme erwirkt, jedoch auch bei der Verarbeitung gesundheitliche Risiken auftreten können, wenn nicht durch ausreichende Obsorge für den korrekten Umgang mit dem Anhydrid gesorgt wird.

Auf der anderen Seite ist die Wasseraufnahmereduktion durch die thermische Behandlung ebenfalls beachtenswert, und, wenn auch geringer, nur hinsichtlich des höheren Energieaufwandes gegenüber den anderen Verfahren im Nachteil. Zwei Punkte sind hierbei anzumerken – einerseits ist das thermische Verfahren sicher am sensitivsten hinsichtlich der Parameter der Behandlung, und andererseits dunkeln die Holzpartikel nach, was bei sehr hellen Produkten problematisch sein kann.

Die Behandlung mit einem Duromer stellt sicherlich auch eine sehr gute Alternative dar, welche anhand der hier diskutierten Punkte zwischen die beiden zuvor diskutierten Verfahren einzureihen ist, da zwar der Additivpreis zu Buche schlägt, allerdings auch eine hohe Reduktion der Wasseraufnahme erreicht werden kann. Ein Vorteil gegenüber der noch effizienteren Behandlung mit Anhydrid ist sicherlich, dass nach der Aushärtung keine in gesundheitlicher Hinsicht bedenkliche Stoffe aus dem Verbund migrieren können.

Tabelle 3: Vergleich der verschiedenen Behandlungen

Eigenschaft	thermisch	Anhydrid	Duromer
Reduktion Wasseraufnahme	~50%	~80%	~75%
Additivkosten pro kg Holzspäne	0 €	0,45 €	0,30 – 0,50 €
zusätzlicher Energieaufwand	hoch	mittel	mittel
Einfachheit der Behandlung	++	~	+
Probleme mit Migration der Behandlung	keine	gering	keine
gesundheitliche Risiken bei der Verarbeitung	keine	möglich	möglich
negative Beeinflussung von Produkteigenschaften	Farbe (ist dunkler als gewöhnlich)	nein	nein

Zusammenfassend ist hier noch anzumerken, dass alle drei Verfahren prinzipiell gut anwendbar sind. Eine Einbindung in Produktionsabläufe in großem Maßstab ist jedoch sicherlich noch ein aufwändiges Projekt, vor allem hinsichtlich der maschinellen Ausrüstung zur Holzvorbehandlung. Nach Meinung des Autors kann eine solche Investition sich durch mehrerlei Faktoren bezahlt machen – vor allem durch die höhere Beständigkeit gegen Wasseraufnahme und die dadurch reduzierten Probleme während der Produktlebenszeit.

4. Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

- **Was sind die in dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse für das Projektteam (fachliche Einschätzung)?**

Im Rahmen dieses Projektes wurden verschiedene Problemstellungen hinsichtlich der Wasseraufnahme von WPC behandelt.

Die **Mechanismen** hinsichtlich der **Wasseraufnahme** wurden mit relativ einfachen Methoden bzw. mit dementsprechend gewählten Auswertungen evaluiert, wobei sich zeigte, dass prinzipiell zwei Mechanismen für die Wasseraufnahme eine Rolle spielen. Einerseits ist dies die Aufnahme von Wasser aus der Umgebung in den Verbund, und andererseits der Weitertransport innerhalb des Verbunds. Während beide Faktoren stark vom Holzanteil und auch der Holzpartikelgeometrie des WPC abhängen, ist jedoch der zweite Faktor im Bereich der extrudierten Profile sicherlich der ausschlaggebende, da zwar die Aufnahme in den Verbund durch dementsprechende Beschichtungen verringert werden kann, jedoch eine Verletzung einer solchen Außenhaut durch den Einbau (z.B. durch Schrauben oder den Zuschnitt) zwangsläufig vorkommt und somit genau dort die Probleme auftreten. Die Ermittlung dieser Mechanismen zeigte wiederum die Notwendigkeit auf, die Holzspäne an sich gegen die Wasseraufnahme resistent zu machen.

Aus der **Ermittlung der Einflüsse der Rezeptur auf die Wasseraufnahme** wurde wiederum deutlich, wie viele Einflussfaktoren, wie etwa Holzanteil, Holzfeinheit, Polymertypen oder Verarbeitungsrouten, existieren, jedoch auch, wie diese zur Reduktion der Wasseraufnahme benutzt werden können. Im Detail bedeutet das, dass auch eine kleine Veränderung der Rezeptur eines WPC schon einen großen Einfluss auf die Wasseraufnahmeeigenschaften haben kann.

Im dritten Hauptteil des Projekts wurde an der **Verringerung der Wasseraufnahme** durch verschiedenste Methoden gearbeitet. Nach einem anfänglichen Screening wurden verschiedene Verfahren aufgrund ihrer Unwirksamkeit (z.B. Behandlung mit PEG) oder auch aufgrund des ohnehin zu aufwändigen Behandlungsverfahrens (z.B. die enzymatische Behandlung) nicht weiter verfolgt. Als die wirklich erfolversprechenden Methoden erwiesen sich die thermische Behandlung, die Behandlung mit Anhydriden sowie die Behandlung mit Harzen. Diese Ergebnisse wurden auch im Rahmen eines Großversuchs beim Projektpartner hinsichtlich ihrer Wirksamkeit anhand eines Hohlkammerprofils untersucht und als geeignet befunden. Dies ist nach Meinung des Autors auch das **Projekthighlight**, da es gelungen ist, ausgehend von stark vereinfachten Auswahlverfahren (Prüfungen an Holzplättchen bzw. an den behandelten Spänen) den Entwicklungsaufwand soweit einzudämmen, dass auch die Möglichkeit zur realitätsnahen Überprüfung der Ergebnisse gegeben war.

- **Wie arbeitet das Projektteam mit den erarbeiteten Ergebnissen weiter?**

Das F&E-Institut arbeitet insofern mit den Projektergebnissen weiter, als die Grundlagenbetrachtungen für WPC sich auch auf andere Verbunde nach einer Anpassung übertragen lassen sollten. Somit werden diese Forschungsergebnisse auf alle Fälle weiter genutzt.

Der Firmenpartner wird aller Wahrscheinlichkeit nach versuchen, die sehr guten Ergebnisse mittelfristig zur Verbesserung der Produkte einzusetzen, was auch durch die verbesserte Produktqualität wiederum einen Nutzen im Gegenzug zu den noch notwendigen Investitionen darstellt.

- **Für welche anderen Zielgruppen sind die Projektergebnisse relevant und interessant und wer kann damit wie weiterarbeiten?**

Eine weitere Zielgruppe sind andere F&E-Institute, für welche diese Ergebnisse auch insofern interessant sind, da die ermittelten Zusammenhänge bzw. Modellbetrachtungen auch auf andere Werkstoffe anwendbar sein können und auch durchaus neue Denkanstöße geben können.

Weiters können die Ergebnisse für die Erschließung neuer Anwendungen im WPC-Bereich ebenfalls für die Industrie von Interesse sein.

4.1. Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie

- **Einpassung in die Programmlinie**

Dieses Projekt passte aufgrund mehrerer Gründe sehr gut in die Programmlinie „Fabrik der Zukunft“. Einerseits wird durch die Nutzung von Holzreststoffen in einem nicht der Energiegewinnung zuzurechnendem Bereich auch eine höhere Wertschöpfung – auch in ökologischer Hinsicht durch die Reduktion von erdölbasierten Rohstoffen im Produkt – generiert. Andererseits tragen die Projektergebnisse auch zu einer verbesserten Produktion bei, da, wenn die WPC eine gute Beständigkeit für die Außenanwendung aufweisen, sich diese Produkte auch zusätzliche Marktanteile sichern können, welche bisher eher durch importierte Hölzer belegt sind.

- **Beitrag zum Gesamtziel der Programmlinie**

Durch die effiziente Nutzung nachwachsender Rohstoffe trägt dieses Projekt zum Gesamtziel der Programmlinie Fabrik der Zukunft bei. Neben den ökonomischen Vorteilen des Einsatzes von Holzreststoffen repräsentieren diese auch eine nachhaltige Nutzung der Rohstoffquelle Holz, da die Reststoffe vor der thermischen Verwertung noch einen zusätzlichen, hochwertigen Produktlebenszyklus durchlaufen.

- **Beitrag zu den Zielen der 5. Ausschreibung**

Das angestrebte Forschungsprojekt zur Behebung der Probleme von Wood Plastic Composites (WPC) durch die mit dieser Materialklasse verbundene Wasseraufnahme und deren negativer Auswirkung auf die Eigenschaften ist mit der Programmlinie Fabrik der Zukunft insofern konform, da es sich hier um die Ermöglichung bzw. Erschließung der **Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen**, in diesem Fall Holzpartikel, in Verbunden für strukturelle Anwendungen mit einem gesicherten Eigenschaftsprofil handelt. Die Reduktion der Wasseraufnahme eröffnet Anwendungsmöglichkeiten, von denen WPC bisher ausgeschlossen war, da die mechanischen Eigenschaften mit der Wasseraufnahme reduziert werden, und somit die zeitliche Beständigkeit

nicht gewährleistet werden konnte. Aus diesem Grund trägt das Projekt zum **Prinzip der Dienstleistungs-, Service- und Nutzenorientierung** insofern bei, da hier das Projektziel eine wissensbasierte Reduktion der Wasseraufnahme darstellt, womit für spätere, dem Projekt nachfolgende, Anwendungen zugeschnittene Lösungen entwickelt werden können.

Die Rohmaterialien für Wood Plastic Composites sind vor allem Holzpartikel und Polyolefine. Diese Holzpartikel stammen aus z.B. Sägewerken oder Holzverarbeitenden Betrieben und sind eindeutig als **erneuerbare Ressource** anzusehen. Thermoplastische Kunststoffe und deren Verbunde sind rezyklierbar, daher können auch WPC stofflich wiederverwertet werden. Weiters können für WPC teilweise auch **rezyklierte** Kunststoffe, wie z.B. Polyolefine eingesetzt werden. Eine dem Projekt nachfolgende Umsetzung kann relativ leicht geschehen, da die Verarbeitung dieser Materialien mittels Standard-Kunststoffverarbeitungsmaschinen erfolgt. Die im Projekt zu untersuchenden Verfahren zur Verbesserung der Wasseraufnahmeresistenz von WPC werden auch hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für solche Prozesse untersucht, wodurch die Kriterien für das **Prinzip der Einpassung, Flexibilität, Adaptionfähigkeit und Lernfähigkeit** eingehalten werden.

Die in der Produktion von WPC angewandten Technologien wie die Extrusion oder der Spritzguss sind, wie in der Industrie allgemein bekannt, solche Prozesssysteme, bei denen keine Störfälle mit erheblichen Auswirkungen zustande kommen können, weder in ökonomischer Hinsicht noch in Bezug auf Arbeitssicherheit und Schutz des Bedienpersonals. Da hierbei keine Risiken auftreten, wird auch das **Prinzip der Fehlertoleranz und Risikovorsorge** erfüllt.

Die Verwendungsmöglichkeit von WPC in den unterschiedlichsten Anwendungsgebieten eröffnet vielfältige Möglichkeiten zur Schaffung von Arbeit, da bei erfolgreicher Marktimplementierung einerseits positiv zur Arbeitsschaffung in Österreich beigetragen wird und auch durch die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen positiv zur ökologischen Gesamtsituation beigetragen wird. Neue Arbeitsplätze könnten durch WPC insofern geschaffen werden, wenn damit eine Substitution von importierten Hölzern erreicht werden kann. Dies und auch der Aspekt, dass die Produktion von WPC aufgrund von Überlegungen zum Transport der Holzpartikel, die eine geringe Schüttdichte aufweisen, normalerweise an oder nahe dem Ort stattfindet, wo diese Holzpartikel anfallen, trägt zum **Prinzip der Sicherung von Arbeit, Einkommen und Lebensqualität** in Österreich bei.

- **Einbeziehung der Zielgruppen (Gruppen, die für die Umsetzung der Ergebnisse relevant sind) und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt.**

Da dieses Projekt sich hauptsächlich mit den Grundlagen der Wasseraufnahme und der Verringerung derselbigen beschäftigt hat, und somit großen Grundlagenforschungscharakter aufwies, wurde mit dem Projektpartner ein Hersteller von WPC miteinbezogen, da eine weiter greifende Miteinbeziehung von z.B. EndkonsumentInnen, in dieser Phase der Entwicklung kaum Nutzen gebracht hätte. Weiters ist hier festzuhalten, dass beim Projektpartner ohnehin die Entwicklung des Deckings auch unter Berücksichtigung der Wünsche und Anmerkungen von den Verlegern und Endkunden durchgeführt wurde und wird, wodurch auch in diesem Projekt nicht am Markt vorbeigearbeitet werden konnte.

- **Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale (Marktpotenzial, Verbreitungs- bzw. Realisierungspotential) für die Projektergebnisse.**

– Marktpotenzial:

Das Marktpotential durch die Behandlung von Holzspänen für Wood Plastic Composites, welche sich durch Ihre Resistenz gegenüber Wasseraufnahme auszeichnen, ist sehr vielfältig, und gerade im Bereich der Außenanwendungen werden viele Einsatzbereiche für solche multifunktionellen Materialien eröffnet. Als Beispiel ist hier die Anwendung im Bereich Garten zu nennen, z.B. als Terrassenbelag, welches durch die reduzierte Wasseraufnahme mit Tropenhölzern technisch und wirtschaftlich konkurrenzfähig wird. Weiters lassen sich durch die thermoplastische Verarbeitbarkeit der WPC Hohlprofile mit Oberflächenstruktur herstellen, welche neben dem reduzierten Bauteilgewicht zusätzlich Vorteile in der Montage und der Langlebigkeit durch erweiterte Funktionalitäten aufweisen.

Obwohl WPC-Terrassenbeläge an sich schon am Markt erhältlich sind, diese jedoch nur mittelmäßige bis geringe Resistenz gegen Wasseraufnahme aufweisen, was sich problematisch auf die Gewährleistung des Herstellers und auf das Kaufverhalten der Endkonsumenten auswirkt, können mit den erarbeiteten Forschungsergebnissen dem Projekt nachfolgend WPC mit sehr guter Resistenz gegen Wasseraufnahme hergestellt werden, wodurch sich aus technischer Sicht bisher nicht gangbare Märkte auftun.

– Verbreitungs- bzw. Umsetzungspotenzial:

Da die Partnerfirmen große wirtschaftliche Potenz und einen guten internationalen Ruf besitzen, wird eine rasche Marktdurchdringung sichergestellt. Vor allem die sehr auf die Qualität bedachte Weiterentwicklung beim Projektpartner stellt sicher, dass die Ergebnisse des Projektes sich zumindest mittelfristig auch in verbesserten Produkten wiederfinden werden.

- **Potential für Demonstrationsvorhaben (Chancen / Schwierigkeiten / Risiken bei der Realisierung / Umsetzung in Richtung Demonstrationsprojekt?) Beschreibung der Ziele, die in dem Projekt verfolgt werden und Darstellung, ob und wie diese erreicht wurden.**

Das Potential für Demonstrationsvorhaben ist sicherlich etwas begrenzt, da für solche Vorhaben auch sehr viel Know-How des Herstellers an die Öffentlichkeit gelangen würde, und sich dadurch auch Probleme mit dem Wettbewerb ergeben würden.

Die Ziele in diesem Projekt waren die Aufklärung der Wasseraufnahme und Transportmechanismen im WPC, auch in Korrelation mit der Rezeptur und deren Bestandteilen sowie die Verringerung der Wasseraufnahme durch die Behandlung des Holzes. Wie schon in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt wurde, wurden diese Ziele allesamt erreicht. Hinsichtlich der grundlegenden Parameter der Wasseraufnahme wurden die Einflüsse wie etwa Holzanteil, Holzfeinheit, Polymertypen oder Verarbeitungsrouten genauer dargestellt. Auch verschiedene Wege zur Reduktion der Wasseraufnahme wurden aufgezeigt, wenn auch manche durch ökonomische Faktoren eher unwahrscheinlich für eine Anwendung sind.

Es ist zwar nicht möglich, ein (industriell hergestelltes) WPC-Profil komplett resistent gegen die Wasseraufnahme auszurüsten, jedoch zeigte sich, dass **Verringerungen um bis zu 80% (!)** möglich sind.

4.2. Ausblick und Empfehlungen

- **Wo liegen die Chancen / Schwierigkeiten / Risiken bei der Realisierung / Umsetzung in Richtung Demonstrationsprojekt?**

Das Potential für Demonstrationsvorhaben ist sicherlich etwas begrenzt, da für solche Vorhaben auch sehr viel Know-How des Herstellers an die Öffentlichkeit gelangen würde, und sich dadurch auch Probleme mit dem Wettbewerb ergeben würden. Die Risiken für ein Demonstrationsprojekt, welches auf diesen Ergebnissen basiert, sind als eher gering zu erachten und beziehen sich am ehesten auf die notwendigen Anlageninvestitionen und das damit verbundene finanzielle Risiko.

- **Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten**

Weiterführende Untersuchungen im Bereich WPC sollten sich nach Meinung des Autors vor allem mit zwei Bereichen beschäftigen – nämlich mit der gezielten Modifizierung der Grenzfläche zwischen Holz und Polymer, da gerade diese den größten Einfluss auf die Verbundeigenschaften ausübt, und mit der anwendungsorientierten Untersuchung verschiedener Herstellungsverfahren für WPC, um die existenten Verfahren noch weiter hinsichtlich Ressourcen- und Energieeffizienz zu verbessern.

- **Resümee hinsichtlich der Ziele, die in dem Projekt verfolgt wurden - Darstellung, ob und wie diese erreicht wurden.**

Die Zielsetzung in diesem Projekt wurde in folgende Hauptteile gegliedert: Zum Einen ging es darum, die Mechanismen der Wasseraufnahme im Verbund mittels geeigneter Testmethoden aufzuklären, wobei besonders die physikalische Natur, d.h. Geometrie und Verteilung der Partikel im Verbund berücksichtigt werden soll. Des Weiteren sind hier Einflüsse wie Ausrichtung der Holzpartikel, Resistenz des Polymers gegen Wasseraufnahme und Diffusion sowie die generelle Zusammensetzung zu nennen. Andererseits sollten auf Basis dieser Ergebnisse Strategien zur Verringerung bzw. Unterdrückung der Wasseraufnahme im Verbund erarbeitet werden, wobei bei diesem Punkt in Hinblick auf eine spätere (nicht im Rahmen des Projektes angestrebte) Verwertung Wert auf eine relativ einfache Durchführbarkeit, eine ökologisch verträgliche Methode und ein angemessenes Kosten-Nutzen-Verhältnis gelegt wird.

Dieses Ziel wurde eindeutig erreicht, da es innerhalb der Projektlaufzeit gelungen ist, die dazu notwendige Wissensbasis zu erarbeiten und dieses Wissen auch in eine für die Unternehmenspartner verarbeitbare und anwendbare Rezeptur umzusetzen, wie auch die Herstellung von Hohlkammerprofilen und deren Testung mit diesen Versuchsrezepturen zeigt.

Auch die Publikationen aus diesem Projekt, die im Anhang zu finden sind, und das dementsprechend große Interesse aus Industrie und Forschung an diesen spiegeln die wissenschaftliche Relevanz dieses Forschungsprojekts wider.

5. Literaturverzeichnis

1. Vogt D., Karus M., Ortmann S., Schmidt C., Pleh A., Wood Plastic Composites – Märkte in Nordamerika, Japan und Europa mit Schwerpunkt auf Deutschland – Technische Eigenschaften, Anwendungsgebiete, Preise, Märkte, Akteure, Studie nova-Institut, Hürth, 2005
2. Bledzki A.K., and Faruk O. Wood fibre reinforced polypropylene composites: Effect of fibre geometry and coupling agent on physico-mechanical properties, Applied Composite Materials 10 (2003) 365
3. Stark N.M., Influence of moisture absorption on mechanical properties of wood flour-PP composites, Journal of Thermoplastic Composite Materials 14 (2001) 421
4. Espert, A., Vilaplana, F., and Karlsson, S. Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties, Composites Part A: Applied science and manufacturing 35 (2004) 1267
5. Steckel V., Clemons C.M., and Thoemen H. Effects of material parameters on the Sorption and Diffusion of polypropylene wood flour composites, Journal of Applied Polymer Science 103 (2007) 752
6. Wang W., Sain M., and Cooper P.A. Study of moisture absorption in natural fiber plastic composites, Composite Science and Technology 66 (2006) 379
7. Burgstaller C., and Stadlbauer W. The influence of moisture content on the mechanical properties of wood and natural fibre reinforced composites, Presentation at: ANTEC09 (2009) Chicago, IL, USA
8. W. Grellmann, S. Seidler, Kunststoffprüfung. 1. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2005
9. Jander-Jahr, Maßanalyse: Theorie und Praxis der Titration mit chemischen und physikalischen Indikatoren, WdeG, Berlin, 2003
10. Lohmann U., Holz-Handbuch, 6. Auflage (2005) 113

6. Anhang

Im Rahmen dieses Projektes wurden folgende Beiträge publiziert sowie ein Patent zur Anmeldung eingereicht:

Deutsche Patentanmeldung 10 20 10 03 48 55.4, angemeldet am 18.08.2010

Titel: Formkörper umfassend ein thermoplastisches Material und ein Naturfasermaterial

Anmelder: Rehau AG

Erfinder: Martin Sonntag
Christoph Burgstaller

Burgstaller C, Priller B, Stadlbauer W, Improving interfacial adhesion in wood plastic composites, Presentation at: ANTEC11 (2011), Boston, MA, USA

Burgstaller C, Priller B, Stadlbauer W, Influence of WPC formulation on water vapor absorption characteristics, Poster presentation at: 11th International Conference on Wood & Biofiber Plastic Composites (2011), Madison, WI, USA

Priller B, Burgstaller C, Stadlbauer W, Detection of the moisture content of wood and cellulose fibre reinforced polypropylene with the Karl-Fischer-titration, Poster presentation at: ASPM 2010 (2010), Leoben, Austria

Priller B, Burgstaller C, Stadlbauer W, The influence of geometrical parameters on water absorption of cellulose fibre reinforced polypropylene, Poster presentation at: 8th Global WPC and Natural Fibre Composites Congress and Exhibition (2010), Fellbach, Germany

Burgstaller C, Stadlbauer W, Water uptake of cellulose reinforced polypropylene matrix composites, Poster presentation at: ECCM 14 (2010), Budapest, Hungary