

Wood Plastic Composites

Neue Wertschöpfung aus Holzspänen
Entwicklung einer Holzspänedirektdosierung
Entwicklung eines Extrusionswerkzeuges

W. Stadlbauer, E. Sehnal, L. Weiermayer

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

68/2006

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 Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Wood Plastic Composites

Neue Wertschöpfung aus Holzspänen
Entwicklung einer Holzspänedirektdosierung
Entwicklung eines Extrusionswerkzeuges

Dr. Wolfgang Stadlbauer
Transfercenter für Kunststofftechnik –
Upper Austrian Research GmbH

Mag. Ing. Erik Sehnal
Cincinnati Extrusion GmbH

Leopold Weiermayer
Greiner Extrusionstechnik GmbH

Wels, Nov. 2006

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

PROJEKTMITARBEITER

Transfercenter für Kunststofftechnik - Upper Austrian Research GmbH

Dipl.Ing. Dr. Robert Putz

Dipl.Ing. Rotraud Leitgeb

Dipl.Ing. Gernot Schaffler

Ing. Harald Ladner

Karl Moser

Andreas Gösweiner

Mario Lintschinger

Johannes Kepler Universität Linz, Institut für Polymerwissenschaften

a.Univ.Prof. Mag.Dr. Alois Schausberger

Universität für Bodenkultur, Institut für Holzforschung

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Alfred Teischinger

Dipl.-Ing. Dr. Ulrich Müller

Greiner Extrusionstechnik GmbH

Dipl. Ing. Mag. Thomas Mayer

Trodat GmbH

Dipl.Ing. Klemens Tremel

IFN Internorm Bauelemente GmbH & Co KG

Dipl.Ing. Dr. Hanspeter Mattischek

IFN Internorm Bauelemente GmbH & Co KG

Markus Rothberger

GriffnerHaus AG

Dipl.Ing. Harald Sauer

Ari Griffner

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. Kurzfassung (1 Seite)	5
2. Kurzfassung (5 Seiten)	7
3. Einleitung	17
3.1 Allgemeine Einführung	17
3.2 Einbindung dieses Projekts in die Programmlinie „Fabrik der Zukunft“	20
3.3 Schwerpunkte der Arbeit	22
3.4 Welche Vorarbeiten gibt es bereits zum Thema?	23
4. Recherchen	24
4.1 Patent- und Literaturrecherche	24
4.2 Überblick über die allgemeine Marktsituation	25
4.3 Überblick über den aktuellen Stand der Verfahrens- Technik	27
4.4 Überblick über den aktuellen Stand bezüglich Polymerrezeptur	28
4.5 Produkte und Märkte	32
4.6 WPC und Automobilindustrie	33
4.7 WPC und Recycling	35
4.8 WPC für Kleinteile im Möbel- und Baumarktbereich	36
4.8.1 Mögliche Substitutionsprodukte	36
4.8.2 WPC-Produkte die sich am Markt befinden	37
4.9 Hersteller von WPC`s und Compounds nach Ländern getrennt	50
4.10 Eigenschaftsprofile solcher sich am Markt befindlicher Produkte	53
4.11 WPC`s im Hausbau	54

5. Rohstoffcharakterisierung	55
5.1 Charakterisierung der verwendeten Polymere	55
5.2 Charakterisierung der verwendeten Holzspäne	60
6. Rezeptur-Eigenschafts-Beziehungen	92
6.1 Probenherstellung	92
6.2 Einfluß der Rezepturvariantionen auf die Mechanischen Eigenschaften	94
6.2.1 Mechanische Charakterisierung	94
6.2.2 Einfluß der Polymerart	95
6.2.3 Einfluß der Holzart	98
6.2.4 Einfluß des Haftvermittlers	104
6.2.5 Einfluß des Holzgehaltes	109
6.3 Einfluß von Prozessparameter	112
6.4 Rheologische Charakterisierung	116
6.5 Weiterführende mechanische Untersuchungen	118
6.5.1 Methodik	118
6.5.2 Ergebnisse	120
7. Entwicklung einer Spänedirektdosierung	133
7.1 Einleitung und Zielsetzung	133
7.2 Komponentenentwicklung	134
7.3 Schlußfolgerungen und Ausblick	138
8. Entwicklung eines Extrusionswerkzeuges	139
8.1 Einleitung und Zielsetzung	139
8.2 Konzepterstellung	140
8.3 Druck- und Strömungsberechnung	141
8.4 Werkzeugkonstruktion - Versuchswerkzeug	155
8.5 Ergebnisse des Projektes und Schlussfolgerungen	157
8.6 Ausblick / Empfehlungen	158
9. Extrusionsprofil	160

10. Zusammenfassung und Ausblick	162
11. Literatur	164
12. Tabellenverzeichnis	166
13. Abbildungsverzeichnis	168

1. Kurzfassung (1 Seite):

Der Markt für naturfaserverstärkte Kunststoffe entwickelte sich in den letzten Jahren dramatisch, speziell in den USA und Japan mit jährlichen Zuwachsraten von mehr als 25%. Auch in Europa begann mit Beginn der 90er-Jahre das Interesse an diesen Werkstoffen zu steigen. Neben Hanf- und Flachsfasern, welche primär im Automotive-Bereich eingesetzt werden, werden auch Holzfasern immer interessanter, speziell in Segmenten, welche derzeit unter enormen Preisdruck stehen (z.B. der Baubereich).

Wurde ursprünglich als Polymerkomponente PVC verwendet und Holz als reiner Füllstoff zur Kostenreduktion zugesetzt, so geht heute der Trend eindeutig zu Polyolefinen mit Holzfasern als aktivem Füllstoff bzw. als Hauptkomponente in der Rezeptur. In diesen Werkstoffen ist also Holz der tragende Werkstoff mit geringen Anteilen an Kunststoffen.

Fast die gesamten Forschungsarbeiten in der Vergangenheit haben sich mit Wood Plastic Composites mit einem Holzanteil von maximal 70% befasst (meist kleiner als 50%), im gegenständlichen Projekt wurden hochgefüllte Systeme mit einem Holzanteil >60% betrachtet.

Das Projekt verfolgte nun folgende Ziele

- Erhöhung der Wertschöpfung von Holzfasern, welche sonst nur als Kuppelprodukte (Pellets, Spanplattenindustrie,..) verwertet werden können
- Systematisches Ausloten der Eigenschaftsmatrices dieser neuen Werkstoffe
- Rezepturoptimierung
- Optimierung der Holzspäneeigenschaften
- Entwicklung einer neuen Verarbeitungstechnologie, um Späne direkt in den Extruder zu dosieren und fördern
- Optimierung der restlichen Verarbeitungstechnologie
- Schaffung des technologischen und werkstofflichen Basiswissens für die Herstellung von marktfähigen Produkten

Von den beteiligten Partnerunternehmen wurden die im Antrag beschriebenen technologischen Probleme (Entwicklung einer Spänedirektdosierung und eines Extrusionswerkzeuges, Kapitel 7 und 8) gelöst. Als Versuchsprofil wurde ein Bauprofil (Schwellenprofil) definiert, welches nicht direkt der Bewitterung ausgesetzt ist.

Es wurden auch intensive Arbeiten in den Bereichen Werkstoffcharakterisierung, Analyse der Holzspäne, Methodenentwicklung und Entwicklung von rheologischen Messverfahren durchgeführt, welche die Basis für systematische Auslotung der Rezeptur-Eigenschaftsmatrix bildeten.

Summary

The market for natural fibre reinforced plastics increased dramatically in the last years, especially in USA and Japan with annual growing rates up to 25% and more. But in the beginning of the last decade also Europe showed increasing interest in these materials. Beside hemp and flax, which are mainly used in the automotive market, also wood-fibres get more and more important, especially in market segments with downward pressure of prices (for example the building industry).

At the beginning, PVC was the only used polymer and wood fibres and flour were passive filler materials to reduce costs. Nowadays, polyolefins gain more and more importance and the wood-fibres are used as an active filler with high contents (wood is therefore now the dominant component in the mixtures).

Nearly all of the past R&D-work considered with wood plastic composites up to 70% wood (mostly <50%). In this project we tried to increase the wood content up to more than 90% wood.

The main goals of this project are

- Systematic work on the properties-matrix for these material family
- Optimization of the formulations
- Optimization of the properties and standardization of the wood-fibres
- Development of new processing technologies (direct feeding and dosing of wood fibres)
- Optimization of the complete processing technology
- Creation of the necessary technological and material Know-how for the production of competitive products

The technological problems have been solved in two separate projects - but connected with this project - (“Wood plastic composites - Development of a wood-fibre-direct-dosing unit” and “Wood plastic composites - Development of a extrusion tool”) and these work was done by the industrial partners. Their results are also included in this project.

The profile geometry and the coarse recipe was also defined by industrial project partners as basis for the extrusion tool.

A lot of work has been done to develop methods for material characterization, fibre analysis, modifying wood-fibres, rheological characterization and so on.

2. Kurzfassung (5 Seiten)

Der Markt für naturfaserverstärkte Kunststoffe entwickelte sich in den letzten Jahren dramatisch, speziell in den USA und Japan mit jährlichen Zuwachsraten von mehr als 25%. Auch in Europa begann mit Beginn der 90er-Jahre das Interesse an diesen Werkstoffen zu steigen. Neben Hanf- und Flachsfasern, welche primär im Automotive-Bereich eingesetzt werden, werden auch Holzfasern immer interessanter, speziell in Segmenten, welche derzeit unter enormen Preisdruck stehen (z.B. der Baubereich).

Wurde ursprünglich als Polymerkomponente PVC verwendet und Holz als reiner Füllstoff zur Kostenreduktion zugesetzt, so geht heute der Trend eindeutig zu Polyolefinen mit Holzfasern als aktivem Füllstoff bzw. als Hauptkomponente in der Rezeptur. In diesen Werkstoffen ist also Holz der tragende Werkstoff mit geringen Anteilen an Kunststoffen.

Fast die gesamten Forschungsarbeiten in der Vergangenheit haben sich mit Wood Plastic Composites mit einem Holzanteil von maximal 70% befasst (meist kleiner als 50%), im gegenständlichen Projekt wurde versucht, den Holzanteil bis auf 90% zu erhöhen.

Das Projekt verfolgte nun folgende Ziele

- Erhöhung der Wertschöpfung von Holzfasern, welche sonst nur als Kuppelprodukte (Pellets, Spanplattenindustrie,..) verwertet werden können
- Systematisches Ausloten der Eigenschaftsmatrices dieser neuen Werkstoffe
- Rezepturoptimierung
- Optimierung der Holzspäneeigenschaften
- Entwicklung einer neuen Verarbeitungstechnologie, um Späne direkt in den Extruder zu dosieren und fördern
- Optimierung der restlichen Verarbeitungstechnologie
- Schaffung des technologischen und werkstofflichen Basiswissens für die Herstellung von marktfähigen Produkten

2.1 Istanalyse

Eine Istanalyse in Bezug auf Verfahrenstechnik, Markt und Rezeptur bildete die Grundlage für die weitere Versuchsplanung.

Für dieses Modul wurde einerseits eine sehr intensive Patentrecherche durchgeführt. Auch das bei den beteiligten Unternehmen bereits vorhandene Patentwissen wurde in die Arbeiten integriert, sodaß nun eine Datenbank mit mehr als 200 Patenten vorhanden.

Ebenso wurde eine Literaturrecherche durchgeführt.

Es wurde dabei mit folgenden Key Words gesucht „Wood composites, Wood plastic composites, Woodfiber composites, Woodextrusion, Fibreextrusion,...“

Einen sehr guten Überblick lieferten auch 3 internationale Tagungen (Bordeaux, Wien und Madison), die von Projektmitarbeitern im Laufe dieses Projektes besucht wurden.

Überblick über die allgemeine Marktsituation:

Auch heute noch ist der Hauptmarkt für WPC Nordamerika, jedoch wird auch Europa immer bedeutender. Dabei muß man sich aber trotzdem verdeutlichen, dass - bezogen auf den gesamten Kunststoffmarkt diese WPC-Menge nur verschwindend klein ist (weniger als 1%)

Alle Experten - so z.B. die neue Marktstudie der britischen Applied Market Information Group (AMI, 2003) - prognostizieren den WPC, auch in Europa dramatische Zuwachsraten (so geht man in dieser Studie von einer Verzehnfachung der produzierten Menge innerhalb der nächsten 3 Jahre aus). Verlässliche Zahlen für Europa gibt es zwar nicht, die Produktion von WPC in Europa für das Jahr 2003 wird auf ungefähr 30.000 Tonnen geschätzt. Im Jahr 2000 waren in Europa 15 Extrusionslinien im Einsatz, derzeit sind es bereits 25 Unternehmen, die WPC extrudieren, Tendenz stark steigend.

Als Hauptanwendungsgebiete werden derzeit Verkleidungsprofile, Fensterprofile, Türen, Gartenmöbel, Verschalungen, Kisten, Paletten und dergleichen betrachtet (AMI Studie und Resümee der WPC Tagungen in Wien und Bordeaux 2003).

Die bedeutendsten Länder in Europa sind Deutschland und Großbritannien, aber auch für Österreich wird ein nicht unbedeutender Markt prognostiziert.

Überblick über den aktuellen Stand der Verfahrenstechnik

WPC`s werden heute fast vollständig durch Extrusion verarbeitet, der Anteil, welcher mit Hilfe des Spritzgießprozesses in Produkte umgewandelt wird, ist marginal, gewinnt aber immer mehr an Bedeutung.

Extrusion ist ein kontinuierliches Verfahren zur Erzeugung von Profilen (Hohlkammer- oder Vollprofile) oder Granulat. Man unterscheidet nun die Direktextrusion (einstufiger Prozeß, bei dem das Mischen der Komponenten und die Profilerzeugung in einem Verfahrensgang im Extruder erfolgt) und die

Extrusion von Vormischungen (dabei wird in einem ersten Schritt das Granulat erzeugt, welches dann in einem anderen Extruder zum Profil extrudiert wird).

Beim Extruder gibt es heute prinzipiell 3 Typen, die für die WPC-Extrusion eingesetzt werden, nämlich den konischen Doppelschneckenextruder, den parallelen Doppelschneckenextruder und den Einschneckenextruder.

Der konische Doppelschneckenextruder ist dabei die bevorzugte Maschine für die WPC-Extrusion. Der Hauptvorteil der konischen Schnecken - großer Durchmesser im Einzugsbereich und kontinuierliche Kompression durch die konischen Schnecken - favorisiert diese Maschine für hochgefüllte Systeme, da man doch sehr hohe Materialverdichtungen im Extruder bewerkstelligen muß. Die doch relativ kurze Bauweise garantiert eine kurze Verweilzeit der Schmelze im Extruder und reduziert somit die thermische Belastung der Holzspäne (Sehnal E., Kassel 2000)

Einschneckenextruder werden dort verwendet, wo man als Rohstoff das fertige Granulat einsetzt, da die Mischwirkung im Vergleich zu den Doppelschneckenextrudern doch wesentlich schlechter ist. Der Hauptvorteil ist der wesentlich niedrigere Preis.

Die einzelnen Prozessschritte sind nun

- Eventuell Vortrocknen der Holzfasern
- Komprimieren und Plastifizieren im Extruder
- Entspannen und Entgasen (entweder atmosphärisch oder mit Hilfe von Vakuum)
- Weiteres Plastifizieren und Mischen
- Formgebung im Werkzeug
- Kalibrieren, Kühlen, Ablängen
- Oberflächenbehandlung (Bürsten, Folieren,....)

Überblick über den aktuellen Stand bezüglich Polymerrezeptur:

Derzeit werden fast ausschließlich folgende 4 Thermoplaste für WPC eingesetzt (geordnet nach absteigender Bedeutung)

- Polyethylen (ca. 65%)
- Polyvinylchlorid (16%)
- Polypropylen (14%)
- Polystyrol (5%)

Polyethylen ist dabei das bevorzugte Matrixpolymer für „Deckings“ und ähnliche Profile, PVC wird hauptsächlich für Fenster- und Türprofile eingesetzt.

Wichtig ist, dass die eingesetzten Polymere einen relativ niedrigen Schmelzbereich haben, damit die thermische Schädigung des Holzes während des Extrusionsprozesses nicht zu groß wird. Holz wird in allen möglichen Formen

eingesetzt, die Palette reicht von Holzmehl (leicht dosierbar, hat aber kaum verstärkende Eigenschaften) über Holzfasern mit unterschiedlichen Geometrien bis hin zu den Pellets (leicht förder- und dosierbar, sie werden jedoch wegen dem nicht konstanten Kompaktierungsgrad im Extruder unterschiedlich gut „aufgeschlossen“, d.h. schwankende Endproduktqualität).

Entsprechend der gesichteten Literatur ist ein direkter Zusammenhang zwischen Holzart und Festigkeitseigenschaften zu erwarten. Weiters ist es wahrscheinlich, dass mehr die Geometrie der Späne (Verhältnis Länge/Breite) die Festigkeitseigenschaften entscheidend beeinflussen als die absolute Spangröße

Als Additive werden - je nach Anwendungsfall - fast alle in der Kunststoffindustrie bekannten Zusatzstoffe wie UV-Stabilisatoren, Antioxidantien, Gleitmittel, Schlagzähmodifizierer, Hitzestabilisatoren, ... eingesetzt. Ein Spezialfall stellen die sogenannten „Coupling agents“ dar, die eine Verbesserung der Holzfaser-Kunststoffmatrix-Haftung bewirken sollen. Diese bestehen im Regelfall aus einer polaren Gruppe und aus einem langen, unpolaren Kettenrest (z.B. Maleinsäureanhydrid gepfropft auf PP). In diesem Bereich gibt es derzeit enorme Entwicklungsaktivitäten, im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche Systeme getestet werden.

2.2 Mechanische Charakterisierung der Werkstoffe

Bei der mechanischen Charakterisierung der Werkstoffe wird primär auf die Dissertation von M. Svoboda [3] aufgebaut, welcher sehr systematisch den Einfluß der Probenkonditionierung untersucht hat

Für die Voruntersuchungen wurden von den Firmen Cincinnati Extrusion GmbH und IFN Internorm Baulelemente GmbH & Co KG extrudierte Platten (200 x 4 mm) mit 70% Holz und 30% Polypropylen zur Verfügung gestellt. Im Rahmen dieser ersten Arbeiten ging es hauptsächlich darum, die Probenpräparation zu optimieren. Zugversuche an extrudierten Fichtenproben zeigen, dass es aufgrund der Ausrichtung der Partikel im Extrusionsprozeß zu einer eindeutigen Anisotropie der Steifigkeit und Festigkeit kommt. So liegt der E-Modul mit 5100 MPa in Extrusionsrichtung ca. 40% über dem E-Modul (3600 MPa) quer zur Produktionsrichtung. Weiters kann im Zugversuch quer zur Produktionsrichtung oberhalb der Proportionalitätsgrenze ein duktileres Bruchverhalten beobachtet werden. Hingegen ist in Produktionsrichtung eher ein sprödes Bruchverhalten zu

beobachten. Die Unterschiede bei der maximalen Zugspannung sind weniger deutlich und liegen in Produktionsrichtung mit 13.8 MPa ca. 25% über den Werten quer zur Produktionsrichtung (10.9 MPa).

Alle im Rahmen dieses Projektes extrudierten Mischungen wurden dann einer grundlegenden mechanischen Charakterisierung (Zug- und Biegeversuch, Schlagbiegeversuch) unterzogen.

2.3 Charakterisierung der Holzspäne vor und nach der Extrusion:

Gewöhnlich werden bei der Holzextrusion Pellets verwendet, die bereits beide Werkstoffkomponenten Holz und Kunststoff beinhalten. Für eine Steigerung der Rentabilität des Verfahrens ist eine direkte Zuführung des Spanmaterials in den Extrusionsprozeß wünschenswert. Für die Optimierung der direkten Spanzuführung und zur Ermittlung des optimalen Spanmaterials ist es notwendig zu evaluieren, ob es während des Prozeß des Extrudierens zu Veränderung der Holzpartikel hinsichtlich Länge (Faserverkürzung) und Geometrie (Abknicken, Brechen etc.) kommt. Zu diesem Zweck wurde aus dem Ausgangsmaterial eine Stichprobe gezogen und anhand dieser die Verteilung der Partikelabmessungen ermittelt. Für die Untersuchung des Spanmaterials nach der Extrusion wurde die Kunststoffkomponente durch geeignete chemische Behandlung (unpolares Lösungsmittel) wieder herausgelöst und die Späne analog zum Ausgangsmaterial untersucht.

Im Ausgangszustand unterscheiden sich die drei verschiedenen Buchenholzspäne (Tipo-Typen) hinsichtlich ihrer Länge, Breite, Dicke und Spanform deutlich von einander. Entgegen des Ausgangsmaterials ist nach der Extrusion kein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen Spansorten zu finden. Weiters findet auch hinsichtlich der Spangeometrie eine Homogenisierung statt. Daraus kann geschlossen werden, dass die Partikelgröße vorwiegend durch den Extruder d.h. Schneckenlänge, Schneckenengeometrie bestimmt wird. Das bedeutet weiters, dass für einen gegebenen Extruder die Partikelgröße im Endprodukt ein bestimmtes kritisches Maß nicht übersteigen kann.

2.4 Prozeß- und Verfahrensentwicklung

Von den beteiligten Partnerunternehmen wurden im Rahmen von zwei eigenständigen Projekte die beiden technologischen Probleme (Entwicklung einer Spänedirektdosierung und eines Extrusionswerkzeuge) gelöst. Als Versuchsprofil wurde eine Schwelle für ein Fertighausssystem definiert, ebenso eine grobe Richtrezeptur, da diese ja für die Werkzeugentwicklung einen bedeutenden Einfluß hat.

Summary

The market for natural fibre reinforced plastics increased dramatically in the last years, especially in USA and Japan with annual growing rates up to 25% and more. But in the beginning of the last decade also Europe showed increasing interest in these materials. Beside hemp and flax, which are mainly used in the automotive market, also woodfibers get more and more importance, especially in market segments with downward pressure of prices (for example the building industry)

At the beginning PVC was the only used polymer and wood fibers and flour have been passive filler materials to reduce costs. Nowadays, polyolefins get more and more importance and the wood-fibres are used as an active filler with high contents (wood is therefore now the dominant component in the mixtures).

Nearly all of the past R&D-work dealt with wood plastic composites up to 70% wood (mostly <50%). In this project we tried to increase the wood content up to more than 90% wood.

The main goals of this project are

- Systematic work on the properties-matrix for these material family
- Optimization of the formulations
- Optimization of the properties and standardization of the wood-fibres
- Development of new processing technologies (direct feeding and dosing of wood fibres)
- Optimization of the complete processing technology
- Creation of the necessary technological and material Know-how for the production of competitive products

The technological problems have been solved in two other projects - but connected with this project - (“Wood plastic composites - Development of a wood-fibre-direct-dosing unit” and “Wood plastic composites - Development of a extrusion tool”) and these work was done by the industrial partners. Their results are also included in this project report (chapter 7 and 8).

The profile geometry and the coarse recipe were also defined by industrial project partners as basis for the extrusion tool.

State of the art

The project has been started with an analyse of the state of the art with respect to

Processing
Market
Formulation

This was done by patent and literature search.

Market:

At the moment the most important market for WPC is North America, but nowadays Europe gains importance. But in comparison to the whole polymer market the WPC-amounts are really vanishing small (<1%)

But all experts (for example Applied Market Information Group AMI) are sure, that the WPC market will increase dramatically also in Europe.

In 2003 at about 30.000 tons of WPC-products have been produced in Europe. In the year 2000 15 companies produced WPC-products in Europe, now there are more than 25.

The most important applications are sidings, deckings, window frames, furniture, palettes, boxes, railings, fences, etc.

Processing:

The dominant processing technique for WPC is extrusion, at the moment only a very small amount is used for injection moulding.

Extrusion is a continuous process for production of profiles or pellets. There are two different processes

Direct extrusion: one step process - polymer, wood and additives are fed separate in the extruder, plasticised and mixed in the extruder. The production of the profile is also done in this process.

Extrusion of compounds: the first step is the production of the compound, which can be shaped to profiles in a second step.

Nowadays 3 different types of extruders are used for WPC-processing

- Conical twin screw extruder
- Parallel twin screw extruder
- Single screw extruder

We prefer the conical twin screw extruder for WPC extrusion, because you can reach the necessary high compaction of the material within a very short processing length so you can minimize the thermal loading of the wood fibres.

Single screw extruders are normally used for the extrusion of WPC-pellets, because no high mixing capacity is needed. They are also much cheaper than twin screw extruders.

Processing steps in the WPC-extrusion

- Pre-drying of the fibres
- Compaction and plastification in the extruder
- Degassing (open or with vacuum)
- Further plastification and mixing
- Profiling in the tool
- Calibration, cooling, sawing
- Surface treatment (laminating, brushing, etc.)

Formulation

For WPC the following 4 polymers are the most used ones

- Polyethylene (PE) (65%)
- Polyvinylchloride (PVC) (16%)
- Polypropylene (PP) (14%)
- Polystyrene (PS) (5%)

HDPE is the favourite material for “deckings” and similar profiles, PVC is normally used for window frames and door profiles. The most important aspect is the low melting points of the polymers to avoid thermal degradation of the wood fibres.

Wood is used in different types, this means flour, fibres and pellets. Because of the different compaction behaviour of the fibres in the pellets it is not so easy to separate the fibres in the polymer matrix during the extrusion process, therefore we prefer the use of wood fibres.

All the well-known additives from the plastic industry are also used in the WPC-production, for example lubricants, flame retardants, impact modifier, UV-

stabilizers, antioxidants. Special additives are the coupling agents, which enhance the fibre matrix adhesion. Normally they consist of a polar functional group (acts with the wood fibres) and a long non-polar chain (acts with the PP-matrix). The most common used coupling agent for PP is maleinic acid anhydride grafted on PP.

Mechanical characterization:

The basis of this work is the doctor thesis of M. Svoboda [3], who has done a very systematic evaluation of the influence of the storage conditions on the mechanical properties of WPC and other natural polymers.

For the first examinations Cincinnati and IFN supplied WPC-sheets (200 x 4 mm) with 70% of wood and 30% PP.

We found an anisotropy of the mechanical properties. The tensile modulus in extrusion direction (5100 MPa) is more than 40% greater than that perpendicular to the extrusion direction (3600 MPa). But the differences in tensile stresses are not so high.

All extruded profiles have been mechanical tested (tensile and bending properties and impact behaviour)

Process development:

Two project partners (Cincinnati Extrusion and Greiner Extrusionstechnik) solved in separate projects two technological problems

Development of a Fibre dosing system (Summary in chapter 7)

Development of an extrusion tool. (Summary in chapter 8)

3. Einleitung

3.1 Allgemeine Einführung

Bereits zu Beginn der Entwicklung von Kunststoffen wurde versucht, durch Beimischen von anderen Stoffen die Eigenschaften gezielt zu verändern bzw. die Rezepturen zu verbilligen. Dabei wurden von Anfang an neben den „klassischen“ anorganischen Füllstoffen (Kreide, Talkum,...) auch Naturfasern als Zusatzstoffe verwendet.

Schon Baekeland - der Erfinder des ersten „Kunststoffes“, begann ab Beginn des 20. Jahrhunderts sein von ihm erfundenes „Bakelite“ mit Holzfasern zu verstärken. Auch anorganische Bindemittel wurden früher mit Holzfasern verstärkt oder gefüllt, so z.B. das Steinholz oder Xylolith, ein auf Basis Magnesiumoxid beruhender Werkstoff für Fußböden, welcher im 19. und Beginn des 20. Jahrhundert breite Verwendung gefunden hat.



Abb 1: Radiogehäuse aus Bakelit [1]

Mit dem Aufkommen der synthetischen anorganischen Fasern (Glas, später dann Aramid, Carbon, Kevlar,...) verloren die Naturfasern immer mehr an Bedeutung. Erst durch das zunehmende Umweltbewusstsein in den letzten zwei Jahrzehnten des vergangenen Jahrhunderts und durch manche technische Nachteile der synthetischen Fasern gewannen die natürlichen Fasern wieder mehr Interesse. Aber erst in den letzten Jahren entwickelte sich eine wirkliche industrielle Nachfrage nach Naturfasern, speziell durch die Automobilindustrie. Aktuell werden in der deutschen Automobilindustrie ca. 20.000 Tonnen Naturfasern (ohne Holz und Baumwolle) pro Jahr eingesetzt, in ganz Europa ungefähr 25.000 Tonnen. Den größten Anteil daran haben der Flachs, gefolgt von Hanf, Jute, Kenaf und Sisal. Das Potential in diesem Segment wird auf ca. 50.000 Tonnen im Jahr 2005 geschätzt.

In der E-Klasse von Daimler-Chrysler kommen heute bereits 30 kg nachwachsende Rohstoffe in 50 verschiedenen Bauteilen zum Einsatz - vorwiegend Naturfasern in Vliesen, Filzen und Verbundwerkstoffen [2]. Laut Aussage von Daimler-Chrysler soll dieser Anteil in den nächsten Jahren noch erheblich gesteigert werden. Auch Audi verwendet im neuen A2 bereits Türinnenverkleidungen aus Polyurethan verstärkt mit Flachs-Sisalmatten. Im Ford Focus wird der Kühlergrill aus einem spritzgegossenen PP/Flachs-Werkstoff erzeugt - diese Teile sind um 30% leichter als die herkömmlichen PP/Glasfaserprodukte.

Die **Wood Plastic Composites (WPC)** stellen nun eine Sonderform der Naturfaser-Verbundwerkstoffe dar. Man versteht darunter Werkstoffe aus Holz (Späne und/oder Mehl) und Kunststoff, welche durch das Einmischen der Holzbestandteile in die Kunststoffschmelze hergestellt werden.

Definition (ÖNORM B 3030): „Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoff (WPC)“

„Werkstoff, der aus vorwiegend lignozellulosehaltigen Teilchen (z.B. Holz, verholzten Pflanzen, Agrofasern) sowie aus thermoplastisch verarbeitbaren Polymeren als Matrix durch einen formgebenden Prozeß zu einem Verbundwerkstoff hergestellt wird. Die dabei erzielbaren Massenteile am fertigen Produkt an Lignozellulosematerial liegen in der Regel zwischen 25% und 85%. „

Der Markt für WPC entwickelte sich in den letzten Jahren dramatisch schnell, speziell in den USA und Japan mit jährlichen Zuwachsraten von mehr als 25%.

Auch in Europa begann mit Beginn der 90er-Jahre das Interesse an diesen Werkstoffen zu steigen. Neben Hanf- und Flachsfasern, welche primär im Automotive-Bereich eingesetzt werden, werden auch Holzfasern immer interessanter, speziell in Segmenten, welche derzeit unter enormen Preisdruck stehen (z.B. der Baubereich).

Wurde ursprünglich als Polymerkomponente Polyvinylchlorid (PVC) verwendet und Holz als reiner Füllstoff zur Kostenreduktion zugesetzt, so geht heute der Trend eindeutig zu Polyolefinen (wie Polyethylen PE und Polypropylen PP) mit **Holzfasern als aktivem Füllstoff bzw. als Hauptkomponente in der Rezeptur.**

In diesen Materialien ist also Holz der tragende Werkstoff mit geringen Anteilen an Kunststoffen als Bindemittel.

Fast die gesamten Forschungsarbeiten in der Vergangenheit haben sich mit Wood Plastic Composites mit einem Holzanteil von maximal 70% befasst (meist kleiner als 50%), in diesen hier beschriebenen Projekten wurde nun versucht, die Technologie und Rezepturen für hochgefüllte Systeme (70 und mehr Prozent Holz) für ein konkretes Bauprodukt zu entwickeln.

Die gegenständlichen Projekte verfolgten dabei folgende Ziele

- Erhöhung der Wertschöpfung von Holzfasern, welche sonst nur als Kuppelprodukte (Pellets, Spanplattenindustrie,..) verwertet werden können
- Systematisches Ausloten der Eigenschaftsmatrices von hochgefüllten WPC-Formulierungen
- Rezepturoptimierung
- Optimierung der Holzspäneeigenschaften
- Entwicklung eines leistungsfähigen Extrusionswerkzeuges
- Entwicklung einer neuen Verarbeitungstechnologie, um Späne direkt in den Extruder zu dosieren und fördern
- Optimierung der restlichen Verarbeitungstechnologie
- Schaffung des technologischen und werkstofflichen Basiswissens für die Herstellung von marktfähigen Produkten

3.2 Einbindung des Projektes in die Programmlinie

„Fabrik der Zukunft“:

Als vorrangiges Ziel der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT wird gefordert, „Innovationssprünge zu realisieren und die konkrete Umsetzbarkeit der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse mit Modell- und Demonstrationsprojekten zu zeigen“. Die Projekte *Wood plastic composites* entsprechen dieser Strategie zur Entwicklung von Demonstrations- und Vorzeigeprojekten aus mehreren wichtigen Gründen:

- Das Projektteam bestand aus regionalen, jedoch erfolgreich international tätigen Akteuren, die über viele Jahre konkrete

Erfahrungen mit der Verarbeitung von Kunststoffen und auch bereits in der „Holzextrusion“ gesammelt haben und deren wichtiges Ziel die Entwicklung und wirtschaftliche Umsetzung von hochgefüllten Polymer-Holz-Composites ist.

- Für die Planung und Abwicklung des Projektes konnten Mitspieler aus Wissenschaft und Wirtschaft gewonnen werden, die sich exakt aus den Fachbereichen rekrutieren, die die noch offenen Fragen zu diesem Thema kompetent und schnell lösen konnten und bei positiver Realisierung auch wirtschaftlich umsetzen wollen und können. Speziell die Kombination von Spezialisten aus den Bereichen Verfahrenstechnik, Holzchemie und Kunststoff ist einzigartig.
- Aufgrund der internationalen Aktivitäten der Wirtschaftspartner und auch der Einbindung von Praxis- und Universitätspartner wurden Forschungsleistungen auf hohem Niveau und mit großer Praxisrelevanz erbracht. Durch den dabei entstehenden Wissenstransfer konnte ein Innovationsnetzwerk aufgebaut werden und die entstandenen und immer noch entstehenden Synergien für die Wettbewerbsfähigkeit des Standortes Österreich genutzt werden.

Der Antragsteller (Transfercenter für Kunststofftechnik) hat bereits im Jahre 2003 - und nicht wie im Antrag erst bei positivem Projektabschluß geplant - in die notwendige Technikumsinfrastruktur (Faserstoffextruder Cincinnati Fibrex T58 mit kompletter Nachfolgeeinheit - Kalibrierung, Abzug, Säge, Kipptisch von der Firma Greiner Extrusionstechnik) investiert, um diese F&E-Aktivitäten sowohl während dieses Projektes und auch danach weiterzuführen.

Dass dies eine richtige Entscheidung war, zeigen schon mehr als 80 nationale und auch internationale Aufträge und Projekte mit mehr als 40 Firmen als Partner auf dem Gebiet der naturfaserverstärkten Kunststoffe!

3.3 Schwerpunkte der Arbeit:

Ziel dieses Verbundprojektes war es, aus Abfallstoffen der Holzindustrie, nämlich den Holzspänen, in Verbindung mit geringen Mengen von thermoplastischen Polymeren (Polypropylen; 5-40%) neue Werkstoffe zu erzeugen, die holzähnlichen Charakter haben, jedoch mit Fertigungstechnologien der Kunststoffindustrie verarbeitet werden können.

Als weiterer innovativer Schritt sollten die Holzspäne direkt verarbeitet werden und nicht wie bisher in Pelletsform, da man damit neben ökonomischen auch technische Vorteile erwartet hat.

Im Rahmen dieser Arbeit sollte daher einerseits die Rezeptur in einem weiten Bereich variiert werden, um das Eigenschaftsprofil dieser Werkstofffamilie auszuloten. Als Polymerbasis wurden aber ausschließlich **Polyolefine** (Polypropylen und Copolymere) eingesetzt, Holz wurde vorrangig in Späneform verwendet. Geplant war auch der Einsatz unterschiedlicher Holzarten (Fichte, Kiefer, Buche). Jedoch sollte auch der Einfluß der Holzpelletierung (erfolgt unter hohen Drücken und Temperaturen) auf die Eigenschaften der fertigen Verbundwerkstoffe untersucht werden.

Sehr große Bedeutung hatte im Rahmen dieses Projektes auch die systematische Untersuchung der Holzfraktion vor und nach der Extrusion mit dem Ziel, die Schädigung der Fasern während der Verarbeitungsprozesse zu ermitteln und daraus das erforderliche Basiswissen für eine Standardisierung der Holzspäne für definierte Anwendungen (Eigenschaften) zu schaffen.

Des Weiteren wurde in einem eigenen Arbeitspaket eine Methode zur rheologischen Untersuchung dieser komplexen Mehrstoffschmelzen entwickelt und auch gebaut, da klassische Verfahren wie Kegel-Platte- oder Platte-Platte-Rheometer u.dgl. bei diesen Systemen nicht anwendbar sind.

3.4 Welche Vorarbeiten gibt es bereits zum Thema?

In Österreich hatten sich bis zum Projektstart im Jahre 2002 nur sehr wenige Unternehmen (Cincinnati Extrusion GmbH, Greiner Extrusionstechnik GmbH, Technoplast, Fasalex) und wissenschaftliche Institute (Montanuniversität Leoben - Charakterisierung von WPC, siehe Dissertation M. Svoboda, 2003 [3], IFA Tulln - Entwicklung von Fasal und Fasalex) mit Wood plastic composites beschäftigt. Die Erfahrungen der beteiligten Firmenpartner flossen natürlich in das Projekt ein und waren für den positiven Erfolg auch zwingend notwendig.

4. Recherchen

4.1 Patent- und Literaturrecherche:

Zu Projektbeginn wurde eine intensive Patentrecherche durchgeführt (siehe Anhang). Auch das bei den beteiligten Unternehmen bereits vorhandene Patentwissen wurde in die Arbeiten integriert, sodaß nun eine Datenbank mit mehr als 200 Patenten vorhanden ist, welche nach vom Projektteam fixierten Kriterien systematisch durchgearbeitet wurden (siehe Anhang A).

Auffallend ist die geographisch sehr starke Fokussierung der Anmeldungen auf USA und Japan, was sich auch durch die geschichtliche Entwicklung der WPC teilweise erklären lässt.

Ebenso wurde in der wissenschaftlichen Literatur eine Literaturrecherche durchgeführt.

Es wurde dabei mit folgenden Key Words gesucht

„Wood composites,
Wood plastic composites,
Woodfiber composites,
Woodextrusion,
Fiberextrusion,...“

Eine Auflistung der gesammelten bzw. gesichteten Literatur findet sich im Anhang B.

Einen sehr guten Überblick über Markt, Technologie und Produkte lieferten auch die internationalen WPC-Tagungen in Bordeaux, Wien, Kassel und Madison, die

von Projektmitarbeitern während der Laufzeit des Projektes besucht wurden bzw. bei denen auch Ergebnisse im Rahmen von Vorträgen und Postern präsentiert wurden.

4.2 Überblick über die allgemeine Marktsituation:

Auch heute noch ist der Hauptmarkt für WPC Nordamerika, wie die folgende Abbildung sehr deutlich zeigt:

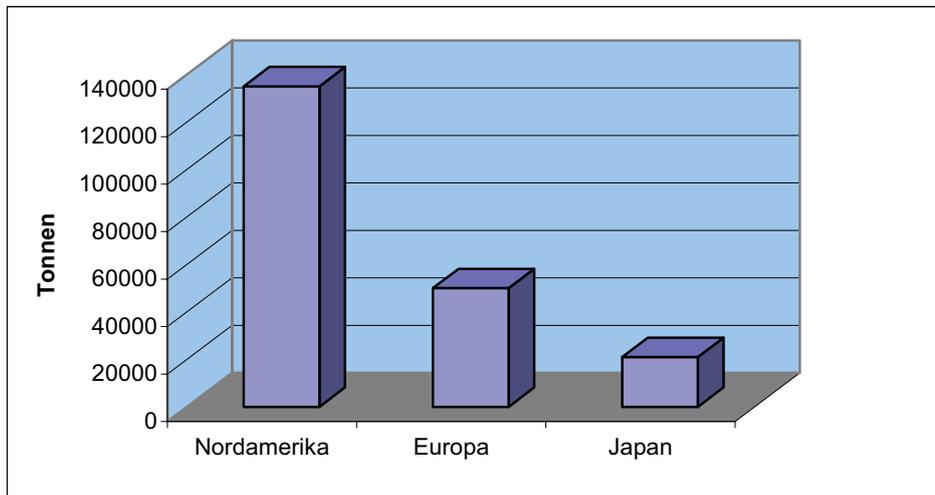


Abb: 2: WPC-Produktion im Jahr 2000 [4]

Dabei muß man sich aber trotzdem verdeutlichen, dass - bezogen auf den gesamten Kunststoffmarkt diese WPC-Menge nur verschwindend klein ist (weniger als 1%)

Alle Experten - so z.B. die neue Marktstudie der britischen Applied Market Information Group (AMI, 2003) [5] - prognostizieren den WPC, auch in Europa dramatische Zuwachsraten (so geht man in dieser Studie von einer Verzehnfachung der produzierten Menge innerhalb der nächsten 3 Jahre aus)

Verlässliche Zahlen für Europa gibt es zwar nicht, die Produktion von WPC in Europa für das Jahr 2003 wird auf ungefähr 30.000 Tonnen geschätzt. 2000 waren in Europa 15 Extrusionslinien im Einsatz, derzeit sind es bereits 25 Unternehmen, die WPC verarbeiten, Tendenz stark steigend. So konnte Cincinnati im 1. Halbjahr 2003 bereits mehr Faserstoffextruder verkaufen als im gesamten Jahr 2002 (Sehnal, persönliche Mitteilung).

Ungefähr 30% der europäischen WPC-Verarbeiter sind komplett neue Unternehmen, 22% machen ihr Hauptgeschäft mit PVC-Profilen, der Rest sind Baufirmen und Recyclingbetriebe [5].

Als Hauptanwendungsgebiete werden derzeit Verkleidungsprofile, Fensterprofile, Türen, Gartenmöbel, Verschalungen, Kisten, Paletten und dergleichen betrachtet (AMI Studie und Resumee der WPC Tagungen in Wien und Bordeaux 2003).

Die bedeutendsten Länder in Europa sind Deutschland und Großbritannien, aber auch für Österreich wird ein nicht unbedeutender Markt prognostiziert.

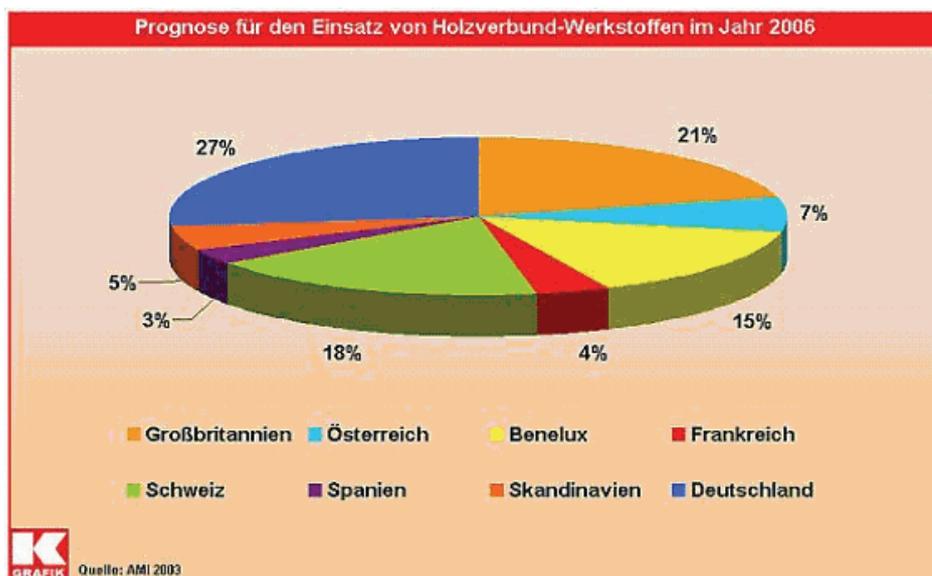


Abb: 3: Prognose für WPC in Europa für das Jahr 2006 [5]

4.3 Überblick über den aktuellen Stand der Verfahrenstechnik

WPC`s werden heute fast vollständig durch Extrusion verarbeitet, der Anteil, welcher mit Hilfe des Spritzgießprozesses in Produkte umgewandelt wird, ist marginal.

Extrusion ist ein kontinuierliches Verfahren zur Erzeugung von Profilen (Hohlkammer- oder Vollprofile) oder Granulat. Man unterscheidet nun die **Direktextrusion** (einstufiger Prozeß, bei dem das Mischen der Komponenten und die Profilerzeugung in einem Verfahrensgang im Extruder erfolgt) und die **Extrusion von Vormischungen** (dabei wird in einem ersten Schritt das Granulat erzeugt, welches dann in einem anderen Extruder zum Profil extrudiert wird).

Beim Extruder gibt es heute prinzipiell 3 Typen, die für die WPC-Extrusion eingesetzt werden, nämlich den

- konischen Doppelschneckenextruder, den
- parallelen Doppelschneckenextruder und den
- Einschneckenextruder.

Der konische **Doppelschneckenextruder** ist dabei die bevorzugte Maschine für die WPC-Extrusion. Der Hauptvorteil der konischen Schnecken - großer Durchmesser im Einzugsbereich und kontinuierliche Kompression durch die konischen Schnecken - favorisiert diese Maschine für hochgefüllte Systeme, da man doch sehr hohe Materialverdichtungen im Extruder bewerkstelligen muß. Die doch relativ kurze Bauweise garantiert eine kurze Verweilzeit der Schmelze im Extruder und reduziert somit die thermische Belastung der Holzspäne [6].

Einschneckenextruder werden dort verwendet, wo man als Rohstoff das fertige Granulat einsetzt, da die Mischwirkung im Vergleich zu den

Doppelschnecken-extrudern doch wesentlich schlechter ist. Der Hauptvorteil ist der wesentlich niedrigere Preis.

Die einzelnen Prozessschritte sind nun

- Eventuell Vortrocknen der Holzfasern
- Komprimieren und Plastifizieren im Extruder
- Entspannen und Entgasen (entweder atmosphärisch oder mit Hilfe von Vakuum)
- Weiteres Plastifizieren und Mischen
- Formgebung im Werkzeug
- Kalibrieren, Kühlen, Ablängen
- Oberflächenbehandlung (Bürsten, Folieren,....)

4.4 Überblick über den aktuellen Stand bezüglich Polymerrezeptur:

Derzeit werden fast ausschließlich folgende 4 Thermoplaste für WPC eingesetzt (geordnet nach absteigender Bedeutung)

Polyethylen (PE) (ca. 65%)

Polyvinylchlorid (PVC) (16%)

Polypropylen (PP) (14%)

Polystyrol (PS) (5%)

Polyethylen ist dabei das bevorzugte Matrixpolymer für „Deckings“ und ähnliche Profile, PVC wird hauptsächlich für Fenster- und Türprofile eingesetzt.

Wichtig ist, dass die eingesetzten Polymere einen relativ niedrigen Schmelzbereich haben, damit die thermische Schädigung des Holzes während des Extrusionsprozesses nicht zu groß wird.

Holz wird in allen möglichen Formen eingesetzt, die Palette reicht von Holzmehl (leicht dosierbar, hat aber kaum verstärkende Eigenschaften) über Holzfasern mit unterschiedlichen Geometrien bis hin zu den Pellets (leicht förder- und dosierbar, sie werden jedoch wegen dem nicht konstanten Kompaktierungsgrad im Extruder unterschiedlich gut „aufgeschlossen“, d.h. schwankende Endproduktqualität).

Entsprechend der gesichteten Literatur ist ein direkter Zusammenhang zwischen Holzart und Festigkeitseigenschaften zu erwarten. Weiters ist es wahrscheinlich, dass mehr die Geometrie der Späne (Verhältnis Länge/Breite) die Festigkeitseigenschaften entscheidend beeinflussen als die absolute Spangröße

Als Additive werden - je nach Anwendungsfall - fast alle in der Kunststoffindustrie bekannten Zusatzstoffe wie UV-Stabilisatoren, Antioxidantien, Gleitmittel, Schlagzähmodifizierer, Hitzestabilisatoren, ... eingesetzt. Ein Spezialfall stellen die sogenannten „**Coupling agents**“ (Haftvermittler) dar, die eine Verbesserung der Holzfaser-Kunststoffmatrix-Haftung bewirken sollen. Diese bestehen im Regelfall aus einer polaren Gruppe und aus einem langen, unpolaren Kettenrest (z.B. Maleinsäureanhydrid gepropft auf PE oder PP). In diesem Bereich gibt es derzeit enorme Entwicklungsaktivitäten, im Rahmen dieser Arbeit wurden daher unterschiedliche Systeme getestet werden.

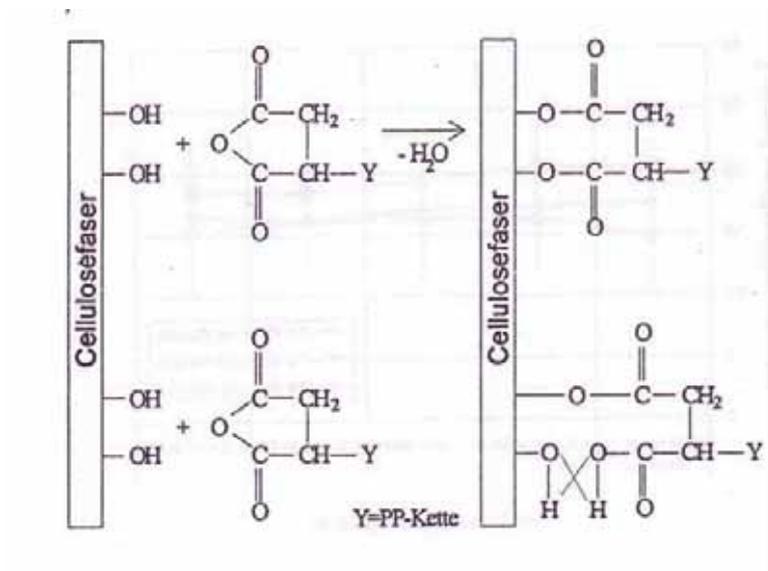


Abb 4: Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Coupling agents (Haftvermittler) auf Basis MAH-gepfropft auf PP

Der Holzgehalt der Composites bestimmt die Anwendung und auch den Herstellprozeß, wie die folgende Tabelle veranschaulichen soll.

Holzgehalt	Erscheinungsbild	Bevorzugte Anwendung	Besonderheit	Extruder
70 - 90%	„holzartig“	Konstruktionen, die nicht direkt bewittert werden, Innenanwendungen	Hohe Steifigkeit, geringere Schlagzähigkeit, begrenzte Wasserbeständigkeit	Konischer Doppelschneckenextruder „Strangpressen“
40 - 70%	„holzähnlich“	Außenbereich (Deckings,...)	Gute Wasserbeständigkeit	Konischer Doppelschneckenextruder, „klassische Extrusion“
5 - 40%	„kunststoffähnlich“	Profile, die durch Holz etwas verstärkt werden		Alle Extruder sind möglich, „klassische Extrusion“

Tabelle 1: Einfluß des Holzgehaltes auf die Eigenschaften und Verwendung von WPC [7]

4.5 Produkte und Märkte [16]

Der Markt für WPC entwickelte sich in den letzten Jahren dramatisch schnell, speziell in den USA und Japan mit jährlichen Zuwachsraten von mehr als 25%. Auch in Europa begann mit Beginn der 90er-Jahre das Interesse an diesen Werkstoffen zu steigen. Neben Hanf- und Flachsfasern, welche primär im Automotive-Bereich eingesetzt werden, werden auch Holzfasern immer interessanter, speziell in Segmenten, welche derzeit unter enormen Preisdruck stehen (z.B. der Baubereich).

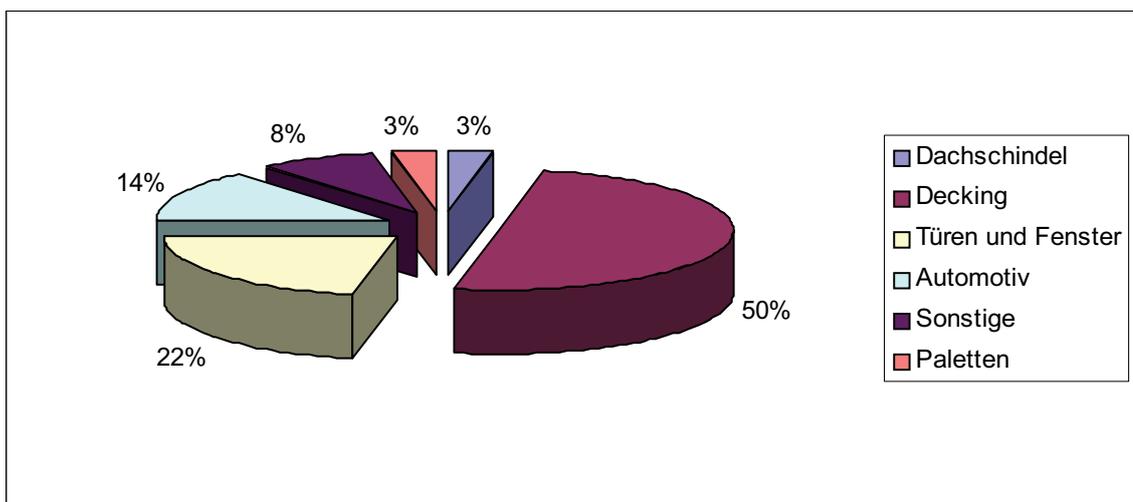


Abb. 5: Marktübersicht USA - Hauptanwendung „Decking“ [8]

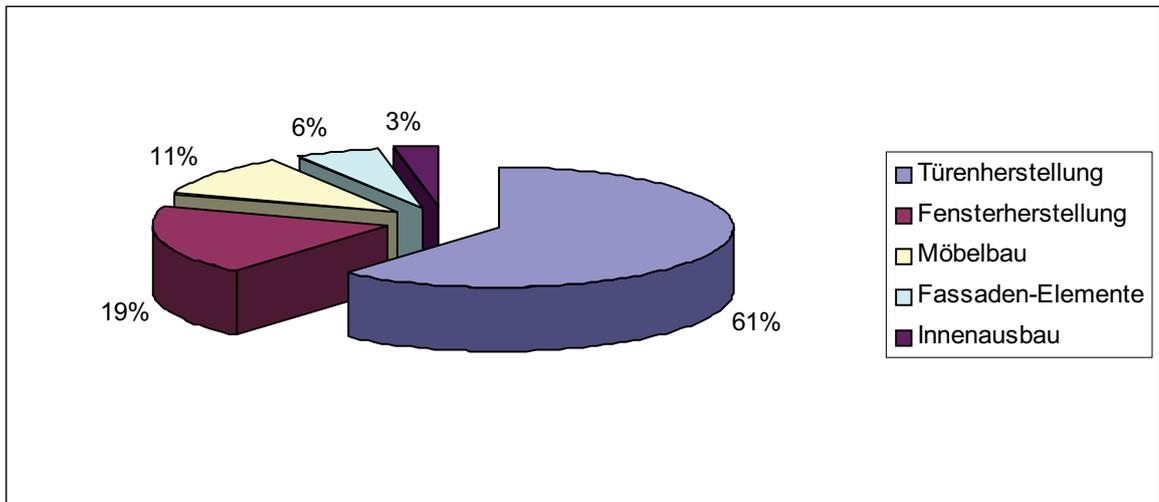


Abb. 6: Marktchancen Europa - Fenster/Türen usw. [8]

4.6 WPC´s und Automobilindustrie [16]

In der Automobilindustrie, aus Sicht des europäischen Marktes, spielen die Wood Plastic Composites eine untergeordnete wenn nicht gar eine unbedeutende Rolle [9]. WPC´s werden hier evtl. als Schaltknäufe oder Zierleisten verwendet. Andere Anwendungen sind in der Automobilindustrie derzeit nicht bekannt, auch liegen keine Forschungsprojekte vor.

Am amerikanischen Markte werden folgende Komponenten bereits aus Wood-Plastic-Composites gefertigt:

- Innenverkleidungen
- Kabelkanäle
- Reserveradmulden
- Rückenlehnen für Sitze
- Heck- bzw. Hutablagen
- Böden für LKW´s

Der Verbrauch pro Fahrzeug wird auf 9 - 14 kg an WPC geschätzt [9]. Am amerikanischen Markt ist der Einsatz von WPC viel mehr fortgeschritten, da es dort die meisten Erfahrungen gibt. Auch ist die Akzeptanz dieses neuartigen Produktes bei der amerikanischen Bevölkerung viel größer als bei der europäischen. Die Europäer sind anscheinend umweltbewusster und verbinden mit dem Werkstoff Holz Umweltfreundlichkeit und Ökologie. Die Wood-Plastic-Composites haben derzeit noch eher das Aussehen von PVC, welches die Europäer aber eher ablehnen. Ebenfalls liegen in Europa höhere Qualitätsanforderungen vor als in Amerika, dass die Etablierung dieses Produkts natürlich erschwert.

Zugangsbedingungen für den Automobilbereich [9]

Diese Bedingungen leiten sich von den mechanischen Eigenschaften ab, die Wood-Plastic-Composites zu bewerkstelligen haben. Sie müssen also die selben Voraussetzungen erfüllen wie reine Kunststoffprodukte. Hier stellt sich das Problem, dass es noch keine allgemein gültigen Normen gibt. Der europäische Markt verlangt jedoch exakte Materialklassifizierungen. Bis es diese einheitlichen Normen nicht gibt, wird die Automobilindustrie beim Einsatz von Wood-Plastic-Composites sehr zurückhaltend sein.

Außerdem ist bei den Wood-Plastic-Composites das Thema Recycling noch nicht abgeklärt. Dies macht die WPC für die europäischen Automobilhersteller nicht sehr attraktiv, da diese seitens der EU bis zum Jahr 2010 verpflichtet sind, die Kraftfahrzeuge zu 95 % recyclingfähig zu konzipieren. Folglich werden derzeit am europäischen Markt Naturfasern wie Hanf, Flachs usw. eingesetzt.

Glücklicherweise wird in diesem Bereich intensiv geforscht und ähnlich wie bei den naturfaserverstärkten Verbunden eine Kennwertdatenbank erarbeitet.

4.7 WPC und Recycling

Bei der Herstellung der Wood-Plastic-Composites kann natürlich Recyclingmaterial verwendet werden. Die Plastikkomponente wird als Recyclingmaterial in Form eines Granulats oder Agglomerats beigestellt . Die Holzkomponente wird aus Abfallprodukten der Holzverarbeitenden Industrie gewonnen.

Über das Recycling der WPC´s am Ende ihres Lebenszyklus gibt es leider keine Informationen. Das Nova - Institut in Deutschland ist derzeit mit einem Forschungsprojekt, das voraussichtlich bis zum Frühjahr 2005 abgeschlossen sein wird, beschäftigt, das genau diese Thematik bearbeitet.

4.8 WPC´s für Kleinteile im Möbel- und Baumarktbereich

4.8.1 Mögliche Substitutionsprodukte

Kanthölzer	Gartenschränke, Aufbewahrung
Zaunfelder	Carport
Gartenmöbel	Pavillions
Werkzeugstile	Gartenhäuser, Blockhäuser
Raseneinfassungen	Spieltürme
Balustraden	Schaukeln
Blumentöpfe	Sandkästen
Kleinbehälter - Schütten	Dachrinnen
Schallungstafeln	Möbelbau- und Arbeitsplatten
Profile für Zwischenwände	Paneele
Türzargen und -verkleidungen	Fensterbänke
Türblätter	Kellerschächte
Steckdosen u. Lichtschalter	Abschlussleisten
Kanthölzer	Garagentore
Schindeln	Treppen
Gartenbänke	Bebankungen
Regale	Profilholz
Bodenbeläge	Arbeitsplatten
Bituwell = Eternit = Bitumenwellplatte	Vordächer
Terrassenböden	Rollrabatte
Pflanzentröge und Rankhilfen	Konstruktionsholz
Balkonsysteme	Vierkantprofile, Rundpfähle
Sichtschutz	Palisaden
Holzfliesen	Geländer, Handläufe

Tabelle 2: Baumarktbereich [9]

Badezimmermöbel	Büromöbel, Sesseln
Arbeitsplatten	Küchenmöbel
Griffe	Bausätze
Füße	Sesselleisten
Gartenmöbel	Vorhangschienen
Randleisten	Tischplatten
Kleiderbügel	

Tabelle 3: Möbelbereich [9]

Paletten	Schütten
Kisten	Industrielle Beplankungen
Schallungsplatten	

Tabelle 4: Industriebereich [9]

4.8.2 WPC - Produkte die sich am Markt befinden

Holzgefüllte Kunststoffe bilden heute in den USA und Japan die umsatzstärkste Gruppe der Werkstoffe, die auf Naturfaserverstärkung aufgebaut sind. Am US - Markt werden jährlich 400.000 - 500.000 to umgesetzt, wobei in Europa der Absatz auf 20.000 - 40.000 to pro Jahr geschätzt wird. Über Japan sind keine Zahlen bekannt. Gleichzeitig zeigen sich hier auch die größten Zuwachsraten. Der weitaus größte Anteil wird im

Außenbereich für Holzterrassen („deckings“), Zäune, Bootsstege und Uferbefestigungen eingesetzt.

EIN Engineering hat in Japan gezeigt, dass der Bau von Lärmschutzwänden ein attraktives Betätigungsfeld ist.

Bedachungs- und Außenwandsysteme, Schindeln und Balkonverkleidungen werden zunehmend eingesetzt und weiterentwickelt. Dabei ist die Tendenz zur Schaffung neuer Farbvarianten unübersehbar. Sowohl die holländische Firma TechWood als auch EIN Engineering/Tokio bieten eine breite Farbskala für holzgefüllte Produkte.

Für den Innenbereich werden unter Anwendungen neuer Technologien zunehmend Fensterrahmen, Türrahmen und ganze Türen produziert. Anderson in den USA ist auf diesem Gebiet ein Vorreiter und bringt auf Basis der Profil-Extrusion Produkte sowie Compounds auf den Markt.

Möbelbereich

Während in Japan bereits komplette Anbausysteme für Schränke am Markt sind wird jetzt auch in Deutschland der Eintritt in den Möbelmarkt vorbereitet. Kanadische Hersteller bieten bereits Regalsysteme mit holzgefüllten Brettelementen an

Duromere und Thermoplaste (vorzugsweise PE und PP) sind die konventionellen Matrices für Mischungen mit Holzpartikel; hinzu kommen interessante Entwicklungen auf Basis einer Stärke-Matrix (Fasalex), die besonders für Anwendungen im Innenbereich geeignet erscheinen. Aber auch andere biologisch abbaubare Matrices werden in den nächsten Jahren mit neuen Verbundwerkstoffen auf den Markt kommen.

Baumarktbereich

In diesem Bereich sind in Deutschland die Firmen MEGAWOOD und FAWOWOOD Vorreiter, und bietet über einige Händler in Deutschland und Österreich folgende Produkte an:

MEGAWOOD bieten eine Barfußdielen an [10]

FAWOWOOD bietet folgende Produkte an

Produkte für Außenanwendungen:

- Dielen, Terrassenbodendielen
- Außenfassaden
- Zäune
- Pfosten
- Dach- und Wandschindeln
- Transportkisten
- Verkleidungen
- Schalungen, etc

Produkte für Innenanwendungen:

- Sockelleisten
- Tür- und Fensterrahmen
- Möbel
- Gerätetechnik
- Wickelhülsen

Diverse Einsatzgebiete und Abbildungen



Abb. 7: Bodendiele mit Extrusionshaut



Abb. 8: Zaunfelder in diversen Farben



Abb. 9: Wickelhülsen

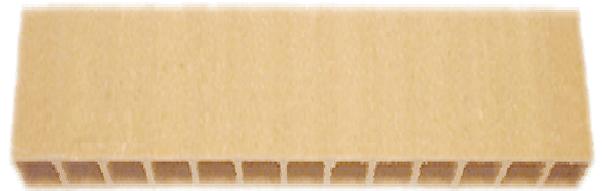


Abb. 10: Hohlkammerprofil für Türen



Abb. 11: Zaunpfosten Abb. 12: Vollprofil für diverse Anwendungen Abb. 13: Hohlkantprofil [11]

Produkte der Fa. Fasalex

Ebenfalls in diesem Zusammenhang sei die österreichische Firma Fasalex GmbH zu nennen, die sich sowohl mit der Holzextrusion, als auch mit der Compoundherstellung beschäftigt.



*Abb. 14: Innenausbau (Boden, Decke, Wand, ...)
Möbel (Leisten, Türen, Verkleidungen, Paneele,...)*



*Abb. 15: Zargenverkleidung
(auch Kabelkanäle, Stützstangen, Fixierelemente, usw.)*



*Abb. 16: Fensterbänke
Außenanwendungen sind frühestens ab Jahresende 2004 verfügbar [12]*

WPC - Anwendungen nach Branchen aufgeteilt

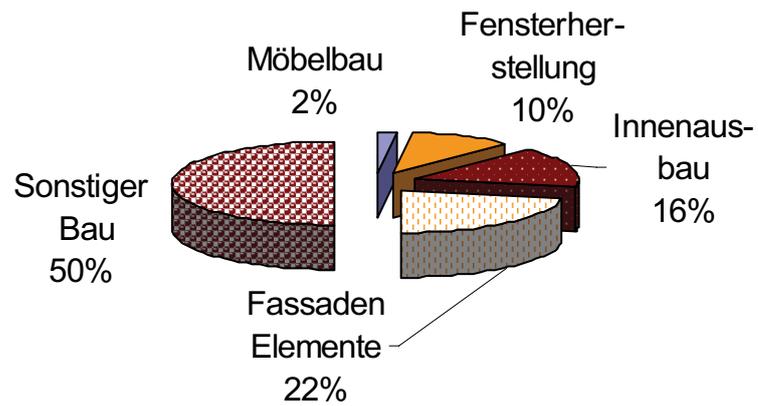


Abb. 17: Holz und Fertigteilbau [13]

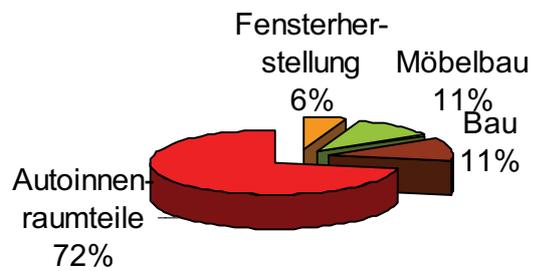


Abb. 18: Automobilinnenteilehersteller [13]

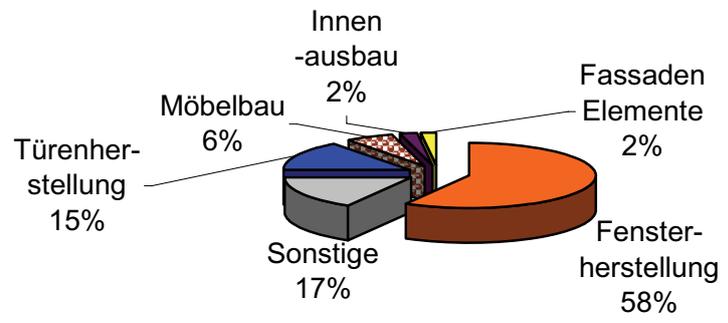


Abb. 19: Fensterhersteller [13]

Fasal

fasal[®] wird hauptsächlich aus den nachwachsenden Rohstoffen Holz und Mais hergestellt. Die Zusatzstoffe wie Harze und geringe Mengen Verarbeitungshilfsmittel sind ebenfalls natürlichen Ursprungs.

Anwendungen von Fasal [14]



Abb. 20: Musikinstrumentenbau [9]

Als besonders ressourcen-schonend hat sich fasal[®] bei Fa. Rödel etabliert. Die bei der Produktion von Klarinetten anfallenden Abfallspäne aus dem Tropenholz Grenadill dienen als Grundstoff für spritzgegossene Klarinetten, die in der Klangqualität von einer Echtholzklarinetten nicht zu unterscheiden sind.



Abb. 21: Spielzeugindustrie

Die ehemals aus Buchenholz durch Fräsen, Bohren und Schleifen aufwendig hergestellten Spielzeugautos werden heute dank fasal[®] in einem Arbeitsschritt gefertigt. Das Männchen und die Räder sind nach wie vor aus Vollholz.



Abb. 22: Möbelindustrie

Deckendosen aus fasal[®] für verschiedene Beleuchungskörper kommen bei Fa. Haba zum Einsatz.



Abb. 23: Möbelindustrie

Die Fa. Villeroy & Boch Badmöbel in Mondsee fertigt Möbelbeine für Badezimmer-Beistellmöbel. Die 250g schweren Teile sind aus Massivholz nur aufwendig herzustellen. Im Spritzguss dauert die Fertigung 90 Sekunden - anschließend folgt nur noch die Oberflächenbehandlung [9].



Abb. 24: Spielzeugindustrie

Die Fa. Zoch Verlag in München fertigt die Rappelfässchen aus dem neuen Spiel Zapp Zerapp aus fasal®. In einem Mehrfachwerkzeug dauert die Fertigung durch Spritzguss wenige Sekunden.

Wieder eine geniale Anwendung von fasal®!



Abb. 25: Spielzeugindustrie

Fa. Haba setzt fasal® unter anderem für verschraubbare Stellfüße im Spiel Schloss Schlotterstein ein.



Abb. 26: Bestattungsartikel

Fa. Sola GmbH stellt für Art Peter spritzgegossene Urnen aus fasal® F 322 her. Die beiden Teile wiegen 750g und sind schwer zerbrechlich. Mit diesem Material wird der Forderung nach biologisch abbaubaren Urnen Rechnung getragen [9].



Abb. 27: Schmuck und Dekorteile

Bei Fa. Konrad Fischer GmbH werden Christbaum- und Osterschmuck produziert und verkauft. Ebenso können Golf-Tees von dieser Firma bezogen werden. Die Teile sind bemalbar oder einfärbbar.

Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe in Europa noch am Anfang ihres Marktwachstums.

Für Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (WPC) existiert in Nordamerika bereits ein florierender Markt. Die Marktdurchdringung in Europa steht dagegen gerade erst am Anfang.

Balmer erläutert: "Die hohen Kosten und das Fehlen eines Massenmarktes haben die Einführung dieser Werkstoffe bisher gebremst. WPC werden jedoch auch in Europa und Asien Fuß fassen, weil immer mehr Hersteller von Kunststoffteilen dem amerikanischen Beispiel folgen und WPC bei Anwendungen für die Bauindustrie einsetzen." Da in Europa eine breitere Anwendungsbasis noch fehlt, dürfte sich die Einführung der WPC-Technologie anders vollziehen als in den USA. Der Schwerpunkt wird vermutlich zunächst auf Spezialanwendungen und anspruchsvolleren Produkten wie Fensterprofilen, Sockelleisten und einigen Anwendungen in der Möbelindustrie liegen.

4.9 Hersteller von WPC's und Compounds nach Länder getrennt

Firmenname	Firmensitz	Anwendungen	Produktname
TREX Company LLC	Virginia	Terrassen, Zäune, Paneele, usw.	
Crane Plastics Holding Company	Ohio	Terrassen, Zäune, Paneele, Profile	
Timbertec Limited	Ohio	Terrassen, Zäune, Paneele, Profile	
Andersen Commercial Group	Minnesota	Terrassen, Zäune, Paneele, Profile	
Lear Corporation World Headquaters	Michigan	Automobilzulieferer, Profile, Sitzschalen	
AERT Inc.	Texas	Fenster, Türen, Terrassen	
Master Mark Plastics	Minnesota	Terrassen	Rhino Deck
Re-New Wood, Incorporated	Oklahoma	Schindeln	
Mikron Industries		Fenster, Türen, Profile, Handläufe	
Duraskid	Ontario	Paletten, Terrassen, usw.	
Bemis Manufacturing Company	Wisconsin	Blumentöpfe	
Crompton Corp.		Extrusionstechnik	

Tabelle 5: USA - Kanada

Firmenname	Firmensitz	Anwendungen	Produktname
Tecnaro GmbH	Deutschland	Granulat div. Anwendung	Arboform
Fasalex GmbH	Österreich	Fensterprofile, Türzagen, Granulat	Fasalex, Fasal
Polyblank AB	Schweden	Paneele, Fassaden, Lärmschutz, Granulat	
PRIMO Sverige AB	Schweden	Profile für Bauindustrie	
Tech-Wood Nederland B.V	Holland	Profile, Paneele, Terrassen, Fassaden	
Beologic N.V	Belgien	Compounds, Granulat, Profile	
Haller Formholz GmbH	Deutschland	Holzfasern, Compounds	
SrandexEurope	England	Technologie, Service	
Baerlocher GmbH	Deutschland	Chemie, Additive	
Borax Europe Limited	England	Additive	
Brabender Technologie KG	Deutschland	Extrudertechnologie	
Colortronic GmbH	Deutschland	Extrudertechnologie	

Conener LTD	Finnland	Extrudertechnologie	
Honeywell	Belgien		
J. Rettenmaier & Söhne	Deutschland	Fasern, Compounds	
Kosche Profilum-mantelungs GmbH	Deutschland	Profile, Compounds	

Tabelle 6: Europa

Firmenname	Firmensitz	Anwendungen	Produktname
EIDAI Kako Company Limited		keine Info	
EIN Engineering Co., Ltd	Japan	Fussböden, Türen, Fenster usw.	

Tabelle 7: Fernost - Japan

4.10 Eigenschaftsprofile solcher am Markt befindlicher Produkte [9]

Das Hauptmerkmal all dieser Produkte ist, dass der eingesetzte Rohstoff Holz um einiges günstiger ist als Kunststoff.

Charakteristische Eigenschaften und Vorteile

- Umweltfreundlicher Verbund aus 60 bis 95% nachwachsenden Rohstoffen (Sägereiabfälle, Stroh vor allem heimische Nadelhölzer) und PVC bzw. PE oder PP aus Rezyklat
- Optische und haptische Eigenschaften wie Holz - kann als umweltfreundliche und ökologische Alternative zu Tropenhölzern eingesetzt werden
- Bearbeitbar wie Holz, splittert aber nicht
- Hohe mechanische Festigkeit und Steifheit sowie gleich bleibende homogene Materialeigenschaften
- Geringe Wasseraufnahme, geringes Quellen, hohe Form- und Witterungsbeständigkeit, Resistenz gegen Insekten und Pilze.
- Eigens entwickelte Extrusionstechnik ermöglicht Herstellung von hochgefüllten Press-, Spritzgussteile und Profile
- Füllgehalte bis 95% durch spezielles Pressverfahren für Formteile. Durch Schäumen wird eine Dichte von $0,8 \text{ g/cm}^3$ erreicht.

4.11 WPC´s im Hausbau

Nexwood Industries (Brampton, ON) hat ein Programm zum Bau preiswerter Häuser für den asiatischen Markt vorgestellt, wobei mit einem Potential von 2 Millionen Häusern pro Jahr gerechnet wird. Eine Kostenersparnis von ca. 30% gegenüber konventionellen Haustypen wurde angegeben.

Boise Cacsade (Boise, ID), ein auf Holzprodukte spezialisierter Betrieb, investiert \$ 65 Millionen in eine neue Anlage zur Herstellung von holzgefülltem Material. Der Betrieb stellt Haus-Verkleidungen sowie Halbfertigprodukte her.

Techwood International B.V. (Rotterdam, NL) und *Industrias Vasallo* (Puerto Rico) kündigten die Produktion von 50 000 hurrikansicheren Haus-Einheiten für Märkte in der Karibik an. Das Großprojekt beinhaltet Bauteile für Dächer, Wände und Fenster. Das Material wird mittels Extrusion auf Basis der von Cincinnati gelieferten Technologie (konischer Doppelschnecken-Extruder) mit hohem Holzanteil in einer PP-Matrix hergestellt werden. Bevor die Fertigung in Puerto Rico unter Lizenz von Tech-Wood begonnen werden kann, sollen die ersten 1000 Häuser aus Europa geliefert werden.

[15]

Bekannte Anwendungen im Hausbau:

- Tür- und Fensterrahmen
- Verkleidungen
- Schalungen,
- Dielen, Terrassenbodendielen
- Außenfassaden
- Zäune
- Pfosten
- Dach- und Wandschindeln

5. Rohstoffcharakterisierung

5.1 Charakterisierung der verwendeten Polymere

Für die Versuche wurden verschiedene Polypropylene der Firma Borealis GmbH (Linz) verwendet, welche sich einerseits in der chemischen Zusammensetzung (Homo- bzw. Copolymere mit unterschiedlichen MFR - „melt flow rate“) und andererseits in ihren mechanischen Eigenschaften unterscheiden. Dabei wurden sowohl bei den Homopolymeren als auch bei den Copolymeren sowohl schmelzesteife „Extrusionstypen“ mit sehr niederen MFR als auch „leichtfließende Spritzgusstypen“ mit hohen MFR untersucht.

Bezeichnung	Typ	MFR
PP 1	Homopolymer	8
PP 2	Homopolymer	4
PP 3	Homopolymer	12
PP 4	Blockcopolymer	30
PP 5	Copolymer	13
PP 6	Homopolymer	0,3
PP 7	Blockcopolymer	8

Tabelle 8: Zusammenstellung der verwendeten Polymere

Alle verwendeten Polymere wurden einer rheologischen und mechanischen Grundcharakterisierung unterzogen.

Zu diesem Zweck wurden Universalprüfkörper gemäß EN ISO 294 auf einer Spritzgußmaschine (ENGEL ES 80/25) gefertigt, welche im Normklima (23°C, 50 % rel. Feuchte) mindestens 88 Stunden gelagert wurden und anschließend für die mechanischen Prüfungen verwendet wurden.



Abb 28: Universalprüfkörper gemäß ISO 294 (links reines Polymere, rechts WPC)

Verwendete Prüfeinrichtungen

Universalprüfmaschine ZWICK TC FR020 TH für Zug- und Biegeprüfungen

Schlagpendel ZWICK 5113.300 für Schlagzähigkeit nach Charpy

Kegel-Platte Viskosimeter Physica Paar 300



Abb 29: Universalprüfmaschine mit Zugversuch

Bezeichnung	Zugversuch				
	E (MPa)	σ_{\max} (MPa)	ϵ_{\max} (%)	σ_B (MPa)	ϵ_B (%)
PP 1	1.078	35,10	14,17		
PP 2	831	26,17	12,93		
PP 3	1.117	36,31	13,62		
PP 4	1.077	26,93	7,47	16,94	51,23
PP 5	799	21,69	8,53		
PP 6	1.124	36,28	14,87		
PP 7	987	27,01	8,88		

Tabelle 9: Mechanische Charakterisierung der verwendeten Polymeren mit Hilfe des Zugversuches (EN ISO 527-1)

Bezeichnung	Biegeversuch		
	E (MPa)	σ_{\max} (MPa)	ϵ_{\max} (%)
PP 1	1.385	40,56	7,17
PP 2	990	28,46	6,97
PP 3	1.310	39,23	7,52
PP 4	1.374	34,95	6,44
PP 5	1.015	26,43	6,53
PP 6	1.426	41,46	7,57
PP 7	1.274	34,00	6,80

Tabelle 10: Mechanische Charakterisierung der verwendeten Polymeren mit Hilfe des Biegeversuches (EN ISO 178)

Bezeichnung	Charpy	
	Schlagarbeit (J)	Schlagzähigkeit (kJ/m ²)
PP 1	4,92	121,10
PP 2	7,62	188,03
PP 3	4,25	104,79
PP 4	7,06	173,90
PP 5	6,88	170,17
PP 6	9,99	244,19
PP 7	8,13	199,35

Tabelle 11: Mechanische Charakterisierung der verwendeten Polymeren mit Hilfe des Schlagbiegeversuches (EN ISO 179)

Bezüglich der mechanischen Eigenschaften (Steifigkeit und Festigkeit) unterscheiden sich diese Polymere nicht gravierend, lediglich bei der Zähigkeit sind die Unterschiede größer.

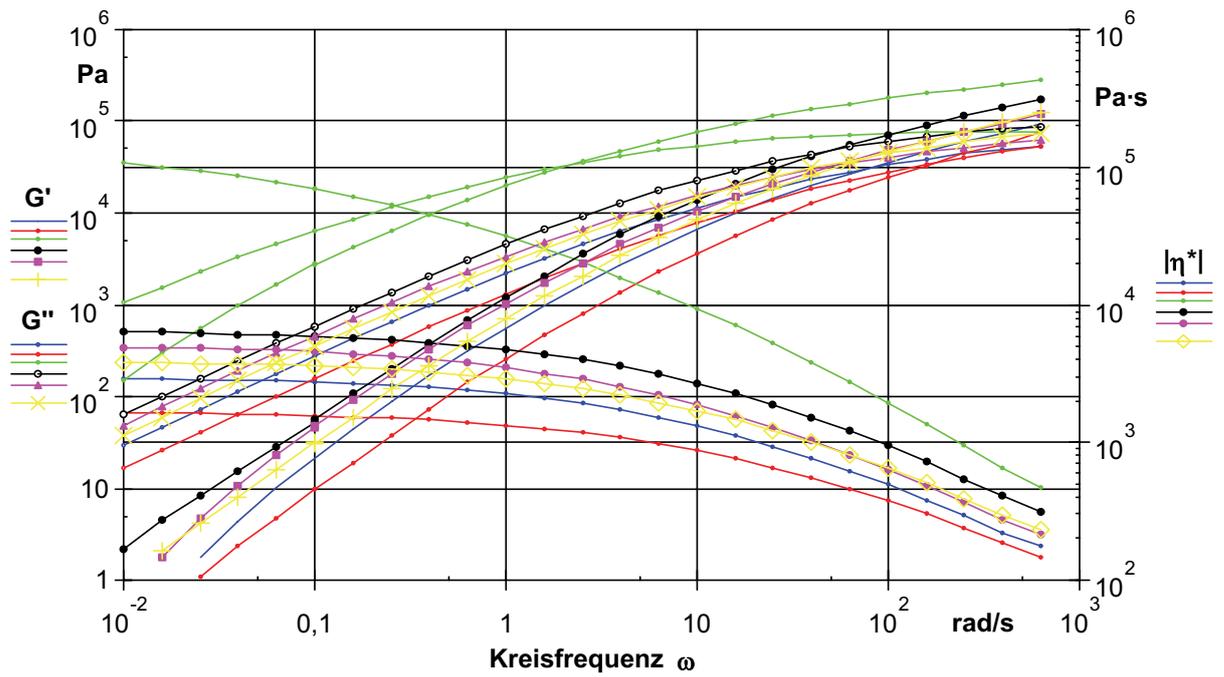


Abb 30: Charakterisierung der verwendeten Polymere hinsichtlich ihres rheologischen Verhaltens (grün - PP 6; schwarz - PP 2; rosa - PP 1; gelb - PP5; blau - PP 3; rot - PP4)

5.2 Charakterisierung der verwendeten Holzspäne

Ursprünglich wurden bei der Holzextrusion Holzpellets oder Agglomerate verwendet, die bereits beide Werkstoffkomponenten Holz und Kunststoff beinhalten. Der Grund dafür liegt darin, dass eine exakte Dosierung der sehr voluminösen Holzspäne sehr schwierig ist. Für eine Steigerung der Rentabilität des Verfahrens ist eine direkte Zuführung des Spanmaterials in den Extrusionsprozeß wünschenswert. Für die Optimierung der direkten Spanzuführung und zur Ermittlung des optimalen Spanmaterials ist es notwendig zu evaluieren, ob es während des Prozesses des Extrudierens zu einer Veränderung der Holzpartikel hinsichtlich Länge (Faserverkürzung) und Geometrie (Abknicken, Brechen etc.) kommt.

Zu diesem Zweck wurde aus dem Ausgangsmaterial eine Stichprobe gezogen und anhand dieser die Verteilung der Partikelabmessungen ermittelt. Für die Untersuchung des Spanmaterials nach der Extrusion wurde die Kunststoffkomponente durch geeignete chemische Behandlung (3 stündiges Kochen in einem unpolaren Lösungsmittel wie z.B. Xylol) wieder herausgelöst und die Späne analog zum Ausgangsmaterial untersucht.

Zur Herstellung der Polypropylen-Holz-Composites wurden insgesamt 16 verschiedene Fraktionen von Spanmaterialien eingesetzt:, wobei sowohl die Holzart (Hart- und Weichholz) als auch die Spanlängen variiert wurden.

Dabei muß angemerkt werden, dass es sehr schwierig ist, Späne von anderen Holzarten als Buche und Fichte/Kiefer in verarbeitbarer Qualität zu bekommen. Im Vorfeld wurden auch Tannen- und Kiefer-Hobelspäne der Firma Ganaus (NÖ) probiert, jedoch war es unmöglich, aus diesen sehr inhomogenen Fraktionen Profile zu erzeugen.

Von allen Fraktionen wurden Siebanalysen durchgeführt (siehe Anhang C),

Bezeichnung	Beschreibung	LWL (aus Siebanalyse) (µm)	LWL_Boku (µm)
Egger	Fichte	1054	
Lignocell BK 40/90	Fichte mit geringen Mengen Hartholz	409	409
Lignocell HB 120 TR	Fichte mit geringen Mengen Hartholz	776	
Lignocell P Super	Fichte mit geringen Mengen Hartholz, Pellets		890
Lignocell S 150 TR	Fichte mit geringen Mengen Hartholz	637	
Lignocell S 8/15	Fichte mit geringen Mengen Hartholz	1589	
Lignocell Typ 4	Fichte mit geringen Mengen Hartholz	2111	3698
Marley	Fichte	1915	
Schaffler	Lärche	1430	
Tipo 15 E	Buche	717	
Tipo 35 E	Buche	465	
Tipo BM	Fichte	848	
Tipo CB 15 E	Fichte	729	646
Tipo CB 20 E	Fichte	873	
Tipo CB 35 E	Fichte	359	894

Tabelle 12: Zusammenstellung der verwendeten Spanarten











Abb 31: Darstellung der verwendeten Holzspäne

5.2.1 Siebanalyse

Alle Holzspäne wurden mit Hilfe der „klassischen Siebanalyse“ untersucht („Fritsch analysette 3 - PRO“). Dabei wurde eine definierte Probenmenge in einen Siebturm eingebracht und durch Trockensiebung die einzelnen Korngrößenklassen ermittelt. Die nächste Abbildung zeigt - stellvertretend für alle Bestimmungen - eine klassische Teilchenverteilung an.

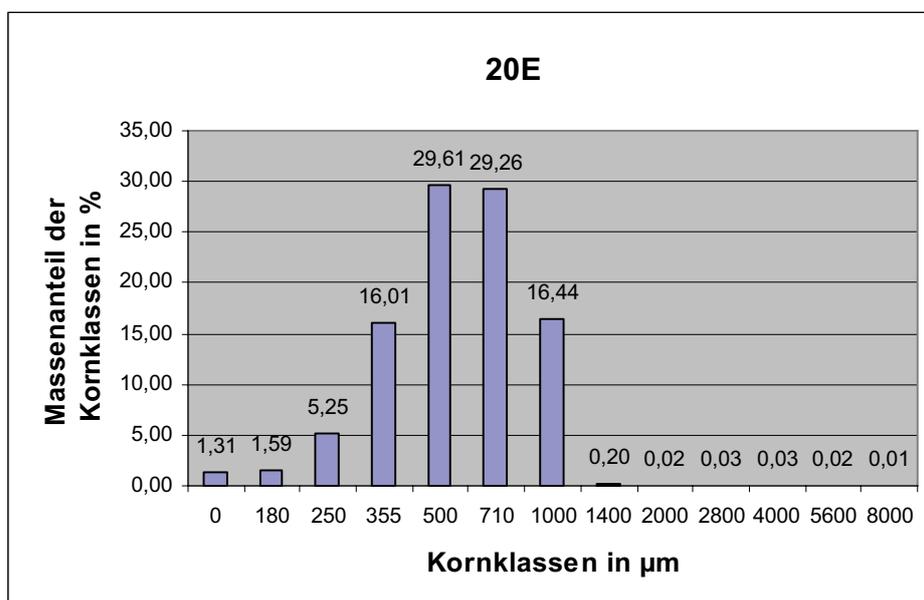


Abb. 32: Siebanalyse von Typo CB 20E

Problematisch ist diese Methode aber - wie auch hier der Fall ist - bei Teilchen mit relativ großem aspect ratio (Längen- zu Durchmesser-Verhältnis), da sie eine Verteilung liefert, die eine Mischung aus Faserlänge und Faserdurchmesser ist, d.h. die „wirkliche“ Verteilung verschiebt sich zu kürzeren Faserlängen, da sich Späne im Sieb „aufstellen“ können und daher entsprechend ihres Durchmessers durch das Sieb fallen können.

5.2.2 Methoden der Spancharakterisierung am IHF

Die unten angeführten Proben wurden vom Institut für Holzforschung (IHF - Boku) noch einer intensiveren Charakterisierung unterzogen

- Typ BK 40/90: Fichtenholzspäne der Fa. Rettenmaier&Söhne (BRD)
- Tipo 35E: Buchenholzspänen der Firma LA SOLE (I)
- Tipo 15E: wie CB 35E aber mit kürzeren Spänen
- Lignocell Typ 4: Fichtenholzspäne der Firma Rettenmaier&Söhne
- Lignocell P Super: Holzpellets, hergestellt aus Lignocell Typ 4

a) Mikroskopische Charakterisierung der Späne:

Das zu untersuchende Spanmaterial wurde auf eine schwarze Glasplatte aufgelegt und durch Vibration vereinzelt. Die Späne wurde anschließend unter einem Auflichtmikroskop (Olympus 40x) beobachtet und fotografiert (siehe Abbildung 33). Mit Hilfe der Bildauswertesoftware „Scion Image“ wurden die digitalen Bilder in binäre Bilder umgewandelt und invertiert. Durch das Programm wird mit einem least square fit eine Ellipse an die Form der Partikel angepasst. Die Hauptachsen der Ellipsen entsprechen etwa der Länge und Breite der Partikel. Für die Evaluierung der Genauigkeit der Methode wurden je 22 Fichten und Buchenpartikel händisch am Bildschirm vermessen und die erhaltenen Längen und Breiten der automatischen Vermessung gegenübergestellt. Ein Mittelwertsvergleich (t-Test) ergab keinen signifikanten Unterschied ($p < 0.0001$) zwischen den beiden Methoden.

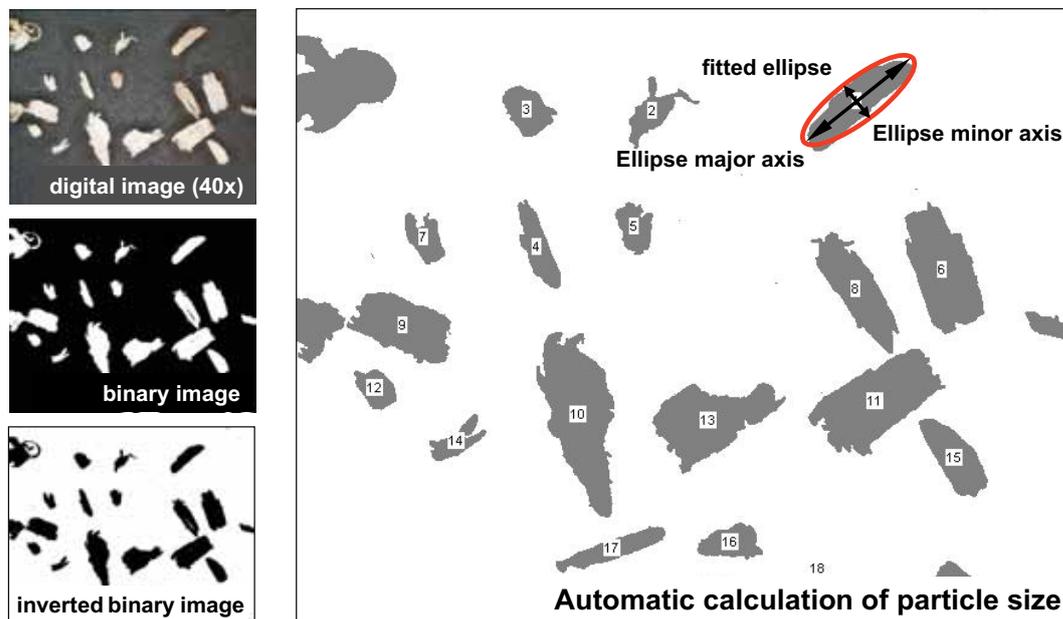


Abbildung 33: Fotos, Umwandlung in ein binäres Bild und automatische Vermessung des Spanmaterials mit der Bildauswertesoftware Scion Image.

Für eine Abschätzung der Dicke der Späne wurden je drei Späne zwischen zwei geschliffene Stahlplättchen gelegt und die Dicke mit einer präzisen Meßuhr ($\pm 3\mu\text{m}$) gemessen. Pro Spansorte wurden so 20 Meßdurchgänge durchgeführt.

Für die Bestimmung des Feinanteils der verschiedenen Spansorten wurden 100 g Spanmaterial eingewogen und mit zwei Sieben (Maschenweite 500 μm und 100 μm) gesiebt. Die Masse der jeweiligen Siebfraktion wurde gravimetrisch bestimmt.

Um die Veränderung der Geometrie aufgrund des Extrusionsverfahrens zu verfolgen, wurde versucht die einzelnen Späne in verschiedenen Spantypen (siehe Abbildung 34) einzuteilen.

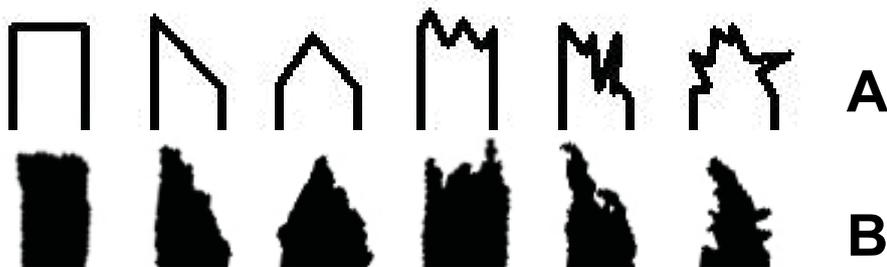


Abbildung 34: Entsprechend der beobachteten Spänformen (B) wurde versucht die Spangeometrie in 6 verschiedene Formen einzuteilen.

b) Charakterisierung der Späne im extrudierten Composite :

Aus verschiedenen Bereichen des Hohlraumprofils (siehe Abb.35) wurden kleine Proben mittels Kreissäge herausgetrennt (Gesamtgewicht ca. 2g), in einen 250 ml Einhalsrundkolben mit aufgesetztem Rückflusskühler überführt, mit Xylol (Isomerengemisch) überschichtet und 4 Stunden lang unter Rückfluss erhitzt. Dabei konnte der Polypropylenanteil des Composites vollständig gelöst werden. Nach Filtration des festen Rückstandes (Spanfraktion) und Trocknung bei 80°C über Nacht, wurde die Spangrößenverteilung nach dem bereits beschriebenen Verfahren ermittelt.

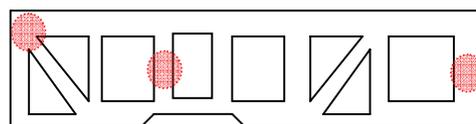


Abb.35: Probenentnahme zur Spangrößencharakterisierung im WPC-Composite

c) Ergebnisse der Spancharakterisierung

Da es sich bei den gefundenen Verteilungen der Spandimensionen um stark linksschiefe Verteilungen handelt, stellt der Mittelwert keine repräsentative Größe für die Charakterisierung des Spanmaterials dar. In der Papierindustrie wurde für die Charakterisierung der Länge der Fasern die sogenannte **length weighted length** (Formel 1) eingeführt.

$$L_{LL} = \frac{\sum n_i L_i^2}{\sum n_i L_i} \quad (1)$$

Length weigthed length: L_i = Spanlänge (breite) der Klasse i , n_i = Summe der Späne in der Klasse i

Die ermittelten Daten der Spangrößen wurde in weiterer Folge auch für die Entwicklung eines Finite Element Modells verwendet. Für die Vereinfachung im FE-Modell ist es notwendig Modellspäne zu entwickeln. Da vor allem kurze und kleine Partikel im Extrudat mehr Füllcharakter haben und wahrscheinlich in einem geringeren Ausmaß Steifigkeit und Festigkeit der Extrudate beeinflussen, wurde der Modellspan entsprechend der Größe length weigthed length entwickelt. Abbildung 32 zeigt anhand der Verteilung der Breite der Fichtenholzspäne die Gegenüberstellung zwischen Mittelwert und length weigthed length.

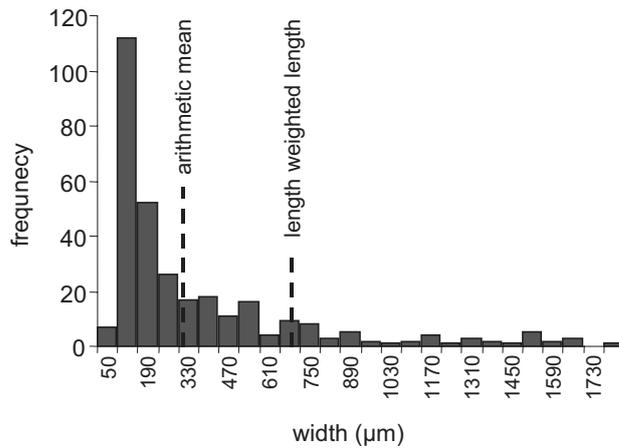


Abbildung 36: Vergleich zwischen Mittelwert und length weighted length anhand des Histogramms der Breite von Fichtenspänen.

d) Spangrößenverteilung der Ausgangsstoffe

Die in Abb.37 zusammengefassten Diagramme A-E zeigen die Längen- bzw. Breitenverteilungen der eingesetzten Spanmaterialien. Zusätzlich wurde die aus der Papierindustrie zur Charakterisierung der Faserlänge herangezogene length weighted length (LWL) berechnet (siehe Glg.1 und Tab.12).

$$LWL = \frac{\sum n_i L_i^2}{\sum n_i L_i} \quad (\text{Glg. 1})$$

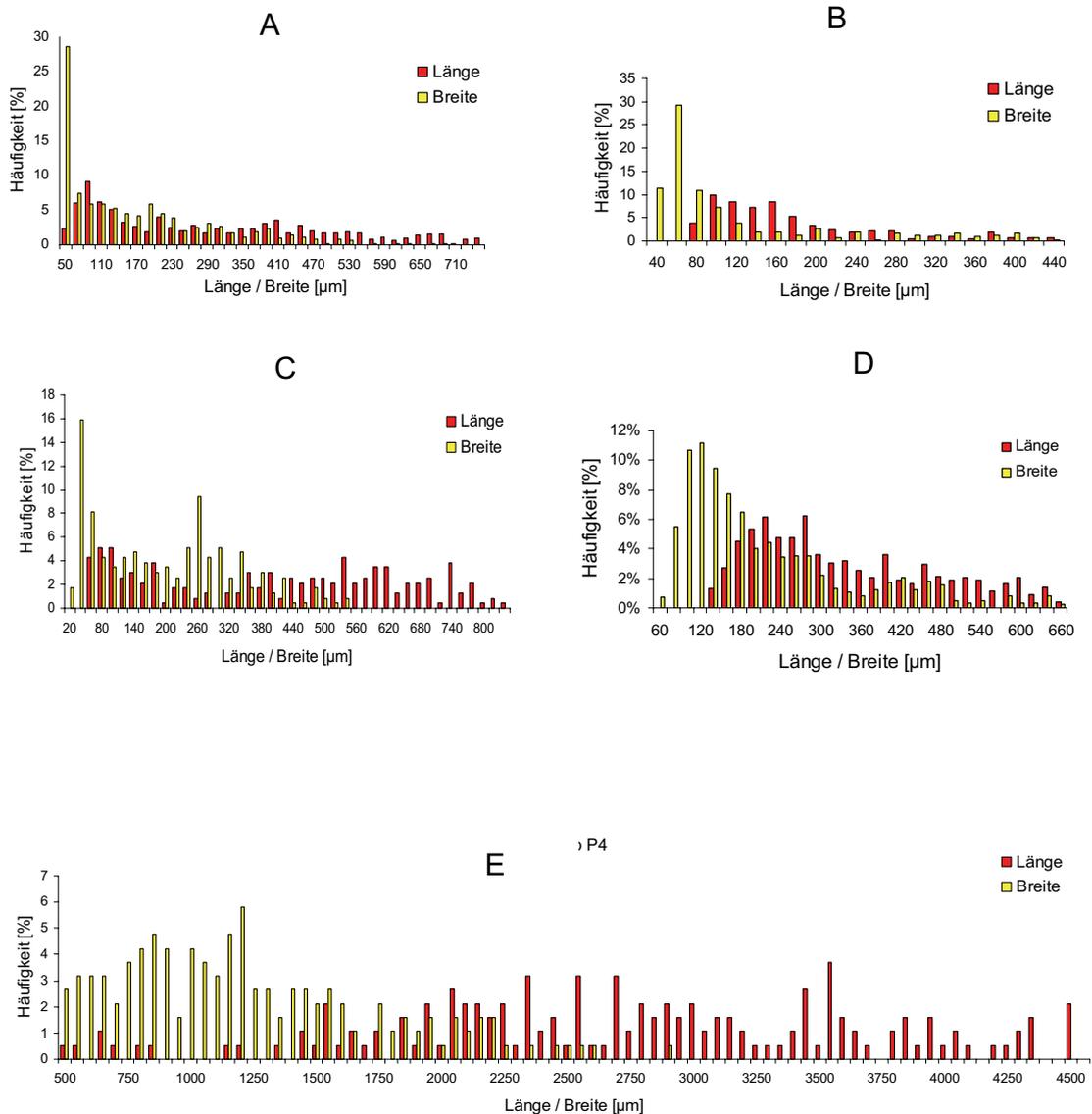


Abb.37: Längen- und Breitenverteilung der Fichtenholzspäne BK 40/90 (A), Tipo CB 15E (B), Tipo CB 35E (C), Lignocel P Super (D) und Lignocel Typ 4 (E)

Aus Abbildung 37 ist der mechanische Einfluß während des Pelletierungsprozesses sehr deutlich ersichtlich. Nach Auskunft der Firma Rettenmaier wird für die Herstellung von Lignocel P Super (D) die Spantype Lignocel Typ 4 (E) verwendet. Man sieht, dass die sehr breite Verteilung durch

die **Pelletierung** „zusammengeschoben“ wird. Auch die Breite der Späne wird bei der massiven mechanischen Belastung durch den Pelletierungsprozeß sehr stark reduziert, die Späne werden im Mittel um 75% in ihrer Länge gekürzt, der Durchmesser nimmt auch um mehr als 50% ab.

	LWL Länge [μm]	LWL Breite [μm]
BK 40/90	409	328
Tipo CB 15E	646	281
Tipo CB 35E	894	434
Lignocel Typ 4	3698	1407
Lignocel P Super	890	644

Tab.13: Length weighted length der Länge (L) und der Breite (B) des untersuchten Spanmaterials

e) Spangrößenverteilung in den extrudierten Composites

Um den Einfluss des Extrusionsprozesses auf die Spangeometrie zu untersuchen, wurde die Spangrößenverteilung in den WPC-Profilen analysiert. Die Ergebnisse der Spangrößenverteilung in den Profilen wurden in zwei Gruppen unterteilt:

Gruppe 1: Spantyp BK 40/90, Prozessparameter variabel

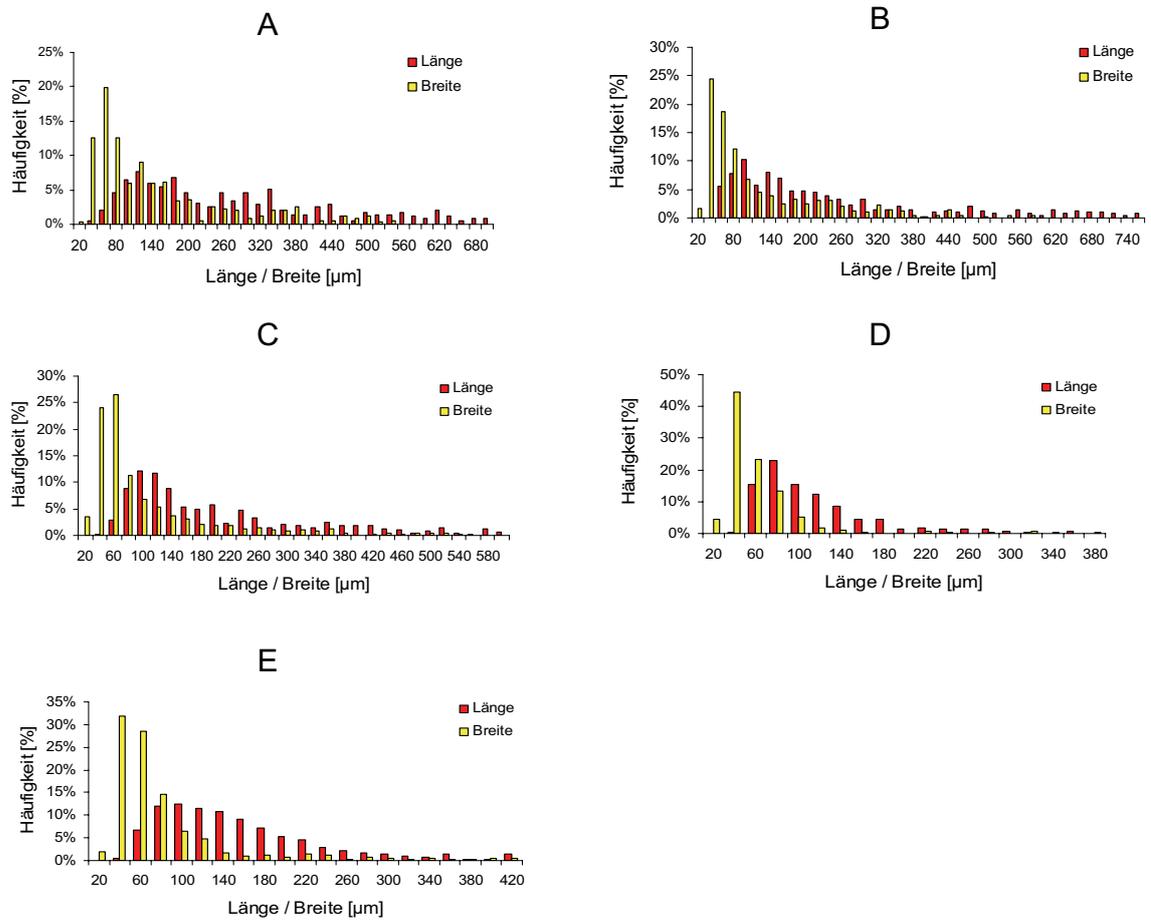
Gruppe 2: Prozessparameter konstant, Spantyp variabel

Tab.13 gibt einen Überblick über die Prozessparameter bei der Extrusion der verschiedenen Hohlraumprofile. Abb.38 enthält die in den Diagrammen A-E zusammengefassten Ergebnisse der Spangrößenanalyse der *Gruppe 1*.

Probe	Holztyp	Anteil [%]	Polymer	Anteil [%]	Additiv	Anteil [%]	Ausstoss [kg/h]	RPM	Ausstoss [m/min]
P15.2_001	BK 40/90	70	120 MO	28	Orevac	2	100	22	0,7
P15.2_002	BK 40/90	70	120 MO	28	Orevac	2	100	28	0,7
P15.2_003	BK 40/90	70	120 MO	28	Orevac	2	100	14	0,7
P15.2_004	BK 40/90	70	120 MO	30	-	0	30	7	0,2
P15.2_005	BK 40/90	70	120 MO	28	Orevac	2	45	10	0,3
P15.2_007	BK 40/90	70	120 MO	30	-	0	45	10	0,3
P15.2_019	Tipo CB 35E	70	HD 120 MO	28	Orevac	2	70	17	0,5
P15.2_020	Tipo CB 15E	70	HD 120 MO	28	Orevac	2	70	17	0,5
P15.2_021	Lignocel Typ 4	70	HD 120 MO	28	Orevac	2	70	17	0,5
P15.2_025	Lignocel P Super	70	HD 120 MO	28	Orevac	2	70	17	0,5

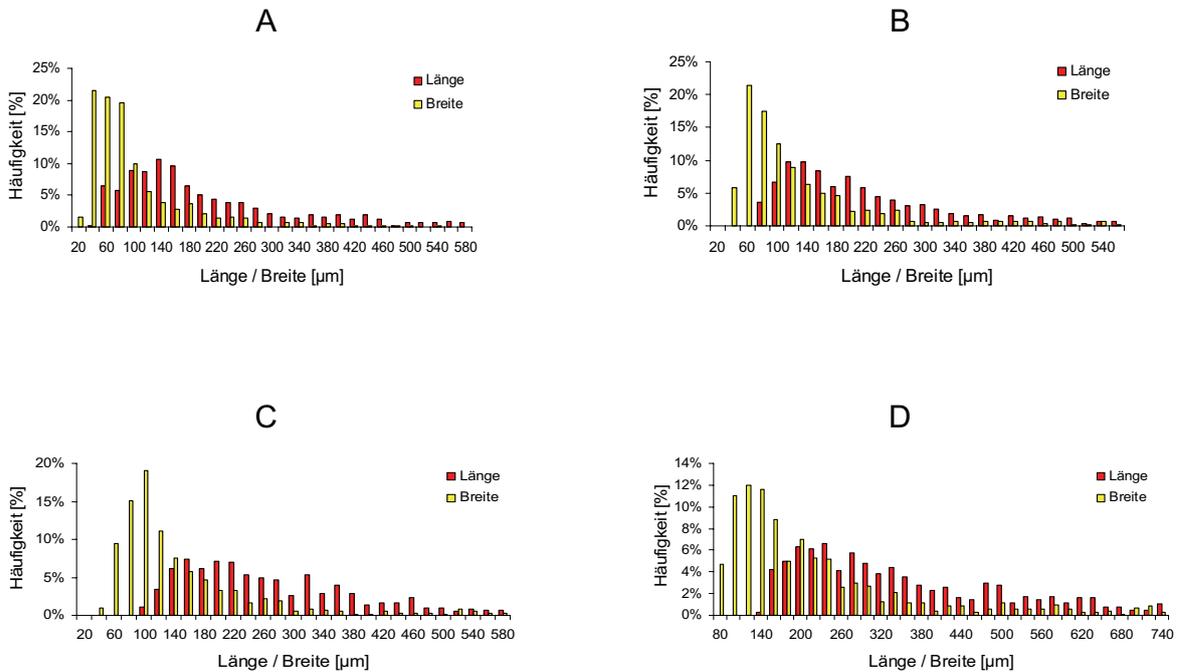
Tab.14: Prozessparameter - Extrusion

Der Ausstoß wurde in einem sehr weiten Bereich (30 bis 100 kg/h) variiert, ebenso die Schneckendrehzahl (zwischen 7 und 28 rpm).



**Abb.38: Spangrößenverteilung in den WPC - Profilen der Gruppe 1
P15.2_001 (A), P15.2_002 (B), P15.2_003 (C), P15.2_004 (D), P15.2_005 (E)**

Abb.39 enthält die in den Diagrammen A-D zusammengefassten Ergebnisse der Spangrößenanalyse der WPC-Profile aus der Gruppe 2.



**Abb.39: Spangrößenverteilung in den WPC - Profilen der Gruppe 2:
P15.2_019 (A), P15.2_020 (B), P15.2_021 (C), P15.2_025 (D)**

In nachfolgender Tabelle wurden die Änderungen der *length weighted length* aller verwendeten Spantypen sowie die prozentuelle Abnahme der Spangrößen durch die Extrusion zusammengefasst.

	Profil	Spantyp	vor Extrusion		nach Extrusion			
			LWL Länge [µm]	LWL Breite [µm]	LWL Länge [µm]	Änderung [%]	LWL Breite [µm]	Änderung [%]
Gruppe 1	P15.2_001	BK 40/90	409	328	369	-10	260	-21
	P15.2_002				348	-15	222	-32
	P15.2_003				352	-14	186	-43
	P15.2_004				209	-49	125	-62
	P15.2_005				293	-28	156	-52
Gruppe 2	P15.2_019	Tipo CB 35E	894	434	348	-61	163	-62
	P15.2_020	Tipo CB 15E	646	281	512	-21	235	-16
	P15.2_021	Lignocel Typ 4	3698	1407	872	-76	469	-67
	P15.2_025	Lignocel P Super	890	644	767	-14	473	-27

Tab.15: Änderung der LWL durch Scherbeanspruchung im Extrusionsprozess

Die statistische Auswertung der Spangrößenverteilung vor und nach der Extrusion wurde in den Abb. 40 graphisch dargestellt.

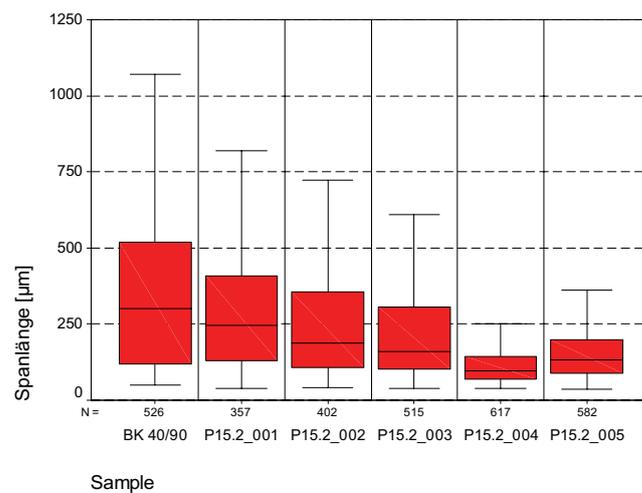


Abb.40: Spanlängenverteilung der WPC-Profile der Gruppe 1 (Holzspan BK 40/90, variierende Prozessparameter)

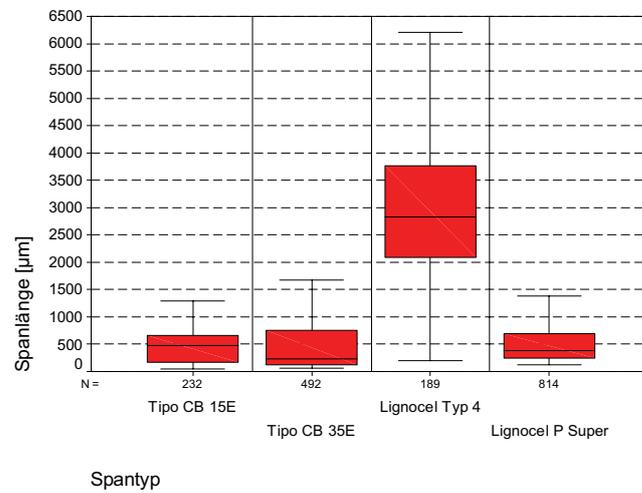


Abb.41: Spanlängenverteilung Ausgangsspäne Gruppe 2

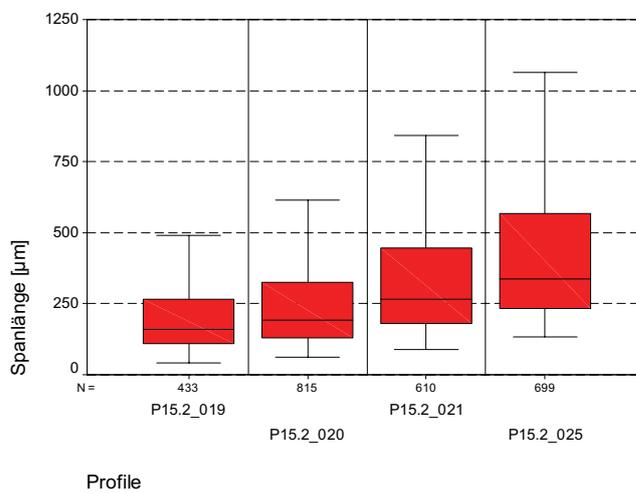


Abb.42: Spanlängenverteilung Gruppe 2 (variierende Spantypen, Prozessparameter konstant)

Diskussion:

Durch die Scherbelastung im Extruder kommt es zu einer mehr oder minder deutlichen Reduktion der Spangröße (Abb.40 und 42). In der Gruppe 1 fällt diese Änderung am deutlichsten für Profil P15.2_004 aus. Bei der Extrusion dieses Formteiles wurde kein Compatibilizer verwendet, die fehlende Gleitmittelwirkung des Additives führt zu einer verstärkten Zerkleinerung der Späne. Während die Spanlänge in den Profilen P15.2_001/002 und 003 nur geringfügig abnimmt (~10-15%), kommt es beim Formteil P15.2_005 zu einer stärkeren Reduktion der Spanlänge (~30%). Grund dafür ist sehr wahrscheinlich die niedrigere Rotationsgeschwindigkeit der Extruderschnecken, die zu einer intensiveren Zermahlung der Späne führen dürfte.

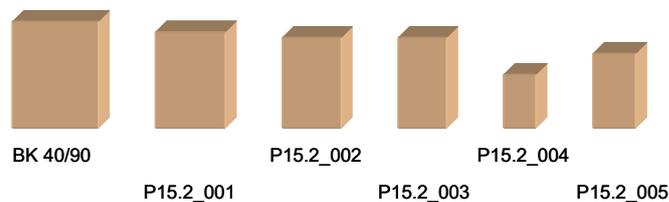


Abb.43: Änderung der Spangeometrie bei den WPC-Profilen der Gruppe 1

Beim Vergleich der *length weighted length* (LWL) der Späne fällt auf, dass im Schneckendrehzahlbereich zwischen 14 und 28 RPM keine großen Unterschiede bestehen. Die Späne werden gleichmäßig auf eine mittlere Spanlänge von etwa 300-350 µm heruntergebrochen.

In der **Gruppe 2** wurden die Spantypen Tipo CB 35E (Profil P15.2_019) und Lignocel Typ 4 (Profil P15.2_021) sehr stark zerkleinert (Spanlänge nimmt um ca. 60-70% ab), während die Späne vom Typ Tipo CB 15E (Profil P15.2_020) bzw. Lignocel P Super

(P15.2_025) nur wenig an Länge bzw. Breite verlieren (Abnahme der Spanlänge um etwa 20%).

Im Fall des Lignocel P Super kann davon ausgegangen werden, dass die Holzpellets während der Extrusion nicht vollkommen aufgetrennt wurden. Im fertigen Profil kann außerdem eine Vielzahl an „Spanagglomeraten“ bereits mit freiem Auge beobachtet werden, was diese Annahme bestätigt. Die Spangeometrien vor bzw. nach der Extrusion wurden in Abb. 44 und Abb.45 graphisch dargestellt.

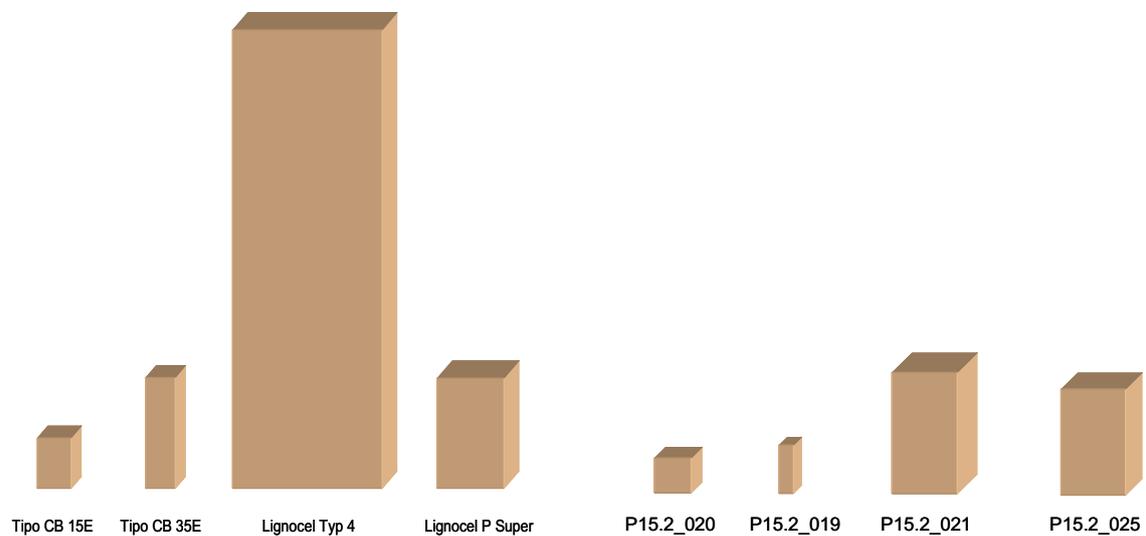


Abb.44 und 45: Spangeometrie vor und nach der Extrusion

Abbildung 4 zeigt die Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen Spangeometrien der verschiedenen Spansorten. Bei der Spangeometrie wurde prinzipiell zwischen scharfkantig und fasrigen Kanten unterschieden. Entsprechend der Form der Abschlußkanten wurden die Späne in gerade, schräg und spitzkantig unterteilt. Entsprechend der häufigsten Spanform und den ermittelten length weighted length für die Länge und Breite wurde für jede Spansorte ein Modellspan ermittelt (siehe Abbildung 43).

Im Ausgangszustand unterscheiden sich die drei verschiedenen Buchenholzspäne hinsichtlich ihrer Länge, Breite, Dicke und Spanform deutlich von einander. Abbildung 48 zeigt die Größenverteilungen der drei Buchenholzspäne nach dem Extrusionsprozeß. Entgegen dem Ausgangsmaterial ist nach der Extrusion kein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen Spansorten zu finden. Weiters findet auch hinsichtlich der Spangeometrie eine Homogenisierung statt. Daraus kann geschlossen werden, dass die Partikelgröße vorwiegend durch den Extruder, d.h. Schneckenlänge, Schnecken spiel und Schnecken geometrie bestimmt wird. Das bedeutet weiters, dass für einen gegebenen Extruder die Partikelgröße ein bestimmtes kritische Maß nicht übersteigen kann. In Abbildung 49 sind die Modellspäne der drei Buchenholzspansorten dargestellt. Die drei Modellspäne entsprechen im Wesentlichen dem Modellspan des Ausgangsmaterials La Sole Tipo 35E. In Tabelle 14 sind die Abmessung der Modellspäne zusammengefaßt.

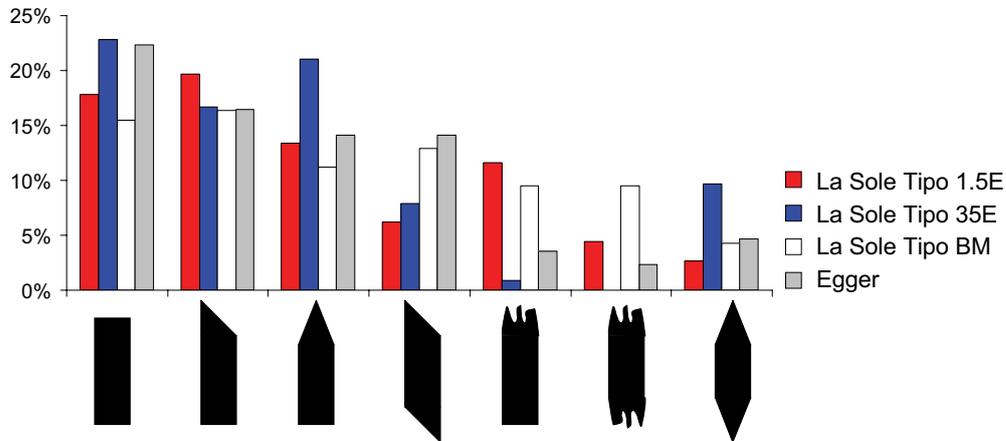


Abb. 46: Häufigkeiten verschiedener Spanformen von Buchen- und Fichtenspänen

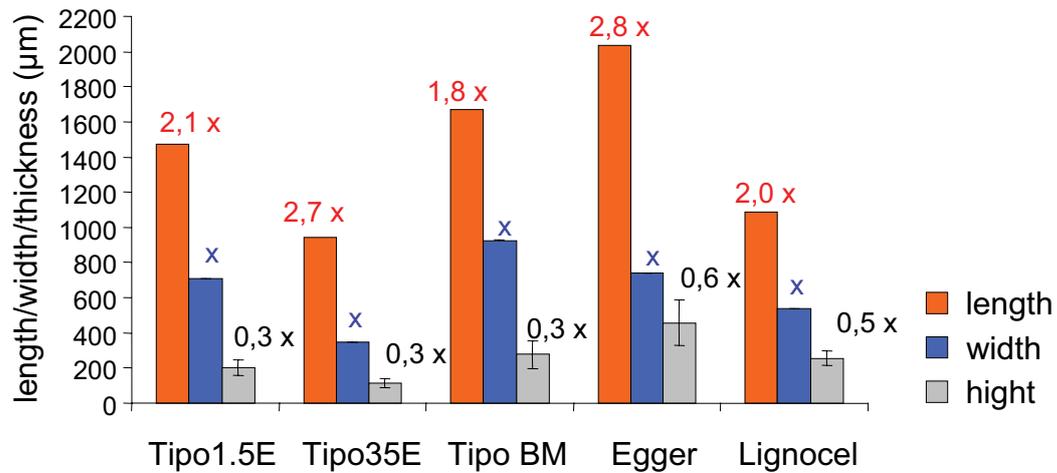
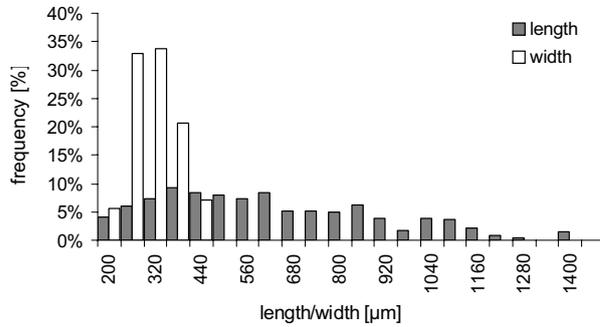
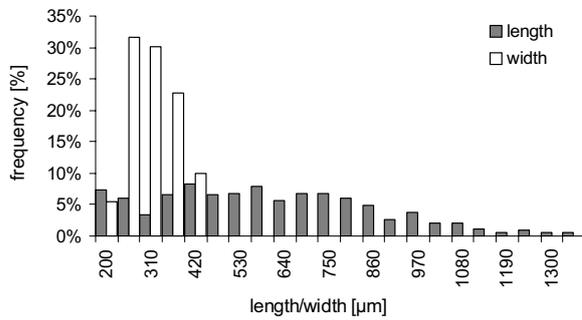


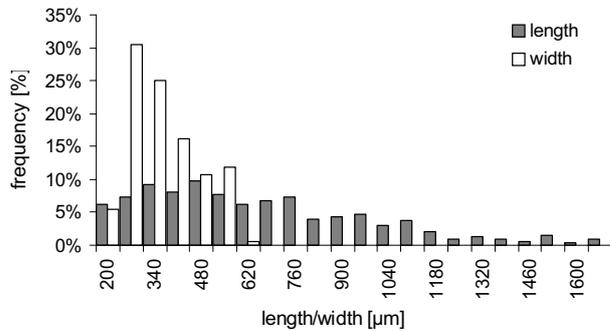
Abb. 47: Abmessungen und Geometrie der Modellspäne der 5 untersuchten Spansorten.



A



B



C

Abb. 48: Längen und Breitenverteilungen der Buchenholzspäne La Sole Typo 1.5E (A), 35 E (B), BM (C) nach der Extrusion.

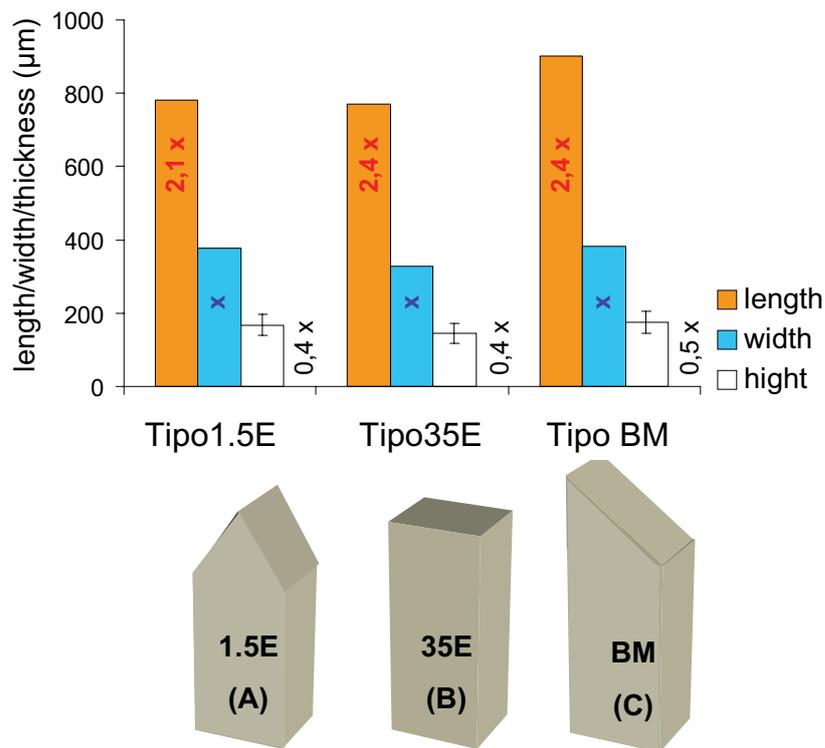


Abbildung 49: Abmessungen und Geometrie der Modellspäne der 3 untersuchten Buchenholz-Spansorten nach der Extrusion.

Entsprechend der geringsten Veränderung der Spangröße während des Extrusionsprozeß sind bei der Spansorte La Sole Tipo 35E auch die geringsten Veränderungen hinsichtlich der Spangeometrie zu beobachten (siehe Abbildung 50).

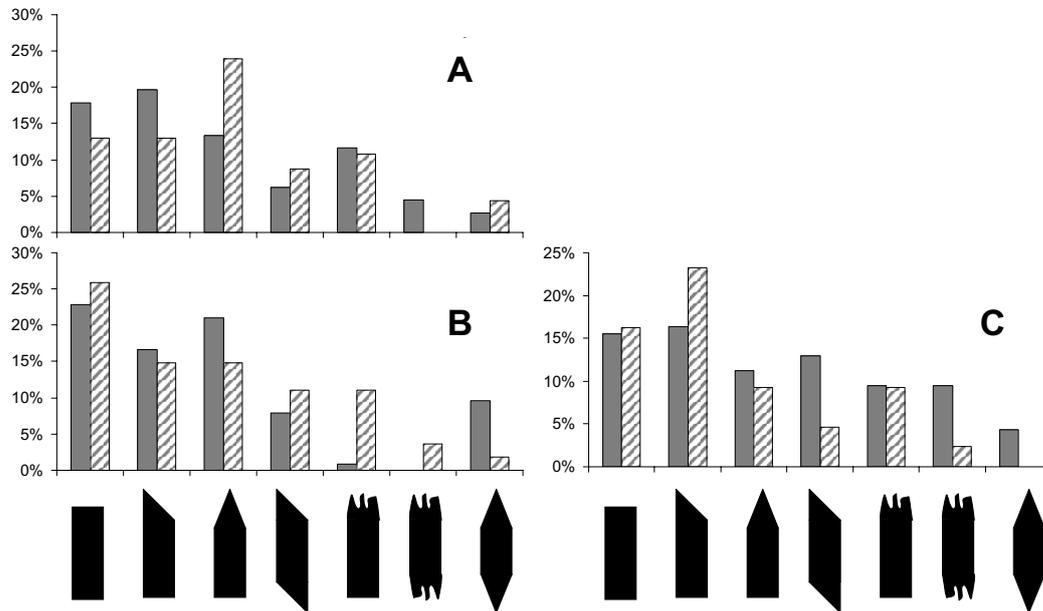


Abb. 50: Veränderung der Spangeometrie der drei Buchenholzspansorten La Sole Tipo 1.5E (A), 35 E (B), BM (C). Schraffierte Säule stellen die Häufigkeiten der Spanform nach der Extrusion dar.

Abbildung 52 zeigt die Masseanteile der verschiedenen Siebfraktionen des Ausgangsmaterial. Bei allen untersuchen Spansorten konnte nur ein sehr geringer Feinanteil (<100µm) beobachtet werden.

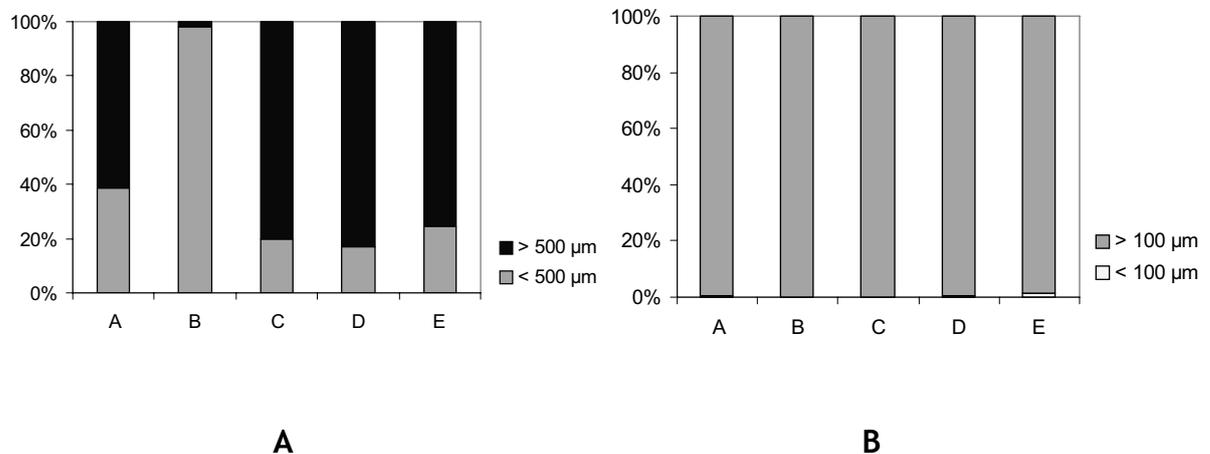


Abb. 51: Siebfraktionen der Buchenholzspäne La Sole Tipo 1.5E (A), 35 E (B), BM (C) und der Fichtenholzspäne Egger (D) und Lignocel P-Super (E).

Partikel bzw. Spanorientierung im Extrudat WP 11

Für die Untersuchung der Spanorientierung wurden kleine Proben des Extrudats (5 x 10 x 20 mm) ca. 3 h in kochendem Wasser gelagert und anschließend mit einem konventionellen Schlittenmikrotom geschnitten. Bei dem untersuchten Material handelt es sich um ein plattenförmiges Extrudat (Dicke ~5mm, Breite 200mm). Die Mikroschnitte wurden in Extrusionsrichtung an den verschiedenen Flächen (Querschnitt, Oberfläche und Seitenfläche) gewonnen. Die erzeugten Mikroschnitte (Dicke ~ 30 µm) wurden für einen besseren Kontrast zwischen Holz und Kunststoff mit Methylenblau gefärbt, gewaschen und anschließend auf einen Objektträger aufgebracht und bei 10-facher bzw. 40-facher Vergrößerung beobachtet und fotografiert (siehe Abbildung 52).

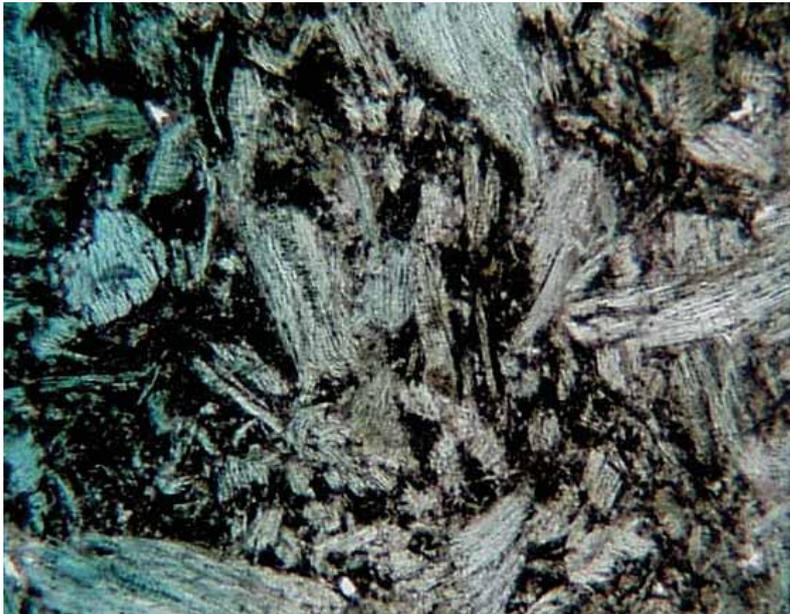


Abb.52: Dünnschnittpräparat eines WPC aus Buchenholz mit Polypropylenmatrix

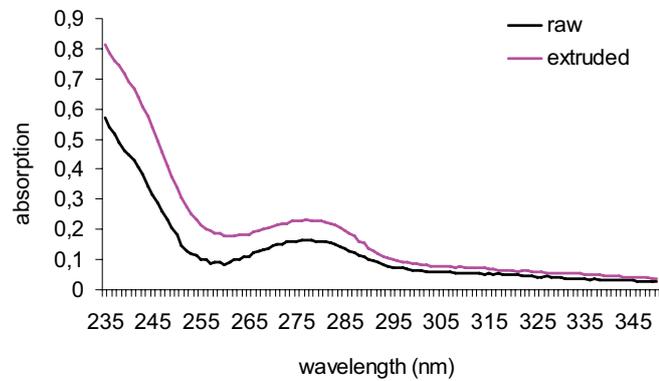
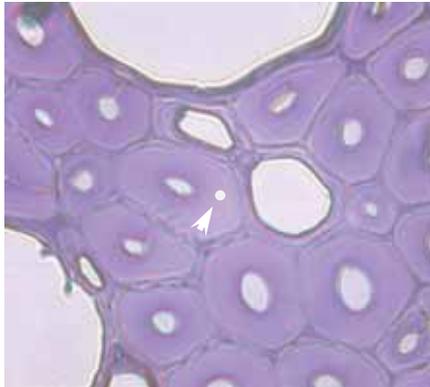
Mit der Bildauswertungssoftware Scion Image wurde die Orientierung der einzelnen Partikel zur Extrusionsrichtung bestimmt. Die Auswertung der Winkelmessungen zeigte, dass vorallem an den Seitenflächen (Höhe der Platten) eine eindeutige Orientierung der Partikel gegeben ist. Daraus läßt sich ableiten, dass auch das formgebende Werkzeug einen entscheidenden Einfluß auf die Partikelorientierung ausübt.

Bei dem untersuchen Fichten- und Buchenholzextrudat wurde das Material bei im Herstellungsprozeß in Pelletform zugeführt. Bei beiden Holzarten konnten eine relativ homogene Partikelverteilung über die beobachteten Querschnitte beobachtet werden.

Thermische Veränderung der Holzkomponente durch die Extrusion

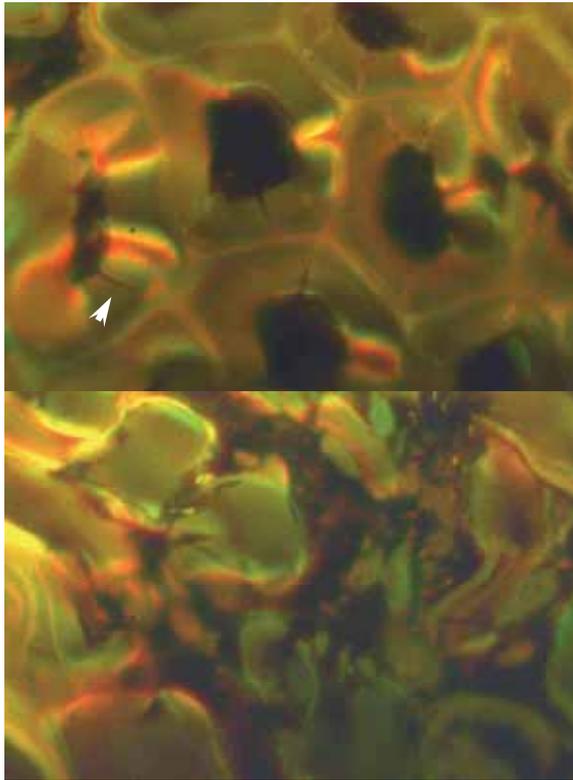
Die Zellwandsubstanz Lignin zeigt im UV-Licht einen Peak der Absorption bei 280 nm. Mit Hilfe von Absorptionsspektren in der UV-Mikroskopie kann daher der Ligningehalt in der verholzten Zellwand bestimmt werden. Aufgrund höherer Kondensationsstufen kann bei thermischer Belastung von Holz eine erhöhte Absorption im UV-Spektrum beobachtet werden. Für die Untersuchung im UV-Mikroskop ist es notwendig Ultra-Dünnschnittpräparate (Schichtdicke 1µm) der Proben zu erzeugen. Zu diesem Zweck wurden kleine Probenblöcke des Extrudats in Kunstharz eingegossen und auf einem Ultra-Mikrotom (Zeiss Ultracut) geschnitten. Für die Referenzmessungen wurden unbehandelten Späne in Spurr eingebettet und ebenfalls am Ultracut geschnitten. Die Mikroschnitte wurden auf ein Quarzglas übertragen und in einem UV-Mikroskop (Zeiss MPM 800) beobachtet.

Bei der Untersuchung der Buchenholzextrudate konnte eine deutliche Veränderung der Absorptionsspektren zu den Referenzproben festgestellt werden (siehe Abbildung 53). Daraus läßt sich ableiten, dass es trotz der kurzen Aufenthaltsdauer des Spanmaterials im Extruder zu einer thermischen Veränderungen der Holzsubstanz kommt. Inwieweit diese thermische Veränderung eine Veränderung der Oberflächeneigenschaften der Holzpartikel verursacht, muß noch untersucht werden.



A B

Abb. 53: A) UV-Mikroskopie von einer Referenzprobe. Der Pfeil markiert den UV-Spot für die UV-Absorptionsmessung. Gemessen wurde jeweils in der Mitte der Sekundärwand. B) Die Absorptionsspektren zeigen eine eindeutige Anhebung der Absorption unterhalb von 300 nm.



A

B

Abb. 54: A) Fluoreszenzaufnahme von Spätholzzellen. Im Extrusionsprozeß dringt die Kunststoffkomponente bis in kleinste Zellhohlräume ein (Pfeil). B) im Bereich von dünnwandigen Frühholzzellen kommt es zu starken Deformationen und Zerstörungen der Zellstruktur.

Dieselben Ultracut-Mikroschnitte wurde auch für Untersuchungen mittels Fluoreszenz-Mikroskopie verwendet. Aufgrund der nicht fluoreszierenden Eigenschaften der Kunststoffkomponente Polypropylen kann ein sehr deutlicher Kontrast zwischen den beiden Werkstoffkomponenten erzielt werden. Die Untersuchungen mittels Fluoreszenz-Mikroskopie zeigen deutlich, dass die Kunststoffkomponente tief in die Holzstruktur eindringt und teilweise selbst kleinste Zellhohlräume wie z.B. Tüpfelöffnungen ausfüllt. Weiters ist klar erkennbar, dass es im Bereich von dünnwandigen Frühholzzellen zu starken Deformationen bzw. Zerstörung der Holzstruktur kommt. Abbildung 54 zeigt Fluoreszenzaufnahme von einem Fichtenholzextrudat.

6. Rezeptur - Eigenschafts - Beziehungen

6.1 Probenherstellung

Fast alle Extrusionsversuche wurden - entgegen dem Projektantrag - am TCKT durchgeführt, da bereits sehr rasch nach Start dieses Projektes die Entscheidung getroffen wurde, in eine entsprechende Technikumsinfrastruktur zu investieren.

Die Versuchsanordnung sah folgendermaßen aus:

- Extruder Fiborex T58 (Cincinnati Extrusion GmbH, Wien)
- Werkzeug „Griffner-Profil“ (Greiner Extrusionstechnik GmbH, Nußbach)
- Kalibrierung Greiner Genius (Greiner Extrusionstechnik, Nußbach)
- Raupenabzug (Greiner Extrusionstechnik, Nußbach)
- Säge (Greiner Extrusionstechnik, Nußbach)
- Kipptisch (Greiner Extrusionstechnik, Nußbach)

Alle Profile wurden durch **Direktextrusion** hergestellt, d.h. Polymer, Additive und Holz wurden getrennt in den Stopftrichter des Extruders dosiert (Holzspäne gravimetrisch, die restlichen Komponenten volumetrisch), im Extruder plastifiziert und homogenisiert und die Schmelze dann als Profil ausgetragen.

Es wurden folgende Rezepturkomponenten variiert:

- Polymerart und -konzentration (zwischen 18- und 28%)
- Holzart und -konzentration (zwischen 70 und 80%)
- Coupling agent (Art und Konzentration)
- Extrusionsparameter (Schneckendrehzahl, Ausstoß)

Insgesamt wurden fast 60 Rezepturen verarbeitet und gemäß Kapitel 6.2 charakterisiert.

Das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Extrusionswerkzeug ist für hochgefüllte Systeme konzipiert, daher konnten Extrusionsversuche mit Füllgraden <60% nicht mit zufrieden stellender Qualität durchgeführt werden (dazu ist eine Vakuumkalibrierung erforderlich), die Versuche mit Rezepturen mit einem sehr hohen Füllgrad (>80%) lieferten zwar optisch sehr schöne Profile mit sehr guten Steifigkeiten, jedoch ist die Schlagzähigkeit dieser Produkte ausgesprochen schlecht, sodaß basierend auf diesen Voruntersuchungen die Entscheidung getroffen wurde, die systematischen Untersuchungen auf einen Füllgrad zwischen 70% und 80% zu beschränken.



Abb. 55: Konischer Doppelschneckenextruder Fiborex T58 der Firma Cincinnati Extrusion GmbH



Abb. 56: Extrusionslinie mit Säge, Abzug, Kalibriertank und Extruder

6.2 Einfluß der Rezepturvariationen auf die mechanischen Eigenschaften

6.2.1 Mechanische Charakterisierung

Aus allen mittels Direktextrusion erzeugten Profilen wurden Universalprüfkörper gefräst und einer mechanischen Grundcharakterisierung (Zug- und Biegeversuch, Schlagbiegeversuch nach Charpy) unterzogen. Die Ergebnisse sind in den nächsten Kapiteln wiedergegeben, wobei jeweils normierte Werte angegeben sind.

6.2.2 Einfluß der Polymerart

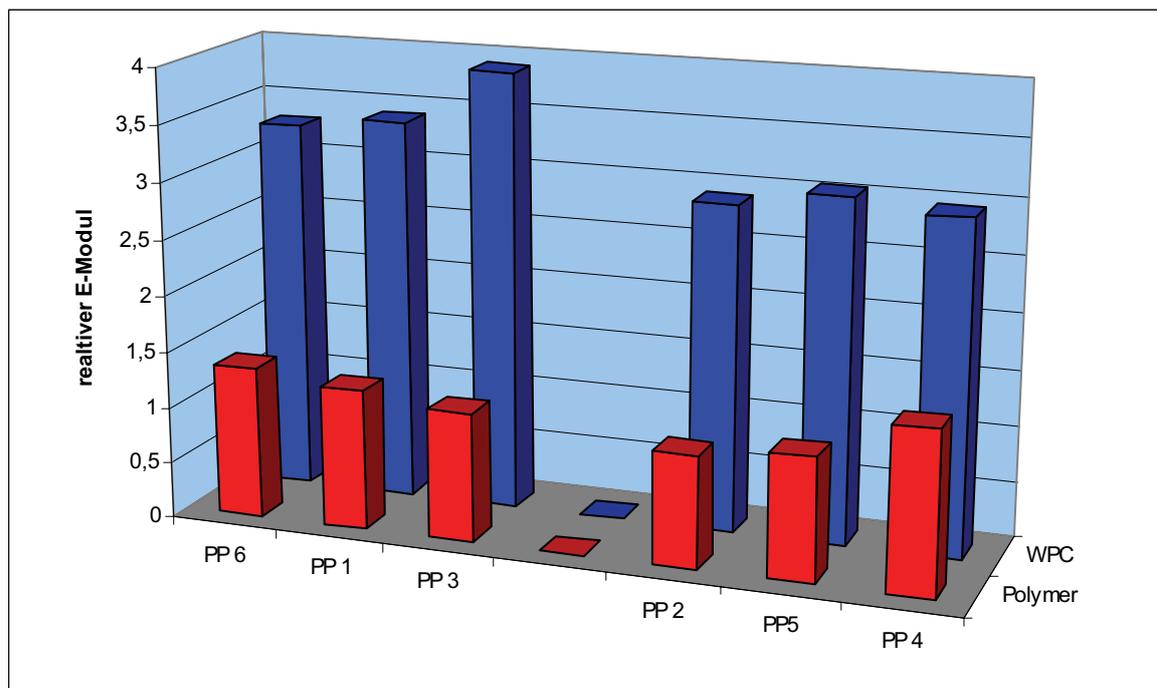


Abb 57: Einfluß der Polymerart auf die Steifigkeit von WPC am Beispiel einer Formulierung mit 70% Holzanteil

Diese Graphik zeigt sehr deutlich, dass sowohl bei den PP-Homopolymeren (PP 6, PP 1 und PP 3) als auch bei den PP-Copolymeren (PP 2, PP 5 und PP 4) durch den Zusatz von Holzspänen eine sehr ausgeprägte Versteifung des Materials eintritt. Es ist aber keine direkte Korrelation zwischen der Steifigkeit des Ausgangspolymers und des daraus hergestellten WPC's erkennbar. Auffallend ist auch, dass die Versteifung bei den Homopolymeren etwas deutlicher ausgeprägt ist als bei den Copolymeren.

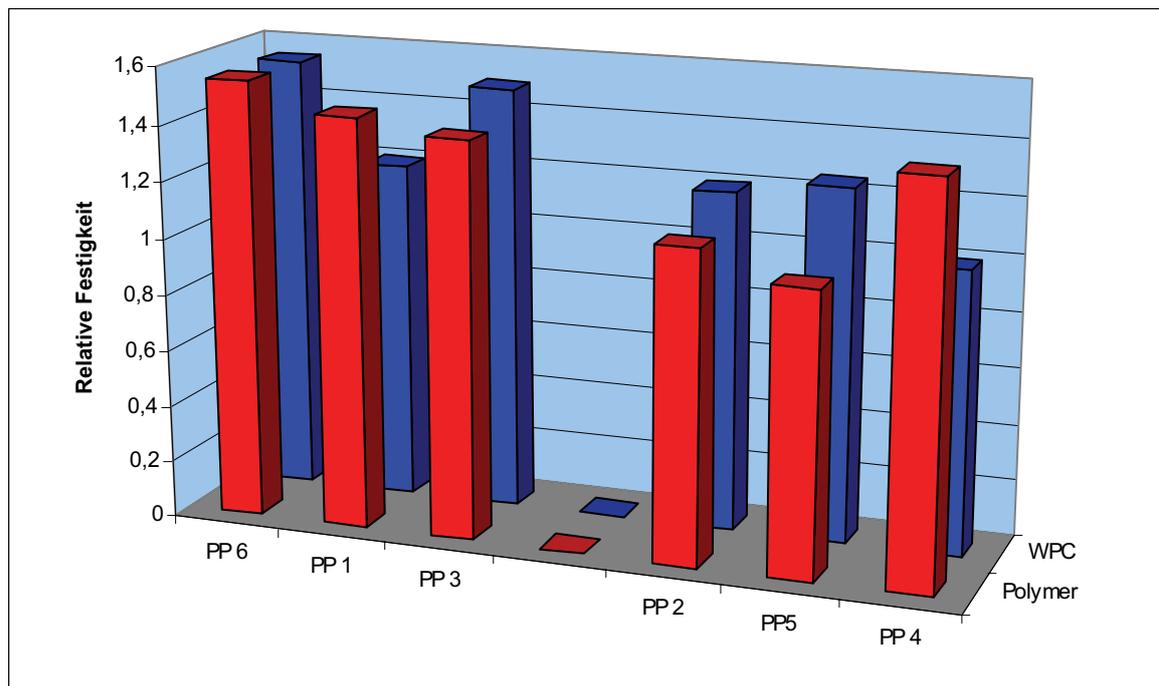


Abb 58: Einfluß der Polymerart auf die Festigkeit von WPC am Beispiel einer Formulierung mit 70% Holzanteil

Durch Zusatz von 70% Holzspänen zu Polypropylen wird die Festigkeit (repräsentiert durch die Maximalspannung beim Zug- oder Biegeversuch) nur in sehr geringem Maße beeinflusst. In den meisten Fällen tritt eine geringe Schwächung des Materials ein, bei einigen Formulierungen (PP3, PP2 und PP5) wird die Festigkeit etwas erhöht. Da sich die verwendeten Polymeren auch hinsichtlich ihres rheologischen Verhaltens deutlich unterscheiden, mag auch dieser einen Einfluß auf dieses Verhalten haben. Eine eindeutige Aussage ist aber mit diesen Werten nicht möglich und bedarf weiterführender Untersuchungen.

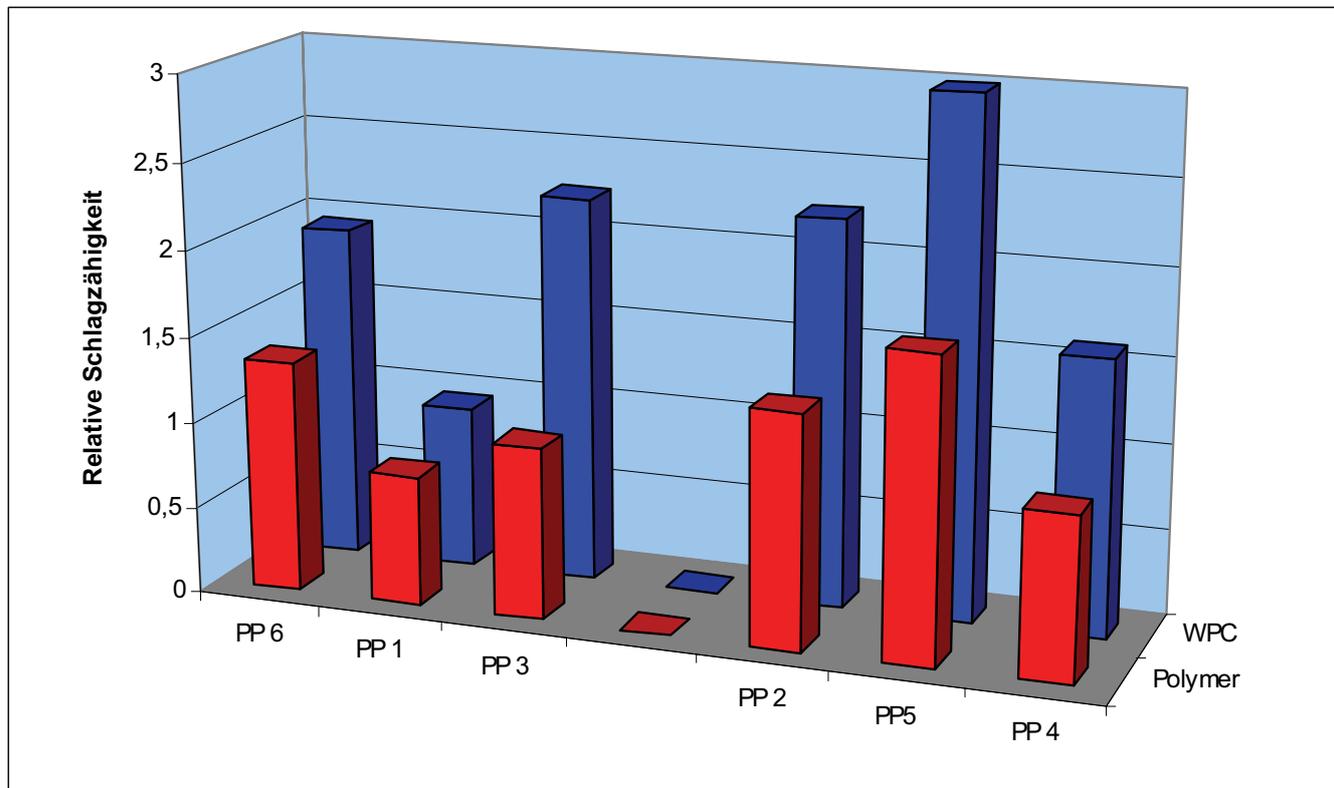


Abb 59: Einfluß der Polymerart auf die Zähigkeit von WPC am Beispiel einer Formulierung mit 70% Holzanteil

Die Zähigkeit (ungekerbt, Charpy) von WPC spiegelt sehr ausgeprägt das Verhalten der reinen Polymeren wider. Sehr deutlich sieht man auch, dass Copolymere ein wesentlich besseres Zähigkeitsverhalten als Homopolymere aufweisen. In dieser Abbildung sind aber nur Relativwerte angegeben, die Absolutwerte zeigen aber, dass es durch die Zugabe von Holzspänen zu einer sehr starken Versprödung des Materials kommt (um einen Faktor 10 und mehr). Dieses Verhalten ist derzeit eine der größten Problembereiche der WPC und bedarf noch sehr intensiver Forschungsarbeit.

6.2.3 Einfluß der Holzart

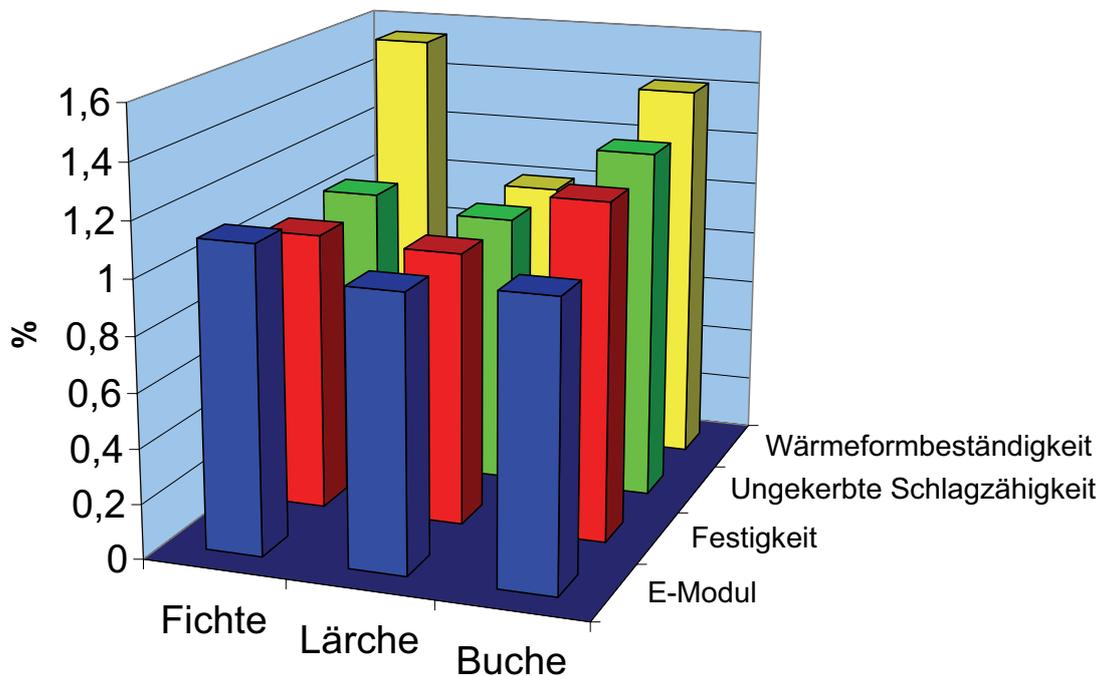


Abb 60: Einfluß der Holzart auf ausgewählte Eigenschaften von WPC am Beispiel einer Formulierung mit 70% Holzanteil

Neben den optischen Eigenschaften (siehe nächste Abbildung) beeinflusst die Holzart auch die mechanischen Eigenschaften von WPC. Das beste Verhalten zeigt dabei die Buche, die sich in allen untersuchten Eigenschaften (besonders deutlich ausgeprägt bei der Festigkeit und der Schlagzähigkeit) etwas besser als die beiden anderen Holzarten verhält. Die Lärche zeigt - vermutlich durch den hohen Harzanteil - etwas schlechtere Eigenschaften. Lediglich bei der Wärmeformbeständigkeit (HDT) hat die Fichte bessere Eigenschaften als die Buche.



Abb 61: Einfluß der Holzart auf die Optik von WPC am Beispiel extrudierter Hohlkammerprofile (von oben nach unten: Lärche - Buche - Fichte)

Fichte zeigt im fertigen Extrudat die hellste Farbe, Farbvertiefung tritt dann bei Buche gefolgt von Lärche ein.

Aber auch ein höherer Rindenanteil dunkelt das Profil stark ein, wie die nächste Abbildung sehr eindrucksvoll beweist. Es handelt sich bei beiden Formulierungen um Fichtenholz, wobei beim dunkleren Profil der Rindenanteil etwas höher war.



Abb 62: Einfluß des Rindenanteils auf die Farbe von extrudierten WPC-Profilen (das obere Profil weist einen höheren Rindenanteil auf)

Auch die Art der Holzzugabe hat einen sehr entscheidenden Einfluß auf die Qualität und auf die Optik der Extrusionsprofile. Wie bereits bei der Faseruntersuchung gezeigt beeinflusst der Pelletierprozeß die Faserlängenverteilung dramatisch. Dies äußert sich auch in den mechanischen Eigenschaften der Produkte.

So fällt bei Mustern, welche aus Pellets statt der Fasern gefertigt wurde, die Steifigkeit um mehr als die Hälfte ab, die Festigkeit reduziert sich ebenfalls mindestens in diesem Ausmaß. Auch konnte optisch

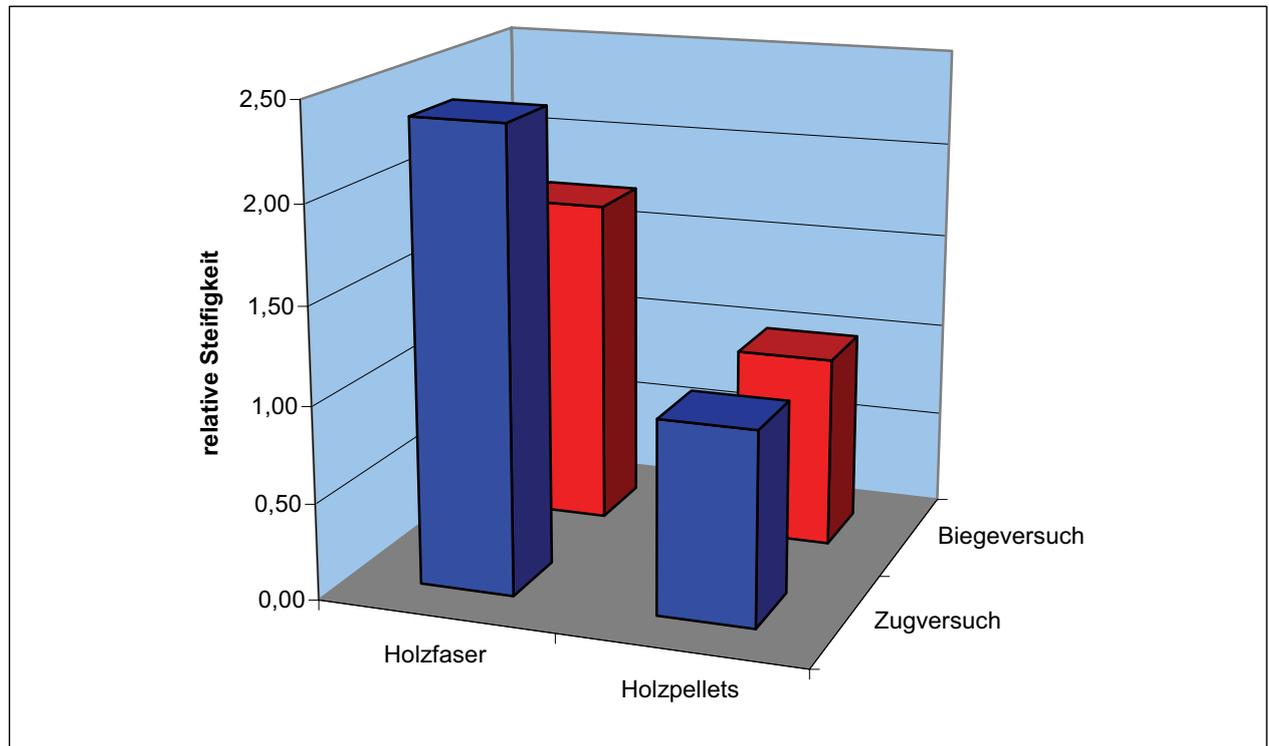


Abb 63: Einfluß der Form des eingesetzten Holzes auf die Steifigkeit von WPC-Profilen

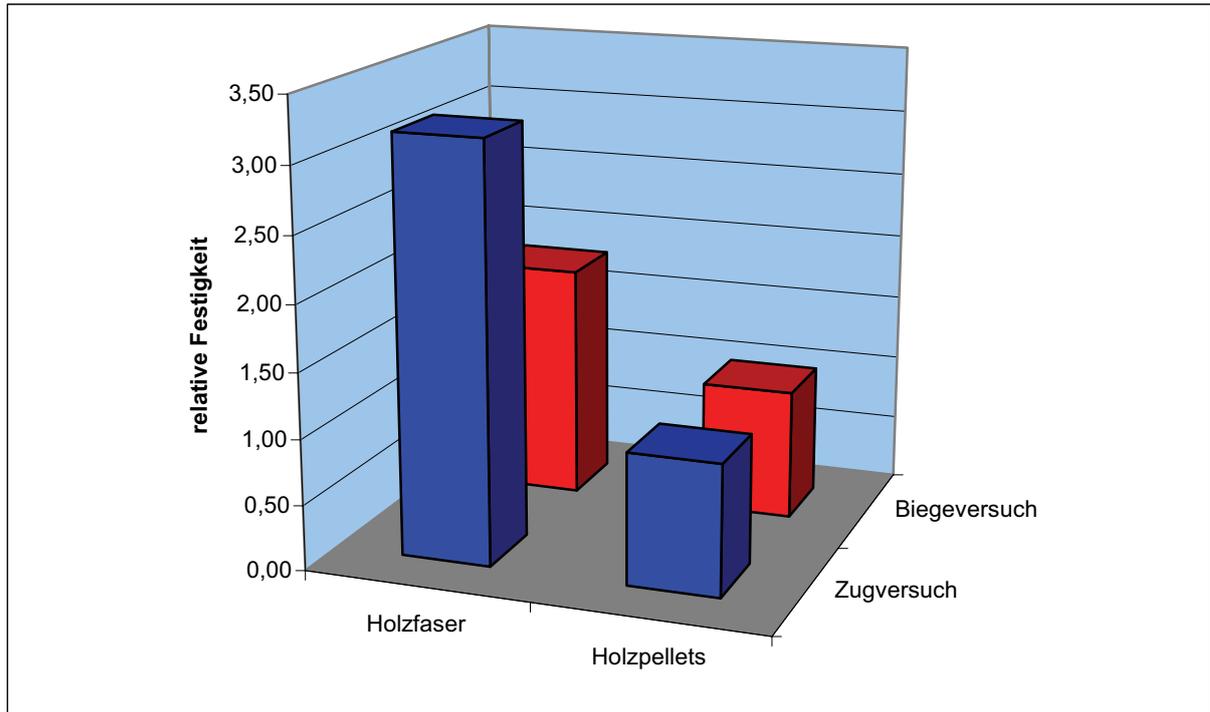


Abb 64: Einfluß der Form des eingesetzten Holzes auf die Festigkeit von WPC-Profilen

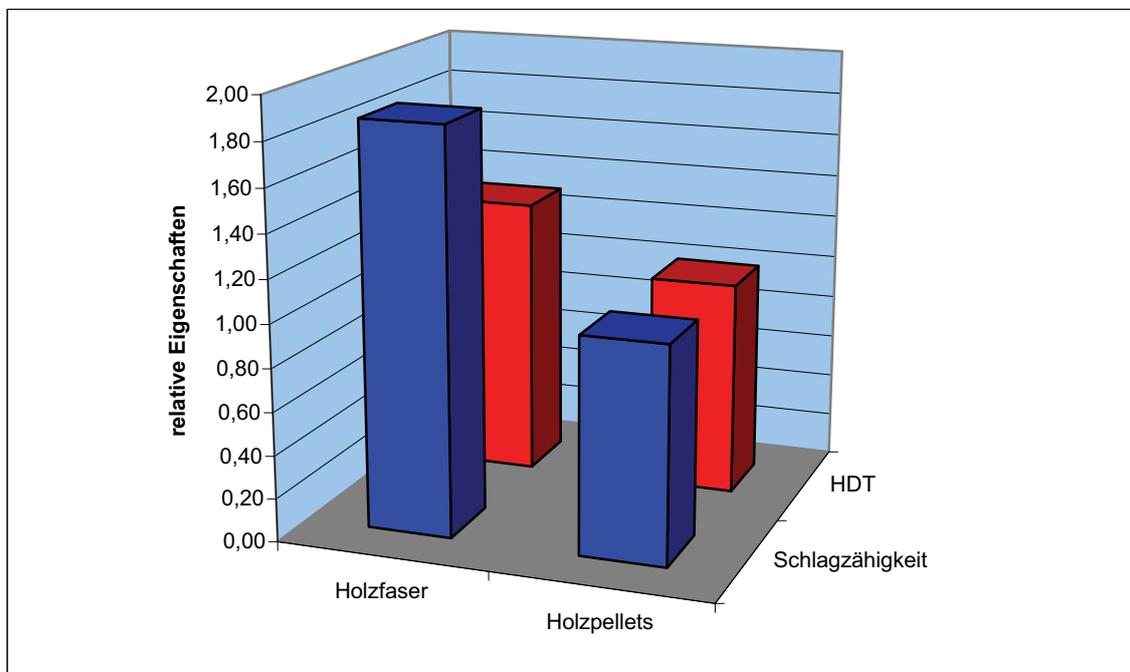


Abb 65: Einfluß der Form des eingesetzten Holzes auf die Schlagzähigkeit und die Wärmeformbeständigkeit von WPC-Profilen



*Abb 66: Einfluß der Form des eingesetzten Holzes auf die Optik von WPC-
Profilen (links Holzspäne, rechts Pellets)*

6.2.4 Einfluß des Haftvermittlers:

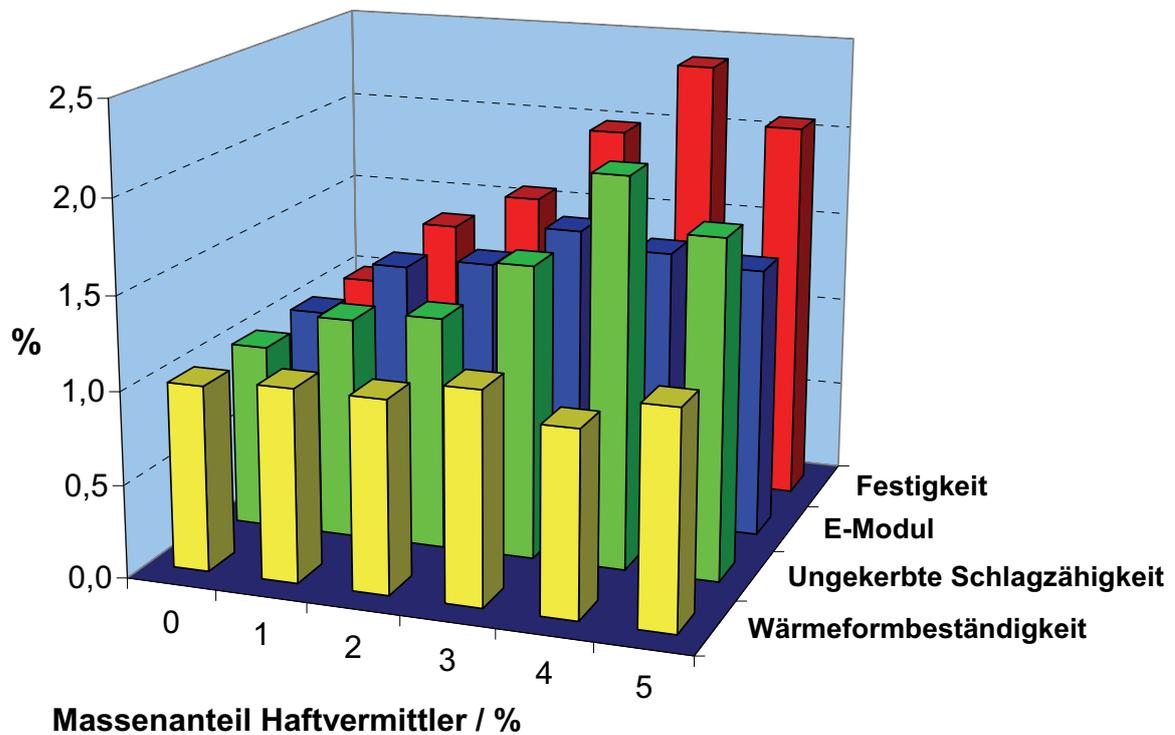


Abb 67: Einfluß der Konzentration von Haftvermittler auf ausgewählte Eigenschaften von WPC am Beispiel einer Formulierung mit 70% Holzanteil

Die mechanischen Eigenschaften von WPC werden deutlich von der Menge an Haftvermittler beeinflusst, wobei sich eine maximal wirksame Konzentration bei ca. 4% ausbildet. Größere Haftvermittlerkonzentrationen verteuern die Rezeptur und schwächen dann die Eigenschaften wiederum. Der Grund für dieses Verhalten liegt darin, dass durch das Aufpropfen von Maleinsäureanhydrid auf die PP-Ketten die Molmasse des PP deutlich verringert wird, bei höheren Konzentrationen in der Formulierung schwächen diese „niedermolekularen“ PP-Ketten die Polymermatrix in der WPC-Rezeptur und verringern die mechanischen Eigenschaften.

Lediglich die Wärmeformbeständigkeit wird von der Haftvermittlerkonzentration nicht signifikant beeinflusst.

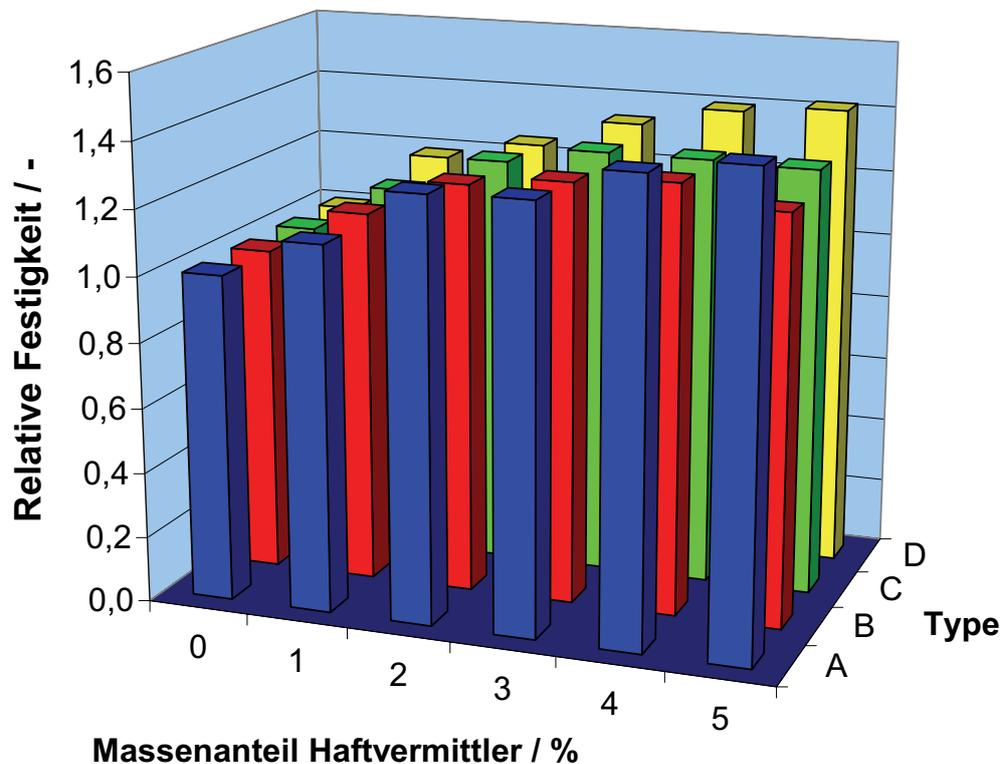


Abb 68: Einfluß der Konzentration und der Art des Haftvermittlers (verschiedene Hersteller) auf die Festigkeit von WPC am Beispiel einer Formulierung mit 70% Holzanteil

Alle 4 untersuchten Haftvermittler (MAH gepropft auf PP, verschiedene Hersteller) zeigen annähernd das gleiche Verhalten, nämlich eine Zunahme der Festigkeit bis ca. 4% und anschließend eine Verschlechterung der Wirksamkeit.

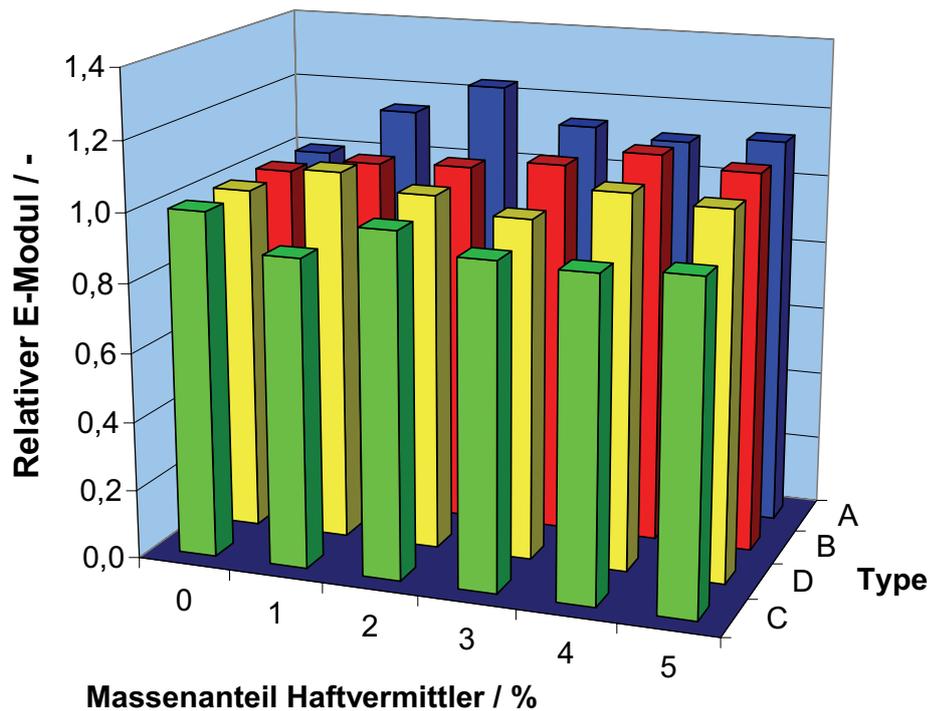


Abb 69: Einfluß der Konzentration und der Art des Haftvermittlers (verschiedene Hersteller) auf die Steifigkeit von WPC am Beispiel einer Formulierung mit 70% Holzanteil

Alle Haftvermittler bewirken in etwa die gleiche Versteifung der Rezeptur, sie wirken über den untersuchten Konzentrationsbereich ca. gleich, einige haben auch hier ein Maximum bei ca. 4%, der Konzentrationseinfluß ist aber nicht so gravierend wie bei der Festigkeit oder bei der Schlagzähigkeit

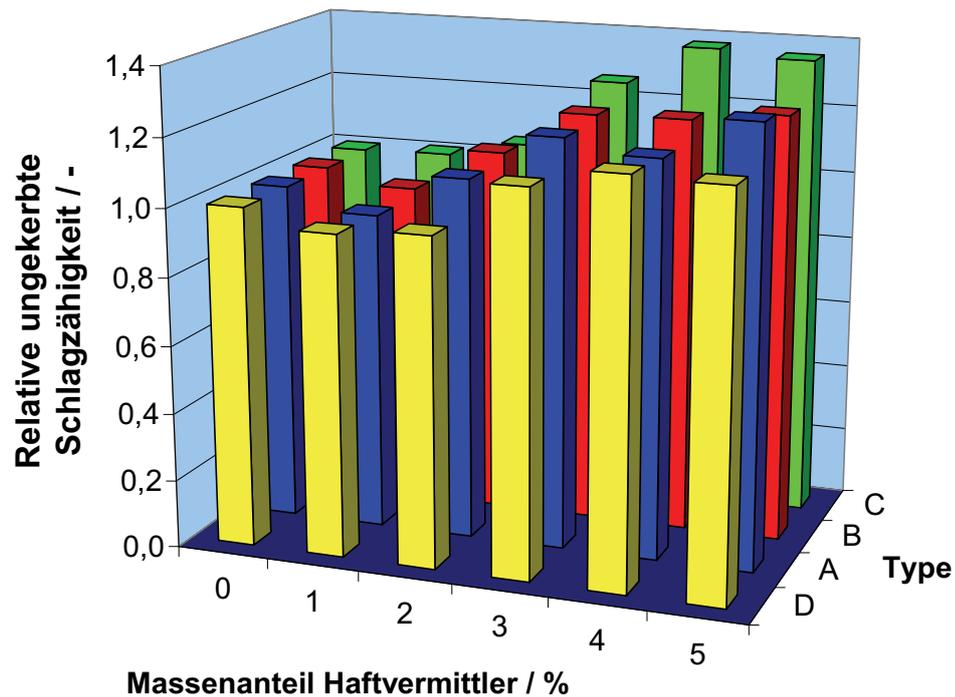


Abb 70: Einfluß der Konzentration und der Art des Haftvermittlers (verschiedene Hersteller) auf die Schlagzähigkeit von WPC am Beispiel einer Formulierung mit 70% Holzanteil

Neben den mechanischen Eigenschaften hat der Haftvermittler auch einen großen Einfluß auf die Wasseraufnahme und auf die optischen Eigenschaften von WPC-Profilen. Ohne Haftvermittler nehmen WPC-Profile wesentlich mehr Wasser auf, außerdem ist Oberfläche dieser Profile bedeutend rauer, wie die nächste Abbildung beweist. WPC-Profile ohne Haftvermittler sind in der Regel um 70-90% rauer als solche mit Haftvermittler. Untersuchungen mit Hilfe der EFI-Methode (Extended Focal Imaging) zeigen dies sehr anschaulich.



Abb 71: Vergleich von WPC-Profilen ohne und mit Haftvermittler

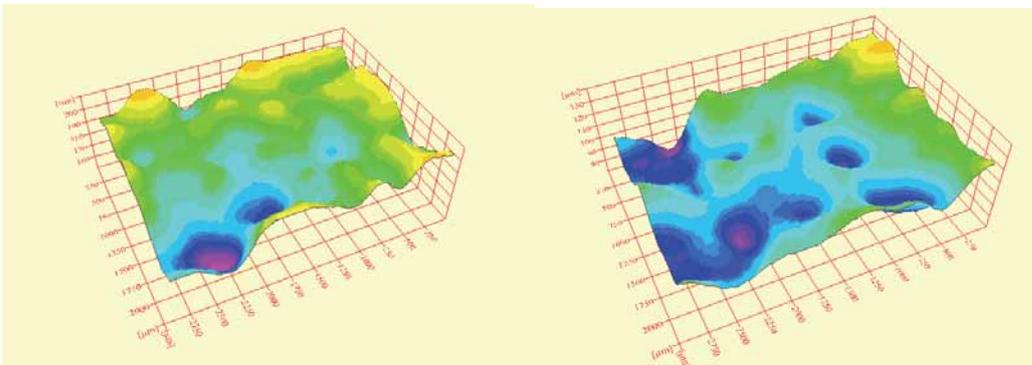


Abb 72: Höhenkarten der Profile ohne und mit Haftvermittler

6.2.5 Einfluß des Holzgehaltes:

In Vorversuchen [18] wurde mit Hilfe eines kleinen parallelen gleichlaufenden Compounders (Thermo Prism TSE 24 HC) WPC-Granulat mit unterschiedlichen Holzgehalten produziert und daraus Prüfkörper gespritzt, welche anschließend mechanisch charakterisiert wurden. Die Ergebnisse sind in den nächsten Abbildungen dargestellt und sollen primär einen qualitativen Eindruck über den Einfluß des Holzgehaltes über einen sehr weiten Konzentrationsbereich geben.

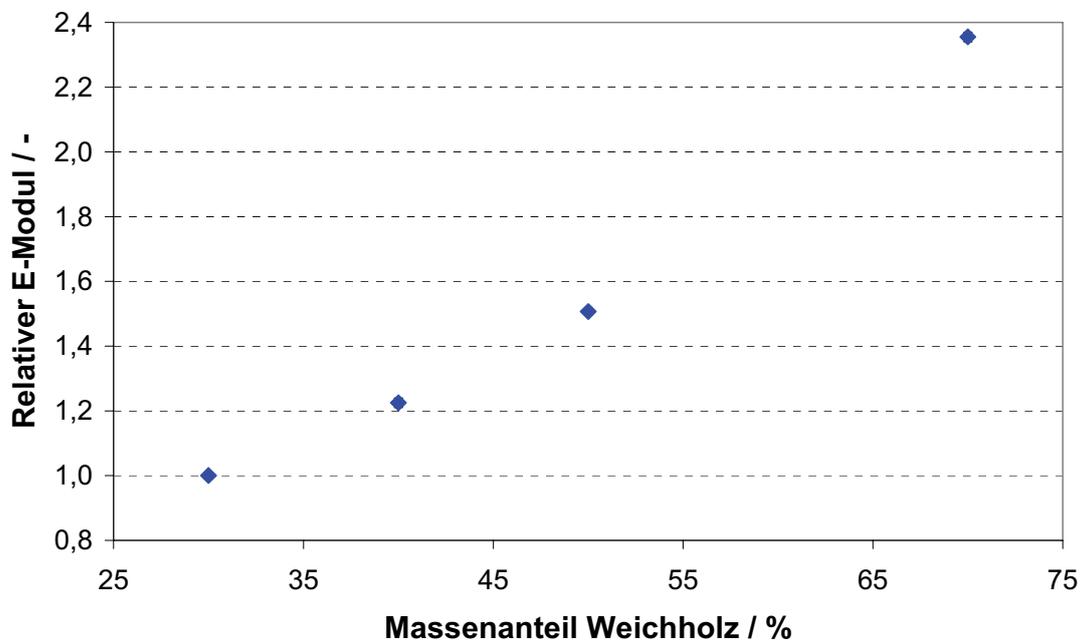


Abb. 73: Einfluß des Holzgehaltes auf de Steifigkeit von WPC

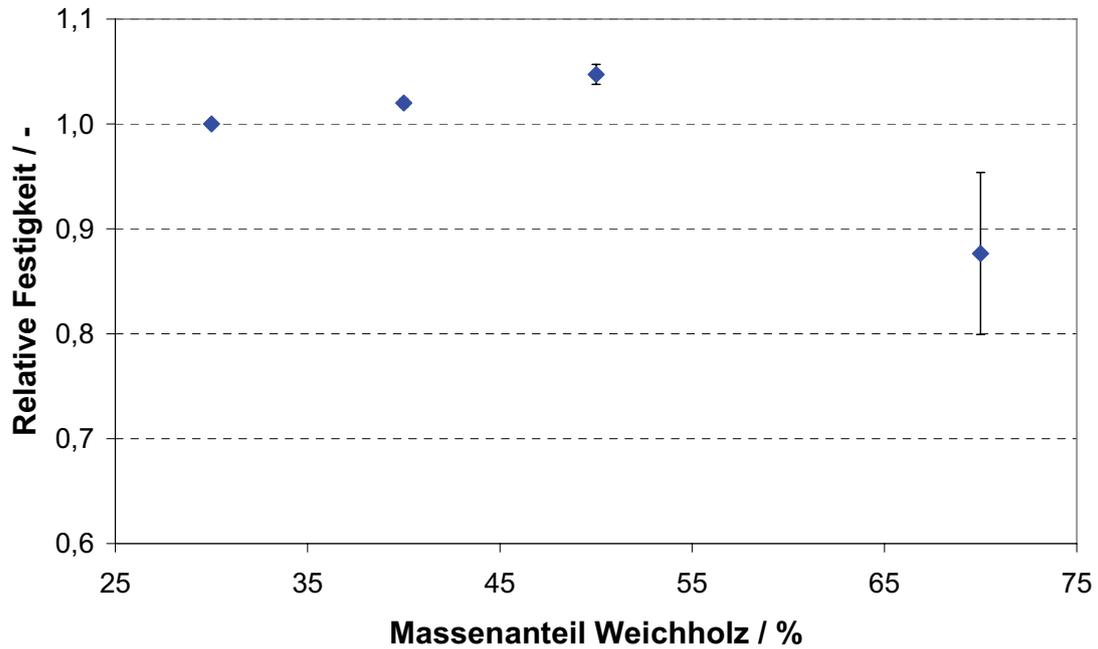


Abb. 74: Einfluß des Holzgehaltes auf de Festigkeit von WPC

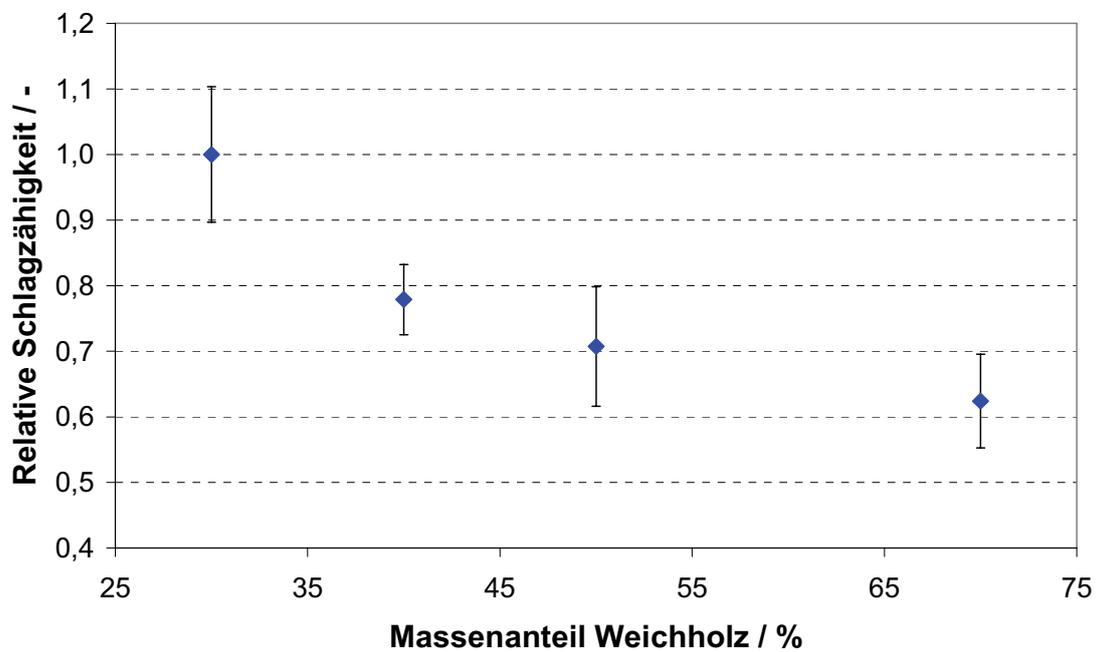


Abb. 75: Einfluß des Holzgehaltes auf die Zähigkeit von WPC

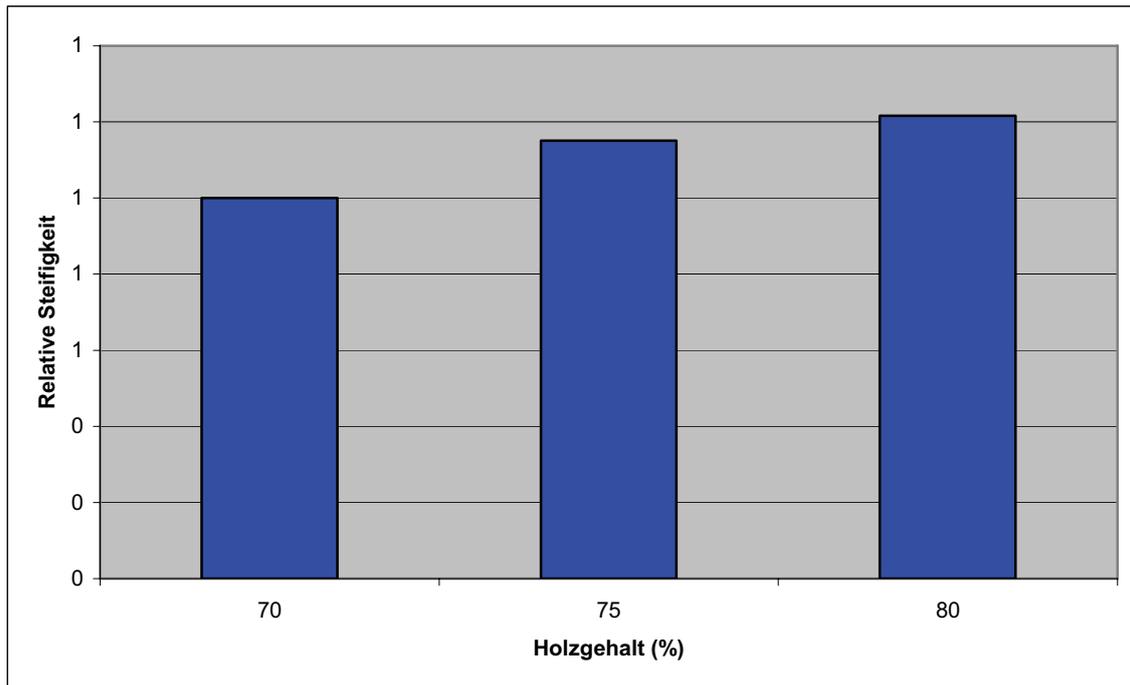


Abb. 76: Einfluß des Holzgehaltes auf die Steifigkeit von extrudierten WPC-Profilen

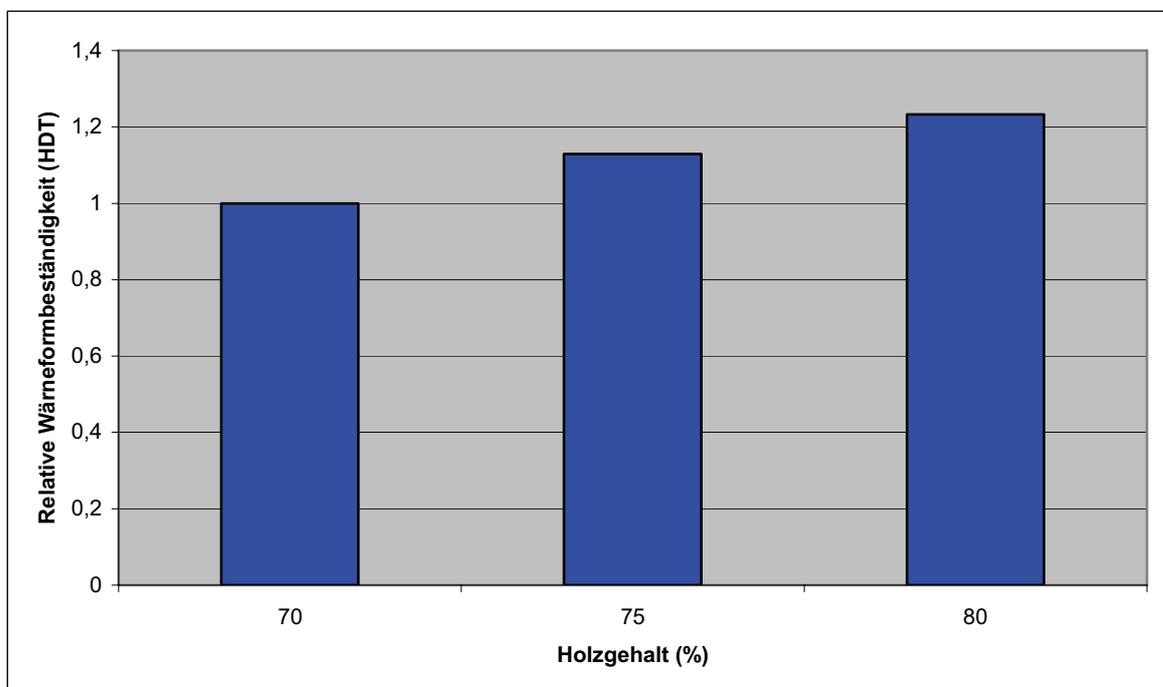


Abb. 77: Einfluß des Holzgehaltes auf die Wärmeformbeständigkeit von extrudierten WPC-Profilen

6.3 Einfluß von Prozeßparameter

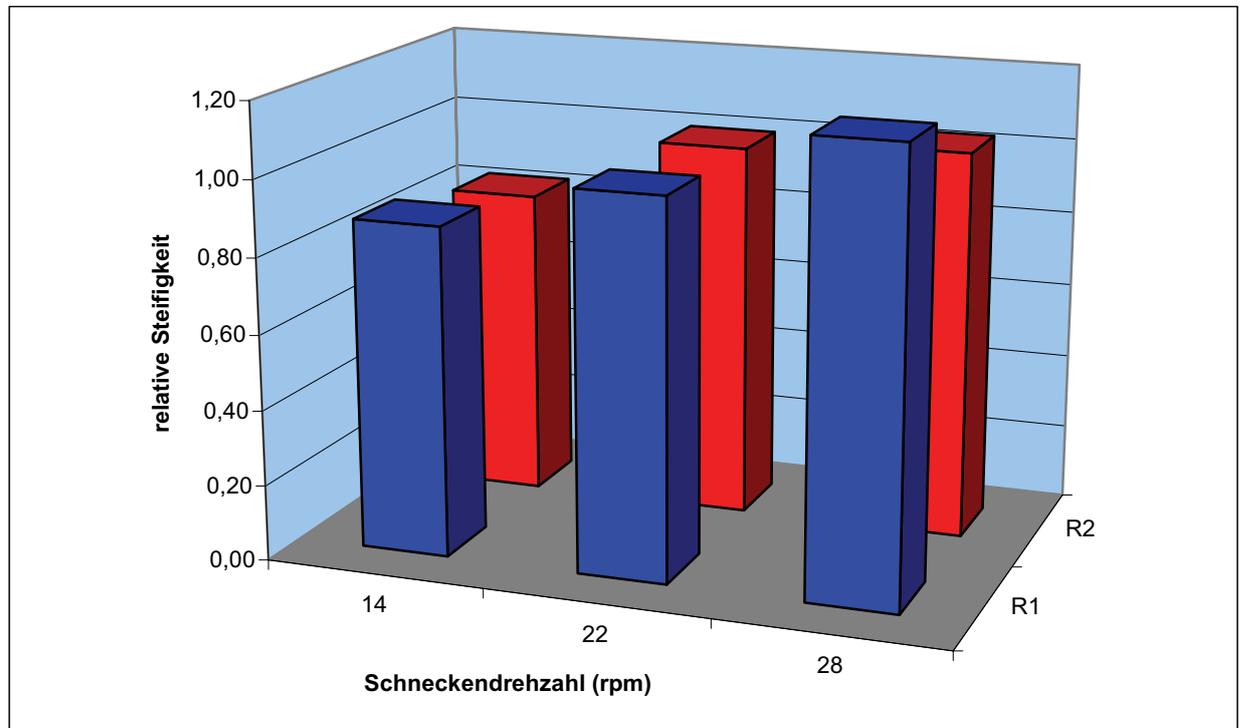


Abb 78: Einfluß der Schneckendrehzahl auf die Steifigkeit (E-Modul) von WPC (rot - Zugversuch, rot - Biegeversuch)

Die Schneckendrehzahl hat bei gleichem Extruderausstoß (hier 100 kg/h) einen deutlichen Einfluß auf die Qualität und auf die mechanischen Eigenschaften von extrudierten WPC-Profilen.

Durch die höhere Drehzahl wird das Material rascher in den vorderen Bereich des Extruders transportiert, wo dann auch eine innigere Durchmischung des Materials und ein größerer Druckaufbau im Werkzeug und dadurch auch eine höhere Kompaktierung erfolgt. Dies äußert sich einerseits in besseren mechanischen Eigenschaften, aber auch in einer homogeneren Optik und einer deutlich geringeren Verfärbung des Materials.

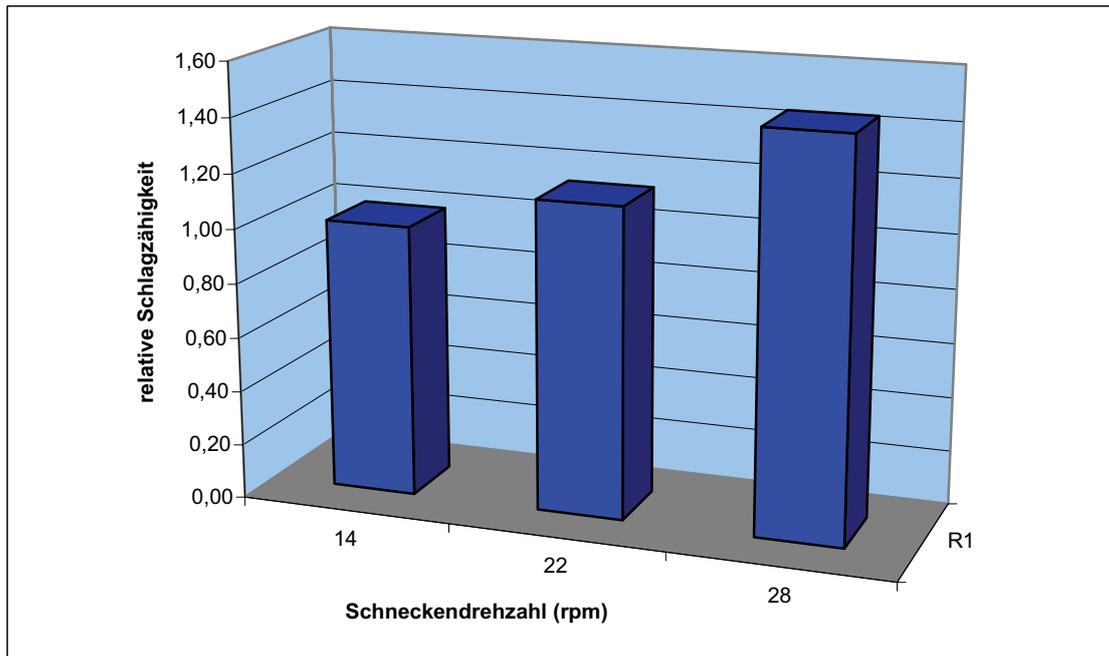


Abb 79: Einfluß der Schneckendrehzahl auf die Zähigkeit) von WPC



Abb 80: Einfluß der Schneckendrehzahl auf die Optik von extrudierten WPC-Profilen

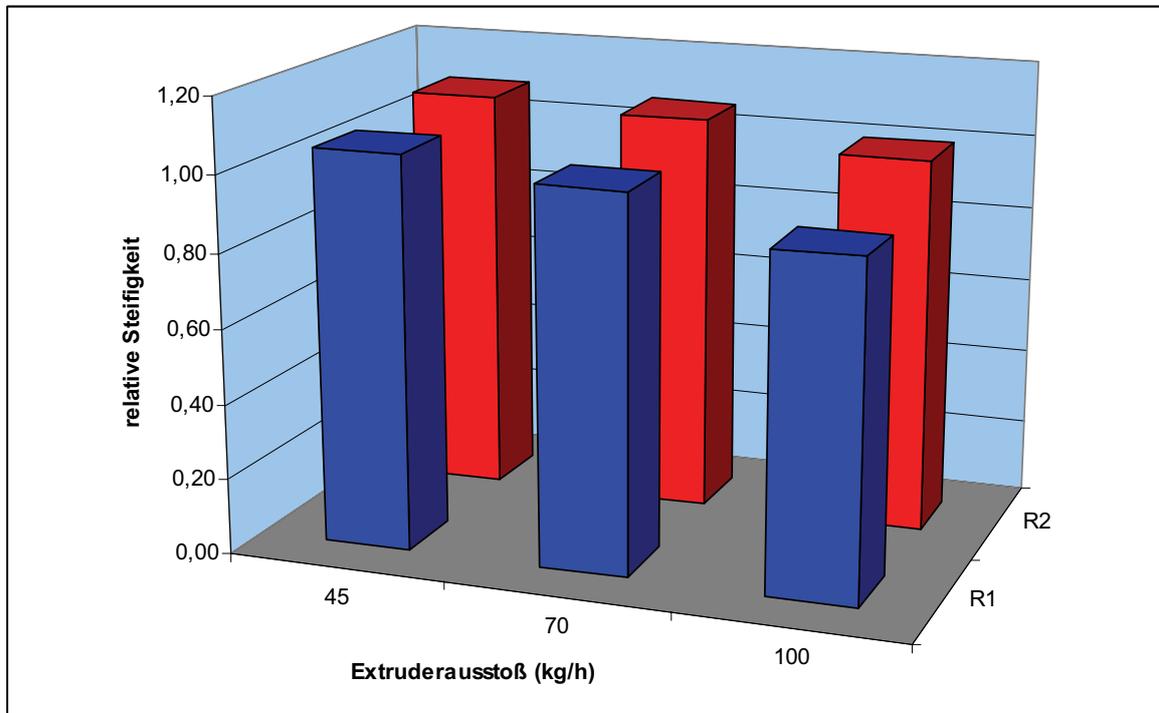


Abb 81: Einfluß des Extruderausstoßes auf die relative Steifigkeit von WPC-Profilen

Der Extruderausstoß beeinflusst bei der Direktextrusion in einem gewissen Ausmaß die mechanischen Eigenschaften von WPC-Profilen, wobei mit steigendem Ausstoß die Festigkeit und auch die Steifigkeit etwas abnehmen. Derzeit gibt es keine Erklärung für dieses Verhalten, möglicherweise ist es auf die spezielle Werkzeuggeometrie zurückzuführen, daher werden diese Versuche mit anderen Werkzeugen in nächster Zeit wiederholt.

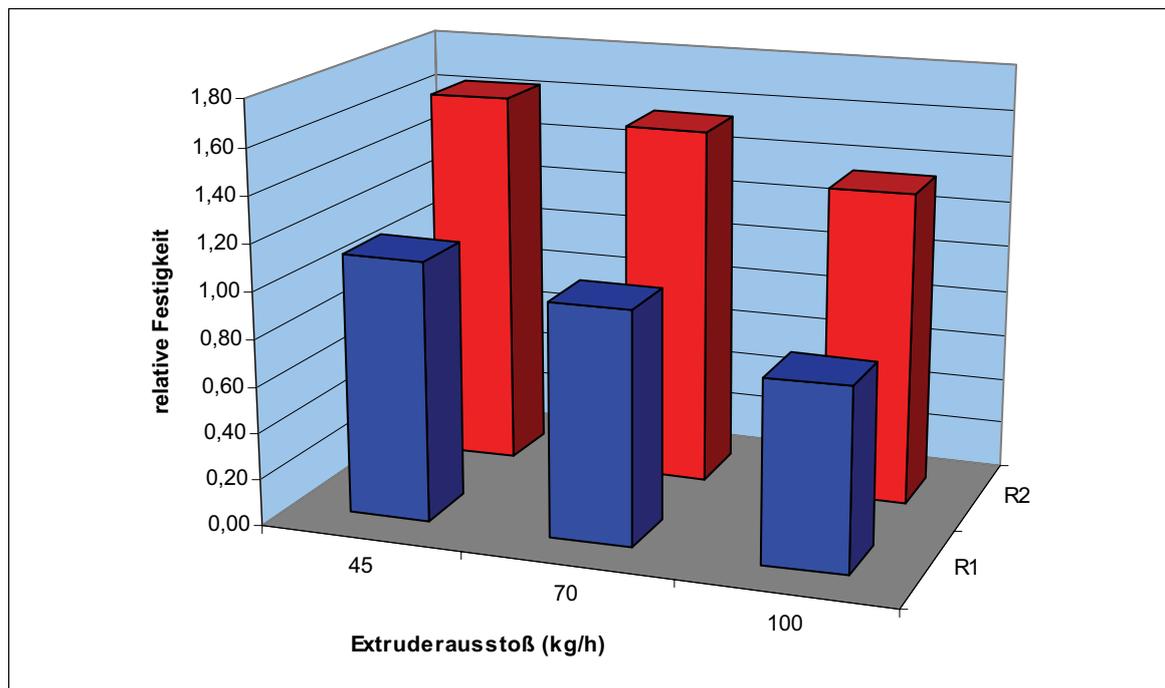


Abb 82: Einfluß des Extruderausstoßes auf die relative Festigkeit von WPC-Profilen

Die Versuche mit unterschiedlichen Schneckenkonfigurationen wurden nicht durchgeführt, da durch das vorgezogene Investment durch das TCKT bereits eine für Direktextrusion optimierte Schneckenkonfiguration mitgekauft wurde. Durch viele Vorversuche seitens Cincinnati wurde diese Schnecke als die für die Direktextrusion von polyolefinbasierenden WPC geeignetste ermittelt.

6.4 Rheologische Charakterisierung

Das viskoelastische Verhalten von Polymerschmelzen wird meistens mit Hilfe der dynamischen Moduli (Verlust- und Speichermodul G' und G'' als Funktion der Kreisfrequenz ω) beschrieben. Diese Materialfunktion wird dadurch ermittelt, dass die Probe zwischen zwei konzentrischen Platten durch eine sinusförmig variierende Rotation der einen Platte deformiert wird, wobei das benötigte Drehmoment gemessen wird. Üblicherweise wird dann auch aus den Moduln der Absolutbetrag der dynamischen Viskosität berechnet:

$$\eta^* = (G'^2 + G''^2)^{1/2} / \omega$$

Nach Cox-Merz ist nämlich diese Viskosität als Funktion von ω gleich der stationären Viskosität als Funktion der Scherrate q , wobei gilt:

$$\omega = q .$$

Die Messungen wurden bei 200 °C durchgeführt. Da PP eine thermorheologisch einfache Flüssigkeit ist, können die Materialfunktionen für andere Temperaturen mit Hilfe des Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzips berechnet werden. Bei Temperaturen ab 200 °C wird der dafür notwendige Shiftfaktor nach einem Arrheniusansatz mit der Aktivierungsenergie $E = 40 \text{ kJ/mol}$ berechnet.

Bei linearen Polymeren ist die Form der Modulkurven nur durch die Molmassenverteilung bestimmt. Bei verzweigten Polymeren beeinflussen auch Art und Grad der Verzweigung das viskoelastische Verhalten.

Diese Art der Charakterisierung ist für wood composites mit hohem Füllungsgrad weniger geeignet, da diese Systeme keine viskoelastischen Flüssigkeiten sind. Zudem gibt es Probleme mit der Wandhaftung (Haftung an den Platten). Weiters ist problematisch, dass die Messung der dynamischen Moduli mehrere Stunden dauert, das Holz aber während dieser Zeit bei 200 °C chemisch verändert wird.

Daher wurde für rheologische Messungen an hochgefüllten Systemen ein Hochdruckkapillarrheometer adaptiert, indem die Kapillaren durch Schlitzdüsen ersetzt wurden, weil dadurch der Druckabfall im durchströmten Kanal beobachtet werden kann.

Bei diesen Messungen ist auch die thermische Belastung viel geringer, da die Messzeiten viel kürzer sind (~ 15 min.).

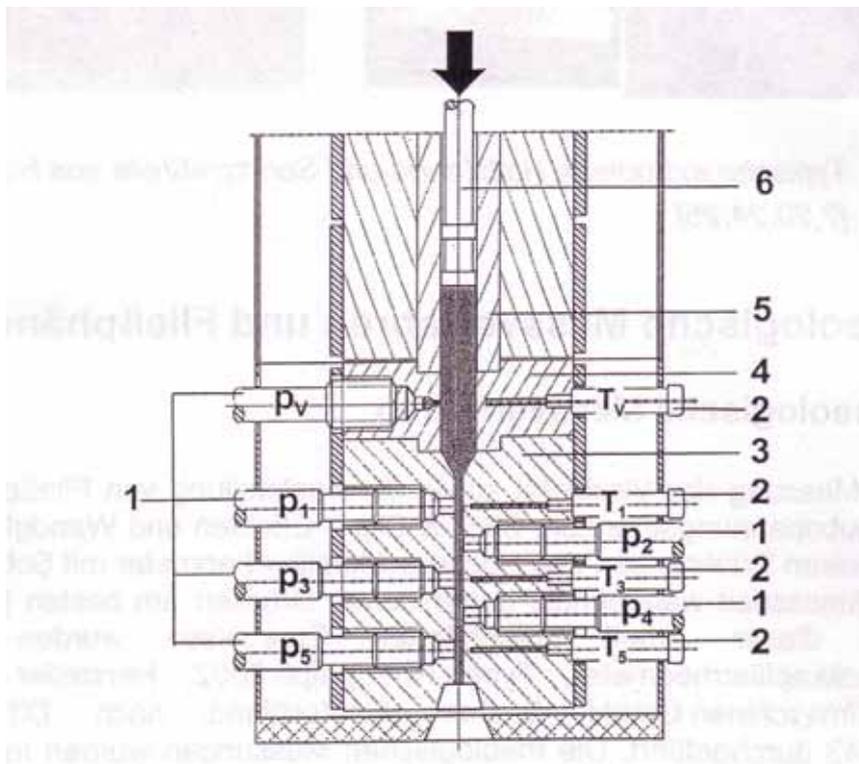


Abb. 83: Schematische Darstellung einer Schlitzkapillare für rheologische Messungen an hochgefüllten Systemen [17]

1 - Massedruckaufnehmer, 2 - Thermoelemente, 3 - Rheometerkapillare, 4 - Meßring, 5 - Vorlagezylinder, 6 - Kolben

6.5 Weiterführende mechanische Untersuchungen

6.5.1 Methodik

Am Institut für Holzforschung wurden im Zuge der Charakterisierung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften einiger vom TCKT Wels extrudierten Hohlkammerprofile zusätzlich zu den vom TCKT durchgeführten Prüfungen noch folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Prüfung der Biegefestigkeit
- Prüfung der Querdruckfestigkeit
- Untersuchung des Kriechverhaltens

Mechanische Prüfungen:

Sämtliche mechanische Prüfungen (Biegefestigkeit, Querdruck, Kriechverhalten) wurden auf einer Universalprüfmaschine des Typs Zwick/Roell Z100 SWA mit Wegaufnehmer Makrosense ausgeführt. Die Biegeprüfungen erfolgten in Anlehnung an EN 789 (3-Punktprüfung, Verhältnis Probenhöhe zu Auflagerabstand 1:18 entsprechend 90 mm). Die Prüfgeschwindigkeit betrug 3 mm/min, die durchschnittliche Dauer bis zum Bruch betrug 90 +/- 30 sec.

Biegefestigkeit

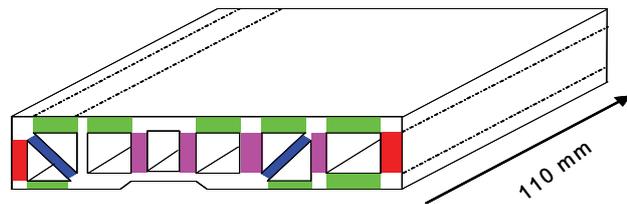
Für die Prüfung der Biegefestigkeit wurden aus dem WPC-Profil mittels Kreissäge Biegestäbe mit einer Probengeometrie von 5x10x110 mm herausgetrennt. Vor der eigentlichen Biegeprüfung wurden Dicke und Breite sämtlicher Stäbe mit einem digitalen Mikrometer genau vermessen. Die Stäbe wurden, gemäß ihrer Position im Profil, in folgende Klassen unterteilt:

Decklage stehend

Decklage liegend

Streben schräg

Stege innenliegend



Querdruckfestigkeit

Zur Bestimmung der Querdruckfestigkeit wurden Hohlraumprofile mit einer Länge von 30 mm präpariert. Die Prüfung der Querdruckfestigkeit erfolgte gemäß einer Simulation des Krafteintrages im verbauten Zustand an den mit schrägen Streben verstärkten Bereichen des Profils (Abb.84).

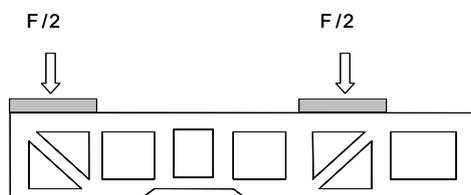


Abb. 84: Krafteintrag bei der Prüfung der Querdruckfestigkeit

Der formale Zusammenhang der Biegefestigkeit, des Elastizitätsmodul sowie der Brucharbeit sind in Abb.85 graphisch dargestellt.

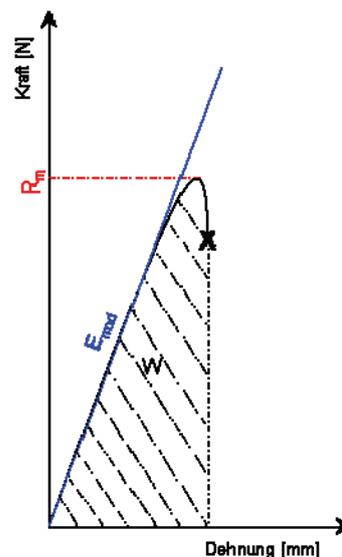


Abb.85: Biegefestigkeit R_m , Elastizitätsmodul E_{mod} und Brucharbeit W

Kriechverhalten

Die Prüfkörpergeometrie sowie der Prüfaufbau bei der Untersuchung des Kriechverhaltens waren ident mit jenen der Querdruckprüfung. Die Belastung der Profile betrug 200 kN/lfm, dies entspricht in etwa 25% der maximalen Belastbarkeit der Profile im verstärkten Bereich.

6.5.2 Ergebnisse:

a) Biegefestigkeit - Gruppe 1

In Abb.86 sind die mit SPSS ausgewerteten **Biegefestigkeiten** der Prüfstäbe aus den WPC-Profilen P15.2_001-P15.2_007 graphisch dargestellt. Das Profil P15.2_007 unterlag bei der Extrusion den selben Parametern wie P15.2_005, enthielt allerdings keinen Compatibilizer.

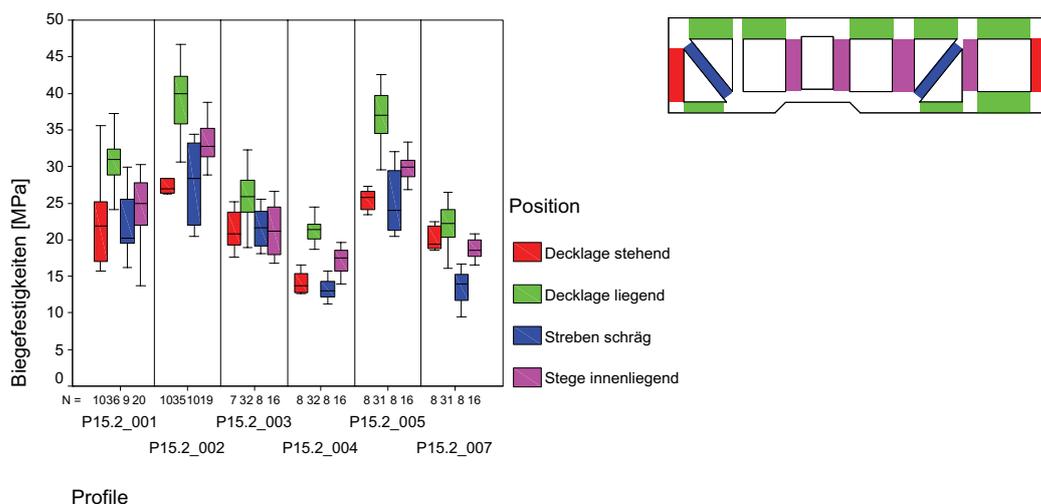


Abb.86: Biegefestigkeiten der Profile P15.2_001 - P15.2_007 in Abhängigkeit von der Position im Profil

Eindeutig erkennbar ist der hoch signifikante Unterschied der Biegefestigkeiten in Abhängigkeit zur jeweiligen Position des Prüfstabes im Profil. Die liegenden Decklagen (grün) zeichnen sich durch besonders hohe Festigkeiten aus, während die schräg liegenden Streben (blau) die geringsten Festigkeitswerte aufweisen. Interessanterweise weisen die aussenliegenden, stehenden Decklagen (rot) ähnlich geringe Festigkeitswerte auf, wie die schräg liegenden Streben. Die

höchsten Biegefestigkeiten lieferten P15.2_002 (höchste Schneckendrehzahl) und P15.2_005 (geringste Schneckendrehzahl). Die schlechtesten Werte wurden für die ohne Compatibilizer-Zusatz extrudierten Profile P15.2_004 und P15.2_007 erhalten.

Durch Zugabe des Additivs OREVAC wurden die Biegefestigkeiten der Stäbe im Durchschnitt um etwa 60% erhöht (vgl. P15.2_005 und P15.2_007).

Um den Einfluss der Absolutwerte (unterschiedliche Festigkeitsniveaus) der verschiedenen Profile zu eliminieren, wurden sg. relative Festigkeitswerte berechnet, welche die Abweichung der jeweiligen mechanischen Eigenschaft (R_m , E_{mod} oder W) vom Mittelwert widerspiegeln. Dafür wurden zunächst für jedes Profil die Biegefestigkeiten aller Biegestäbe gemittelt. Die Biegefestigkeiten aus den unterschiedlichen Bereichen des Profils wurden nachfolgend auf diesen Mittelwert bezogen. Dadurch konnte die relative Abweichung der Biegefestigkeiten aus den verschiedenen Bereichen unabhängig von den Absolutwerten der einzelnen Profile angegeben werden.

Abb.87 zeigt, dass unabhängig von den Prozessparametern bzw. vom Additivzusatz die relativen Unterschiede zwischen den verschiedenen Profilmitteln konstant bleiben ($p < 0.05$). Lediglich die „Decklagen stehend“ des Profils P15.2_007 zeigten einen signifikanten Unterschied zu den selben Bereichen der anderen Profile.

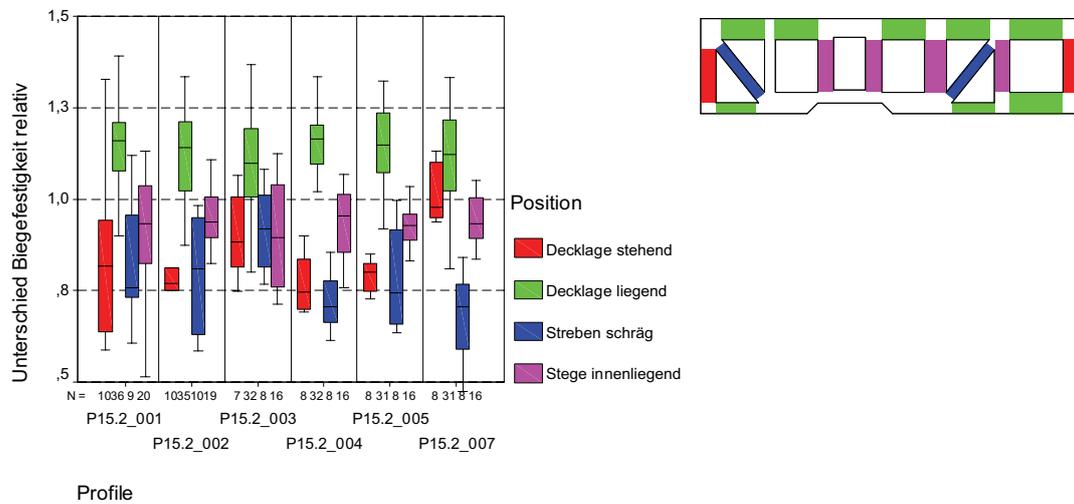
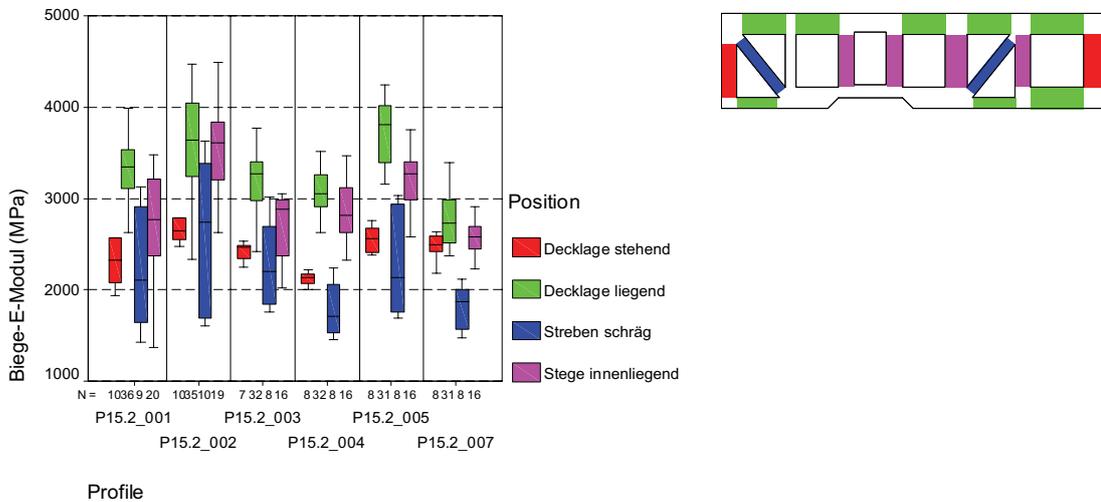


Abb. 87: Relative Biegefestigkeiten der Profile P15.2_001 - P15.2_007 in Abhängigkeit von der Position im Profil

b) Elastizitätsmodul - Gruppe 1

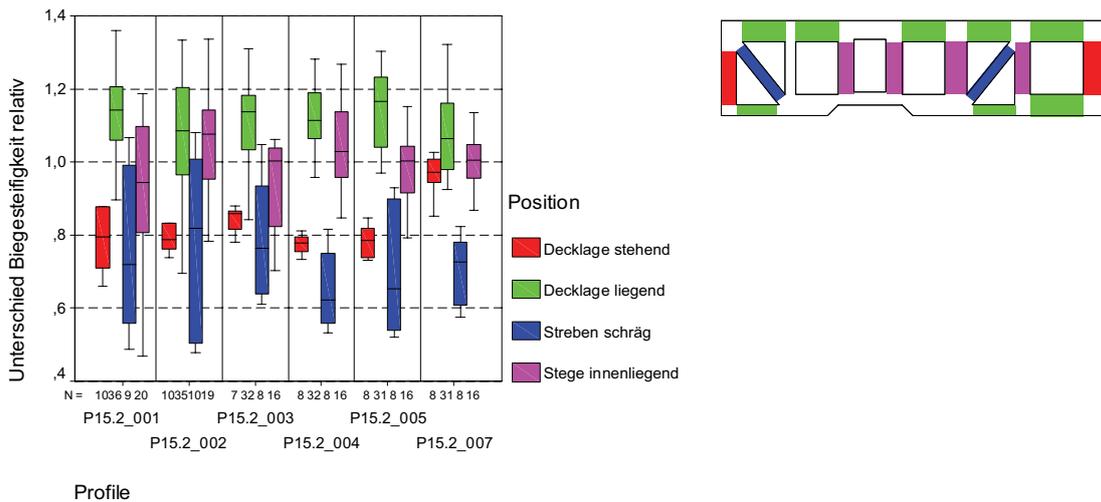
Analog zu den Biegefestigkeiten wiesen auch die Biegesteifigkeiten der Prüfstäbe (Abb.88) eine sehr starke Streuung sowohl zwischen den Profilen, als auch innerhalb des gleichen Profils auf. Besonders die schrägliegenden Streben im Profilinneren zeigten einen hohen Variationskoeffizienten von bis zu 25%. Wie bei den Biegefestigkeiten erreichten auch die Steifigkeiten der liegenden Decklagen die höchsten Absolutwerte. Bemerkenswert ist, dass das Fehlen des Compatibilizers in den Profilen P15.2_004 bzw. P15.2_007 einen geringeren Einfluss auf die Biegesteifigkeit (E_{mod}) als auf die Biegefestigkeit (R_m) ausübte.



Profile

Abb.88: Biege-E-Modul der Profile P15.2_001 bis P15.2_007 in Abhängigkeit von der Position im Profil

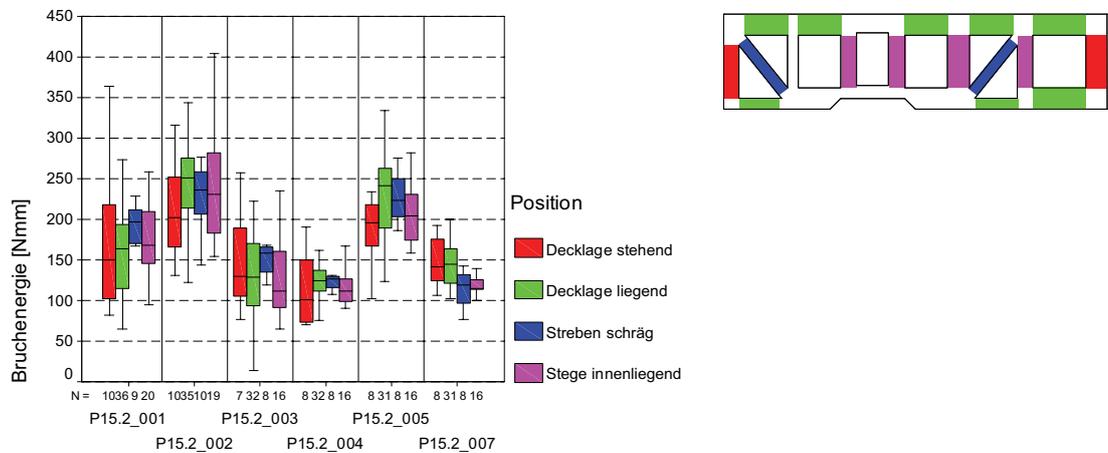
Hinsichtlich der relativen Unterschiede der E-Module ergab sich ein zu den Festigkeiten analoges Bild. Es konnte weder zwischen den verschiedenen Profilen noch innerhalb ein und des selben Profils eine signifikante Abweichung festgestellt werden (Abb. 89).



Profile

Abb.89: Relativer Unterschied der Biegesteifigkeit der Profile P15.2_001 bis P15.2_007 in Abhängigkeit von der Position im Profil

c) Brucharbeit - Gruppe 1



PROFIL

Abb.90: Brucharbeit der Profile P15.2_001 - P15.2_007 in Abhängigkeit von der Position im Profil

Für die Brucharbeit kann festgehalten werden, dass innerhalb der verschiedenen Profilbereiche (Decklagen, Streben und Stege) kein signifikanter Unterschied in der Bruchenergie nachgewiesen werden konnte (siehe Abb.89 und 90).

Die Profile ohne Compatibilizer (P15.2_004 und P15.2_007) sowie das Profil P15.2_003 brachen allerdings bei deutlich geringerer Belastung als die Profile P15.2_002 und P15.2_005, welche bis zum strukturellem Versagen in etwa die doppelte Energiemenge aufnahmen.

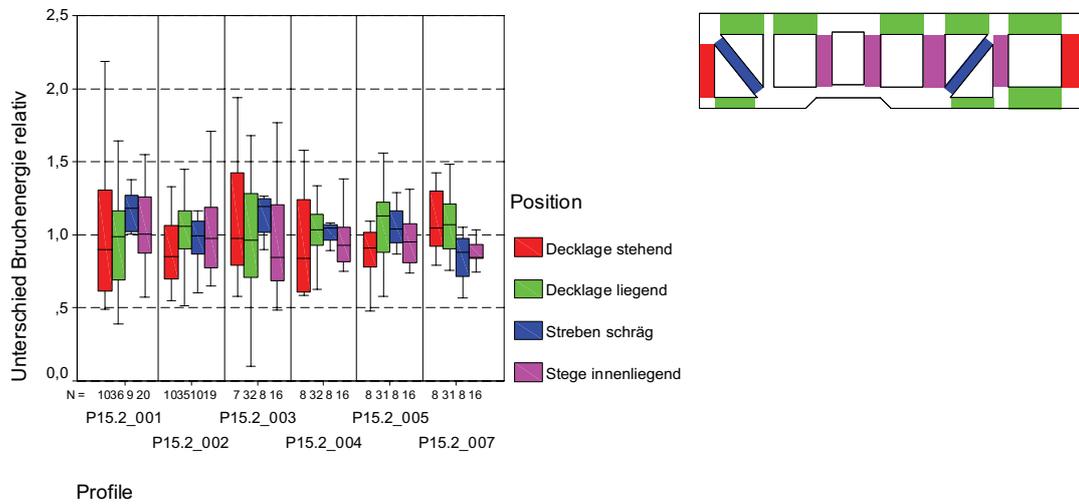


Abb.91: Relativer Unterschied der Bruchenergien der Profile P15.2_001 - P15.2_007 in Abhängigkeit von der Position im Profil

d) Biegefestigkeit - Gruppe 2

Die mit den Spantypen Lignocel Typ 4 und Lignocel P Super extrudierten Profile (P15.2_021 bzw. P15.2_025) erreichten in allen klassifizierten Lagen (Deckschicht, Streben, Stege) beinahe idente Werte hinsichtlich ihrer Biegefestigkeiten (vgl. Abb. 92) und lagen damit im selben Bereich wie das gut zu bewertende Profil P15.2_005 (~35 MPa). Die höchsten Biegefestigkeiten innerhalb der *Gruppe 2* wurden bei den Profilen P15.2_019 bzw. P15.2_020 (Spantyp Tipo CB 35E bzw 15E) gemessen (45 und 55 MPa).

Jene Profilbereiche die im Allgemeinen die geringsten Festigkeitswerte aufwiesen (Streben schräg bzw. Decklage stehend), zeigten für die beiden oben genannten Profile, Werte in der Größenordnung der sonst am besten bewerteten Decklagen der übrigen Profile (siehe Abb. 86 bzw. 92). Insbesondere die Decklagen der Profile P15.2_019 bzw. P15.2_020 erzielten mit einer mittleren

Biegefestigkeit von ca. 50 MPa bis zu 2 mal höhere Werte als die Decklagen aller anderen Extrudate.

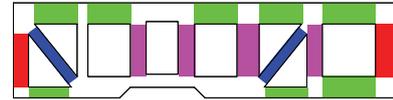
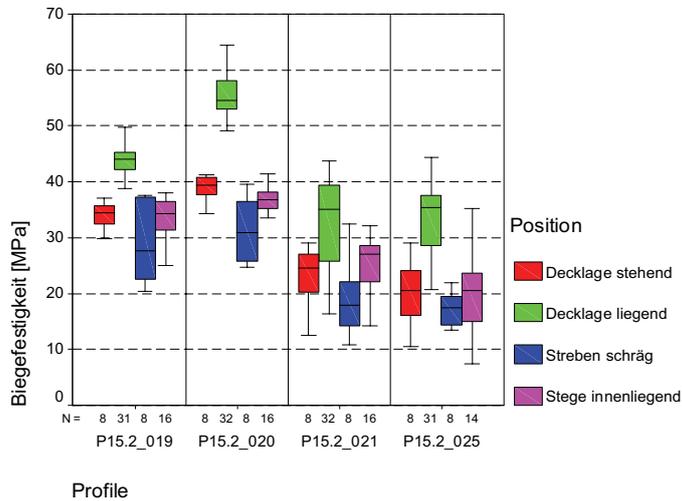


Abb. 92: Biegefestigkeiten der Profile P15.2_019 - P15.2_025 in Abhängigkeit von der Position im Profil

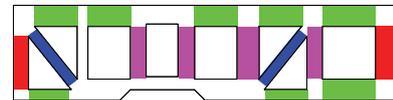
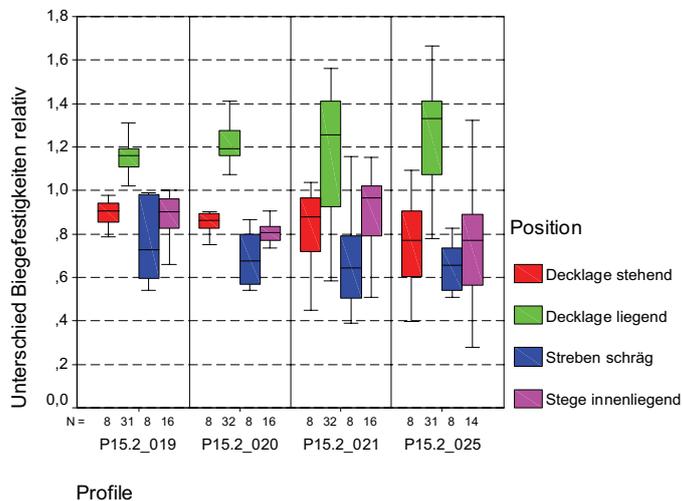


Abb. 93: Relative Biegefestigkeiten der Profile P15.2_019 - P15.2_025 in Abhängigkeit von der Position im Profil

Hinsichtlich der relativen Unterschiede der Biegefestigkeiten (Abb. 93) kann die selbe Aussage wie für *Gruppe 1* getroffen werden. Es konnten auch in der *Gruppe 2* keinen signifikanten Abweichungen vom Mittelwert nachgewiesen werden.

e) Elastizitätsmodul - Gruppe 2

Die deutlich verbesserten Eigenschaften der Profile P15.2_019 bzw. P15.2_020 spiegeln sich auch in der Biegesteifigkeit wider (Abb. 94). Die E-Module der sehr gut bewerteten liegenden Decklagen wiesen um ca. 25% höhere Werte auf, als die Decklagen aller übrigen Extrudate.

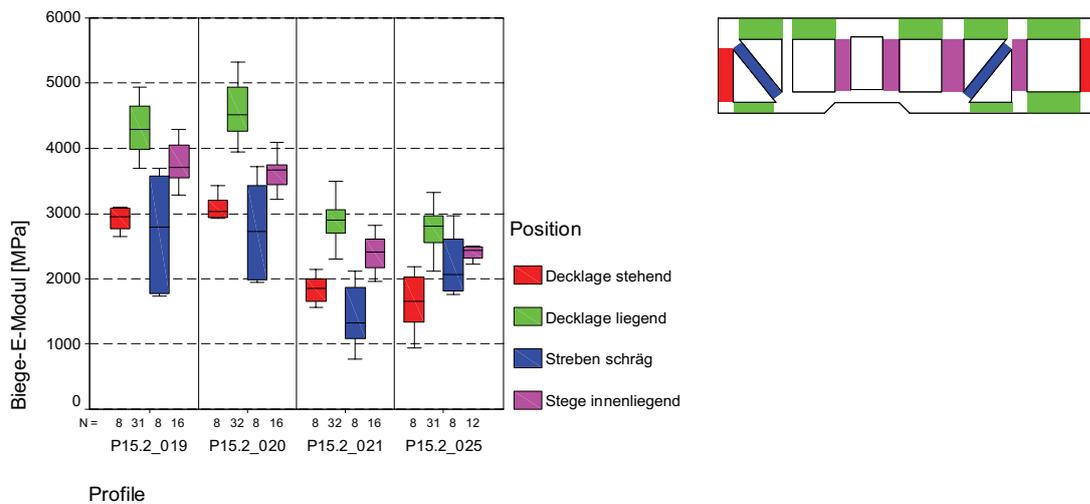


Abb. 94: Biegesteifigkeiten der Profile P15.2_019 bis P15.2_025 in Abhängigkeit von der Position im Profil.

Analog zu den relativen Biegefestigkeiten ergab sich für die relativen Biegesteifigkeiten ein sehr ähnliches Erscheinungsbild. Die relative Abweichung der Biegesteifigkeiten der verschiedenen Profilbereiche vom Mittelwert wurde weder durch die Prozessparameter noch durch den jeweiligen Spantyp signifikant beeinflusst (Abb.95).

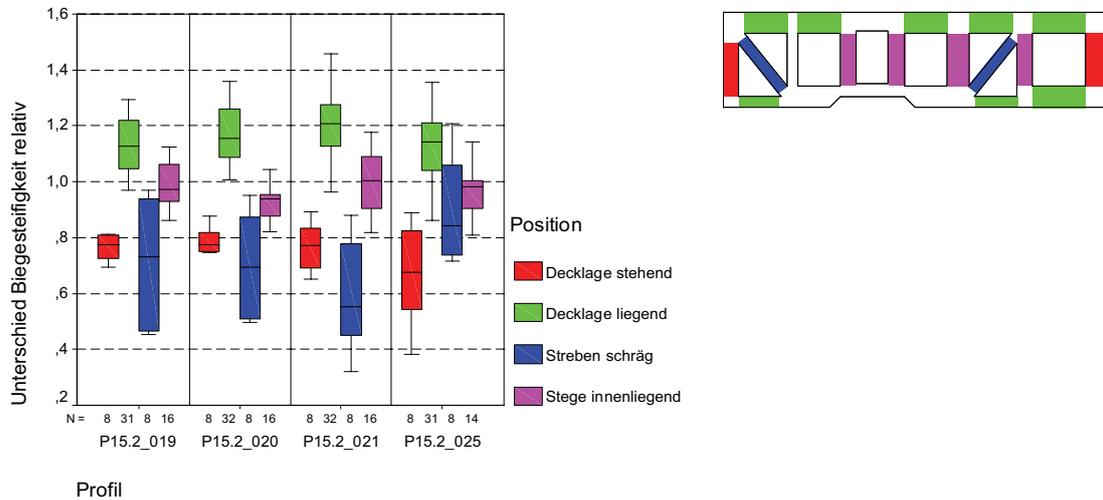


Abb. 95: Relative Biegesteifigkeiten der Profile P15.2_019 bis P15.2_025 In Abhängigkeit von der Position im Profil

f) Brucharbeit - Gruppe 2

Wie Abb.65 zu entnehmen ist, unterlagen die Werte für die Brucharbeit bei den Profilen P15.2_021 und P15.2_025 einer sehr starken Streuung und erschwerten den direkten Vergleich mit den Ergebnissen für die Profile aus der *Gruppe 1*. Die durchschnittlichen Brucharbeiten der oben genannten Profile dürften aber in etwa im selben Bereich liegen (~150-250 Nmm). Es ist anzunehmen, dass die hohe Streuung der Werte mit der Spangrößenverteilung bzw. mit der sehr inhomogenen Verteilung der Holzpartikel in der Polymermatrix korreliert.

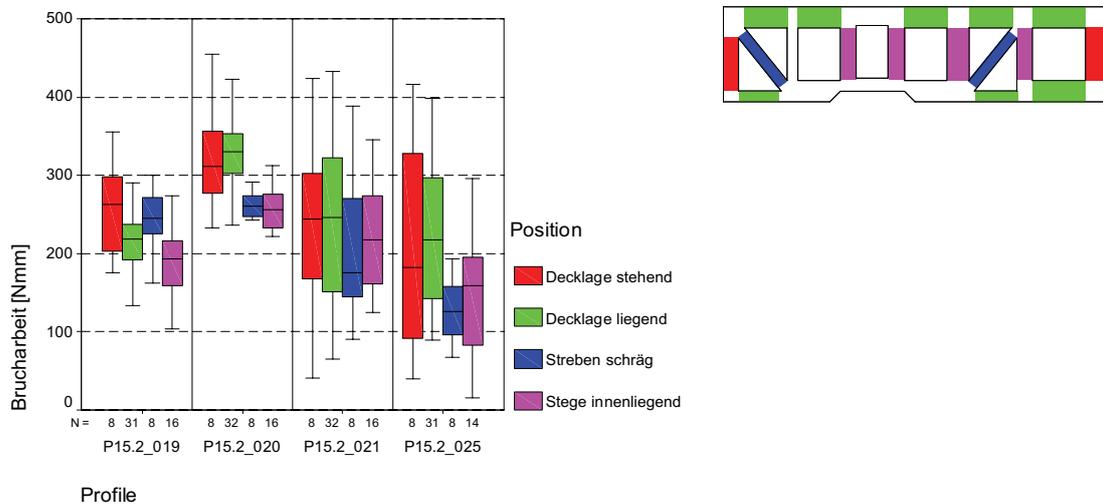


Abb.96: Brucharbeit der Profile P15.2_019 - P15.2_025 in Abhängigkeit von der Position im Profil

Die Werte der Brucharbeit für die Profile P15.2_019 bzw. P15.2_020 wiesen hingegen eine sehr viel geringere Streuung auf und übertrafen, in absoluten Zahlen gemessen, vor allem im Fall des Profils P15.2_020, jene der am besten bewerteten Extrudate aus der *Gruppe 1* um bis zu 25%.

Die graphische Darstellung der relativen Abweichung der Brucharbeit vom Mittelwert des jeweiligen Profils bietet diesbezüglich ein identes Bild (vgl. Abb. 97).

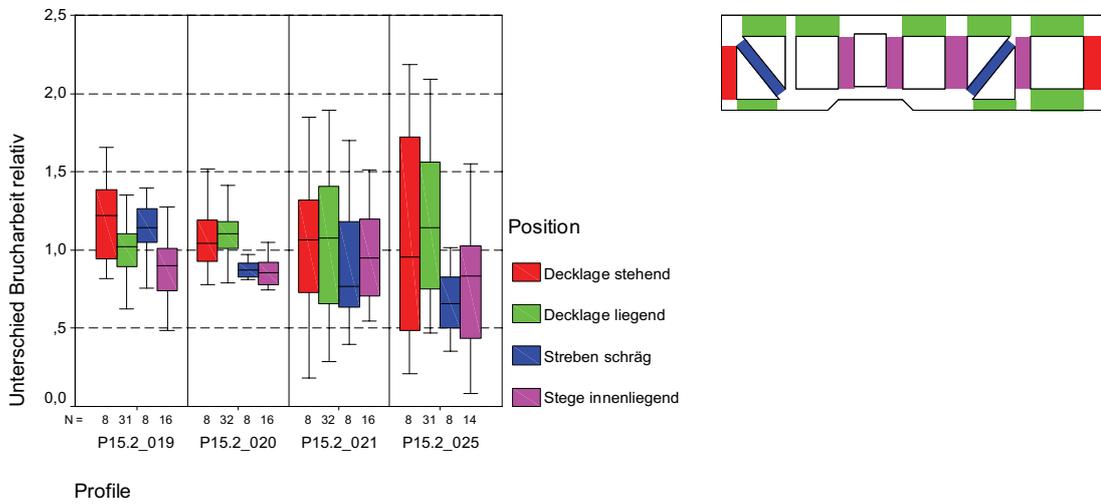


Abb.97: Relativer Unterschied der Brucharbeiten der Profile P15.2_019 - P15.2_025 in Abhängigkeit von der Position im Profil

g) Querdruckfestigkeit - Gruppe 1+2

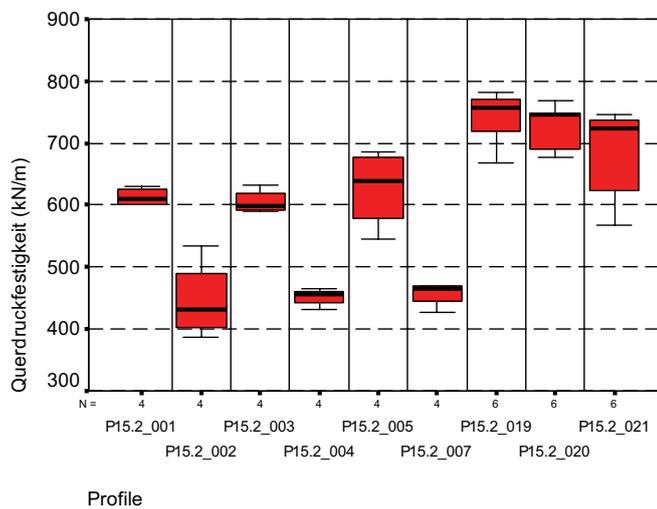


Abb.98: Querdruckfestigkeiten der Profile P15.2_001 - P15.2_021

Beim Vergleich der Querdruckfestigkeiten innerhalb der *Gruppe 1* fiel zunächst auf, dass das Profil P15.2_002 trotz Additivzusatz ebenso so schlecht abschnitt wie die Profile P15.2_004 bzw. P15.2_007, die ohne Additiv extrudiert wurden.

Die Absolutwerte der genannten Profile liegen im Durchschnitt um 33% niedriger als jene für die übrigen Extrudate aus der selben Gruppe. Da sich die Spangrößenverteilungen der Profile aber nicht maßgeblich voneinander unterscheiden (Ausnahme P15.2_004), kann die Begründung hierfür nur in den unterschiedlichen Prozessparametern oder in der Faserorientierung gesucht werden.

Innerhalb der *Gruppe 2* liegen die Werte der Querdruckfestigkeiten der untersuchten Profile eng beieinander (~700 kN/m). Die Untersuchung der Querdruckfestigkeit bzw. des Kriechverhaltens an P15.2_025 konnte wegen einer starken einseitigen Deformation des Profils nicht durchgeführt werden.

Im direkten Vergleich der Querdruckfestigkeiten der am besten bewerteten Profile aus beiden Gruppen (P15.2_005 bzw. P15.2_019) übertraf der Wert für P15.2_019 jenen des Profils P15.2_005 um ca. 15%.

h) Kriechverhalten - ausgesuchte Profile

Bei den Kriechversuchen konnten deutliche Unterschiede zwischen den Profilen P15.2_001, bzw. P15.2_019 bis 021 festgestellt werden (Abb.99). Profil P15.2_020 wies mit einer Kriechverformung von 0,44 mm nach 60h eine deutlich stärkere Deformation auf, als die anderen untersuchten Profile. Profil P15.2_019 zeigte mit einer Kriechverformung von 0,18 mm im Gegensatz dazu ein besseres Verhalten bei Langzeitbelastung unter konstanter Kraft. Wie anhand von Abb.68 ebenfalls eindeutig gezeigt werden konnte, wurde die maximale Kriechdehnung zum Zeitpunkt des Abbruchs der Messung nach 60h bei Weitem noch nicht erreicht.

Für eine Abschätzung der zu erwartenden nachfolgenden Kriechverformung wurde daher für den Zeitraum der Belastung zwischen 40 und 60 h die Kriechgeschwindigkeit ($d\varepsilon/dt$) ermittelt (Abb.100).

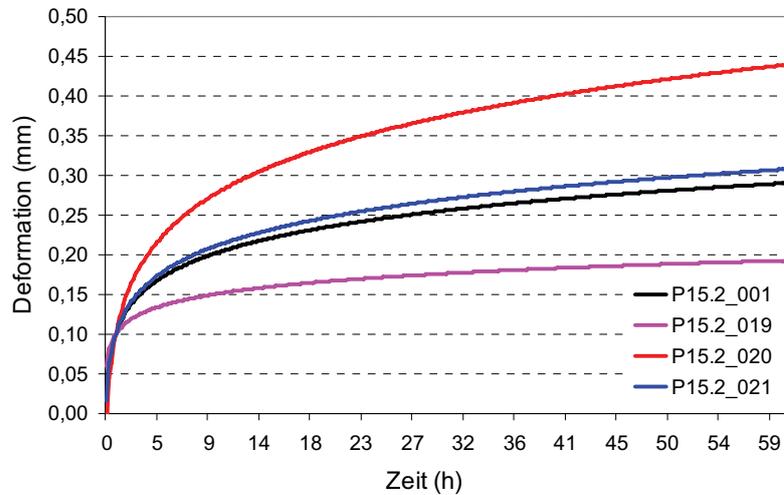


Abb.99: Kriechverhalten der Profile P15.2_001, bzw. P15.2_019 bis 021 nach dem Erreichen der aufgebrachten Kraft von ca. 25% der Querdruckfestigkeit.

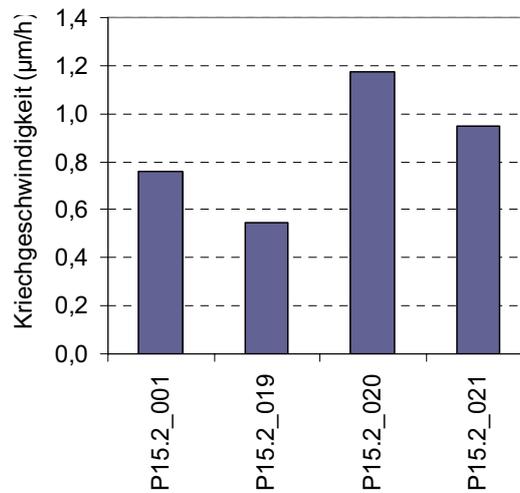


Abb.100: Kriechgeschwindigkeit der Profile basierend auf der Kriechverformung
Im Zeitraum von 40 bis 60 h des Langzeitversuchs

7. Entwicklung der Spänedirektdosierung

7.1 Einleitung und Zielsetzung

Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (engl.: Wood-Plastic Composites, WPCs) zählen zu jenen Sektoren der Kunststoffbranche, die sich am schnellsten weiterentwickeln. Bei der Extrusion von WPCs wird die Holzkomponente derzeit in Form von Pellets dem Extruder zugeführt. Durch den Pelletierprozess erfahren die Holzfasern eine nicht reproduzierbare Faserschädigung (Kürzung, Quetschung und thermische Belastung), sodass standardisierte Pelletqualitäten - eine unabdingbare Voraussetzung für die Extrusion qualitativ hochwertiger Profile - derzeit nicht angeboten werden können.

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Vorrichtung entwickelt, die es ermöglicht, Holzfasern bzw. Holzspäne (z.B. aus der Säge- oder Holzplattenindustrie) unkompaktiert und direkt im Extruder zu verarbeiten. Dies resultiert in einer höheren Wirtschaftlichkeit (niedrigere Rohstoffkosten der Holzspäne im Vergleich zu den Pellets) und besseren Produktqualität. Eine Steigerung der Extrusionsgeschwindigkeit kann ebenfalls erzielt werden.

Das Verarbeitungsspektrum reicht von Holzmehl mit sehr kurzer Faserlänge (z.B: Scand. Wood Fiber oder Rettenmaier S150TR ca. 100µm) bis zu langfasrigen Materialien, z.B. Lignocel Type 4.

Die Schüttdichten der zu verarbeitenden Holzkomponenten betragen ca. 75-150 gr/li.

Das Mischungsverhältnis beläuft sich auf 50 % bis 85 % Holzanteil.

Die Feuchte eingesetzter Holzkomponenten beträgt 0 % bis 8 %, Hauptaugenmerk sollte jedoch auf den Bereich von 0 % bis 4 % gelegt werden.

Verarbeitet werden die Verbundwerkstoffe auf Maschinengrößen FT45 bis 92 in max 3 Varianten. Der Prototyp im Rahmen des Projekts wird mit einer FT 58 realisiert.

Ausstoßziel: 50 kg/h Minimum, 150kg/h Maximum

7.2 Komponentenentwicklung

Die Vorgangsweise bei der Komponentenentwicklung erfolgte in vier Schritten:

1. Vorversuche zur Verifizierung der Zieldefinition, Erkenntnisse und Fragenkatalog zur Definition des Prototyps:

- ◆ Sind die Ziele und auch die Patentansprüche umsetzbar?
Kann kontinuierlich und unterdosiert ins Stopfwerk gefahren werden?
Können Naturfasern zwangsdosiert werden und sind ausreichende Füllfaktoren erreichbar?
- ◆ Ist Stabilität und Betriebssicherheit prinzipiell erreichbar?
- ◆ Erkenntnisse für Auslegung der Prototypenanlagen:
Volumen der Stopfschnecken, Drehzahlen und Motorleistungen.
Welche Dosiergeräte sind für die geforderten Späne geeignet?

Es wurde ein bestehendes altes Stopfwerk aus der Kunststoffverarbeitung umgebaut und mit diversen Dosiergeräten (Leihgeräte von Plasticolor und K-tron) der Aufbau der Naturfaserdirektextrusion simuliert.



Abb 101: Adaptierte Zwangsdosierlösung aus der Kunststoffverarbeitung zur Verifizierung der Grundannahmen und Ermittlung der wichtigsten Konstruktionsdaten

Es wurden mehrere Versuche mit verschiedenen Materialien und Einstellungen zur Ermittlung der Eignung nach obigen Punkten durchgeführt. Nach mehrmaliger Modifikation konnte das Funktionieren des Konzepts nachgewiesen werden. Die Daten daraus mündeten ins Pflichtenheft bzw. in die Konstruktion und den Bau der Prototypenanlage.

2. Pflichtenheft, Konstruktion und Bau des Prototypes → mechanische Komponentenentwicklung. Bau eines kompletten Extruders mit neu entwickelter Software zur Integration der Steuerung des Prototypes → Software und Steuerungsentwicklung

3. Versuchsreihen mit der Prototypenanlage; Optimierung. Versuche mit mehreren Kundenmaterialien -werkzeugen und Rezepturen.



Abb 102: Prototypenanlage

4. Bau einer verkaufsfähigen Anlage, Präsentation und Live Vorführungen der Anlage auf der K 2004.

Ausgehend von den erfolgreichen Versuchen am Prototypen sowie den Erkenntnissen aus den anderen Arbeitspaketen (UAR- Materialtests, Greiner

Werkzeugentwicklung) kam es zum Bau einer verkaufsfähigen Anlage zur Präsentation und Vorführungen der direkten Naturfaserextrusion auf der K 2004.



Abb 103: Extrusionsline für die direkte Naturfaserextrusion auf der K 2004

Die Arbeiten für 1 begannen im Jahr 2002, 2 und 3 wurden in 2003 durchgeführt, der Bau der verkaufsfähigen Anlage begann Anfang 2004.

7.3 Schlußfolgerungen und Ausblick

Das erfolgreich abgeschlossene Projekt zur Entwicklung einer Holzspäne-direktdosierung und die Beherrschung dieser Technologie steht nicht nur für zusätzliche Absicherung der Marktführerschaft des Unternehmens Cincinnati, sondern vielmehr für einen Durchbruch der Holzextrusion an sich. Erstmals wird dem Kunden ermöglicht, direkt, von lokal verfügbaren, kostengünstigeren und leichter zu verarbeitenden Materialien zu produzieren. Geringere Materialkosten und höherer Durchsatz sind die Konsequenz.

Die große Herausforderung besteht nun in der Rezeptur- und Prozessoptimierung, wobei die Grundvoraussetzungen dafür bereits mit Versuchsreihen und Untersuchungen gelegt wurden, die parallel zur Komponentenentwicklung einhergingen. Technische Weiterentwicklungen zur Direktdosierung werden im Rahmen der Auftragskonstruktion für die bereits angelaufenen oder in Verhandlung stehenden Aufträge durchgeführt.

Größere Aufmerksamkeit wird in die Optimierung der Materiallogistik, Aufbereitung und Zuführung zu legen sein. Jede Unregelmäßigkeit bewirkte signifikante Auswirkungen auf den Extrusionsprozess, da die Puffer- und Ausgleichwirkung eines vollen Trichters (wie bei fertig gemischten Compounds oder Agglomeraten) wegfällt. Die Restfeuchte sowie die Korngrößenverteilung der Naturfasern müssen in einem vergleichsweise geringeren Toleranzband vorliegen, Schwankungen wirken sich bei der Direktextrusion stärker aus.

Dennoch haben die durchgeführten Versuche gezeigt, dass selbst Massenware wie das Deckschichtmaterial aus der Spanplattenproduktion im Direktextrusionsprozess verarbeitbar ist. Aus dieser Tatsache leitet sich auch direkt das wirtschaftliche und ökologische Potential ab

8. Entwicklung eines Extrusionswerkzeuges

8. 1 Einleitung und Zielsetzung

Holzfasereextrusion mit höherem Kunststoffanteil ist schon länger bekannt und wird auch für einige Anwendungen eingesetzt. Bei diesen Materialien wird die Holzfaser aber eher als Füllstoff und nicht als Verstärkungstoff eingesetzt. D.h. das Fasermaterial dient nur zur Senkung der Materialkosten, aber nicht zur Erhöhung von bestimmten Eigenschaften des Endproduktes. Dies ist allerdings mit einem höheren Anteil an Holzfasern möglich. Für die Verarbeitung von Materialcompounds mit höherem Faseranteil und wirtschaftlichen Ausstoßleistungen, ist die bisher eingesetzte Prozess- und Werkzeugtechnologie nicht ausreichend geeignet. Es wird keine ausreichende Profilqualität erreicht, und oder keine wirtschaftlich Ausstoßleistungen realisiert, welche für Massenprodukte unabdingbar sind.

Ziel dieser Technologieentwicklung war nun zuerst ein Versuchswerkzeug, mit welchem unterschiedliche Wanddicken von 2,5 bis 6,0mm realisiert werden können. Dadurch können unterschiedliche Materialsysteme von größeren Holzspänen bis kleinen Holzfasern mit unterschiedlichen Füllgraden getestet werden und der Einfluss auf den Prozess und die Profileigenschaften ermittelt werden. Der Ausstoß soll bei ca. 300 kg/h liegen, sodass die Kühl- und Kalibriervorrichtung daraufhin ausgerichtet ist.

Das Werkzeug bildete die Basis für die ersten orientierenden Untersuchungen und für die Erarbeitung der technologischen Grundlagen zum Bau des im Rahmen dieses Projektes definierten Werkzeugs („Griffner-Profil“).

8.2 Konzepterstellung

Bei der IST-Analyse wurden die beiden bekannten Werkzeugtechniken sehr genau analysiert, mit dem Ergebnis, dass die neu zu entwickelnde Werkzeugtechnik die Vorteile beider Prozesse, soweit als möglich, vereinen soll.

Um einerseits die prozess- und werkzeugtechnischen Möglichkeiten hinsichtlich erreichbarer Ausstoßleistung, möglichen Profilqualitäten und Profildesign zu ermitteln und andererseits die Eignung und Verarbeitbarkeit verschiedener Materialsysteme, ist im ersten Schritt ein produktionsnahes Versuchswerkzeug mit einer einfachen Profilgeometrie erforderlich.

Ziel des Versuchswerkzeuges war es, eine mögliche Produktapplikation (z.B. Decking als Hohlkammerprofil) mit einer einfachen symmetrischen Geometrie, mit verschiedenen Materialsystemen produktionsnahe Musterprofile zu extrudieren. Aus den Materialversuchen sollten Erkenntnisse hinsichtlich maximaler Ausstoßleistung, Prozessstabilität, erreichbare Profilqualität (Oberfläche, Maßhaltigkeit,...) und eventuelle Einschränkungen und oder Empfehlungen im Profildesign ermittelt werden. Anschließend wurden aus den Profilen die mechanischen und physikalischen Eigenschaften ermittelt, um die angestrebte bzw. mögliche Profilapplikationen auszutesten.

Das Versuchswerkzeug wurde so ausgeführt werden, dass unterschiedliche Wanddicken von 2,5 bis 6,0mm realisiert werden konnten. Dadurch konnten unterschiedliche Materialsysteme mit größeren Holzspänen bis kleinen Holzfasern, bei unterschiedlichen Füllgraden getestet werden und der Einfluss auf den Prozess und die Profileigenschaften ermittelt werden.

Die Kühl- Kalibrierstrecke sollte für Ausstoßleistungen bis 300 kg/h dimensioniert werden, dadurch sollte eine Korrelation Ausstoßleistung / Profilqualität bzw. Profileigenschaften ermittelt werden. Ebenso ist die Erkenntnis der möglichen Ausstoßleistung für die Profilkalkulation von entscheidender Bedeutung. Die

gesamte Kühl- Kalibrierstrecke wurde mit Rollenkalibrierungen ausgeführt um bei hochgefüllten Systemen (>60% Holzanteil) die entstehenden Reibungskräfte im Kalibrierungsprozess so gering als möglich zu halten. Dadurch sollte einerseits das Prozessfenster wesentlich erhöht werden, andererseits sollten dadurch auch mögliche Spannungsrisse während des Abkühlprozesses im Profil verhindert werden.

8.3 Druck- und Strömungsberechnung

Materialdaten

Am Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik wurden Viskositätsmessungen von verschiedenen PP-Holz Compounds durchgeführt. Die Daten wurden uns freundlicherweise vom IWM zur Verfügung gestellt.

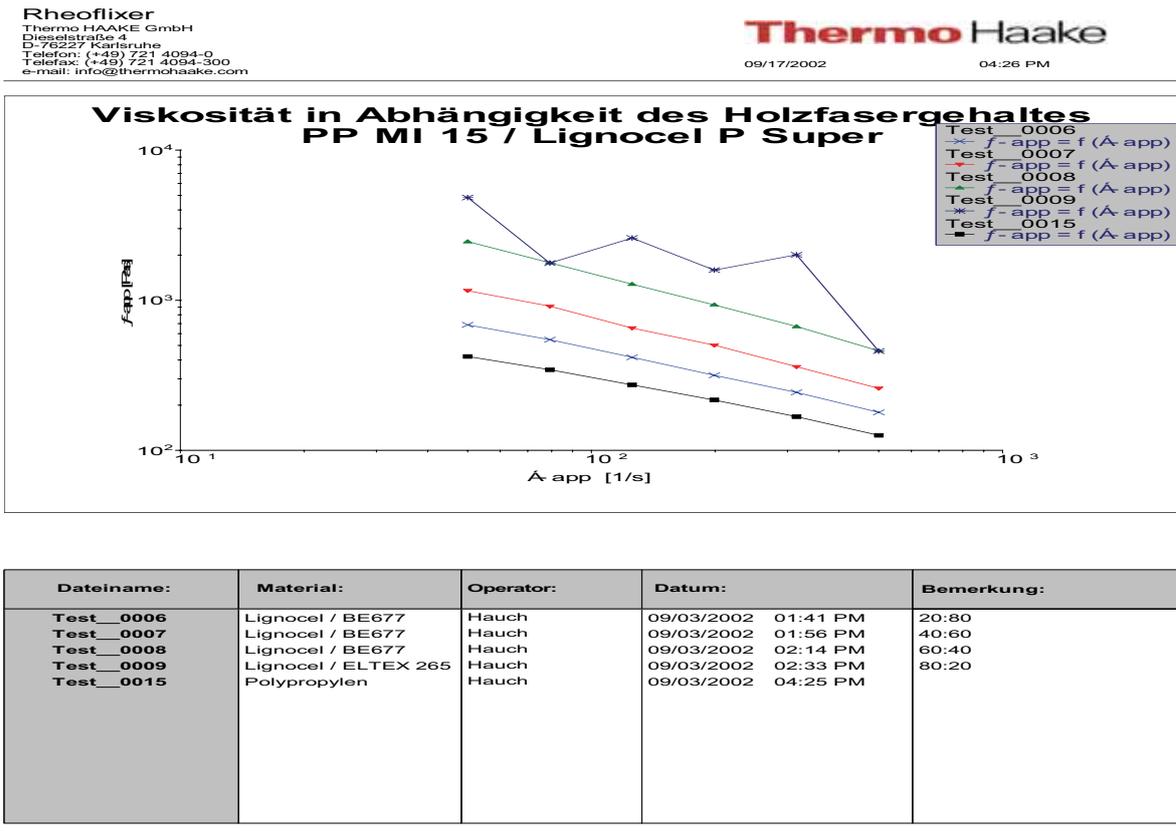


Abb. 104: Viskosität als Funktion der Schergeschwindigkeit für verschiedene PP-Holz-Compounds (Daten vom Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik)

Anhand der Daten ist sehr gut erkennbar, dass die Viskosität mit steigendem Holzfasern-Anteil steigt.

In erster Näherung lassen sich die Viskositätskurven mit einem Potenzansatz nach Ostwald und de Waele beschreiben:

$$\eta = \left(\frac{1}{\phi} \right)^{\frac{1}{m}} \dot{\gamma}^{\frac{1}{m}-1},$$

wobei η die Viskosität, Φ die Fluidität und m den Fließexponenten darstellen.

Entnimmt man der Viskositätskurve zwei repräsentative Punkte η_1, g_pkt1 und η_2, g_pkt2 , dann lassen sich die Fluidität und der Fließexponent folgendermaßen bestimmen:

$$\frac{1}{m} = \frac{\log \eta_1 - \log \eta_2}{\log \dot{\gamma}_1 - \log \dot{\gamma}_2} + 1$$

$$\log \phi = m \left[\left(\frac{1}{m} - 1 \right) \log \dot{\gamma}_1 - \log \eta_1 \right]$$

Wendet man dieses Verfahren auf obige Kurven an, so erhält man folgende Materialdaten:

PP	Holz	g_pkt1 [s-1]	eta_1 [Pas]	g_pkt2 [s-1]	eta2 [Pas]	m	□
100%	0%	50	420	500	130	2,037	7,85e-8
80%	20%	50	690	500	195	2,217	4,35e-9
60%	40%	50	1020	500	260	2,463	1,27e-10
40%	60%	50	2500	500	480	3,534	4,85e-17

Tabelle 16: Rheologische Daten verschiedener PP-Holz-Compounds

Analytische Druckberechnung

Das bei Greiner entwickelte Programm GPOT wurde um die Holz-PP-Materialdaten erweitert.

Die zu erwartenden Drücke liegen deutlich unter den typischen Werten von PVC-Werkzeugen. Während bei PVC-Werkzeugen mit einem typischen Massedruck um 300 bar gearbeitet wird, ist bei PP-Holz-Profilen mit Wandstärken um 5 mm und einem Holzfaser-Anteil von 60% mit einem Massedruck um 80 bar zu rechnen.

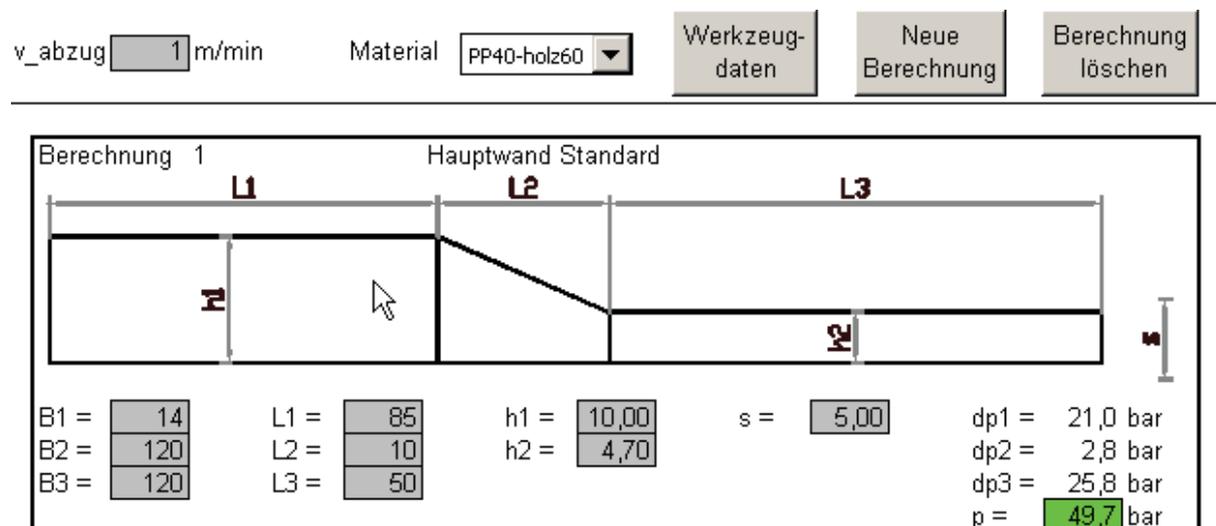


Abb. 105: Druckberechnung bei „Schwelle“

Strömungsberechnung

Für die 2D Querschnittströmungsrechnung wurde das Programm ANSYS7.0 eingesetzt. Es wird Wandhaften modelliert.

Variante mit 5 mm Wandstärke

Beim Werkzeug 490141 wird mit einer Abzugsgeschwindigkeit von 2 m/min gerechnet, was bei einer Profilquerschnittsfläche von 2100,9 mm² einen Massendurchsatz von 289 kg/h ergibt.

Aufgrund der Symmetrie wird nur ein Viertel des Profils modelliert.

zeigt die berechnete Geschwindigkeitsverteilung im Austrittsbereich. Die Seitenwände treiben vor, während die Innenstege zurückbleiben.

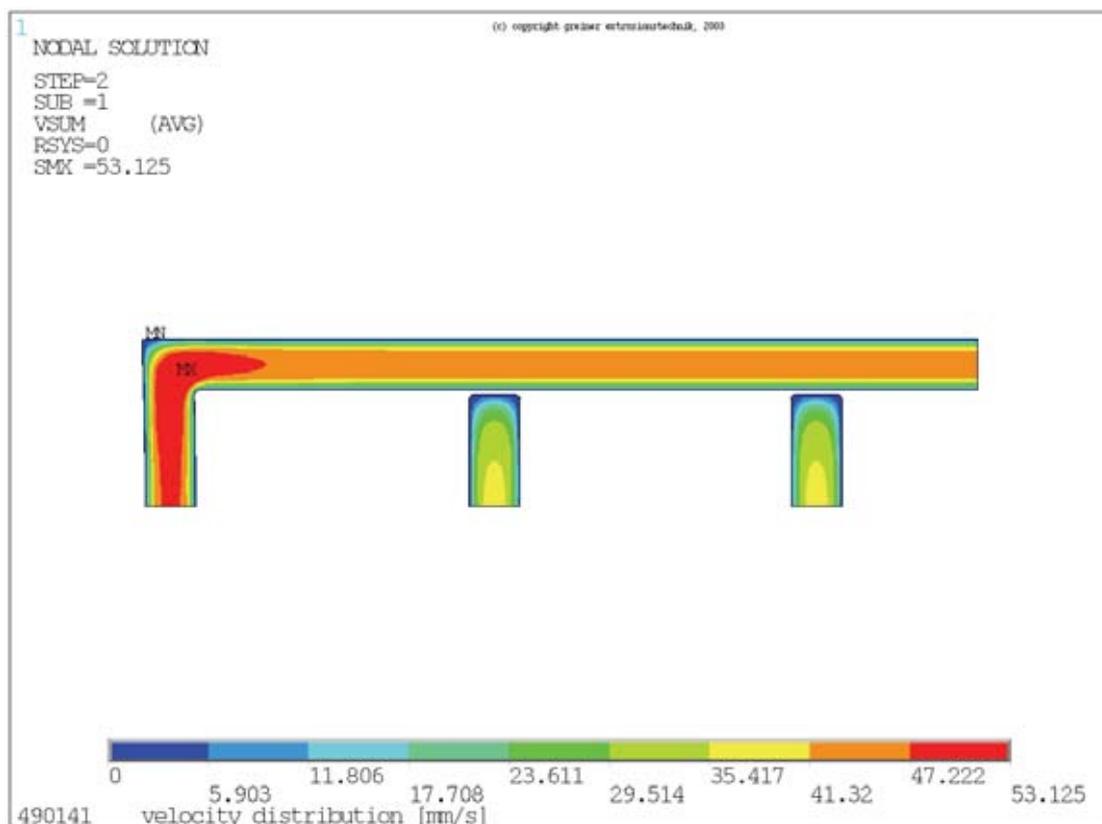


Abb. 106: Geschwindigkeitsverteilung bei 490141

Mit diesen Berechnungen lassen sich somit die Werkzeugauslegung im Vorfeld optimieren.

Kühlungsberechnungen

Materialdaten

Leider sind die thermischen Materialdaten von PP-Holz-Compounds nur ungenügend bekannt.

Um trotzdem Abschätzungen der benötigten Kühlstrecken erstellen zu können, wurde folgende Vorgangsweise zur Festlegung von Materialdaten gewählt:

In der Literatur wurden folgende typische Materialdaten für reines Holz gefunden:

$$\text{Rho} = 640 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Cp} = 400 \text{ J/kgK}$$

$$\text{Lambda} = 0,17 \text{ W/mK}$$

Im Allgemeinen wird das Holz in der Extrusion hohen Druck und Temperatur so konditioniert, dass die Dichte auf ca. 1300 kg/m^3 steigt. Wie sich diese Bearbeitung auf die thermischen Materialdaten auswirkt, ist unbekannt. In erster Näherung wird angenommen, dass dabei die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit nicht verändert werden.

Somit ergeben sich folgende thermische Standard-Materialdaten für Holz:

ρ	1300 kg/m ³
c_p	400 J/kgK
λ	0,17 W/mK

Tabelle 17: Thermische Materialdaten für 100% Holz

Die typischen Materialdaten für PP sind wesentlich besser bekannt (siehe nächste Tabelle)

T [°C]	c _p [J/kgK]	ρ [kg/m ³]	Λ [W/mK]
-20	1190	933	0,23
20	1510	916	0,23
60	1830	897	0,23
100	2150	877	0,23
140	2520	855	0,23
150	2800	847	0,23
160	3400	840	0,23
170	5500	833	0,23
180	5450	800	0,23
190	2700	772	0,23
200	2520	766	0,23
230	2590	741	0,23

Tabelle 18: Thermische Materialdaten für 100% PP

Die Materialdaten für PP-Holz-Compounds werden durch lineare Interpolation zwischen 100% PP und 100% Holz bestimmt. So ergibt sich zum Beispiel für die Wärmeleitfähigkeit einer 80% PP / 20% Holz Mischung ein Wert von $0,23 \text{ W/mK} \cdot 0,8 + 0,17 \text{ W/mK} \cdot 0,2 = 0,218 \text{ W/mK}$.

Analog wird mit allen anderen Materialdaten verfahren.

Neben den oben angeführten thermischen Materialdaten ist auch noch die Kenntnis der Emissivität für die Abkühlsimulation von zentraler Bedeutung.

Ein typischer Wert für Holz ist 0,9 , während bei PP mit 0,96 gerechnet wird.

Somit ergeben sich folgende Werte für die Compounds:

PP	Holz	□
100 %	0 %	0,96
80 %	20 %	0,95
60 %	40 %	0,94
40 %	60 %	0,92
20 %	80 %	0,91
0 %	100 %	0,90

Tabelle 19: Emissivität verschiedener PP-Holz-Compounds

FEM- Modell

Für die Kühlungssimulation wurde das Programm ANSYS7.0 eingesetzt. Die Berechnung erfolgt 2D.

Alle für die Abkühlung relevanten Wärme-Transportmechanismen werden berücksichtigt:

- Wärmeleitung
- Strahlung
- Konvektion
- Wärmeübergang Profiloberfläche - Werkzeug
- Wärmeübergang Profiloberfläche - Wasser im Tank

Folgende Rand- und Anfangsbedingungen werden angenommen:

Starttemperatur zum Zeitpunkt 0	200 °C
Wärmeübergangskoeffizient TK - Profil	1000 W/m ² K
Wärmeübergangskoeffizient Wasser - Profil	1000 W/m ² K
Wärmeübergangskoeffizient Luft - Profil	10 W/m ² K
Wassertemperatur	15 °C
Lufttemperatur	20 °C

Tabelle 20: Rand- und Anfangsbedingungen für die Abkühlsimulation

Bei drei Profilen wurden Abkühlsimulationen durchgeführt, wobei hier exemplarisch jene der Schwelle angeführt wird

	„Schwelle“
Abzugsgeschwindigkeit	1 m/min
TK-Länge	0,95 m
Tank-Länge	6 m
Abstand Tank-Ende zu Säge	6,5 m

Tabelle 21: Kühlstreckendaten von „Schwelle“ und 490141

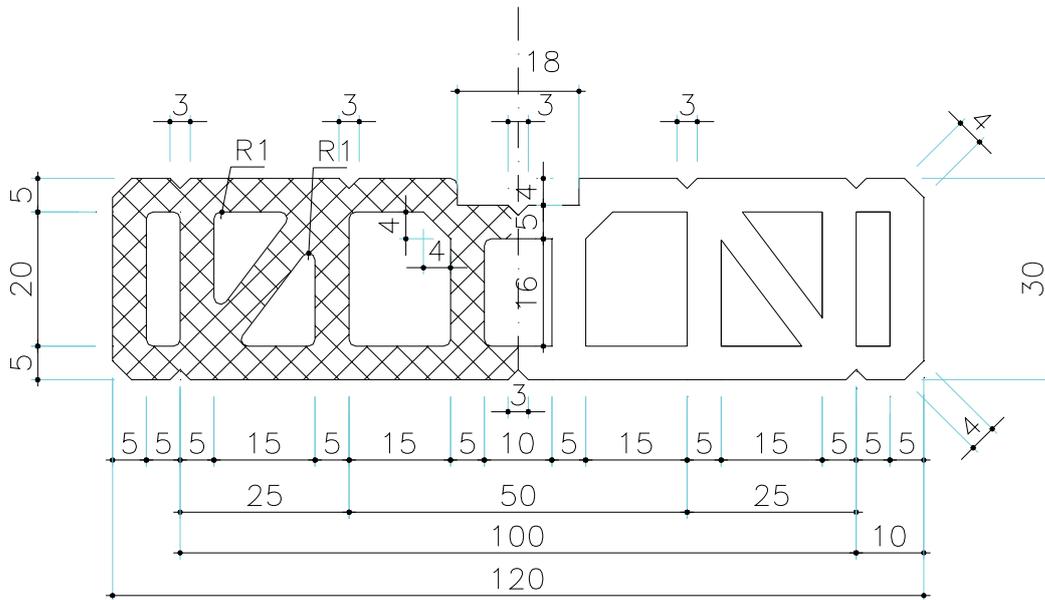


Abb. 107: Profil „Schwelle“

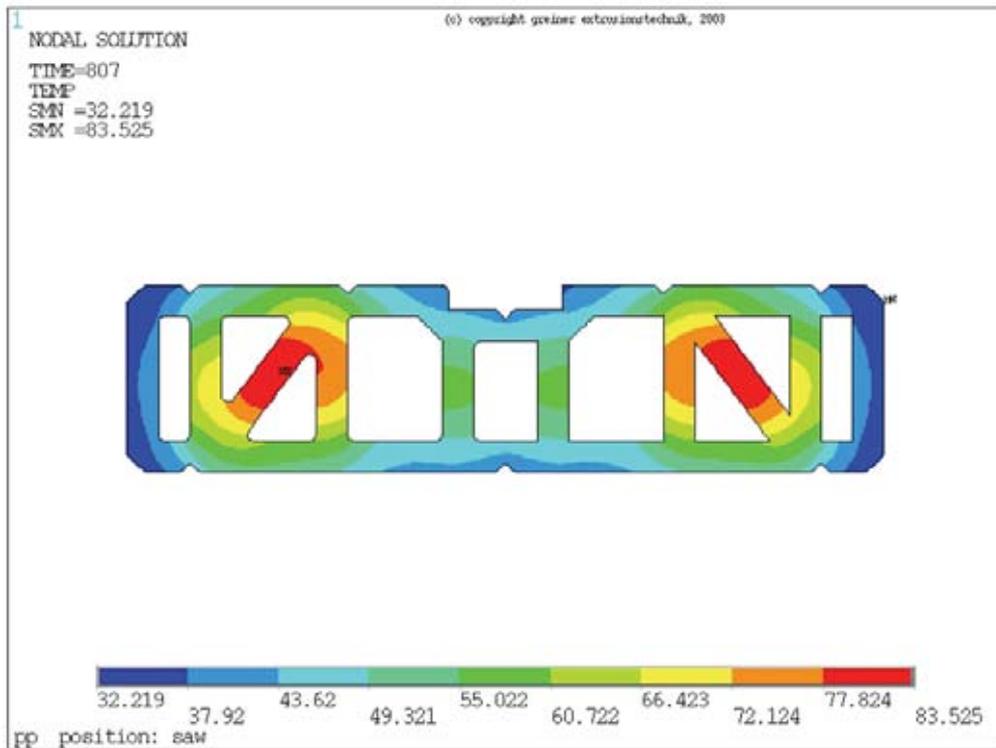
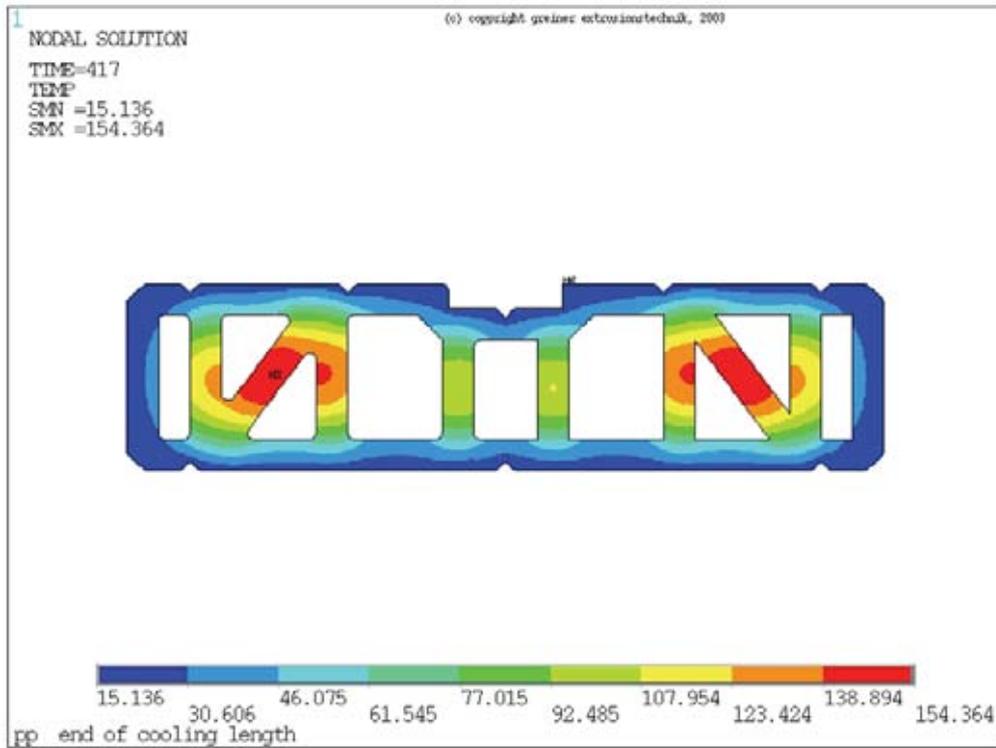
Ergebnisse

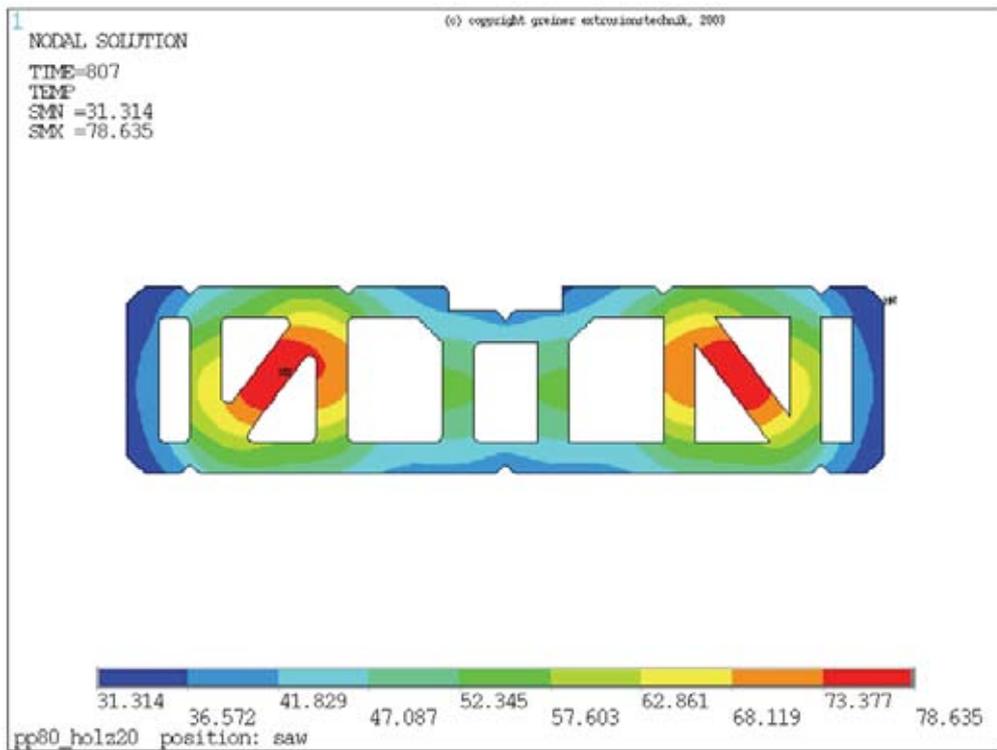
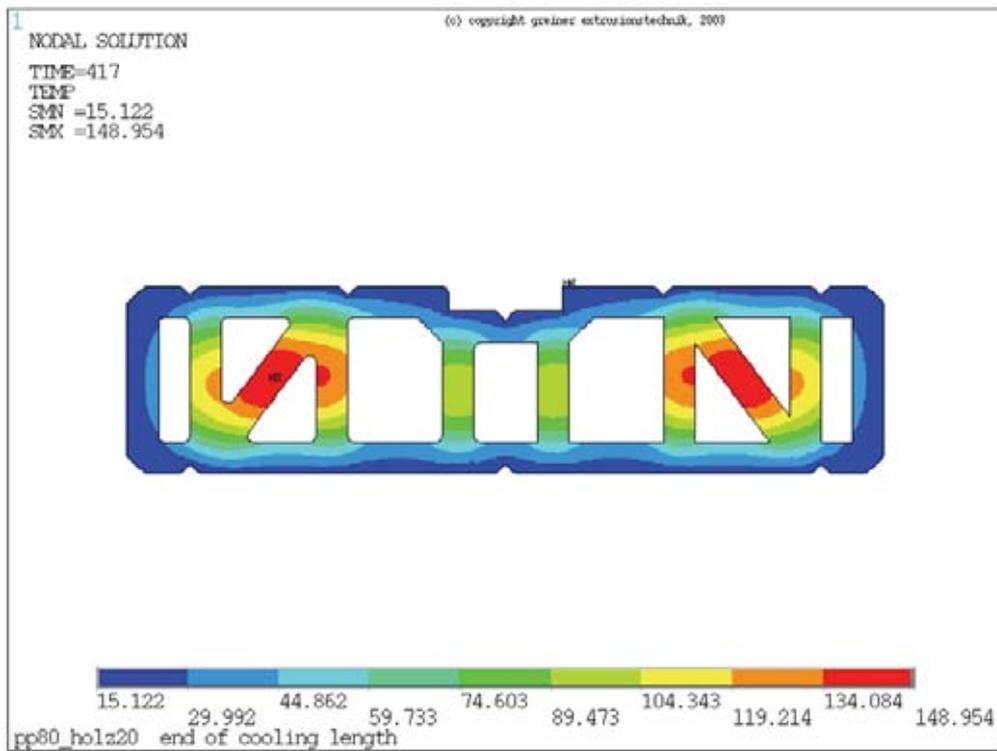
Durchgeführte Berechnungen

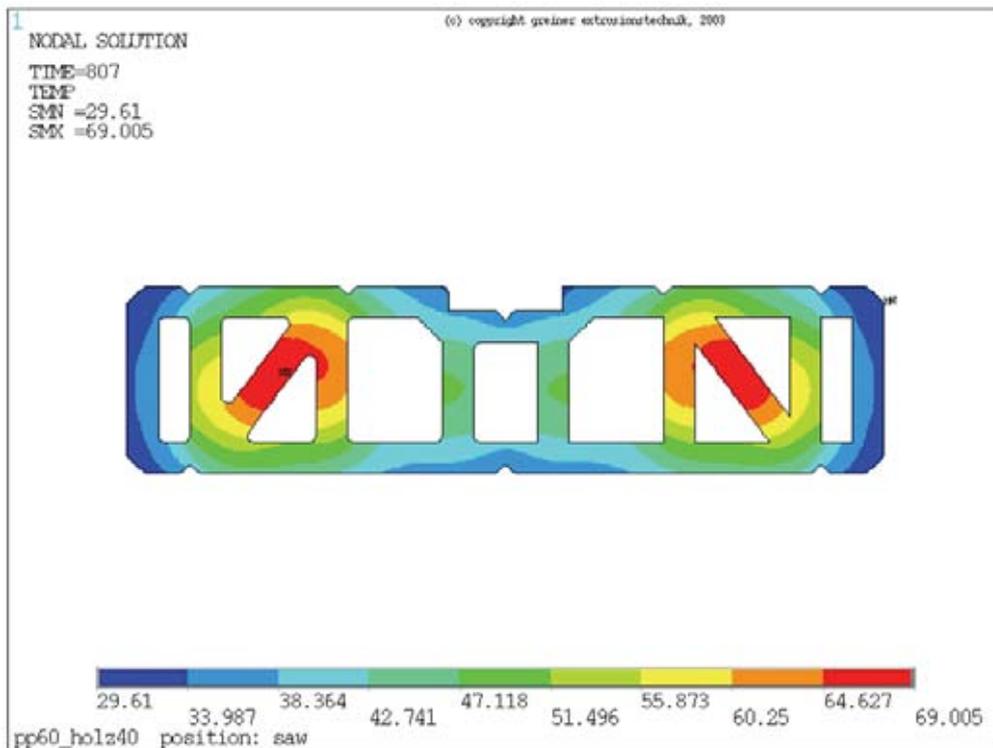
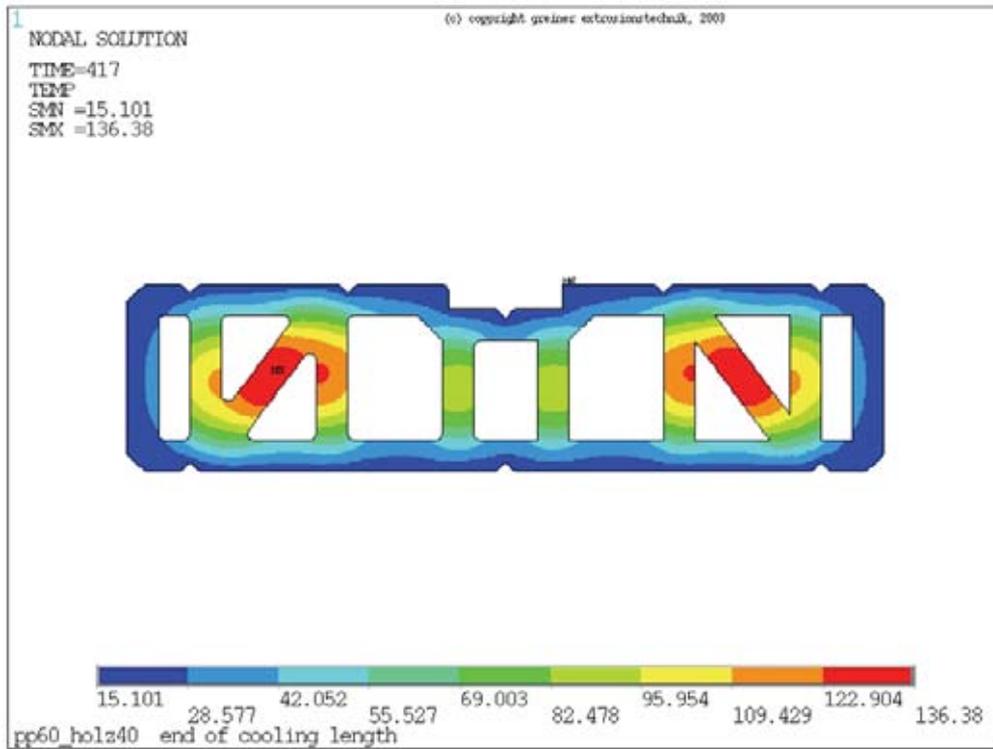
Berechnung	Profil	PP	Holz	T_max Ende Tank [°C]	T_max Säge [°C]
PP	Schwelle	100 %	0 %	154,4	83,5
PP80_holz20	Schwelle	80 %	20 %	149,0	78,6
PP60_holz40	Schwelle	60 %	40 %	136,4	69,0
PP40_holz60	Schwelle	40 %	60 %	114,5	54,5
PP20_holz80	Schwelle	20 %	80 %	78,6	36,3

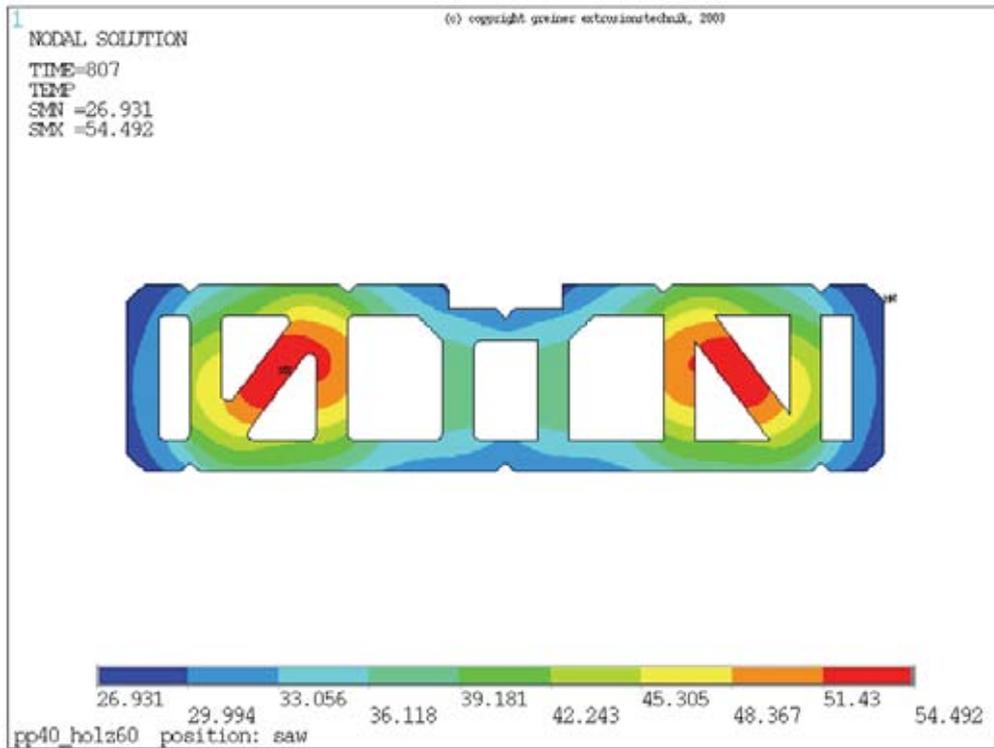
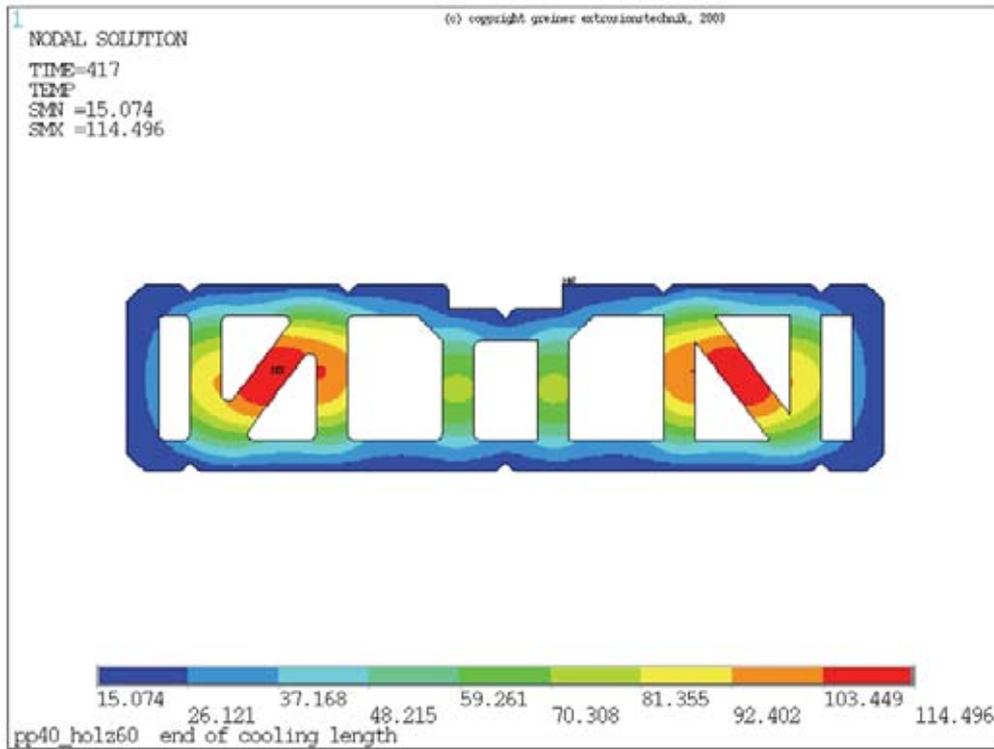
Nachfolgend ist für jede Berechnung die Temperaturverteilung am Ende der Kühlstrecke sowie bei der Säge dargestellt.

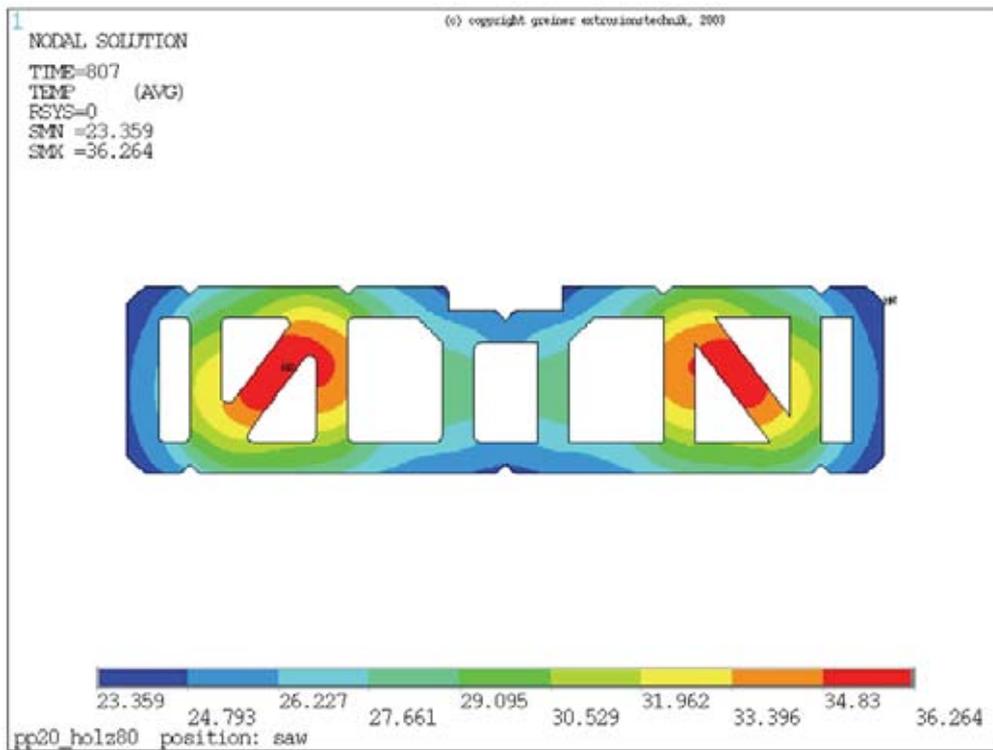
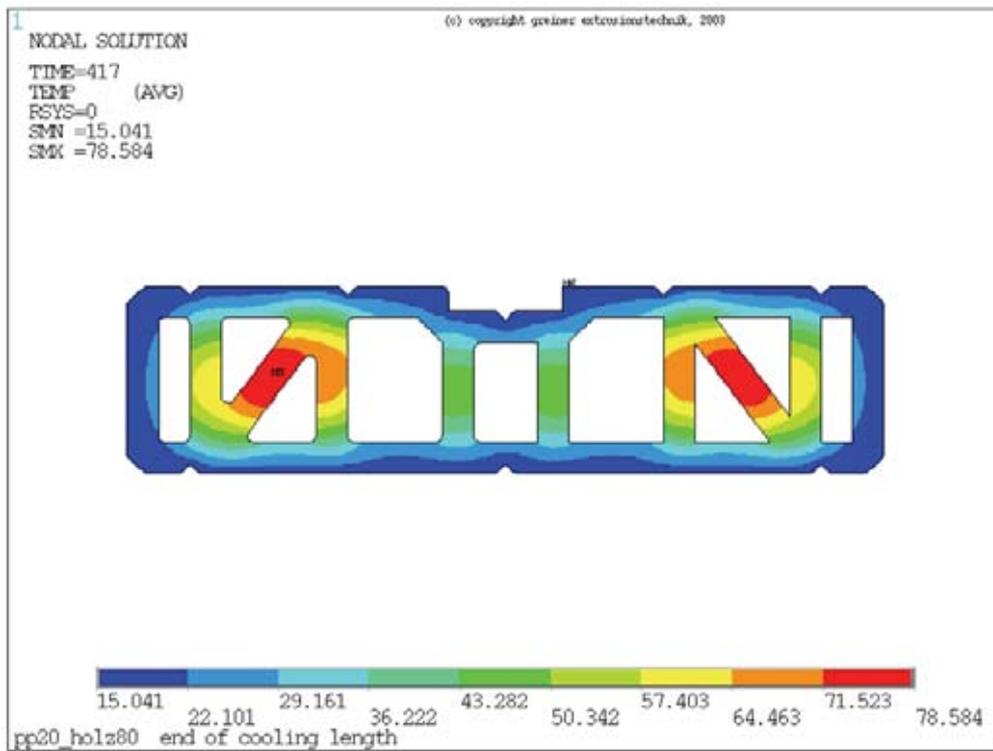
Temperaturprofile











8.4 Werkzeugkonstruktion - Versuchswerkzeug

Die Kühl- Kalibrierstrecke wurde für Ausstoßleistungen bis 300 kg/h dimensioniert, dadurch sollte eine Korrelation mit verschiedenen Ausstoßleistungen zur Profilqualität bzw. -eigenschaften ermittelt werden können. Ebenso ist die Erkenntnis der möglichen Ausstoßleistungen für eine wirtschaftliche Abschätzung von hoher Bedeutung.

Werkzeugaufbau:

- ❖ Extrusiondüse mit integrierter Temperierplatte
 - Der Spaltverlauf in der Düse wird so dimensioniert, dass ein Druckverbrauch von ca. 80 bar erreicht wird, für einen Ausstoßbereich von 150 bis 300 kg/h.
 - Die Temperierplatte muss zur Düse weitgehend thermisch getrennt werden. Durch unterschiedliche Temperaturführung der Temperierplatte soll ein Wandgleiten des Extrudates erwirkt bzw. begünstigt werden.
 - Dornhaltestege müssen so angeordnet werden, dass keine Bindenahtfehler in kritischen Profilmereichen verursacht werden.
 - Zwei Dorne fertigen, sodass Wanddicken von 2,5 bis 6,0mm extrudiert werden können.
- ❖ Trockenkalibrierungseinheit > 2 Stk. a´235mm
 - Die Trockenkalibrierung muss mit einem Zentrier- und Dichtsystem zur Düse ausgeführt werden. Zwischen Düse und TK wird Vakuum angelegt, um die Profiloberfläche besser zu kalibrieren.
 - Die Vakuumschlitze müssen über mehrere Vakuumkammern in Extrusionsrichtung versorgt werden, dadurch soll ein guter Kompromiss zwischen guter Kalibration und möglichst geringer Reibungskraft einstellbar erreicht werden können.

- ❖ Vakuumkühltank mit Rollenkalibrierungen > 3 Stk. a´3m insg. 9m
 - Alle 3 Vakuumkühltanks müssen mit Rollenkalibrierungen ausgeführt werden, dadurch kann die Reibungskraft fast über die gesamte Kalibrierungslänge deutlich reduziert werden. Erwartet wird, dass die Gefahr von Spannungsrisssbildungen im Profil reduziert wird, ebenso soll der Vakuum-Einstellbereich erhöht werden.

8.5 Ergebnisse des Projektes und Schlussfolgerungen

Versuchswerkzeug

Das Versuchswerkzeug wurde voll funktionsfähig fertig entwickelt und es konnten alle gesetzten Ziele erreicht werden. Es steht für Materialversuche zur Verfügung. Der Aufbau und die Ausführungsvarianten vom Versuchswerkzeug ermöglicht ein sehr breites Spektrum für verschiedene Materialsysteme. Die theoretischen Ansätze hinsichtlich Kühl- und Kalibrierstreckenauslegung, konnten schon mehrmals praktisch bestätigt werden. Auch die Druckverbrauchsrechnungen bei der Extrusionsdüse haben sich weitgehend bestätigt, trotz einer relativ großen Unsicherheit von den vorhandenen Stoffdaten. Diese Basisdaten und Erkenntnisse sind insofern von großer Bedeutung, da für neue Profilgeometrien mit unterschiedlichen Ausstoßleistungen wieder eine hohe Trefferquote erwartet werden kann.

Die Extrusionsdüse wurde entsprechend der Konstruktionsvorgabe umgesetzt. Die integrierte Temperierplatte wurde so umgebaut, dass wahlweise mit und ohne gefahren werden kann. Es hat sich herausgestellt, dass abhängig vom verwendeten Polymer und Holzfasergehalt unterschiedliche Übergangsbedingungen von der Düse zur Kalibrierung erforderlich sind.

Versuchsergebnisse

Bisher wurden Versuche mit hochviskosem Polypropylen und Polyethylen mit einem Holzfasergehalt von 30% bis 65% erfolgreich durchgeführt. Es wurden Ausstoßleistungen bis 300 kg/h bzw. 2,2 m/min erreicht. Die erzielte Profilqualität hinsichtlich Maßhaltigkeit ist akzeptabel, die Oberflächenqualität ist stark abhängig vom Materialsystem. Es besteht die Möglichkeit die Oberfläche mit Gleitmitteln zu verbessern, oder durch Änderungen im Bereich der Düse und Temperierplatte. Bei niederviskosen Polymertypen konnten nur Profile mit großer Wandstärke (> 5,0mm) extrudiert werden, bei einem sehr kleinen Prozessfenster -sensibel auf Spannungen.

8.6 Ausblick / Empfehlungen

Die bisher erreichten Ergebnisse mit dem entwickelten Extrusionswerkzeug für mittel- und hochgefüllte Holzfaser-Kunststoffgemischen sind sehr vielversprechend und zeigen ein hohes technisches und wirtschaftliches Potential für verschiedene Profilanwendungen.

Ebenso konnte die Zielsetzung, Materialsysteme mit einem Holzfaseraanteil über 60% prozesssicher zu extrudieren, bestätigt werden.

Die Profiloberfläche kann durch die neu entwickelte Glanz- und Kühlplatten Technologie gut beeinflusst werden. Es ist zum Beispiel möglich einen hohen Oberflächenglanz einzustellen, ebenso kann durch Änderung der Vakuumeinstellung und der Oberflächentemperatur von Kühl- und Glanzplatte der Oberflächenglanz reduziert werden.

Die erarbeiteten Ergebnisse sichern die Voraussetzung, dass Produktionswerkzeuge für komplexe Profilgeometrien hergestellt werden können.

Die konzeptionellen Überlegungen und ebenso die ersten Berechnungen für ein Schwellenprofil -Profil zwischen Bodenplatte und Wänden von einem Fertigteilhaus sind bereits in Bearbeitung. Erste Statische Berechnungen von der TU in Graz bestätigen die Eignung hinsichtlich der erforderlichen Druckfestigkeit. Die geforderte Profilqualität (Oberfläche, Maßtoleranzen) wurde gut erfüllt, ebenso konnte die Prozesssicherheit gewährleistet werden.

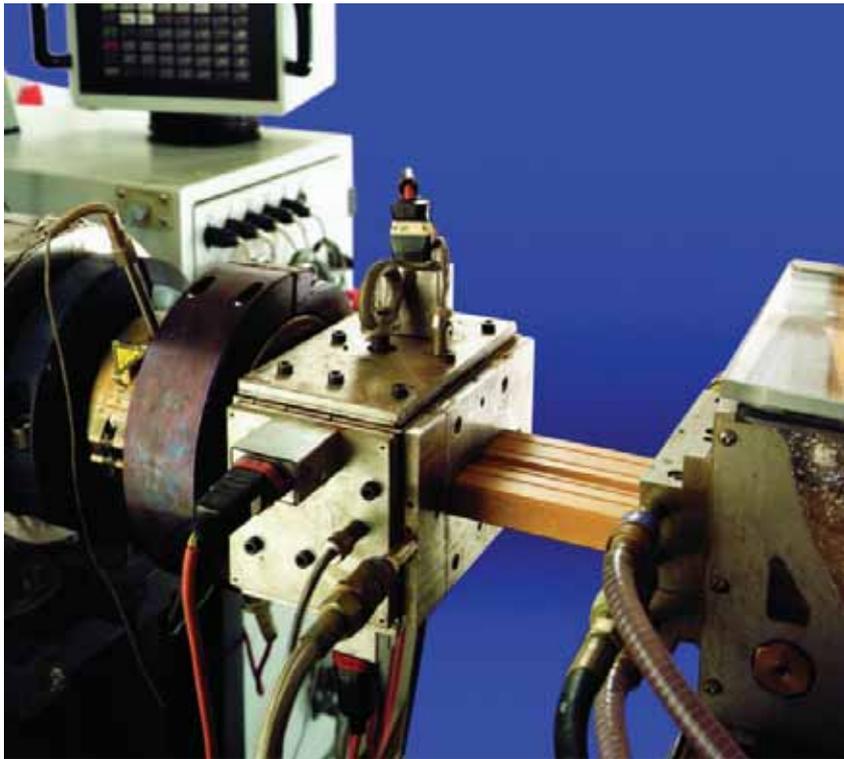


Abb. 108 : Extrusionswerkzeug mit austretendem Profil

9. Extrusionsprofil:

Von einem Projektpartner (GriffnerHaus AG) wurde ein Profil entwickelt („Schwellenprofil“), welches durch seine Form 3 Funktionen erfüllen konnte. So kann es in seiner ursprünglichen Form als Schwelle für die Außenwände (120 mm) eingesetzt werden, durch Abtrennen einer Hohlkammer dagegen als Schwelle für die Innenwände (100 mm).

Durch Herausfräsen einiger Hohlkammern kann es als Schwelle für ein neues Bausystem „United Buildings“ verwendet werden.

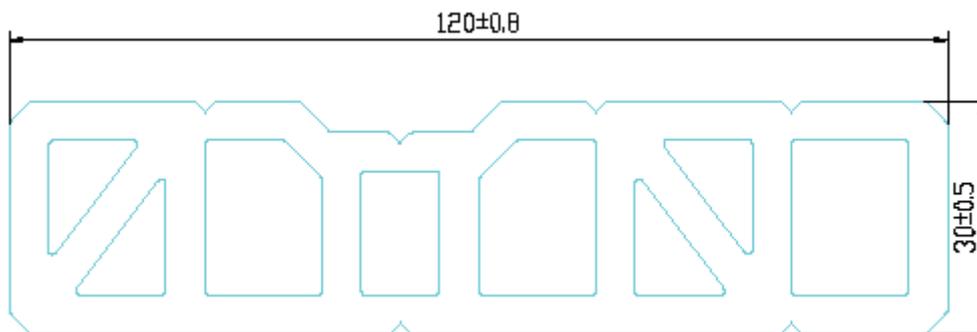


Abb. 109: Konstruktion des „Schwellenprofils“

Mittlerweile wurde in ein Testhaus dieses neue System eingebaut, um die Beständigkeit in einem Dauertest zu überprüfen. Probleme bereitet aber die baurechtliche Zulassung, da es sich um einen „tragenden“ Bauteil handelt.

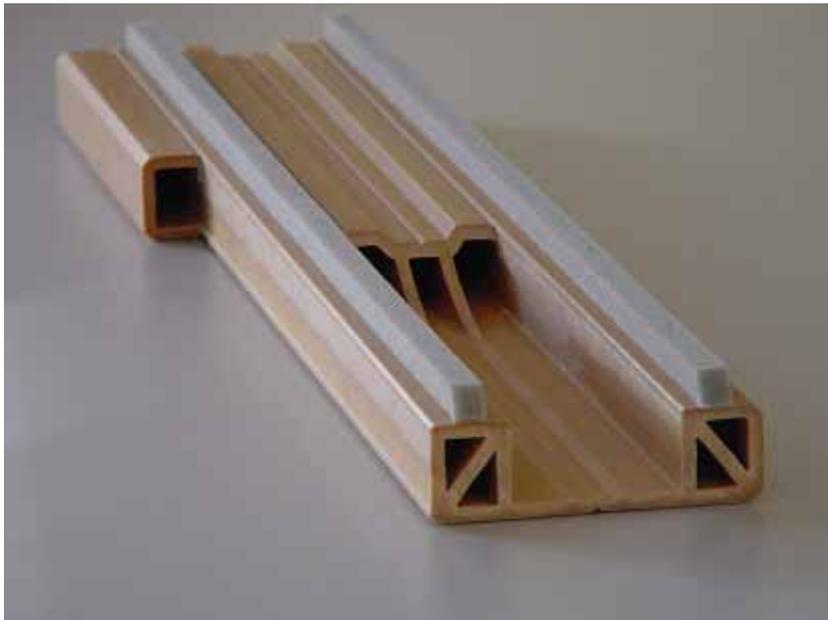


Abb 110: Schwelle ohne Heizelement

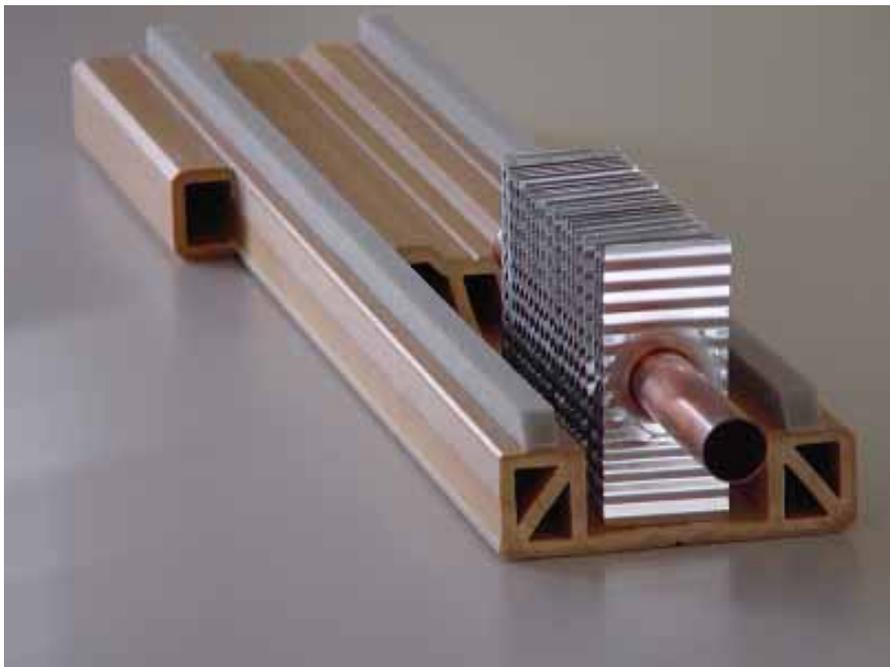


Abb. 111: Schwelle mit Heizelement

10. Zusammenfassung und Ausblick:

Alle im Rahmen des Projektantrages geplanten Projektinhalte und Aktivitäten konnten erfolgreich bearbeitet und abgeschlossen werden. Die enge Zusammenarbeit aller Projektpartner, nämlich der Industriepartner (IFN, Cincinnati, Greiner, Trodat und GriffnerHaus) und der wissenschaftlichen Partnern (Institut für Holzforschung - Boku, JKU - Institut für Polymerwissenschaften und TCKT) führte zu einem Kompetenzaufbau sowohl innerhalb des Projektteams als auch bei allen Projektpartnern.

Es wurden während der Laufzeit des Projektes insgesamt 6 Projektmeetings abgehalten, wobei Wert darauf gelegt wurde, dass diese bei den einzelnen Partnern stattfanden, sodaß alle Beteiligten neben den Projektergebnissen auch die einzelnen Partner kennengelernt haben.

Im Rahmen einer Fachtagung des Kunststoffclusters Oberösterreich mit dem Titel „Entwicklungsneuheiten in der Extrusionstechnik“ wurde das Projekt von Hr. Dr. Hanspeter Mattiscek mehr als 80 fachkundigen Zuhörern vorgestellt (siehe Anhang D).

Entgegen den Ausführungen im Projektantrag beschloß der Projekteinreicher, das Transfercenter für Kunststofftechnik, bereits im Jahre 2003, in eine Faserstoffextrusionslinie (Cincinnati Fiberex T 58 und Greiner Nachfolge) zu investieren, eine Entscheidung, die sich bereits nach sehr kurzer Zeit als richtig erwiesen hat. Neben zahlreichen nationalen und internationalen Aufträgen (z.B. Arabische Emirate, Unternehmen aus Brasilien, Norwegen, Polen, Schweden, Frankreich,...) bearbeitet das TCKT derzeit mehr als 10 Projekte auf dem Gebiet der Faserstoffextrusion.

Alle Projektpartner konnten ein umfangreiches Wissen hinsichtlich Rezeptur-Eigenschafts-Beziehungen, Einfluß der Prozeßbedingungen auf die Eigenschaften von WPC und Werkstoff- und Rohstoffcharakterisierung erwerben.

Leider scheiterte die Implementierung des entwickelten Profiles (Schwelle) an legislativen Hürden („baurechtliche Zulassung“), das Langzeitverhalten wird aber derzeit in einem Musterhaus getestet.

Das TCKT und auch alle anderen Partner werden ihre Aktivitäten im Bereich naturfaserverstärkter Kunststoffe fortsetzen, neben der Extrusion wird auch der Spritzguß als Verarbeitungsverfahren in Betracht gezogen.

Von der Forschungsseite werden die Probleme in nächster Zukunft zu lösen sein, um die breitere Verbreitung von WPC zu ermöglichen:

- Kriechen von WPC, d.h. der irreversiblen Deformation unter Lasteinwirkung,
- UV-Schutz für Außenanwendung bei Polyolefinen als Polymermatrix
- Verminderte Wasseraufnahme
- Verbesserung der Zähigkeit bei gleich bleibender Steifigkeit
- Einfärben von WPC

11. Literatur

- [1] „Die Zehntausend Dollar Idee“; U. Tschimmel; Econ Verlag 1991
- [2] „Naturfasereinsatz in Verbundwerkstoffen in der deutschen Automobilproduktion 1996 bis 2002“; M. Karus, S. Ortmann, D. Vogt; Nova Institut 2004
- [3] “Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen”; M. Svoboda; Dissertation Montanuniversität Leoben; 2003
- [4] „Market Report t Extrudable Wood Composites“, A. Eder 2000
- [5] „Wood plastic composites - Identifying viable opportunites in the west european market - Kurzfassung“; Applied Market Information Group; 2003
- [6] „Faserstoffextrusion - Extrusionsprozeß, Anwendungen und Produkteigenschaften“; E. Sehnal; 3. International Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel 2000
- [7] „Extrusion of Natural Fibre Materials - a Field with New Opportunites“; E. Sehnal; Wood Fibre Polymer Composites Symposium - Applications and Trends; Bordeaux 2003
- [8] Asta Eder BOKU/Kplus 2003
- [9] Applied Market Information Ltd.
- [10] www.megawood.de
- [11] www.fawo-wood.de
- [12] www.fasalex.com
- [13] Asta Eder; 2004

- [14] www.ifa-tulln.ac.at
- [15] AMI-Conference for Wood Plastic Vienna 2004
- [16] “Wood Plastic Composites - Gegenwärtige Marktsituation und Zukunftschancen in der Automobil-, Möbel- und Bauindustrie”; T. Fuchs; Wels 2004
- [17] „Rheologische Charakterisierung hochgefüllter Compounds“; W. Friesenbichler, 17. Leobener Kunststoff-Kolloquium
- [18] „Wood plastic composites“; C. Burgstaller und W. Stadlbauer, Vortrag Borealis Linz

12. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einfluß des Holzgehaltes auf die Eigenschaften und Verwendung von WPC [7]	31
Tabelle 2: Baumarktbereich [9]	36
Tabelle 3: Möbelbereich [9]	37
Tabelle 4: Industriebereich [9]	37
Tabelle 5: USA - Kanada	50
Tabelle 6: Europa	52
Tabelle 7: Fernost - Japan	52
Tabelle 8: Zusammenstellung der verwendeten Polymere	55
Tabelle 9: Mechanische Charakterisierung der verwendeten Polymeren mit Hilfe des Zugversuches (EN ISO 527-1)	57
Tabelle 10: Mechanische Charakterisierung der verwendeten Polymeren mit Hilfe des Biegeversuches (EN ISO 178)	58
Tabelle 11: Mechanische Charakterisierung der verwendeten Polymeren mit Hilfe des Schlagbiegeversuches (EN ISO 179)	58
Tabelle 12: Zusammenstellung der verwendeten Spanarten	61
Tabelle 13: Length weighted length der Länge (L) und der Breite (B) des untersuchten Spanmaterials	74
Tabelle 14: Prozessparameter - Extrusion	75
Tabelle 15: Änderung der LWL durch Scherbeanspruchung im Extrusionsprozess	78
Tabelle 16: Rheologische Daten verschiedener PP-Holz-Compounds	142
Tabelle 17: Thermische Materialdaten für 100% Holz	145

Tabelle 18: Thermische Materialdaten für 100% PP	146
Tabelle 19: Emissivität verschiedener PP-Holz-Compounds	147
Tabelle 20: Rand- und Anfangsbedingungen für die Abkühlsimulation	148
Tabelle 21: Kühlstreckendaten von „Schwelle“ und 490141	148

13. Abbildungsverzeichnis

Abb 1: Radiogehäuse aus Bakelit [1]	17
Abb: 2: WPC-Produktion im Jahr 2000 [4]	25
Abb: 3: Prognose für WPC in Europa für das Jahr 2006 [5]	26
Abb 4: Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Coupling agents auf Basis MAH-gepfropft auf PP	30
Abb. 5: Marktübersicht USA - Hauptanwendung „Decking“ [8]	32
Abb. 6: Marktchancen Europa - Fenster/Türen usw. [8]	33
Abb. 7: Bodendiele mit Extrusionshaut	40
Abb. 8: Zaunfelder in diversen Farben	40
Abb. 9: Wickelhülsen	40
Abb. 10: Hohlkammerprofil für Türen	40
Abb. 11: Zaunpfosten	41
Abb. 12: Vollprofil für diverse Anwendungen	41
Abb. 13: Hohlkantprofil [11]	41
Abb. 14: Innenausbau (Boden, Decke, Wand, ..) Möbel (Leisten, Türen, Verkleidungen, Paneele,...)	41
Abb. 15: Zargenverkleidung (auch Kabelkanäle, Stützstangen, Fixierelemente, usw.)	42
Abb. 16: Fensterbänke	42
Abb. 17: Holz und Fertigteilbau [13]	43
Abb. 18: Automobilinnenteilehersteller [13]	43
Abb. 19: Fensterhersteller [13]	44
Abb. 20: Musikinstrumentenbau [9]	45
Abb. 21: Spielzeugindustrie	45

Abb. 22: Möbelindustrie	46
Abb. 23: Möbelindustrie	46
Abb. 24: Spielzeugindustrie	47
Abb. 25: Spielzeugindustrie	47
Abb. 26: Bestattungsartikel	48
Abb. 27: Schmuck und Dekorteile	48
Abb. 28: Universalprüfkörper gemäß ISO 294	56
Abb. 29: Universalprüfmaschine im Zugversuch	57
Abb 30: Charakterisierung der verwendeten Polymere hinsichtlich ihres rheologischen Verhaltens	59
Abb. 31: Darstellung der verwendeten Holzspäne	66
Abb. 32: Siebanalyse von Tipo CB 20E	67
Abb. 33: Fotos, Umwandlung in ein binäres Bild und automatische Vermessung des Spanmaterials mit der Bildauswertesoftware Scion Image	69
Abb. 34: Entsprechend der beobachteten Spanformen (B) wurde versucht die Spangeometrie in 6 verschiedene Formen einzuteilen.	70
Abb.35: Probenentnahme zur Spangrößencharakterisierung im WPC-Composite	70
Abb. 36: Vergleich zwischen Mittelwert und length weighted length anhand des Histogramms der Breite von Fichtenspänen.	72
Abb. 37: Längen- und Breitenverteilung der Fichtenholzspäne BK 40/90 (A), Tipo CB 15E (B), Tipo CB 35E (C), Lignocel P Super (D) und Lignocel Typ 4 (E)	73
Abb. 38: Spangrößenverteilung in den WPC - Profilen der Gruppe 1 P15.2_001 (A), P15.2_002 (B), P15.2_003 (C), P15.2_004 (D), P15.2_005 (E)	76

Abb.39: Spangrößenverteilung in den WPC - Profilen der Gruppe 2: P15.2_019 (A), P15.2_020 (B), P15.2_021 (C), P15.2_025 (D)	77
Abb.40: Spanlängenverteilung der WPC-Profile der Gruppe 1 (Holzspan BK 40/90, variierende Prozessparameter)	78
Abb.41: Spanlängenverteilung Ausgangsspäne Gruppe 2	79
Abb.42: Spanlängenverteilung Gruppe 2 (variierende Spantypen, Prozessparameter konstant)	79
Abb.43: Änderung der Spangeometrie bei den WPC-Profilen der Gruppe 1	80
Abb.44 und 45: Spangeometrie vor und nach der Extrusion	81
Abb. 46: Häufigkeiten verschiedener Spanformen von Buchen- und Fichtenspänen	83
Abb. 47: Abmessungen und Geometrie der Modellspäne der 5 untersuchten Spansorten	83
Abb. 48: Längen und Breitenverteilungen der Buchenholzspäne La Sole Tipo 1.5E (A), 35 E (B), BM (C) nach der Extrusion.	84
Abb. 49: Abmessungen und Geometrie der Modellspäne der 3 untersuchten Buchenholz-Spansorten nach der Extrusion.	85
Abb. 50: Veränderung der Spangeometrie der drei Buchenholz- spansorten La Sole Tipo 1.5E (A), 35 E (B), BM (C). Schraffierte Säule stellen die Häufigkeiten der Spanform nach der Extrusion dar.	86
Abb. 51: Siebfraktionen der Buchenholzspäne La Sole Tipo 1.5E (A), 35 E (B), BM (C) und der Fichtenholzspäne Egger (D) und Lignocel P-Super (E).	87
Abb. 52: Dünnschnittpräparat eines WPC aus Buchenholz mit Polypropylenmatrix	88
Abb. 53: A) UV-Mikroskopie von einer Referenzprobe. Der Pfeil markiert den UV-Spot für die UV-Absorptionsmessung. Gemessen wurde jeweils in der Mitte der Sekundärwand. B) Die Absorptionsspektren zeigen eine eindeutige Anhebung der Absorption unterhalb von 300 nm.	90

Abb. 54: A) Fluoreszenzaufnahme von Spätholzzellen. Im Extrusionsprozeß dringt die Kunststoffkomponente bis in kleinste Zellhohlräume ein (Pfeil). B) im Bereich von dünnwandigen Frühholzzellen kommt es zu starken Deformationen und Zerstörungen der Zellstruktur.	91
Abb. 55: Konischer Doppelschneckenextruder Fibrex T58 der Firma Cincinnati Extrusion GmbH	93
Abb. 56: Extrusionslinie mit Säge, Abzug, Kalibriertank und Extruder	94
Abb. 57: Einfluß der Polymerart auf die Steifigkeit von WPC am Beispiel Einer Formulierung mit 70% Holzanteil	95
Abb. 58: Einfluß der Polymerart auf die Festigkeit von WPC am Beispiel Einer Formulierung mit 70% Holzanteil	96
Abb. 59: Einfluß der Polymerart auf die Zähigkeit von WPC am Beispiel Einer Formulierung mit 70% Holzanteil	97
Abb. 60: Einfluß der Holzart auf ausgewählte Eigenschaften von WPC Am Beispiel einer Formulierung mit 70% Holzanteil	98
Abb. 61: Einfluß der Holzart auf die Optik von WPC am Beispiel von Extrudierten Hohlkammerprofilen	99
Abb. 62: Einfluß des Rindenanteils auf die Farbe von extrudierten WPC-Hohlkammerprofilen	100
Abb. 63: Einfluß der Form des eingesetzten Holzes auf die Steifigkeit von WPC-Profilen	101
Abb. 64: Einfluß der Form des eingesetzten Holzes auf die Festigkeit von WPC-Profilen	102
Abb. 65: Einfluß der Form des eingesetzten Holzes auf die Schlagzähigkeit Und Wärmeformbeständigkeit von WPC-Profilen	102
Abb. 66: Einfluß der Form des eingesetzten Holzes auf die Optik von WPC-Profilen	103
Abb. 67: Einfluß der Konzentration von Haftvermittler auf ausgewählte Eigenschaften von WPC am Beispiel einer Formulierung mit 70% Holzanteil	104

Abb. 68: Einfluß der Konzentration und der Art des Haftvermittlers (verschiedene Hersteller) auf die Festigkeit von WPC am Beispiel Einer Formulierung mit 70% Holzanteil	105
Abb. 69: Einfluß der Konzentration und der Art des Haftvermittlers (verschiedene Hersteller) auf die Steifigkeit von WPC am Beispiel Einer Formulierung mit 70% Holzanteil	106
Abb. 70: Einfluß der Konzentration und der Art des Haftvermittlers (verschiedene Hersteller) auf die Schlagzähigkeit von WPC am Beispiel Einer Formulierung mit 70% Holzanteil	107
Abb. 71: Vergleich von WPC-Profilen ohne und mit Haftvermittler	108
Abb. 72: Höhenkarten der Profile ohne und mit Haftvermittler	108
Abb. 73: Einfluß des Holzgehaltes auf die Steifigkeit von WPC	109
Abb. 74: Einfluß des Holzgehaltes auf die Festigkeit von WPC	110
Abb. 75: Einfluß des Holzgehaltes auf die Zähigkeit von WPC	110
Abb. 76: Einfluß des Holzgehaltes auf die Steifigkeit von extrudierten WPC-Profilen	111
Abb. 77: Einfluß des Holzgehaltes auf die Wärmeformbeständigkeit von Extrudierten WPC-Profilen	111
Abb. 78: Einfluß der Schneckendrehzahl auf die Steifigkeit von WPC	112
Abb. 79: Einfluß der Schneckendrehzahl auf die Zähigkeit von WPC	113
Abb. 80: Einfluß der Schneckendrehzahl auf die Optik von extrudierten WPC-Profilen	113
Abb. 81: Einfluß des Extruderausstoßes auf die relative Steifigkeit von WPC-Profilen	114
Abb. 82: Einfluß des Extruderausstoßes auf die relative Festigkeit von WPC-Profilen	115
Abb. 83: Schematische Darstellung einer Schlitzkapillare für rheologische Messungen an hochgefüllten Systemen	117
Abb. 84: Krafteintrag bei der Prüfung der Querdruckfestigkeit	119
Abb. 85: Biegefestigkeit R_m , Elastizitätsmodul E_{mod} und Brucharbeit W	119

Abb. 86: Biegefestigkeiten der Profile P15.2_001 - P15.2_007 in Abhängigkeit von der Position im Profil	120
Abb. 87: Relative Biegefestigkeiten der Profile P15.2_001 - P15.2_007 in Abhängigkeit von der Position im Profil	122
Abb. 88: Biege-E-Modul der Profile P15.2_001 bis P15.2_007 in Abhängigkeit von der Position im Profil	123
Abb. 89: Relativer Unterschied der Biegesteifigkeit der Profile P15.2_001 bis P15.2_007 in Abhängigkeit von der Position im Profil	123
Abb. 90: Brucharbeit der Profile P15.2_001 - P15.2_007 in Abhängigkeit von der Position im Profil	124
Abb. 91: Relativer Unterschied der Bruchenergien der Profile P15.2_001 - P15.2_007 in Abhängigkeit von der Position im Profil	125
Abb. 92: Biegefestigkeiten der Profile P15.2_019 - P15.2_025 in Abhängigkeit von der Position im Profil	126
Abb. 93: Relative Biegefestigkeiten der Profile P15.2_019 - P15.2_025 in Abhängigkeit von der Position im Profil	126
Abb. 94: Biegesteifigkeiten der Profile P15.2_019 bis P15.2_025 in Abhängigkeit von der Position im Profil.	127
Abb. 95: Relative Biegesteifigkeiten der Profile P15.2_019 bis P15.2_025 In Abhängigkeit von der Position im Profil	127
Abb. 96: Brucharbeit der Profile P15.2_019 - P15.2_025 in Abhängigkeit von der Position im Profil	128
Abb. 97: Relativer Unterschied der Brucharbeiten der Profile P15.2_019 - P15.2_025 in Abhängigkeit von der Position im Profil	130
Abb. 98: Querdruckfestigkeiten der Profile P15.2_001 - P15.2_021	130
Abb. 99: Kriechverhalten der Profile P15.2_001, bzw. P15.2_019 bis 021 nach dem Erreichender aufgebracht Kraft von ca. 25% der Querdruckfestigkeit.	130

Abb. 100: Kriechgeschwindigkeit der Profile basierend auf der Kriechverformung Im Zeitraum von 40 bis 60 h des Langzeitversuchs	132
Abb. 101: Adaptierte Zwangsdosierlösung aus der Kunststoffverarbeitung zur Verifizierung der Grundannahmen und Ermittlung der wichtigsten Konstruktionsdaten	135
Abb. 102: Prototypenanlage	136
Abb. 103: Extrusionsline für die direkte Naturfaserextrusion auf der K 2004	137
Abb. 104: Viskosität als Funktion der Schergeschwindigkeit für verschiedene PP-Holz-Compounds (Daten vom Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik)	141
Abb. 105: Druckberechnung bei „Schwelle“	143
Abb. 106: Geschwindigkeitsverteilung bei 490141	144
Abb. 107: Profil „Schwelle“	149
Abb. 108: Extrusionswerkzeug mit austretendem Profil	159
Abb. 109: Konstruktion des „Schwellenprofils“	160
Abb. 110: Schwelle ohne Heizelement	161
Abb. 111: Schwelle mit Heizelement	161