Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

FENAFA-Netzwerkverbund - Teilvorhaben 5: Entwicklung von Dosiersystemen und Compounderkonfigurationen für optimierte Compoundierprozesse mit ganzpflanzenbasierten Naturfasern

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik	**22024308**
Technische Universität Chemnitz	**22024508**
ULT AG	**22005412**

Laufzeit:

01.06.09 bis 31.05.14

Datum der Veröffentlichung: 18.03.2015

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1 Ziele 3
1.1 Aufgabenstellung 3
1.2 Stand der Technik 5
1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 7
2 Ergebnisse 9
2.1 Erzielte Ergebnisse 9
2.2 Verwertung 32
2.3 Erkenntnisse von Dritten 33
2.4 Veröffentlichungen 34

1 Ziele

1.1 Aufgabenstellung

Die Zielstellung des Teilprojektes 5 war die Entwicklung eines neuen Dosierkonzepts für schwer dosierbare Naturfasern und eine Optimierung der Compoundierung in einem Doppelschneckenextruder zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von naturfasergefüllten Kunststoffen. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf der Verarbeitung von FENAFA-Faserstoffen aus Ganzpflanzen Flachs und Hanf. Für die Produktion von Naturfasercompounds mit einer reproduzierbaren Qualität ist sowohl eine gleichbleibende Güte der Einzelkomponenten als auch eine kontinuierliche und homogene Faserzuführung in den Aktionsraum der Compoundierschnecken entscheidend. Dabei ist eine aufwendige Aufbereitung des Faserguts in einem Pelletierungsprozess unerwünscht, da sie zu Erhöhung der Produktkosten führt. Neben der Dosierungsproblematik wurde der Prozess der Compoundierung von naturfaserverstärkten Kunststoffen auf Zweischneckenextrudern eingehend untersucht. Ziel war hier eine Verbesserung der Faserfilamentisierung und -dispergierung im Matrixmaterial bei minimaler Faserschädigung. Dazu wurden Versuchsreihen mit verschiedenen Schnecken- und Compounderkonfigurationen durchgeführt und neue Schneckenelemente getestet. Darüber hinaus wurde auch die Thematik der Anwendung von nicht getrockneten oder extra befeuchteten Fasern beleuchtet. Das bringt zwei positive Effekte mit sich. Einerseits wird dadurch der energieintensive Prozessschritt der Faservortrocknung eingespart und andererseits die Faserfilamentisierung verbessert.

Folgende übergeordnete Arbeitspunkte wurden im Rahmen des Teilprojekts 5 bearbeitet:

- Entwicklung einer universalen Faserdosiervorrichtung für verschiedene Naturfasern
- Verbesserung der Dispergierung und Homogeniesierung der Naturfaser in der Kunststoffmatrix bei einer schonenden Verarbeitung
- Untersuchung neuer Schnecken- und Compounderkonfigurationen optimiert für Naturfasercompounds
- Entwicklung von NFK-Compounds mit verbesserten mechanischen und spritzgießtechnischen Eigenschaften

In **Tabelle 1** ist der detaillierte Arbeitsplan des Vorhabens dargestellt. Nach einer umfangreichen Literaturrecherche wurde eine Analyse der Dosierungsmöglichkeiten von konventioneller Technik mittels Praxistests durchgeführt. Hierfür standen die FENAFA-Naturfaserstoffe von den Netzwerkpartnern in Teilprojekten 2 und 3 zur Verfügung. Ziel dieser Untersuchung war die Erkennung der Defizite herkömmlicher Dosierungstechnik in Abhängigkeit von der jeweiligen Fasersorte und -qualität.

Tabelle 1 Übersicht der Arbeitspakete des Teilprojekts 5

Arbeitspakete	Beschreibung
AP1	Literatur- und Patentrecherche zu Wirkprinzipien für die Dosierung von schlecht rieselfähigen Materialien und Compounderkonfigurationen für die Verarbeitung von Naturfasermaterialien
AP2	Grundlagenuntersuchungen zur homogenen Dosierung von schwer dosierbaren losen Naturfasermaterialien
AP3	Entwicklung neuer Dosierkonzepte für schlecht rieselfähige Naturfasern
AP4	Grundlagenuntersuchungen zur Funktion und Wirkungsweise verschiedener Schneckenelemente und -konfigurationen für eine Verarbeitung von Naturfasercompounds
AP5	Entwicklung von Schneckenelementen und -konfigurationen für eine schonende homogene Compoundierung von Naturfasercompounds
AP6	Konstruktive Umsetzung der neuen Dosierkonzeption und Durchführung von Dosierversuchen verschiedener Fasermaterialien
AP7	Integration von modularen Funktionselementen für eine Optimierung der Dosieranlage für unterschiedliche Naturfasermaterialien
AP8	Aufbau verschiedener Schneckenkonfigurationen und Durchführung von Compoundierversuchen
AP9	Werkstoffmechanische Charakterisierung der hergestellten Compounds, Untersuchen der homogenen Verteilung, Faserschädigung, Faser-Matrix-Bindung
AP10	Valildierung volumetrischer Faserdosierung
AP11	Konzeption automatisierter Dosierer-Beschickung
AP12	Konstruktion gravimetrischer Universaldosierung
AP13	Entwicklung Umsetzung des Steuerungskonzeptes
AP14	In-Line-Vakuumentgasung von feuchten Naturfasern
AP15	NFK-Compounds mit verbesserten Eigenschaften
AP16	Formfüllstudien in vorhandenen Versuchswerkzeugen
AP17	Formfüllstudien in vorhandenen Versuchswerkzeugen

Bei der Fasersorte „TechnoFlachs“ ist die Anwendung von konventioneller Technik unter Einhaltung bestimmter Bedingungen möglich. Ein großes Defizit dieser Fasersorte ist eine inhomogene Faserlänge, die die Kontinuität des Dosierprozesses stört. Diese Problematik, d. h. Erzielung einer homogenen, exakt geschnittenen Faser mit einer Reduktion der Faserüberlänge, wurde im Teilprojekt 2 bearbeitet. Während der ersten Tests wurde ebenso die Fasersorte „Hanfkonservat“ untersucht. Diese Faser zeichnet sich durch niedrige Schüttdichte, fehlende Rieselfähigkeit, sehr dünne und lange Fasern aus. Die Dosierbarkeit dieser Fasersorte war mit herkömmlichen Dosieranlagen nicht realisierbar, da sich durch die Brückenbildung und das Verhaken der Fasern ineinander Unregelmäßigkeiten im Dosierprozess einstellten, die eine kontinuierliche Prozessführung beim Compoundieren behinderten.

Zum Ende der ersten Projektphase wurde ein neuartiges Dosierungskonzept, das auf aerodynamischen Wirkungsprinzipien basiert, entwickelt und in Form eines Prüfstandes bautechnisch umgesetzt. Die entstandene Erstkonstruktion des Universaldosierers wurde bei der Compoundierung von verschiedenen Naturfasermaterialien erfolgreich getestet. Das entwickelte Dosierverfahren und die zugehörige Anlagenkonfiguration wurden patenrechtlich geschützt. In der zweiten Phase des Projektes folgte die Optimierung der Anlage, wie z. B. Umstellung vom volumetrischen auf gravimetrisches Dosierungsprinzip, Entwurf automatisierter Beschickung und Umkonstruktion für einen kompakteren Aufbau der prototypischen Anlage. Ferner wurde eine konstruktive Anpassung der Seitenzuführung des Compounders vorgenommen, damit die zu dosierenden Naturfasern in den Aktionsraum der Compoudierschnecken gefördert werden können.

Bei der Entwicklung von einsatzangepassten NFK-Spritzgießcompounds wurden verschiedene Schneckenkonfiguration und deren Einfluss auf die Compoundeigenschaften getestet. Anschließend wurde eine optimierte Schneckenkonfiguration erarbeitet. Parallel wurden mehrere NFK-Compounds mit verbesserten mechanischen und spritzgießtechnischen Eigenschaften durch Zugabe verschiedener Additive und Modifikatoren entwickelt. Insgesamt wurden nahezu 300 Materialkombinationen mit Naturfaserfüllstoff getestet. Einige Rezepturen zeigten Potenzial zur deutlichen Verbesserung der Fließfähigkeit und der Schlagzähigkeit der naturfaserverstärkten Kunststoffe. Allerdings wurde auch große Anzahl an Varianten (wie z. B. konventionelle Fließmittel verschiedener Hersteller, Matrixkunststoffe mit erhöhter Schlagzähigkeit) getestet, die im Ergebnis zu keiner Verbesserung der Verarbeitungs- oder Materialeigenschaften führten. Sehr gute Ergebnisse in der Modifizierung der NFK-Eigenschaften wurden mit Zugabe von CRF-Konzentraten und TPE-Blends erzielt.

1.2 Stand der Technik

Die Dosierung von Naturfasern stellte sich aufgrund materialspezifischer Beschaffenheiten dieser Stoffe wie Neigung zur Selbstkompaktierung und Brückenbildung in modernen Förder- und Dosierungssystemen als erhebliches Problem heraus. Konventionelle auf dem Markt erhältliche Dosieranlagen sind für nicht rieselfähige Naturfasern kaum geeignet, um reproduzierbare Prozessführung bei wirtschaftlich sinnvollen Stundenleistugen zu gewährleisten. Sogar die mit einem paddelmassierten flexiblen Trog ausgestattete Dosiereinrichtungen, die eine gleichmäßige gravimetrische oder auch volumetrische Dosierung von schwer dosierbaren Fasermaterialien erlaubt, stößen bei Naturfasern oft an ihre Grenzen. Zudem gestaltet sich auch der Einzug der Fasern in den Extruder sehr schwierig, da sich das Fasergut über den Einzugsschnecken anhäuft und nur sehr ungleichmäßig eingezogen wird. Auch die in den Patenten DE 2847494 C2 und DE 3031201 C2 beschriebene Lösungen mit einem Stopfwerk leistet keine gute Abhilfe. Eine weitere technische Variante zur Dosierung von schwer rieselfähigen Naturfasern, ist die Umformung des losen Fasermaterials in eine geordnete oder rieselfähige Struktur, wie bspw. Faserbänder, Kardenband oder Pellets. Dabei ist allerdings zum einen ein weiterer sehr

aufwendiger Verfahrensschritt und zum anderen eine „scharfe“ Schneckenkonfiguration mit einem hohen Energieeintrag zum Aufbrechen des Pellets und Dispergieren der Fasern in der Matrix notwendig, was zu einer großen Scherbelastung und unvermeidlichen Schädigung der Naturfasern führt. Alternative Verfahren, wie z. B. Pull-Drill-Verfahren zur Herstellung eines Langfasergranulats, konnten sich aus wirtschaftlichen Gründen nicht in der Serienfertigung durchsetzen.

Die Compoundierung von Naturfasern entwickelte sich seit der Einführung von Naturfaserspritzgieß- und Extrusionsverfahren zu einem eigenständigen Innovationsbereich. Mit einem kämmenden Paralleldoppelschneckenextruder können verschiedene Verfahrensschritte (wie Einzug, Kompression, Mischung, Entgasung, Austrag) mit unterschiedlichsten Schneckenelementen umgesetzt werden. Die Förderwirkung beruht hierbei auf dem Prinzip der Zwangsförderung. Die abtreibende Flanke der einen Schnecke übergibt die Schmelze im Zwickelbereich der auftreibenden Flanke der anderen Schnecke. Hierdurch kommt es immer wieder zu Strömungsumlagerungen und zu Scherung des Materials. Dabei weisen die dichtkämmenden Schneckenelemente selbstreinigende Eigenschaften auf.

Neben dem kämmenden Doppelschneckenextruder wurden auch Untersuchungen mit einer an der TU Chemnitz im Rahmen eines AiF-Projekts entwickelten nicht kämmenden Schnecke (nach Patent DE201110054409) bei der Compoundierung von Naturfasern durchgeführt. Bei diesem Prinzip sind die bei den kämmenden Schnecken auftretenden örtlichen thermischen Spitzen sowohl in den Knet- und Mischzonen als auch während der Strömungsumlagerungen im Zwickelbereich nahezu ausgeschlossen. Dadurch ist die Wirkung der Zwangsförderung stark minimiert und die Förderung nähert sich dem Prinzip zwei nebeneinander liegenden Einzelschnecken an, wobei die Materialübergabe von einer Schnecke zu der anderen trotzdem erfolgt und so die Mischwirkung vorliegt. In der **Abbildung 1** sind die zwei Prinzipien mit kämmenden oder nicht kämmenden Schnecken gegenübergestellt.

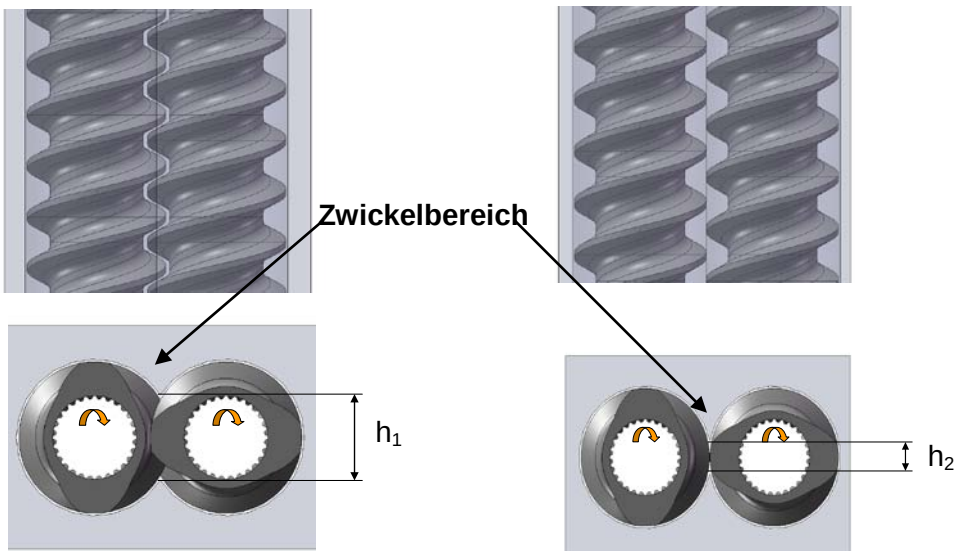


Abbildung 1: Paralleldoppelschneckenextruder: kämmend (links) und nicht kämmend (rechts)

Die Compoundierungsschnecken sind nach dem Stand der Technik aus Standard-, Förder-, Knet- und Mischelementen mit den unterschiedlichsten geometrischen Abmaßen zusammengesetzt. Verschiedene auf dem Markt vorhandene Sonderelemente fokussieren eine Verbesserung der Dispergierung des Füllstoffs und Homogenisierung der Schmelze, insbesondere jedoch der Vermeidung von Faserschädigungen durch thermische Spitzen in den Scher- und Mischbereichen.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Entwicklung von NFK-Compounds mit verbesserten mechanischen und spritzgießtechnischen Eigenschaften wurden unterschiedlichen Additive und Modifikatoren verwendet. Zahlreiche Literaturquellen weisen auf verbesserte Faser-Matrix-Haftung unter Anwendung eines Haftvermittlers auf MSA-Basis hin, was schließlich in einer Erhöhung der mechanischen Eigenschaften von naturfaserverstärkten Kunststoffen resultiert. Im Laufe des Projektes durchgeführte Recherchen ergaben Literaturquellen[1,2], die einen positiven Effekt auf Schlagzähigkeit bei WPC unter Anwendung von PP-TPE-Blends beschreiben.

1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Teilvorhaben 5 bildet im Fenafa-Netzwerk eine Schnittstelle zwischen der Erzeugung von Naturfaserstoffen und der Verarbeitung zum Endprodukt im Spritzgießverfahren (siehe **Abbildung 5**). So kamen neben den kommerziell erhältlichen Holzfasern auch neuartige Flachs- (TechnoFlachs) und Hanffaserstoffen (Hanfkonservat) auf der Ganzpflanzenbasis. Die unterschiedlichen Ausführungen des TechnoFlachs wurden im Teilprojekt 2 „Serienfähige Konzepte zum Trennen und Schneiden sowie zielgerichteten Reinigung und Konditionierung für die Gewinnung von ganzpflanzenbasiertem Kurzfasermaterial als Naturfaserrohstoff für Fließpress- und Spritzgießverfahren“ hergestellt. Die Hanfkonservat-Faserstoffe stammen aus dem Teilprojekt 3 „Zielgerichtete Weiterentwicklung und Anpassung der Verfahrensschritte zur Bereitstellung und Konditionierung von Naturfaserkonservat für den Einsatz in Verbundwerkstoffen (Schwerpunkt: Hanf)“.

Dank der engen Zusammenarbeit aller involvierter Partner konnten anhand der gewonnen Erkenntnisse aus der Verarbeitung der Faser im Compoundierprozess und deren resultierenden mechanischen Eigenschaften Rückschlüsse zur notwendigen Optimierung der Aufbereitung und Qualität des Faserstoffes gezogen werden. Zudem konnten die hier gewonnenen Erkenntnisse, entwickelte Dosiertechnologie und Dosiergerät auch im Teilvorhaben 9 „IMC basierte Technologien für den Einsatz von Naturfasern in innovativen Spritzgießbauteilen am Beispiel von Transportsystemen“ für die Anpassung von Schneckenkonfigurationen und Materialrezepturen sowie für die Herstellung von

[1] Yeh, S. K.; Kim, J. K..; Gupta R. K.: Synergistic Effect of Coupling Agents on Polypropylene-Based Wood-Plastic Composites; J. Appl. Polym. Sci. 2013

[2] Kim, J. K.; Pal, K.: Recent Advances in the Processing of Wood-Plastic Composites - Effect of Compatibilizers in WPC Composites; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

Spritzgießbauteilen im Teilprojekt 6 „Neuartige Bauteilkonzepte unter Nutzung von Holzfaserwerkstoffen mit Thermoplastmatrix in serientauglichen Verfahren“ genutzt werden, sodass insgesamt ein deutlicher Fortschritt erzielt wurde.

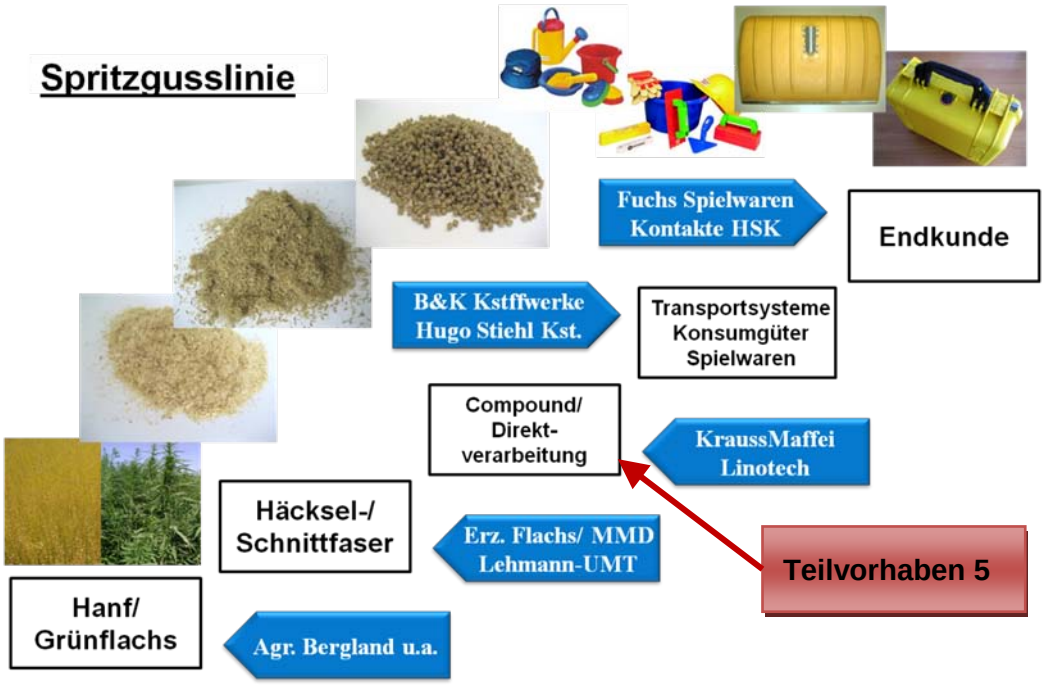


Abbildung 2: Teilvorhaben 5 als Schnittstelle zwischen Faser- und Produkherstellung

Am Ende der ersten Projektphase wurde erfolgreich eine Lösung für die Dosierung von schwerdosierbaren Fasern entwickelt. Für die weitere Entwicklung, den Nachweis der Reproduzierbarkeit und die Erhöhung der Chancen für die Markteinführung des neuentwickelten Dosier-Verfahrens ist ein neuer Industriepartner ULT AG in das Teilprojekt eingestiegen. Die Firma ULT AG ist Entwickler und Hersteller von Absaug-, Filter-, Aufbereitungs- und Förderanlagen. Diese Kernkompetenzen unterstützten die Weiterentwicklung und optimierte Auslegung des Dosier-Systems. Dabei waren die Erhöhung der Durchsatzleistung, die Umsetzung des gravimetrischen Prinzips, ein kompakter Aufbau mit einer Gewichtseinsparung und einer Minimierung der Staubbelastung von großem Interesse. Der Netzwerkpartner KraussMaffei Technologies GmbH leistete projektbegleitend durch wertvolle Hinweise und Impulse einen Beitrag zum Gelingen des Vorhabens.

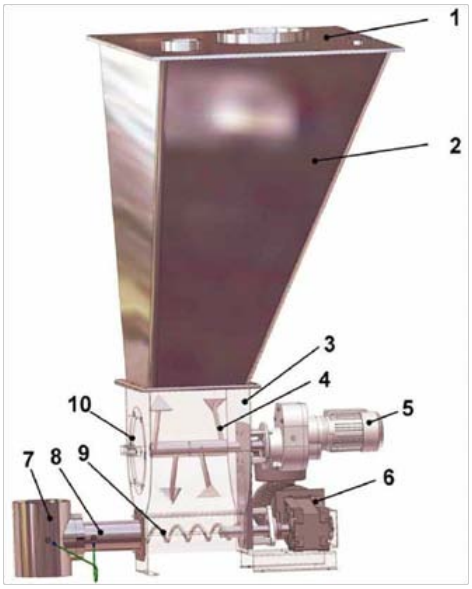
2 Ergebnisse

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 Dosierung von Naturfasern mittels Rührwerksdosierern

Bei den Untersuchungen kamen drei Baugrößen von Rührwerksdosieren mit speziellen Spiralförderschnecken der Fa. Brabender DSR 28, DSR 67 und DSR 103 zum Einsatz, davon die kleinste Baugröße testete TU Chemnitz und die zwei größeren Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik. Im Einzelnen wurden zunächst folgende Faserstoffe untersucht (siehe **Abbildung 3** und **Abbildung 4**):

- im Extruder 1-mal und 2-mal aufgeschlossene Holzfasern (von der Fa. Lehmann-UMT),
- Holzfasergemisch Fichte 50/Kiefer 50 und Hanfkonservat (vom Leibniz-Institut ATB),
- TechnoFlachs 10 mm Länge (von Erzgebirgschen Flachs GmbH und Mühlenmontagen Dresden GmbH).



1. Behälterdeckel
2. Behälter
3. Rührwerkstrog
4. Rührwerk
5. Antriebsmotor Rührwerk
6. Antriebsmotor Schnecke
7. Vertikaler Auslauf
8. Schneckenrohr
9. Spiralschnecke
10. Reinigungsöffnung (opt.)

Abbildung 3: Prinzipieller Aufbau der eingesetzten Dosiertechnik der Fa. Brabender

Abbildung 4: Verschiedene Faserstoffe (v. l. n. r.: Hanfkonservat, TechnoFlachs, Holzfasergemisch)

Die Fasern wurden innerhalb von 10 Minuten vearbeitet und alle 60 Sekunden wurde ein Messpunkt aufgenommen. Dies wurde für 10%, 50% und 90% der maximalen

Schneckendrehzahl des jeweiligen Dosierers durchgeführt. Die Untersuchungen mit Dosierer DSR 28 zeigten, dass nur Faservariante TechnoFlachs mit dieser Anlage dosierbar ist. Bei den restlichen Faservarianten gestaltete sich der Dosierungsprozess sehr problematisch. Die Untersuchungen an größeren Dosieranlagen ergaben folgende Ergebnisse:

- Für die aufgeschlossenen Holzfasern (1x im Extruder aufgeschlossen) konnte ein maximaler konstanter Durchsatz von 27,4 kg/h bei 90% der maximalen Drehzahl mittels DSR 103 erreicht werden.
- Bei der kleineren Dosierung DSR67 ist deutlich zu erkennen, dass diese für die Laborverarbeitung mit den Stundendurchsätzen von bis zu 30 kg NFK-Compound sehr gut geeignet ist, allerdings im Industriemaßstab trotzt der beachtlichen Größe der Dosierschnecke nicht ausreicht, um iindustrierelevante Mengen Fasermaterial zu verarbeiten.

Die detaillierte Darstellung der erreichten Durchsätze zeigt **Abbildung 5**. Das Material enthielt eine Mischung aus zum einen groben und zum anderen sehr feinen Anteilen, was zur Verhakung der Fasern untereinander und damit zur Herabsetzung des Schüttgewichtes führte. Die Holzfasern, welche zum Faseraufschluss zweimal den Extruder passierten, erlaubten deutlich höhere Durchsätze bei der Faserdosierung (siehe **Abbildung 6**). Der maximal mögliche Faserdurchsatz liegt hier bei ca. 130 kg/h und ist somit industriekompatibel. Die Fasern werden durch den zweiten Extruderlauf deutlich besser aufgeschlossen und Grobanteile minimiert. Somit ist neben der Durchsatzerhöhung auch eine wesentlich konstantere Dosierung möglich.

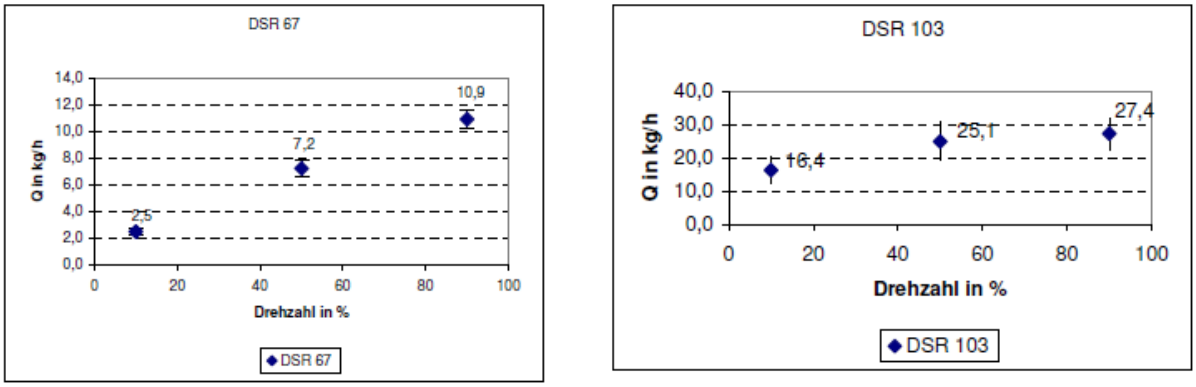


Abbildung 5: Förderleistung des DSR 67 und DSR 103 mit 1-mal aufgeschlossenen Holzfasern

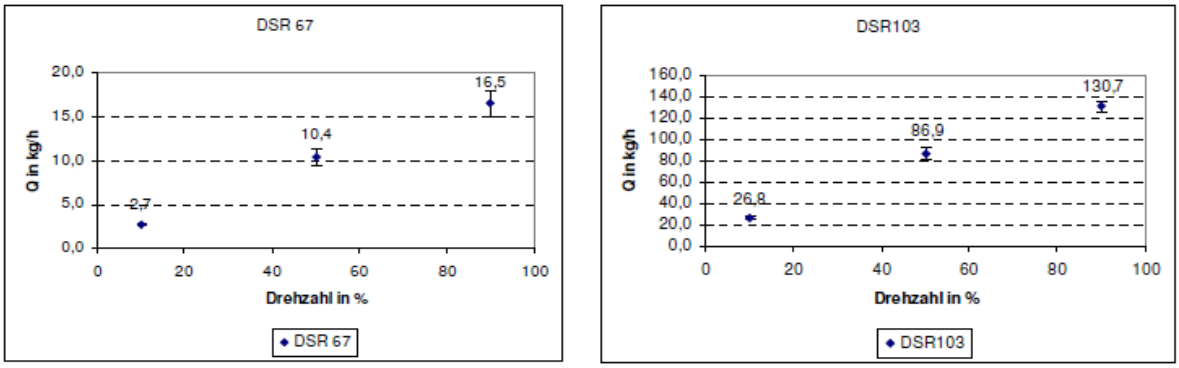


Abbildung 6: Förderleistung des DSR 67 und DSR 103 mit 2-mal aufgeschlossenen Holzfasern

Das untersuchte Holzfasergemisch (Fichte 50%/ Kiefer 50%) von Leibniz-Institut ATB zeigte ähnliches Verarbeitungverhalten wie der 1-mal aufgeschlossene Holzfaserstoff von Lehmann-UMT und lag ebenfalls unter 30 kg/h Maximalförderleistung bei den eingesetzten Dosieranlagen (siehe **Abbildung 7**). Es handelt sich hierbei um sehr fein aufgeschlossene Fasern, welche allerdings wollige Klumpen bilden, die stark zusammenhängen und nicht rieselfähig sind.

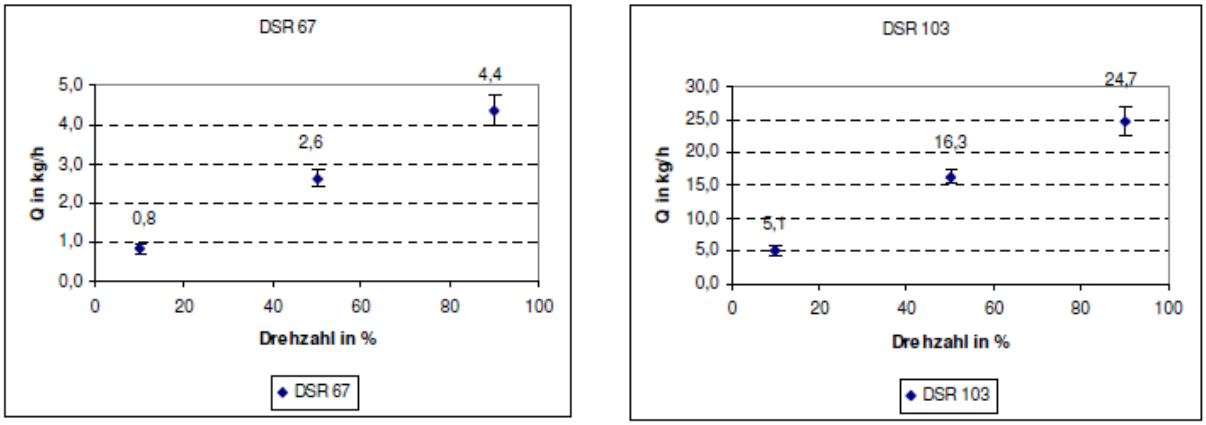


Abbildung 7: Förderleistung des DSR 67 und DSR 103 mit dem Holzfasergemisch

Das von ATB hergestellte Hanfkonservat wurde lediglich ruhend atmosphärengetrocknet. Diese vereinfachte Methode führte dazu, dass sich die Fasern nicht so stark aufbauschen und weniger ineinander verhaken. Der Maximaldurchsatz der Dosieranlage DSR 67 liegt hier bei 16 kg/h. Mit dem DSR 103 konnten sogar 118 kg/h dosiert werden (siehe **Abbildung 8**).

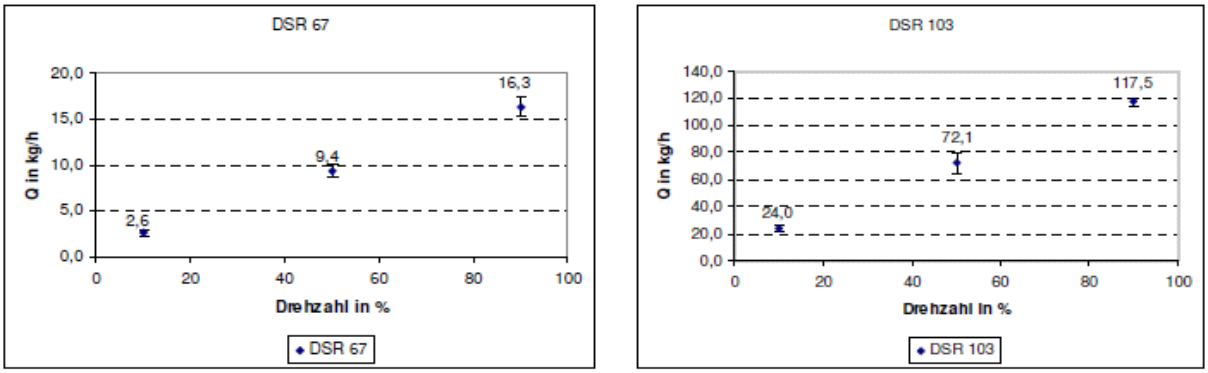


Abbildung 8: Förderleistung des DSR 67 und DSR 103 mit dem Hanfkonservat

Der von ErzFlachs/MMD bereitgestellte TechnoFlachs in einer Ausgangslänge von 10 mm ist im Unterschied zu den oben beschriebenen Faserstoffen gut rieselfähig. Eine Dosierung in gewünschter Menge ist optimal realisierbar. So konnte mit DSR 103 ein Durchsatz von 234 kg/h erreicht werden. Dies ist ein in der Industrie durchaus üblicher Durchsatz und somit auf industrielle Prozesse direkt übertragbar (siehe **Abbildung 9**).

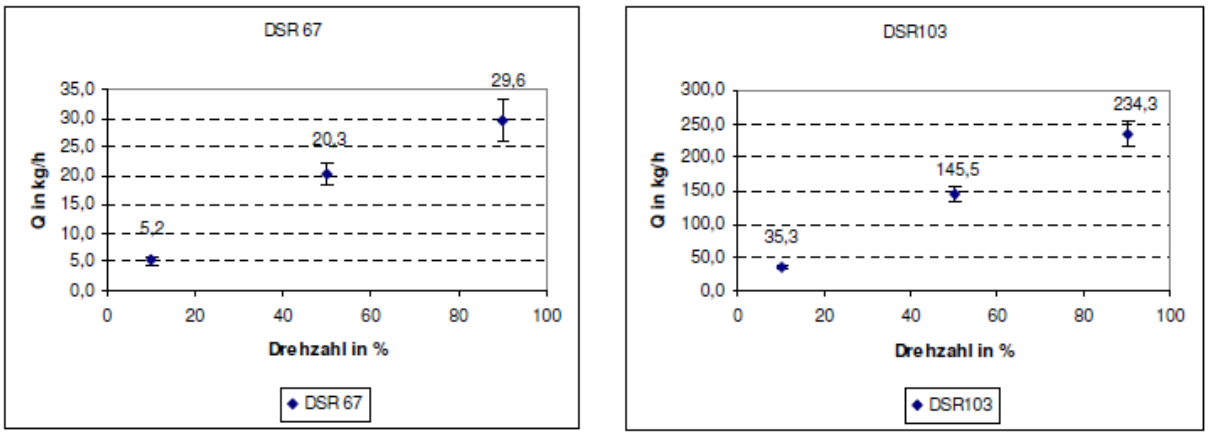


Abbildung 9: Förderleistung des DSR 67 und DSR 103 mit dem TechnoFlachs 10 mm

Diese Untersuchungen ergaben, dass nur Faservariante TechnoFlachs problemlos mit konventionellen Rührwerkdosierern verschiedener Baugröße dosierbar ist. Anhand dieser Erkenntnisse bestätigte sich, dass für Fasermaterialien mit niedriger Schüttdichte und schlechter Rieselfähigkeit keine der gestesteten herkömmlichen Dosieranlagen geeignet ist.

Darüber hinaus wurde eine bestehende Technologie, welche für die Glasfaserverarbeitung Stand der Technik darstellt, erprobt und für Naturfasern weiter angepasst. Diese Methode basiert auf der Verwendung von Naturfasern in Form eines Rovings oder einer Packschnur, die dem Compounder direkt zugeführt wird (siehe **Abbildung 10**).

Abbildung 10: Einzug von Naturfaser-Rovings in den Doppelschneckenextruder

Die Faserdosierung wird gravimetrisch überwacht und der Masseanteil an Naturfasern im Compound über die Schneckendrehzahl des Compoundierextruders geregelt. Da Glasfaser sehr sprödes Verhalten aufweist, wird Roving nach dem Einzug in die Compoundiermaschine durch die Scherkräfte gekürzt. Im Unterschied hierzu wickelt sich das Naturfaser-Roving um die Schneckenelemente, was zu einer Überlastung und anschließendem Ausfall der Compoundiermaschine führen kann. Der Einsatz von zusätzlichen Scherelementen im Einzugsbereich behebt dieses Problem, führt allerdings zu unerwünschter Erhöhung der Scherung und dadurch zur starken Einkürzung der Faserlänge sowie Überhitzung der Schmelze. Obwohl die Verwendung von Naturfaserovings logistische Vorteile beim Materialtransport und eine vereinfachte Dosierung bietet, kann ein Halbzeug

dierser Art nur über textile Verarbeitungsstufen erzeugt werden, was eine Erhöhung der Materialkosten nach sich zieht. Aus diesen Gründen wurde der beschriebene Lösungsansatz nicht weiterverfolgt.

Das Fraunhofer IWM verfügt eine eigens entwickelte Bandfördereinrichtung für die Zufuhr von sperrigen Fasern in den Extruder (siehe **Abbildung 11**), die in Kombination mit der Rovingverarbeitung über einen speziellen Schneidkopf besonders vorteilhaft ist. Zum Test an dieser Anlage kamen vorzugsweise Viskosestapelfasern/-kurzschnittfasern (siehe **Abbildung 12**), die sonst in den Extruder kaum zugeführt werden können. Die Viskosefasern (CRF) wurden innerhalb des Projektes als eine Modifikationsmöglichkeit zur Erhöhung der Schlagzähigkeit von naturfaserverstärkten Kunststoffen untersucht. Aus diesen Untersuchungen resultierte die Entwicklung von CRF-Konzentraten. Diese Variante der Schlagzähigkeitsmodifizierung zählt zu den wesentlichen wissenschaftlich-technischen Ergebnissen des Vorhabens und ist im Weiteren detailliert beschrieben.

Abbildung 11: Zweischnecken-Bandfördereinrichtung für die Zufuhr von nicht rieselfähigen Fasern in den Extruder

Abbildung 12: Viskosekurzschnittfaser

Zusammenfassend lässt sich trotzt einiger erfolgreichen Ergebnissen ein deutlicher Bedarf nach einer neuen technologischen Lösung für das Dosieren von Naturfaern festhalten.

2.1.2 Universaldosierer

Im Rahmen des Projektes wurde neues Dosierkonzept für schwerdosierbare Fasermaterialien entwickelt. Bei der Lösung wurden aerodynamische Prinzipen genutzt. In **Abbildung 13** ist das Kernstück der Vorrichtung schematisch dargestellt. Unter Verwendung von Vakuum wird ein Luft-Faser-Gemisch über eine Förderleitung zur Förderschnecke zugeführt. An der luftdurchlässigen Membran wird die Förderluft von den Fasern getrennt und gleichzeitig füllt sich die Förderschnecke auf. Durch die Rotation der Förderschnecke wird das Fasermaterial entlang des Schneckenzylinders transportiert. Der Stundendurchsatz der Vorrichtung hängt vor allem von den Eigenschaften des Fördergutes, der Saugleistung der Vakuumpumpe, der Schneckensteigung und der Schneckendrehzahl ab.

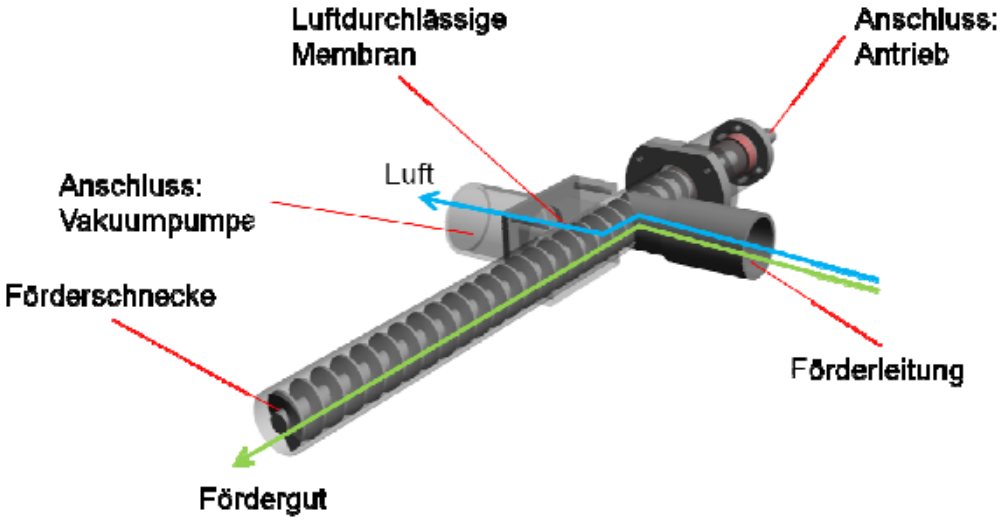


Abbildung 13: Funktionschema der neuen Universaldosierung

In **Abbildung 14** ist der aufgebaute Prüfstand für die Validierung dieses Verfahrens dargestellt.

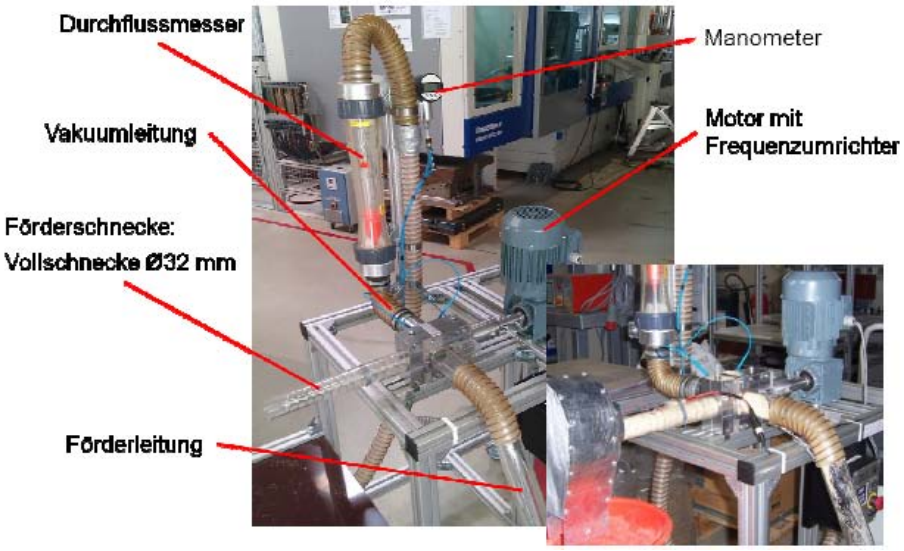


Abbildung 14: Universaldosierer: Prüfstandaufbau und Einblick in die Versuchsdurchführung

Der Luftstrom wurde mittels eines Schwebekörpermessgeräts erfasst, welches zwischen dem Unterdruckerzeuger und der Schneckeneinheit geschaltet wurde. Der Durchmesser der verwendeten Förderschnecke (Blattschnecke) betrug 32 mm und war somit in Kombination mit dem 34 mm Schneckenrohr um Faktor 2 kleiner als bei DSR 67. Zum Antrieb der Förderschnecke wurde ein Standard-Drehstrommotor eingesetzt, dessen Drehzahl mittels eines Frequenzumrichters von 0 bis 300 rpm geregelt werden konnte. Zu einer besseren Veranschaulichung des Verarbeitungsprozesses kam ein transparentes Schneckenrohr aus Kunststoff zum Einsatz. Dank dem gewählten Aufbau konnte auch bei nicht rieselfähigen Naturfasern ein konstanter und sehr hoher Füllgrad der Förderschnecke erreicht werden, was zu einer sehr guten Reproduzierbarkeit bei den Versuchen führte.

Die ersten Untersuchungen zeigten, dass die Durchsatzleistung des Gesamtsystems trotzt einer rein volumetrischen Prozesskontrolle konstant, jedoch von der Faserlänge und Faserqualität abhängig ist (siehe **Abbildung 15**). Dies resultiert aus einer unterschiedlichen Verdichtungsfähigkeit des jeweiligen Faserstoffs. Der erzielte Durchsatz weist in lineare Abhängigkeit von der Umdrehungsfrequenz der Förderschnecke auf. Deshalb sind für die Kalibrierung des Dosiersystems lediglich zwei Betriebspunkte ausreichend. In Verbindung mit der sehr geringen Standardabweichung kann somit in der Praxis eine hohe Prozessstabilität erreicht werden, was jedoch die gravimetrische Funktionsweise kaum ersetzt. Weitere Versuche haben gezeigt, dass die Steigung der Förderschnecke die Durchsatzleistung direkt beeinflusst. Ein Durchsatzvergleich für zwei Förderschnecken mit 16 und 32 mm Steigung ist in **Abbildung 16** dargestellt. Hieraus folgt, dass bei den untersuchten Förderschnecken der Verdoppelung der Schneckensteigung eine ca. zweifache Durchsatzsteigerung entspricht.

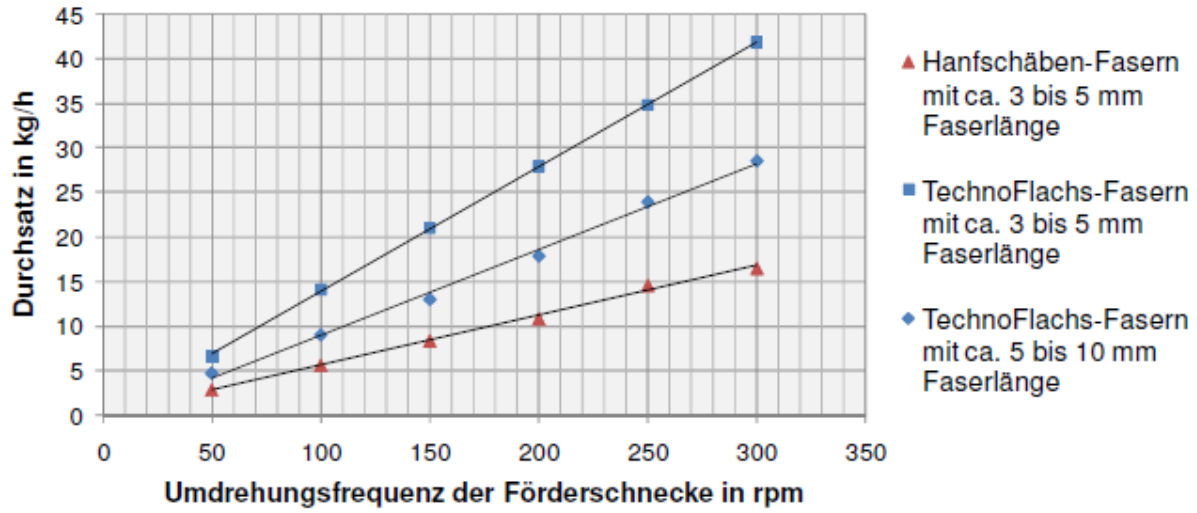


Abbildung 15: Einfluss des Fasertyps und der Faserlänge auf den Durchsatz des FENAFA-Universaldosierers

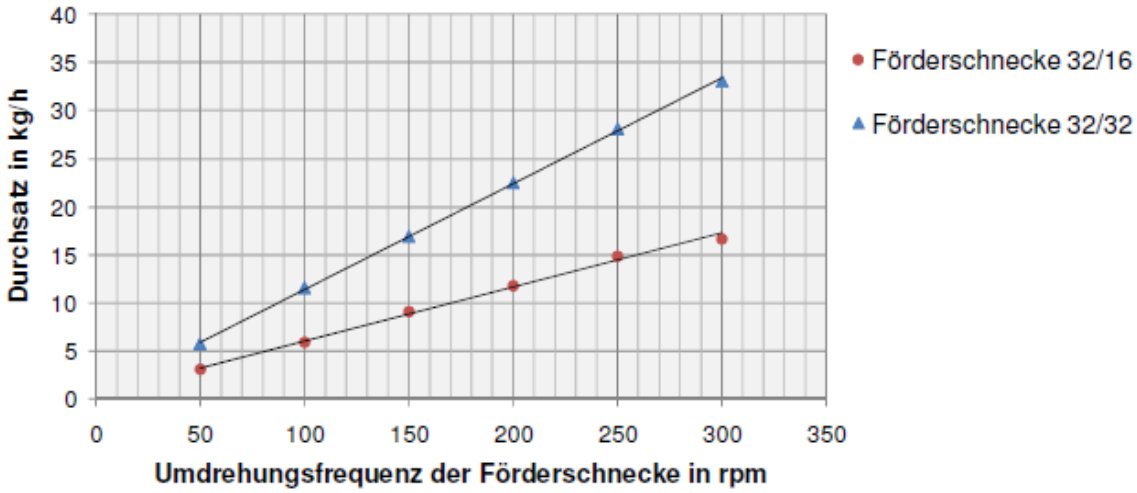


Abbildung 16: Einfluss der Steigung der Förderschnecke am Beispiel der Hanfschäben-Fasern

In **Abbildung 17** ist der weiterentwickelte Aufbau des Dosierprüfstandes mit einem im Bereich der Faserzuführung sensorisch überwachten Vorratsbehälter und einem Desagglomerator am Ende des Schneckenrohres zu sehen. Für eine Verbesserung der Prozesskontinuität wurde der Universaldosierer um folgende Verfahrenseinheiten ergänzt:

- luftdurchlässiger Filter mit selbstreinigenden Eigenschaften für den erforderlichen Massedurchsatz,
- transparenter Vorratsbehälter mit großem Fassungsvolumen, geraden Wänden, integrierter Nadelwalze und Materialrutsche,
- transparentes Umfüllrohr mit Füllstandsensor, der die Nadelwalze des Vorratsbehälters ansteuert.

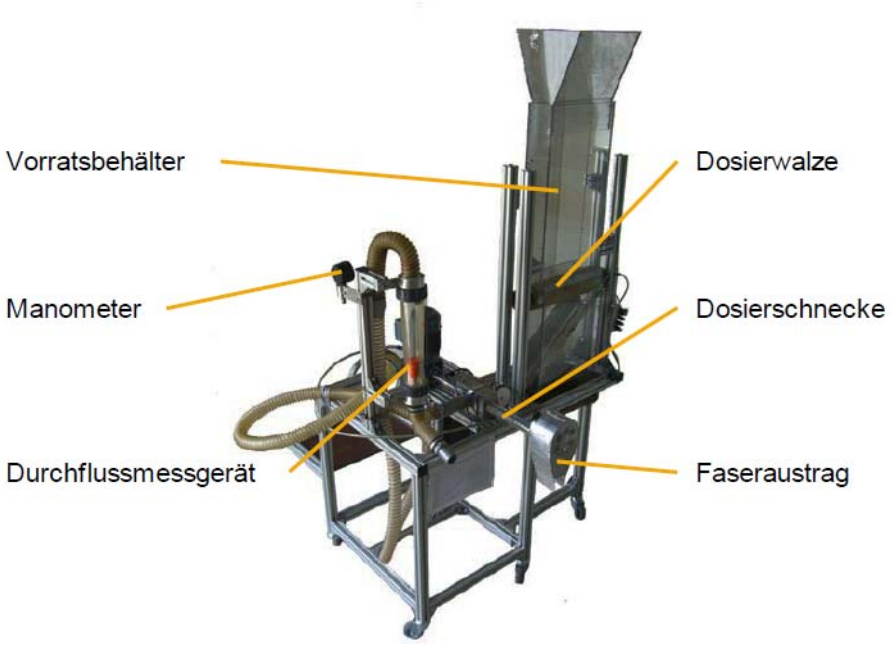


Abbildung 17: Universaldosierer: Prüfstand mit einem Vorratsbehälter und Desagglomerator

Durch den Einsatz des Vorratsbehälters mit geraden Wänden konnte die sog. Brückenbildung effizient verhindert werden. Als Brückenbildung wird der Effekt bezeichnet, dass sich Fasermaterial an der Behälterwand festsetzt und anschließend immer mehr Fasern an diesen verhaken, was zu einer Verstopfung des Trichters und schließlich zur Unterbrechung des Materialflusses führt. Im unteren Bereich des Vorratsbehälters ist eine Dosierwalze eingebaut, die eine begrenzte Fasermenge aus dem Vorratsbehälter entnimmt. Diese Materialportion wird dann mit Unterdruck zur Dosierschnecke transportiert. Ein Sensor im Einzugsbereich der Dosierschnecke regelt die Funktion der Dosierwalze, wodurch die Zwischenräume der Förderschnecke stets vollständig gefüllt sind. Dadurch erhöht sich die Genauigkeit des Dosiersystems, sodass eine prozesskonforme Steuerung des Massedurchsatzes gewährleistet werden kann. Wiederholte Messungen ergaben, dass die Kennlinie des Massedurchsatzes über der Schneckendrehzahl im gesamten Bereich von 20 rpm bis 300 rpm linear ist, was die angestrebte Umsetzung einer gravimetrischen Dosierung vereinfachen soll. Die Faseraustragsvorrichtung zerteilt Faseragglomerate, welche sich durch die reibungsbedingte Komprimierung im Schneckenrohr bilden, und dadurch entsteht ein konstanter Massestrom von feinen Fasern, die der Compoundierung zugeführt werden.

Hanfkonservat A (38 g/l) | Hanfkonservat D (45 g/l) | Hanfschäben (50 g/l) | PET-Kurzschnitt (3 mm) | PAN-Kurzschnitt (6 mm)

Abbildung 18: Einige getestete Natur- bzw. Chemiefasern mit Angaben zum Schüttgewicht bzw. zur Faserlänge

Ferner wurde die Seiteneinspeisung des Extruders Noris ZSC 25/44D durch die Vergrößerung des Fassungsvolumens, die Verwendung von tief geschnittenen Förderschnecken und Umsetzung der Absaugung im Bereich des Einfüllfensters wesentlich modifiziert (siehe **Abbildung 19**).

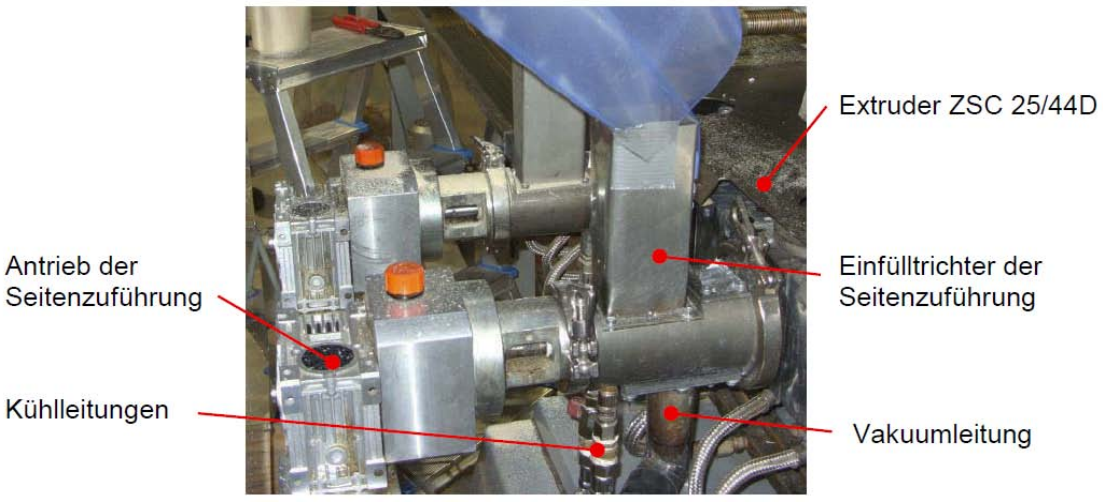


Abbildung 19: Modifizierte Seitenzuführung des Noris-Compounders ZSC 25/44 D

Diese Anlagenanpassung erlaubt eine materialgerechte Verarbeitung von nicht rieselfähigen Faser- und Füllstoffen niedriger Schüttdichte (weit unter 100 g/l) im Compoundierprozess. Die Validierung der Wirkpaarung „Universaldosierer-Seitenzuführung“ zeigte vor allem bei den getesteten ganzpflanzenbasierten Naturfasern eine hohe Reproduzierbarkeit des Dosierungsprozesses und der Compoundeigenschaften. Der maximal erzielte Massedurchsatz dieser Wirkpaarung lag weit über der oberen Beschickungsgrenze des eingesetzten Zweischneckenextruders, sodass die Förderleistung des Universaldosierers stark reduziert werden musste. Die gewonnenen Erkenntnisse erlauben zugleich die Übertragung des Prinzips auf größere Compoundieranlagen.

Die exakte Einstellung des Massedurchsatzes und dadurch auch der genauen Rezeptur von Naturfasercompound erfordert im Allgemeinen statt volumetrischer eine gravimetrische Materialflusskontrolle. Daher fanden in der zweiten Projektphase eine Neukonstruktion des gravimetrischen Universaldosierers (siehe **Abbildung 20**) und weitere Anpassungen des Systems unter der Voraussetzung kompakter Baugröße statt.

Abbildung 20: Neuer gravimetrischer Universaldosierer

Das eigentliche Dosiergerät im Bild ist mit einem Gestell ausgestattet, um den Betrieb als Beistellaggregat an den bestehenden Extrusionsanlagen zu ermöglichen. Sonst erfordert der Universaldosierer eine Aufstellfläche am Extruder von ca. 50x70 cm. Der Vorratsbehälter ist

modular aufgebaut und kann nach oben erweitert werden, sodass eine Verdoppelung des Fassungsvolumens mit einem geringen Aufwand erfolgen kann.

Da es sich im Falle der Hanfkonservatfasern um sehr stark staubbelastete Fasern handelt, mussten sie bei der Verarbeitung mit dem Universaldosierer 1. Generation zunächst entstaubt werden, sonst setzte sich die luftdurchlässige Membrane des Fördermoduls durch die Staubpartikel zu. Dieser Aspekt wurde bei der Neukonstruktion berücksichtigt und durch die Umsetzung eines automatischen Luftrückstoßes in der Niederdruckleitung gelöst. Zusätzlich wurden auf Basis der Validierungsversuche neue Sensoren zur Füllstandeinstellung, ein auf Dauerbetrieb ausgelegtes Gebläse mit entsprechender Leistung ausgewählt und eine neue bauraumangepasste Nadelwalze konstruiert. Die Implementierung der gravimetrischen Dosierung erfolgte mithilfe einer speziellen Differentialwaage hoher Genauigkeit, die den tatsächlichen Massestrom erfasst und die Drehzahl der Förderschnecke regelt. Gegenüber dem ersten Prototyp ist die Neukonstruktion sehr kompakt und im Hinblick auf die Auslegung der Förder- und Vakuumleitung optimiert, sodass ein energiesparender Dauerbetrieb zu erreichen ist.

In den bis zum Projektende geplanten Versuchsreihen erfolgte die Beschickung des Universaldosierers manuell. Eine automatisierte Dosierer-Beschickung, welche für eine Produktfertigung im Industriemaßstab notwendig ist, wurde im Projekt konzipiert. Die Umsetzung der entwickelten Konzeption zur automatisierten Anlagenbeschickung in der Praxis ist jedoch kein Bestandteil des Teilvorhabens und erfordert eine entsprechende Detailkonstruktion mit der Auswahl und Erprobung der Standardkomponenten, die zum Fördern von nicht rieselfähigen Fasern geeignet sein sollen.

Da die neuentwickelte Konstruktion aus nicht-standardisierten Komponenten und Bauteilen besteht, kam es bei der Sonderherstellung zur zeitlichen Verschiebung. Zusätzlich stellte die steuerungstechnische Implementierung der Differenzialwaage einen hohen Arbeitsaufwand dar. Demzufolge waren bei diesem neukonstruierten Dosierer die Erprobung in praktischen Versuchen an der Compoundieranlage und die Überprüfung im Dauerbetrieb nicht mehr innerhalb der Projektlaufzeit möglich. Die vorläufigen Tests zu einzelnen Prozessschritten deuteten jedoch auf einen erfolgreichen Abschluss hin und zeigten vielseitige Potenziale dieser Dosierungstechnik. Weitere Anpassung und auch die bereits erwähnte automatisierte Beschickung werden nach dem Projektabschluss in Zusammenarbeit zwischen ULT AG und TU Chemnitz fertiggestellt. Im Anschluss ist die Vermarktung des Universaldosierer durch ULT AG vorgesehen. Dabei sind Messeauftritte auf renommierten Kunststoff- und Technologienmessen wie z. B. internationale Messe Fakuma 2014 vorgesehen. Die Notwendigkeit einer zuverlässigen Materialdosierung besteht nicht nur bei der Naturfaserverarbeitung, sondern auch bei der Herstellung von Langfasergranulaten auf Basis von Schnittfaser oder Recycling von Kunststofffolien und verstärkten Kunststoffen. So bietet die neuentwickelte Dosiertechnologie hohes Vermarktungspotenzial.

2.1.3 Compounderkonfigurationen für optimierte Naturfaserverarbeitung

Schwerpunkt der bei Fraunhofer IWM durgeführten Untersuchungen war eine Optimierung des Extruder-Verfahrensteils (ZE-Reihe) für die Verarbeitung von WPC und NFK. Dabei wurden am Zweischneckenextruder ein Standardaufbau ZE40A-UTX und ein optimiertes Verfahrensmodul ZE40R-UTX – beide von KraussMaffei Berstorff – miteinander verglichen. Das sogenannte R-Verfahrensteil gewährleistet größeres Volumen im Schneckenraum des Extruders zur schonenden Verarbeitung von hochgefüllten Materialsystemen, kann jedoch geringeres Drehmoment übertragen. In **Tabelle 2** sind beide Verfahrenseinheiten gegenübergestellt.

Tabelle 2: Vergleich des A- und R-Verfahrensteils

ZE40A-UTX	**ZE40R-UTX**
Durchmesserverhältnis D/d = 1,46	Durchmesserverhältnis D/d = 1,74
Optimales Verhältnis von Drehmoment zu freiem Volumen	Großes freies Volumen
Hohe Schneckendrehmomente	Hohe Verweilzeiten, große Schmelzeoberfläche
Anwendungsbeispiele: Hochleistungscompoundierung Masterbatchherstellung	*Anwendungsbeispiele:* Hochgefüllte Compounds wie WPC Reaktions-, Entgasungsverfahren

Aufgrund der tiefgeschnittenen Schneckengänge bei dem R-Verfahrensteil wurde insbesondere bei der Verarbeitung von Naturfasern die freigesetzte Feuchtigkeit in Form von Wasserdampf sehr effektiv abgeführt. Es wurden Verarbeitungsversuche mit vergleichbaren Zylinder- und Schneckenkonfigurationen unter Verwendung des A- bzw. R-Verfahrensteils durchgeführt. Beispielhaft ist hierfür ein Materialsystem aus PP (MFI 230/2,16=44 g/10min) mit einem Holzanteil von 40 Ma% (WEHO 500, Jelu) und einem entsprechenden Anteil Haftvermittler ausgewählt worden. Die Verfahrenskonfiguration umfasste insgesamt drei Mischzonen nach dem Holzmehleinzug über eine Seitenzuführung. Mittels Vakuumentgasung wurden Feuchtigkeit und leichtflüchtige Bestandteile aus der Kunststoffschmelze entfernt. Vergleichend wurde ein Gesamtdurchsatz von 100kg/h Compound gefahren. Die extrudierten Compoundstränge liefen anschließend zur Kühlung durch ein Wasserbad und wurden im Stranggranulator zu Granulaten gängiger Partikelgröße verarbeitet.

Bei der Durchführung der vergleichenden Verarbeitungsversuche konnte festgestellt werden, dass sich das Einzugsverhalten des Holzmehls in den Extruder bei der R-Verfahrensvariante einfacher gestaltet als bei der A-Variante, insbesondere bei höheren Holzmehldurchsätzen. Allerdings lief bei beiden Varianten der Verarbeitungsprozess an sich vergleichbar stabil ab. Die Schmelzetemperatur war mit dem R-Verfahrensteil im Vergleich zum A-Teil bei gleicher Schneckendrehzahl und vergleichbaren Zylindertemperaturen um ca. 20°C niedriger, was für

Naturfaserverarbeitung sehr vorteilhaft ist. Die mechanischen Eigenschaften wurden anhand der Ergebnisse der Zug- sowie Schlagzähigkeitsprüfung analysiert. Aus **Abbildung 21** und besonders in der **Abbildung 22** wird deutlich, dass sich eine Verarbeitung von WPC auf dem R-Verfahrensteil positiv auf die ermittelten Materialeigenschaften, insbesondere Materialzähigkeit, auswirkt. Zurückzuführen ist dieses Materialverhalten auf eine verbesserte und schonende Füllstoffdispergierung aufgrund größerer Volumina im Extruder, was zum Erhalt von Faserlängen und eine geringere Faserschädigung durch den reduzierten Temperaturanstieg in der Schmelze mit sich bringt.

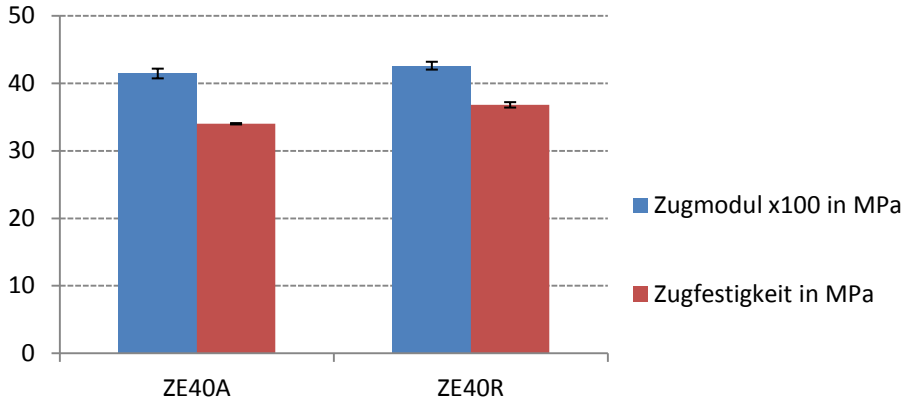


Abbildung 21: Vergleich der Zugeigenschaften der mit ZE40A- bzw. ZE40R-Verfahrensteil hergestellten Holz-PP-Compounds

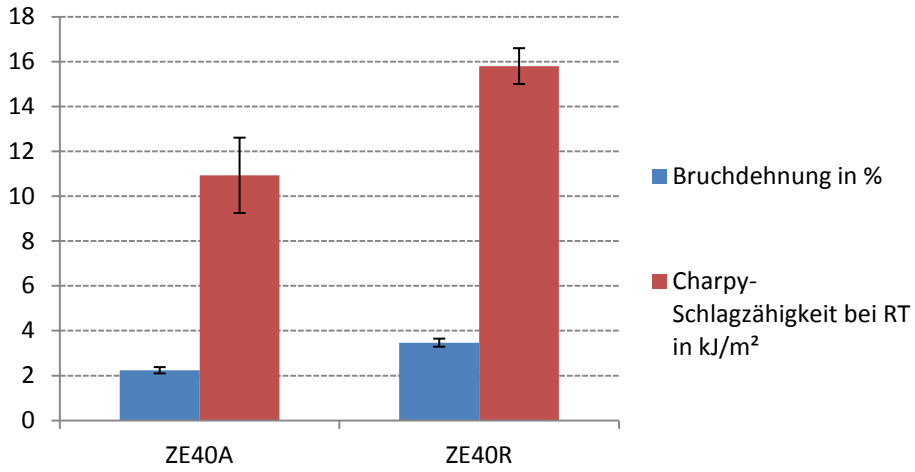


Abbildung 22: Bruchdehnung und Charpy-Schlagzähigkeit der mit ZE40A- bzw. ZE40R-Verfahrensteil hergestellten Holz-PP-Compounds

2.1.4 Einfluss der Schneckenkonfiguration auf Eigenschaften der NFK-Compounds

Die an der TU Chemnitz durchgeführte Untersuchungen hatten zum Ziel, den Einfluss der Schneckenkonfiguration auf mechanischen Eigenschaften von NF-Compound (40 Gew.-% TechnoFlachs mit Polypropylen-Matrix) zu ermitteln. Zum Einsatz kamen konventionelle Schneckenelemente für gleichsinnig drehende Doppelschneckenextruder (Förder-, Misch- und Knetelemente). Durch die Kombination und verschiedene Reihenfolge der

Schneckenelemente entstanden 4 unterschiedliche Schneckengeometrien (G1 bis G4). Sämtliche Schneckenkonfigurationen wurden für die Verarbeitung von Naturfasern optimiert, wiesen allerdings verschiedene Intensität der Misch- und Knetwirkung auf. Hergestellt wurden die Compounds auf einem Zweischneckencompounder (Noris ZSC 25/44D) mit anschließender Stranggranulierung. Zur Kennwertermittlung wurden Prüfkörper entsprechend der Normen DIN EN ISO 3167 Typ A auf einer Spritzgießmaschine vom Typ Arburg Allrounder All Drive 370 hergestellt. Die Ermittlung mechanischer Kennwerte erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 527 (Zugversuch) sowie DIN EN ISO 179 (Charpy-Schlagzähigkeit). Wie in **Abbildung 23** dargestellt, erreichten alle 4 Konfigurationen vergleichbare Ergebnisse.

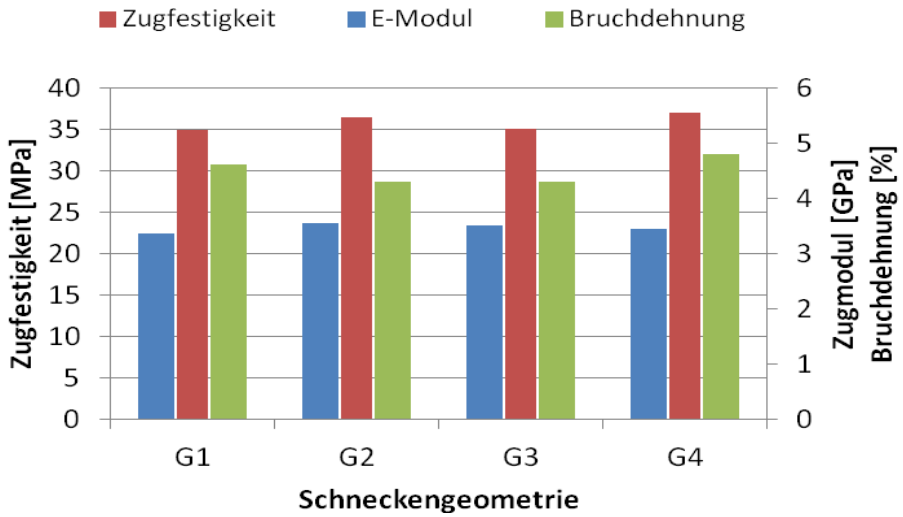
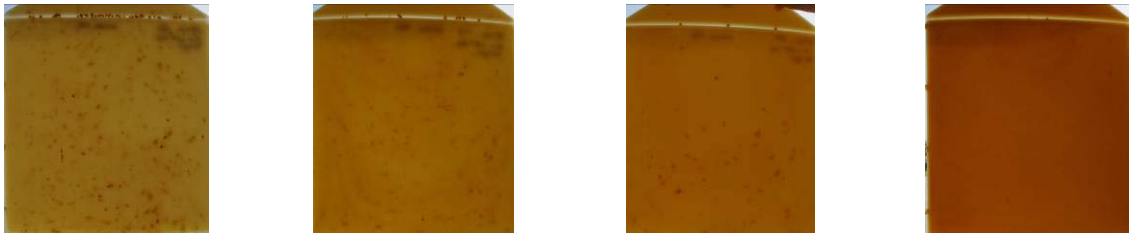


Abbildung 23: Einfluss der Schneckenkonfiguration auf mechanische Eigenschaften von NFK-Compounds

Ferner wurden Versuche bei IWM an einer ZE40A-UTX zur Optimierung der Maschinenkonfiguration und Prozessführung für die Herstellung anwendungsspezifischer CRF-(Celluloseregeneratfaser-)Konzentrate durchgeführt. Neben Untersuchungen zur Optimierung des Gesamtdurchsatzes und zur Temperaturführung im Extruder und dem Granuliersystem wurden 4 Schneckenkonzepte mit unterschiedlichen Misch- und Scherverhalten getestet. Dabei wurde insbesondere der Einfluss des Zusammenspiels und der Anordnung von Misch- und Scherzonen in der aktiven Schneckenlänge auf die Dispergierung der CRF in der Polymerschmelze untersucht. Die CRF-Konzentrate wurden mit den Faseranteilen zwischen 30 Ma% und 50 Ma% in unterschiedliche PP-Typen eingearbeitet. Hierzu wurden die Fasern vom Roving mittels eines speziellen Schneidwerks auf ca. 4 mm abgelängt und direkt dem Extruder zugeführt. Zur Beurteilung der Einarbeitung der CRF in die Polymerschmelze wurden Platten (290x210x4mm) spritzgegossen, bei denen die Faserkonzentrate durch die Beimischung des gleichen Matrixkunststoffs auf 5–10 Ma% Faseranteil gestreckt (verdünnt) wurden. Die Untersuchungen zeigten eine optimale Einmischung der CRF und Homogenisierung der Schmelze unter Verwendung der Schneckenkonfiguration 4. Offensichtlich ist eine Kombination aus Scher- und Mischelementen für die Einarbeitung hoher Anteile bis 50 Ma% der CRF in die

Polymerschmelze optimal. Am unterschiedlichen Farbton der in **Abbildung 24** dargestellten Spritzgussplatten wird ebenso die Temperaturentwicklung mit Erhöhung der Scher- und Mischwirkung der Compoundierschnecken deutlich.



Konfiguration 1 Konfiguration 2 Konfiguration 3 Konfiguration 4

Abbildung 24: Einfluss der unterschiedlichen Schneckenkonfigurationen auf Faserverteilung bei der CRF-Verarbeitung und Farbton der Spritzgussplatten

2.1.5 Verarbeitung von Konservat-Naturfasern

Zur Compoundierung von ganzpflanzenbasierten Naturfasern aus Flachs oder Hanf wurden zahlreiche Versuchsreihen durchgeführt. Speziell bei TechnoFlachs konnte die angestrebte Verbesserung mechanischer Verbundeigenschaften nicht durch die Verwendung von rieselfähigen Halmzuschnitten mit größerer Schnittlänge erzielt werden. Weitere Potenziale sind hier in der Steigerung der Faserfilamentisierung bereits im Lieferzustand zu sehen, was allerdings eine entsprechende Intensivierung der Faseraufbereitung im Teilvorhaben 2 voraussetzt. Eine neue, technisch interessante Lösung stellte das am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) entwickelte Verfahren zur konservierenden Lagerung und anschließenden Aufbereitung von Ganzpflanzen dar, die sowohl bei Hanf als auch bei Flachs angewandt werden kann. Zur Ermittlung der Auswirkung des Konservierungsprozesses werden einheitliche Rezepturen mit 67,5 Gew.-% Polypropylen-Copolymer, 30 Gew.-% Naturfasern und 2,5 Gew.-% Haftvermittler auf MSA-Basis verwendet. Da durch den Konservierungsprozess ein Faserstoff mit sehr unangenehmem Geruch entsteht, wurden beim ATB die Hanffasern vor dem Konservierungsprozess teilweise mit Enzymen und/oder Propionsäure behandelt, mit dem Ziel, einen geruchsneutralen Faserstoff zu erhalten. Zu Vergleichszwecken wurden zusätzlich zwei Compounds mit kommerziell erhältlichen Holzfasern hergestellt und geprüft. Die Herstellung der Compounds wurde auf Zweischneckencompounder ZSC 25/44D mit anschließender Stranggranulierung durchgeführt. Für die Dosierung der Konservatfasern kam der in diesem Teilprojekt entwickelte Universaldosierer zu Einsatz. Die Prüfkörperherstellung erfolgte auf der Spritzgießmaschine Arburg Allrounder All Drive 370.

In **Tabelle 3** sind einige wesentliche Kennwerte ausgewählter Compounds gegenübergestellt. Die mit den untersuchten Konservatfasern verstärkten Compounds weisen gegenüber den holzfaserverstärkten einen leicht verbesserten E-Modul sowie eine um ca. 20% höhere Zugfestigkeit auf. Die Schlagzähigkeiten liegen unabhängig von der verwendeten Fasertype auf annähernd gleichem Niveau. Hierin ist zudem ersichtlich, dass

die zugehörige Standardabweichung bei den Compounds mit Konservatfasern gegenüber den Holzfasercompounds stets deutlich höher ausfällt, was auf die breitere Faserlängenverteilung im Faserstoff zurückzuführen ist.

Tabelle 3: Mechanische Eigenschaften von Holzfaser- und Konservat-Bastfaser-Compounds

Faser	Zugprüfung						Schlagzähigkeit	
	E_t [MPa]	s [MPa]	σ_M [MPa]	s [MPa]	ε_M [%]	s [%]	a_{cU} [kJ/m²]	s [kJ/m²]
Hanfkonservat ATB	3050	38	34,5	0,3	3,26	0,20	22,1	3,6
Flachskonservat ATB	2970	34	34,2	0,2	3,51	0,05	21,1	2,2
Jeluxyl WEHO 500S / Jelu	2740	14	28,3	0,1	3,90	0,04	20,2	1,7
Lignocel BK 40-90 / Rettenmaier	2660	19	28,2	0,1	4,01	0,09	19,1	1,4

Die vor dem eigentlichen Konservierungsprozess vorgenommene Faservorbehandlung wirkte sich sehr positiv auf die Geruchsneutralität des Faserstoffes aus. Der Zusatz von Enzymen oder von einer Kombination der Propionsäure mit Enzymen resultierte in einer leichten Abnahme des E-Moduls, der Zugfestigkeit und Schlagzähigkeit untersuchter Compounds. Die Verwendung der Propionsäure allein hatte keinen weiteren Einfluss auf die erzielten mechanischen Eigenschaften. Ausgewählte mechanische Werkstoffkennwerte verdeutlicht **Abbildung 25**.

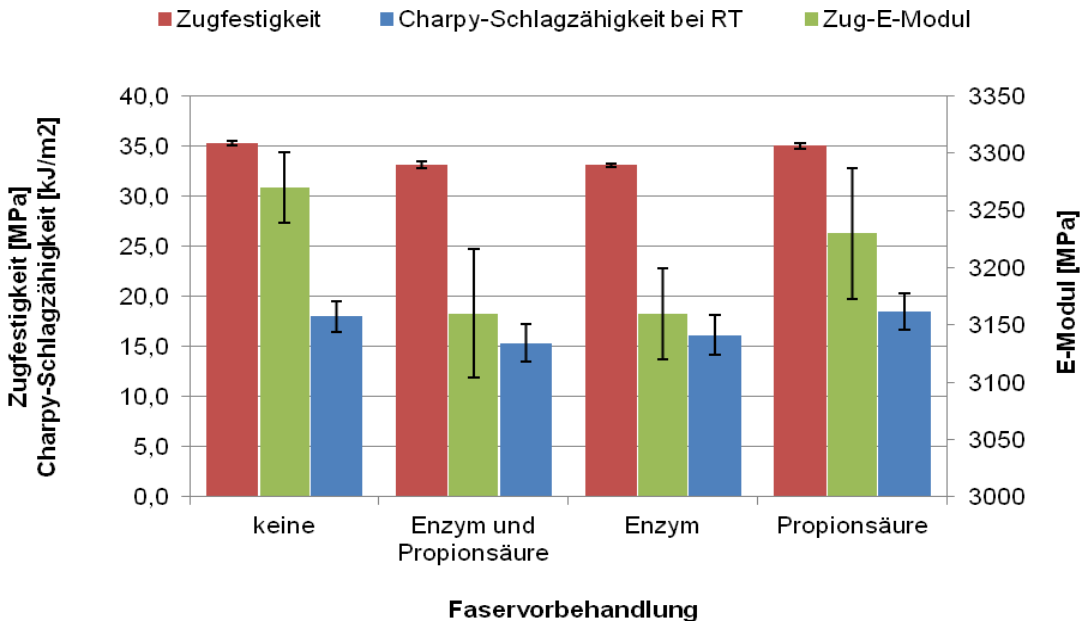


Abbildung 25: Einfluss der Faservorbehandlung auf die mechanischen Eigenschaften des Compounds

2.1.6 Entwicklung von einsatzangepassten NFK-Spritzgießcompounds

Innerhalb des Projektes wurden nahezu 300 NFK-Rezepturen getestet. Dabei kamen Naturfasern wie TechnoFlachs, Hanfkonservat, Hanfstroh, Refinerholz, Holzmehl und Viskose zum Einsatz. Für die Verbesserung der mechanischen und spritzgießtechnischen Eigenschaften wurden zahlreiche Additive, wie z. B. Fließhilfen, Haftvermittler, dehnfähige Thermoplastfasern verwendet. Die werkstofftechnischen Ergebnisse wurden im Verlauf des Projektes in einem elektronischen System zentral verwaltet, welches einen schnellen Überblick zur Zusammensetzung, Verarbeitungsparametern und erzielten mechanischen Eigenschaften der untersuchten NF-Compounds bietet und eine anwedungsspezifische Materialauswahl erlaubt. Vor allem Steigerung der Schlagzähigkeit und Fließfähigkeit standen im Vordergrund der Untersuchungen.

Zur Verbesserung der Fließfähigkeit bei naturfaserverstärkten Kunststoffen kamen sechs kommerziell erhältliche Fließmittel mit unterschiedlichem Wirkprinzip zum Einsatz. Die vom Hersteller empfohlene Fließmittelzugabe von 2 Ma% erfolgte im Compoundierungsprozess in Kombinaiton mit 30 Ma% Holzmehl und PP-Matrix. Die Fließfähigkeit wurde anhand der erreichten Fließlänge im Spritzgießverfahren mittels eines normierten Fließspiralen-Werkzeugs als Funktion der Verarbeitungsparameter ermittelt. Die Materialien wurden bei vier verschiedenen Einspritzdruck-Stufen 300, 900, 1200, 1800 bar getestet. Die Prüfkörperherstellung erfolgte auf der o.g. Spritzgießmaschine.

Die Fließmittelzugabe führte zu keiner deutlichen Verbesserung der Fließfähigkeit (siehe **Abbildung 26**) und resultierte zudem in einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften (siehe **Abbildung 27**).

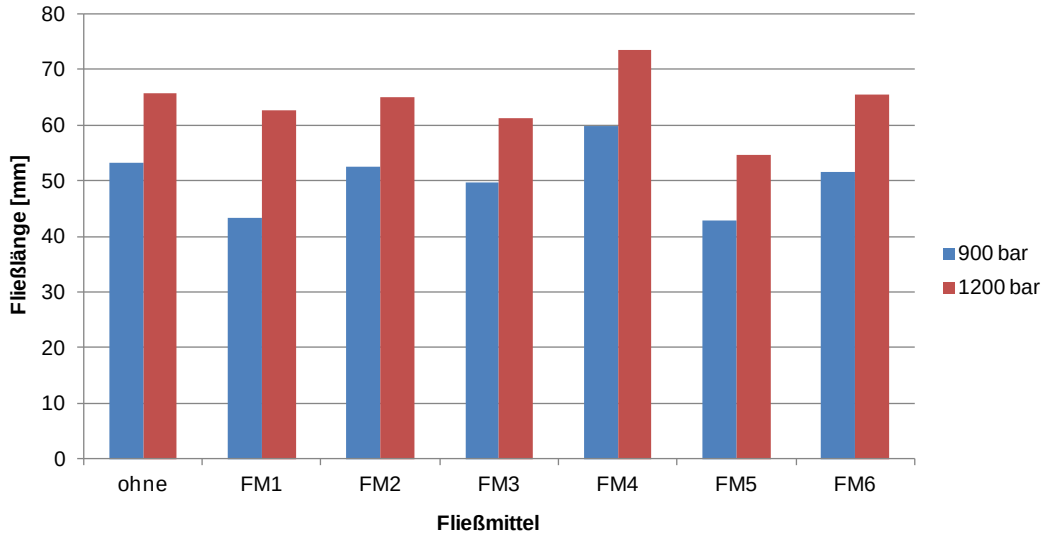


Abbildung 26: Einfluss der Fließmittelzugabe von 2 Ma% auf die Fließlänge von NF-Compounds mit 30 Ma% Holzfaser in PP-Matrix

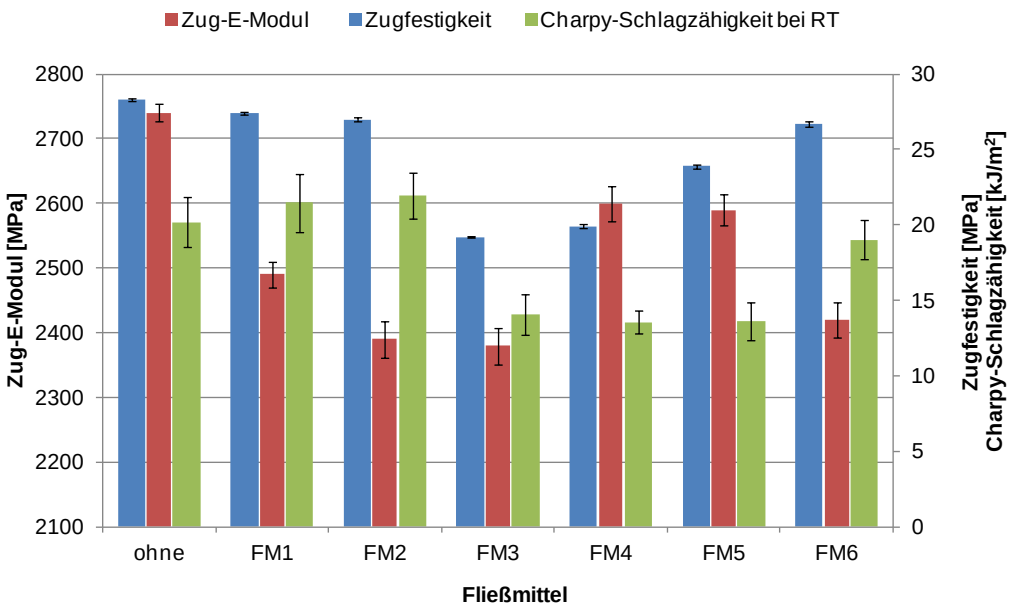


Abbildung 27: Einfluss der Fließmittelzugabe von 2 Ma% auf mechanische Eigenschaften von NF-Compounds mit 30 Ma% Holzfaser in PP-Matrix

Zur Verbesserung der allgemein relativ niedrigen Schlagzähigkeit von NF-Compounds wurden Versuche zur Zusatzverstärkung mit diversen dehnfähigen Synthesefasern durchgeführt. Dabei wurden den ausgewählten Grundrezepturen mit 30 Ma% Holzfasern in PP-Matrix jeweils 5-, 10- und 15%ige Masseanteile an PA-, PET- oder PAN-Kurzschnittfasern (Schnittlänge 3 mm) beim Compoundieren zugegeben. Die hergestellten Probekörper wurden im Hinblick auf Schag- und Kerbschlagzähigkeit bei Raumtemperatur und bei -20°C untersucht. Im Kerbschlagbiegeversuch konnte eine eindeutige Verbesserung der Compoundeigenschaften nachgewiesen werden (siehe **Abbildung 28**). Der steigende Gehalt an Holzfasern zeigte keine signifikanten Auswirkungen. Im Gegensatz dazu führte die Zugabe der synthetischen Fasern, konkret bei PET und PAN, zu einem deutlichen Einstieg der Kerbschlagzähigkeit. Gegenüber dem mit ausschließlich 30 Ma% Holzfasern verstärkten PP bewirken PET-Faserzusätze von 15 Ma% einen Anstieg um ca. 30% sowohl bei Raumtemperatur als auch bei -20°C. PAN erhöht diese um knapp 50% bei Raumtemperatur und 60% bei -20°C. Die PA-Fasern verschlechtern die Schlagzähigkeitseigenschaften aufgrund einer schlechten Kompatibilität mit PP. In diesem Zusammenhang ist jedoch nachteilig, dass für eine ausreichend große Änderung der Eigenschaften ein vergleichsweise hoher Anteil (bis zu 15 Ma%) an synthetischen Fasern notwendig ist, was aufgrund eines höheren Preises von Synthesefasern die Wirtschaftlichkeit von NFK-Spritzgießcompounds verringert. Diese Methode weist allerdings auf einen technisch interessanten Lösungsweg zur Erhöhung der hochdynamischen Eigenschaften von NFK hin.

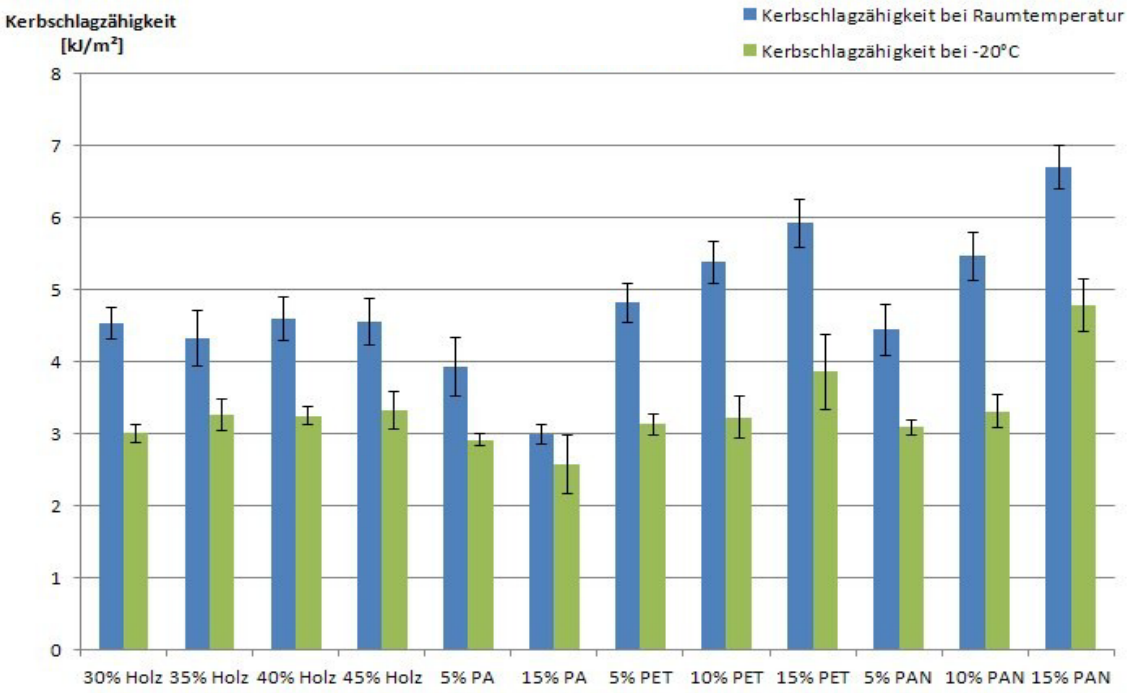


Abbildung 28: Kerbschlagzähigkeit von NF-Compound (30 Gew.-% Holzfasern in PP-Matrix) mit Zusatzverstärkung durch Synthesefaser

Des Weiteren wurde das Schlagzähigkeitsverhalten von naturfaserverstärkten Compounds mit Celluloseregeneratfaser (CRF)-Verstärkung untersucht. Dazu wurden die im Absatz 2.1.4 beschriebenen CRF-Konzentrate im Compoundierprozess zur Herstellung von holzmehlgefüllten PP-Typen beigemischt, sodass der CRF-Anteil im Verbund 5% bzw. 10% betrug.

Um den Prozessschritt des Compoundierens zur Einmischung der CRF einsparen zu können, wurde ausgewähltes CRF-Konzentrat direkt im Spritzgussprozess zu den WPC Granulaten hinzugegeben. Dadurch wurden WPC und CRF-Konzentrat direkt im Spritzgussprozess miteinander vermischt und thermische sowie mechanische Belastungen für die naturfaserverstärkten Materialien reduziert.

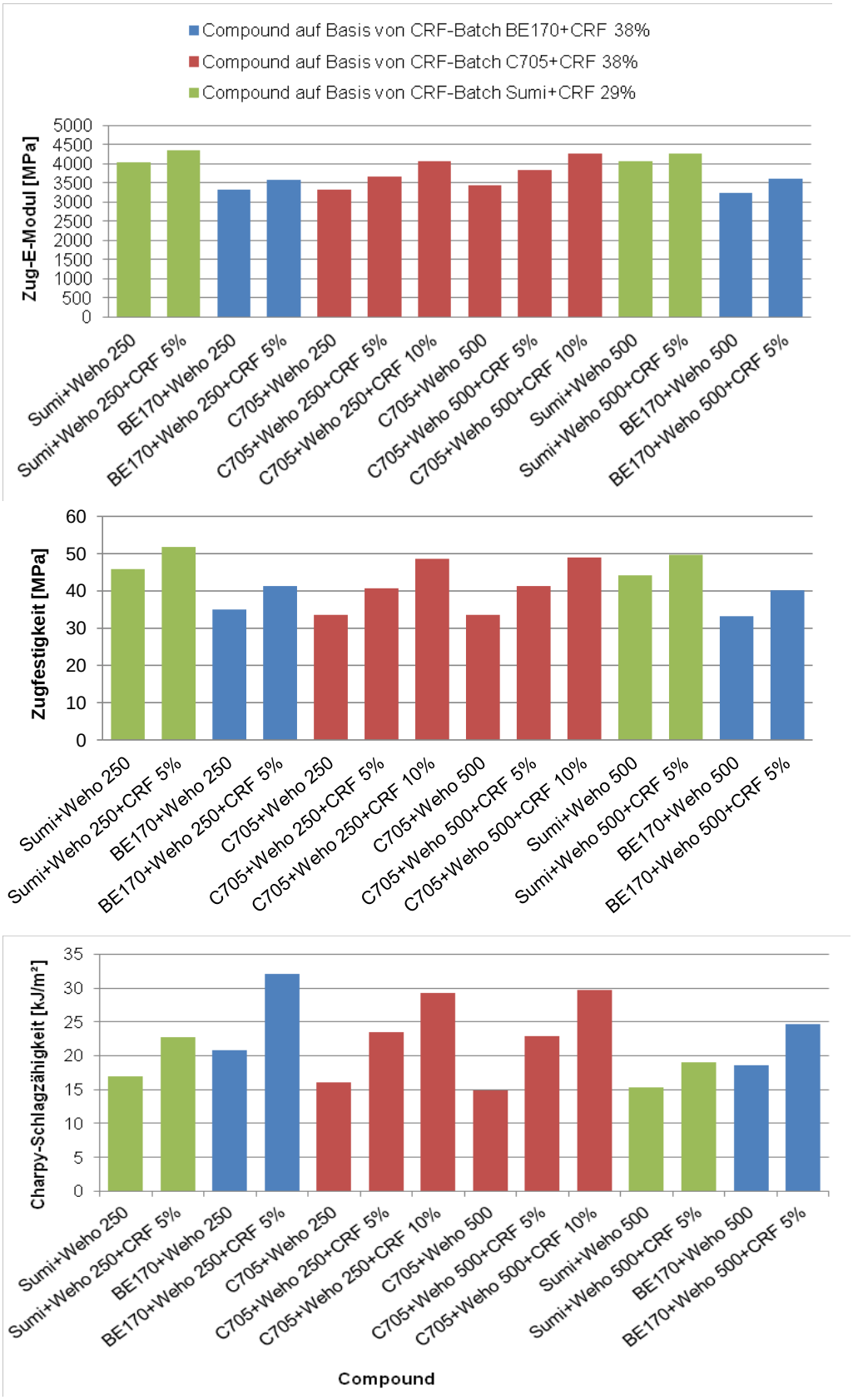


Abbildung 29: Einfluss der CRF-Konzentrate auf mechanische Eigenschaften von naturfaserverstärkten Kunststoffen

Wie in **Abbildung 29** zu erkennen ist, führt die Beimischung geringer Mengen an CRF zu einer signifikanten Verbesserung der mechanischen Kennwerte. Dies betrifft Zug-E-Modul,

Zugfestigkeit, Bruchdehnung und insbesondere Charpy-Schlagzähigkeit bei Raumtemperatur. In Abhängigkeit von CRF-Anteil und verwendeter PP-Type werden gegenüber dem reinen WPC ohne CRF die Schlagzähigkeiten um 27% (bei einem CRF-Anteil von 5% im Compound) bis 100% (bei einem CRF-Anteil von 10% im Compound) erhöht. Bei der Betrachtung der Compounds aus dem zweistufigen Herstellungsprozess mit denen, die direkt während des Spritzgießens gemischt wurden, lässt sich eine geringfüge Reduktion des Zug-E-Moduls sowie der Zugfestigkeit erkennen. Eine Ursache hierfür kann in der schlechteren Durchmischung der Materialien im einstufigen Herstellungsprozess liegen. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass durch die Zugabe von CRF vor allem die hochdynamischen Werkstoffeigenschaften von WPC- und NFK-Spritzgießcompounds effizient verbessert werden, was jedoch mit der Materialpreiserhöhung einhergeht.

Der Einfluss von CRF auf das Fließverhalten beim Spritzgießen wurde mittels Fließspirale bei vier verschiedenen Einspritzdruck-Stufen (300bar, 600bar, 1200bar und 1800bar) untersucht. In **Abbildung 30** sind die Fließlängen der einzelnen Materialsysteme in Abhängigkeit vom Einspritzdruck dargestellt. Die Fließlänge stellt sich als Funktion verschiedener Material- und Prozessgrößen wie scherratenabhängige Fließfähigkeit des Matrixmaterials, Füllstoffart- und -anteil, Massetemperatur und Einspritzdruck dar. Die größten Fließlängen im Diagramm erreichen die WPC-Materialien ohne CRF-Konzentrate. Die Fließwege nehmen erwartungsgemäß mit steigendem CRF-Anteil ab.

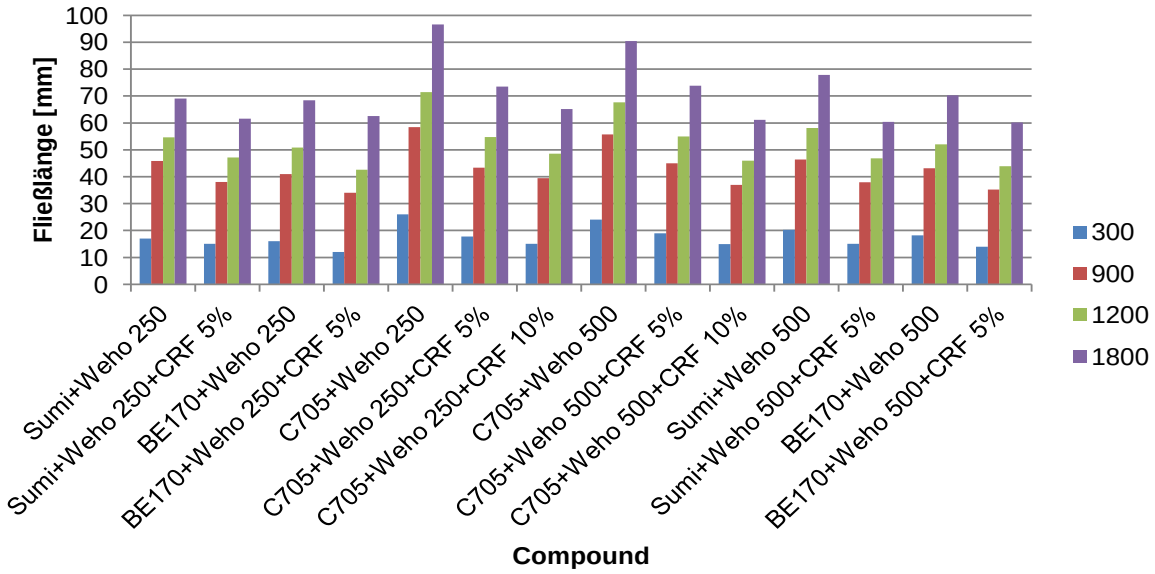


Abbildung 30: Einfluss der CRF-Konzentrate auf Fließverhalten von naturfaserverstärkten Kunststoffen

Im Zuge der Projektbearbeitung ergab sich noch ein weiterer Lösungsansatz für die Verbesserung der Schlagzähigkeit und gleichzeitig der Fließfähigkeit, der großes Potenzial zeigte. Hier wurden Modifizierungen von NFK durch TPE-Blends vorgenommen. Die NFK-Grundrezeptur bestand aus 40 Ma% Holzfasern, PP-Homopolymer-Matrix und 3 Ma% von Haftvermittler. Die Zugabe von 4 unterschiedlichen ölgestreckten TPEs erfolgte in 10- und 20%tigen Anteilen. Diese Compounds wurden auf einem Zweischneckencompounder ZSC 25/44D der Professur SLK/TUC hergestellt. Die mechanischen Eigenschaften der

Compounds wurden, wie oben bereits beschrieben, durch Zugprüfung und Charpy-Schlagzähigkeitsprüfung und das Fließverhalten mit Fließspirale ermittelt. **Abbildung 31** verdeutlicht die Auswirkung der TPE-Zugabe auf die mechanischen Eigenschaften der NFK-Compounds. Mit wachsendem Anteil an TPE ist bei der Schlagzähigkeit eine steigende Tendenz zu beobachten. Die höchste relative Änderung (ca. 75%) im Vergleich zum Material ohne TPE wurde bei Compound mit TPE-DB003 festgestellt.

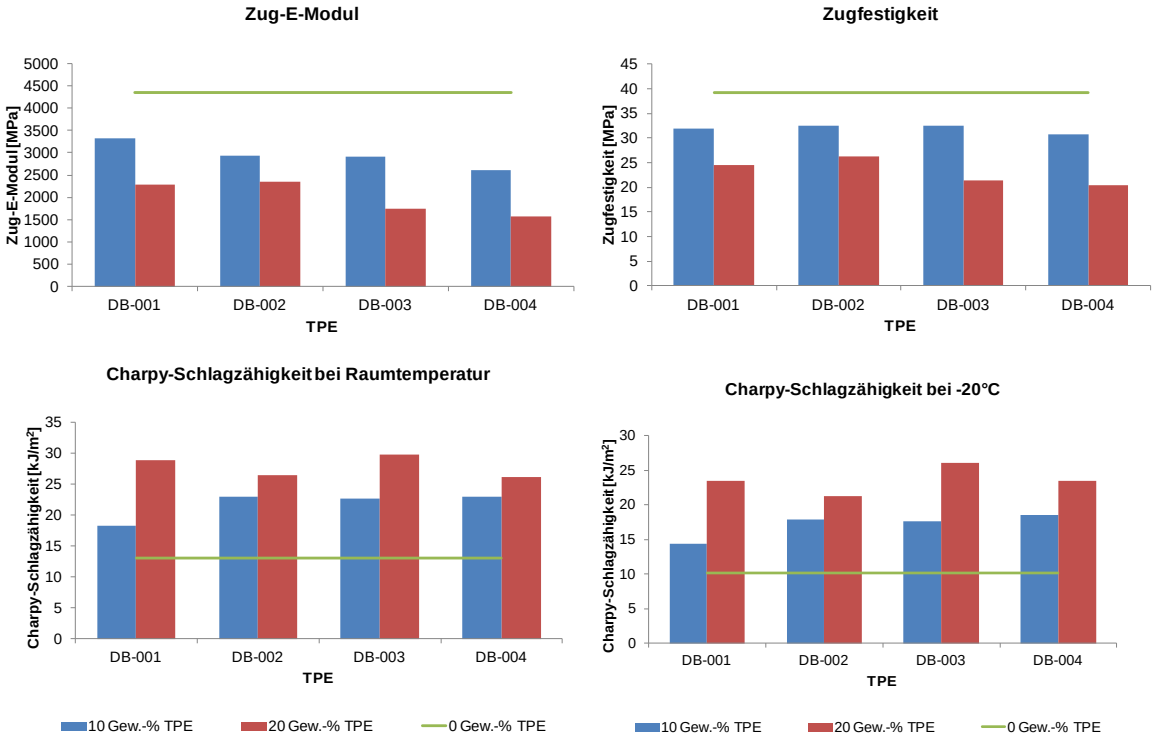


Abbildung 31: Mechanische Eigenschaften der untersuchten HF-PP-TPE-Compounds

Positiv zu bewerten ist insbesondere der Einfluss der verwendeten TPEs auf das Fließverhalten von HF-PP-TPE-Compounds, denn die bisher untersuchten Schlagzähigkeit-Modifikationen durch CRF, schlagzähe Matrixkunststoffe oder weitere TPE-Typen haben eine deutliche Verschlechterung der Fließfähigkeit der NFK-Compounds verursacht. Bei der Zugabe des TPE vom Typ DB004 konnte dagegen eine durchschnittliche Erhöhung der Fließlänge um ca. 77% erreicht werden (siehe **Abbildung 32**). Nur bei Typ TPE-DB001 wurde ein negativer Einfluss auf das Fließverhalten beobachtet. Dies ist in der Kombination des hoch- und niedermolekularen Anteils in dem TPE-System begründet.

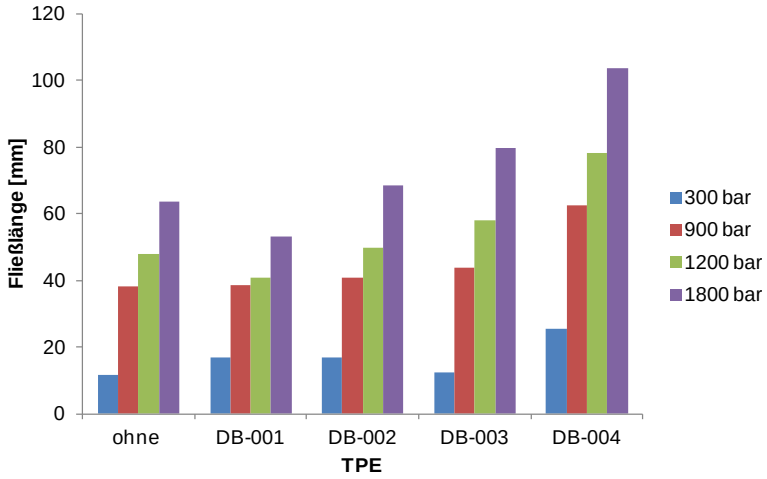


Abbildung 32: Fließverhalten von HF-PP- und HF-PP-TPE-Compounds mit 20 Ma% TPE

Die favorisierten Varianten der untersuchten NFK-Rezepturen und vor allem die Modifizierung von naturfaserverstärkten Kunststoffen (Hanfkonservat und TechnoFlachs) durch CRF-Konzentrat und TPE-Blends wurden in den Teilprojekten 6 und 9 bei der Bauteilbemusterung im Spritzgießprozess verwendet. Die Zugabe von TPE-Blends wirkte sich auch dort positiv besonders auf die Verarbeitungsparameter aus.

Insgesamt konnte auf dem Gebiet Naturfaserverstärkter Kunststoffe durch die Projektergebnisse ein deutlicher Fortschritt erzielt werden. Besonders hervorzuheben ist hierbei die synergetische Nutzung der einzelnen Lösungen innerhalb des FENAFA-Netzwerk, die dem Erfolg wesentlich beitrug.

2.2 Verwertung

Für das entwickelte Dosierungskonzept erfolgte am 30.03.2011 seitens der TU Chemnitz eine deutsche Patentanmeldung Nr. 102011015553.8 „Verfahren zum Dosieren von partikulärem oder faserförmigem Material und Dosiereinrichtung“. Die Offenlegung des angemeldeten Patentes fand am 04.10.2012 statt. Die wissenschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten nach Projektende lassen sich für das entwickelte Dosierungskonzept als sehr positiv einschätzen. Die anlagentechnische Umsetzung in Serie und die Markteinführung nach Projektende werden unter der Berücksichtigung der Nachfrage durch die ULT AG übernommen.

Die Untersuchungen zur Schlagzähigkeitsmodifizierung an naturfasergefüllten Compounds durch TPE-Blends haben gezeigt, dass diese Thematik für weiterführende Untersuchungen und marktfähige NFK-Bauteile sehr interessant ist. Insbesondere ist die Substitution der synthetischen niedermolekularen Komponente durch biobasierte Komponente attraktiv, somit kann der Anteil an nachwachsenden Rohstoffen im Compound erhöht werden.

Die Vorstellung der erzielten Ergebnisse und entwickelten technologischen Lösungen soll im Rahmen der Messe FAKUMA 2014 in Friedrichshaven sowie auf den entsprechenden Fachtagungen geplant.

2.3 Erkenntnisse von Dritten

Die projektbegleitende Informationsrecherche ergab von dritter Seite keine relevanten Informationen auf dem Gebiet des beschriebenen Vorhabens. Aufgrund der Einzigartigkeit der untersuchten Faserarten bleibt der Neuerungsgrad weiterhin erhalten. Durch Fachmesseauftritte und Teilnahme an verschiedene Kongressen und Tagungen wurde mehrmals bestätigt, dass das Interesse seitens Industrie an neuen Lösungen für die Verarbeitung und Anwendung von naturfaserverstärkten Kunststoffen im Spritzguss vorhanden ist. Die innerhalb des FENAFA-Projektes gewonnenen Erkenntnisse zur NFK-Verarbeitung wurden teilweise in einem durch die FNR geförderten Projekt zur Herstellung von WPC bestätigt (FKZ 22041811). Das betrifft insbesondere die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Verarbeitungsverfahren und die hohe Variation der erzielten Eigenschaftswerte innerhalb einer Rezeptur, welche keine eindeutige allgemeine Aussage zum Verarbeitungsoptimum zulassen. Zudem ist die Untersuchung des Faseranteils, der Füllstoffverteilung und -morphologie (z. B. Partikelgrößen) in den unterschiedlichen NFK-Compounds mit einem hohen Präparations- und Analyseaufwand verbunden.

Im Rahmen eines vom DBU geförderten Projektes wurden dosierfähige Hanffaserpellets (sog. Softpellets) entwickelt[3]. Eine Verarbeitung zum Pellet stellt aus der Sicht des FENAFA-Projektteams einen Mehraufwand dar, der höhere Produktkosten nach sich zieht. Die Umsetzungschancen dieser Ergebnisse werden daher aufgrund der angegebenen Kilopreise für derartige Softpellets und einer niedrigen Variabilität des Verfahrens relativ gering eingeschätzt. Vorteilhaft ist hier jedoch die Breitenwirkung der Pellettechnologie, sodass nahezu jeder Compoundhersteller derartige Pellets mittels Standarddosiergeräte verarbeiten kann.

[3] Pressemitteilung der nova-Institut GmbH: Durchbruch beim Naturfaser-Spritzgießen: Zufuhr als Faserpellets löst Dosierprobleme. Hürt, 25.04.2012

2.4 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projektes wurden ein Schutzrecht angemeldet und mehrere Veröffentlichungen vorgenommen:

- DE 102011015553 A1: Verfahren zum Dosieren von partikulärem oder faserförmigem Material und Dosiereinrichtung; TU Chemnitz; Nendel, W.; Rinberg, R.; Schierl, S.; Todorov, A.; Offenlegung 04.10.2012
- Busch, M; Jahn, I.: „Verbesserung der Eigenschaften von PP-Compounds durch Faserzugabe auf Standard-Spritzgießmaschinen“; Fraunhofer PAZ; Mitteldeutscher Kunststofftag, 2010
- Rinberg, R.; Bürgermeister, S.; Schierl, S.; Nendel, W.; Kroll, L.: Perspektiven von ganzpflanzenbasierten Naturfasern als Verstärkungskomponente in Kunststoffbauteilen; 8. Int. Symposium „Werkstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen“; Erfurt; Deutschland; September 9–10, 2010
- Wallot, G.; Gusovius, H.-J.; Pecenka, R.; Schierl, S.; Rinberg, R.; Nendel, W.: Advantages of the use of fibres from wet-preserved hemp for composite production; 3rd International Conference on Innovative Natural Fibre Composites for Industrial Applications; Rom, Italy; October 12–14, 2011
- Jahn, I.: „Schlagzähmodifizierung durch naturfaserbasierte Masterbatches“; Fraunhofer PAZ; POLYKUM-Workshop Naturfasercompounds; 2012
- Ulke-Winter, L.; Kroll, L.; Schierl, S.: Rezepturenentwicklung mit künstlichem Gehirn, Kunststoffe 8/2012; Carl Hanser Verlag; München
- Bürgermeister, S.; Buschbeck, S.; Reinhardt, M.; Rinberg, R.: Naturfaserverstärkte (Bio-)Kunststoffe – neue Möglichkeiten für nachwachsende Rohstoffe; 19. Symposium für Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde; Karlsruhe, Germany; July 03–05, 2013
- Hartmann, T.; Bürgermeister; S.; Rinberg, R.; Kroll, L.: TPE-Modification for Advanced Rheological and Impact Properties of Wood Plastic; 58th IWK, Ilmenau; September 8-12; 2014 (Beitrag angenommen)
- Messeaussteller Euromold 2011, FENAFA-Produkte, Halle 11.0 Stand-Nr. D 153
- Messeaussteller naturetec, Grüne Woche 2011, Fraunhofer Gemeinschaftsstand
- Messeaussteller mtex 2014, Poster zum Thema Naturfaserverstärkte thermoplastische Kunststoffe (NFK) & Wood Plastic Composite (WPC), TU Chemnitz/SLK Gemeinschaftsstand
- Ergebnispräsentation auf FAKUMA 2014 auf dem Gemeinschaftsstand mit Livemold GmbH und ULT AG