

Schriftenreihe

KUNSTSTOFF-FORSCHUNG

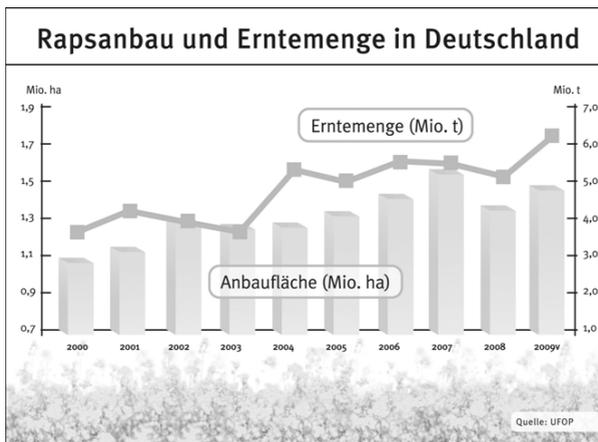
73

Herausgegeben von Manfred H. Wagner

Untersuchungen zum Materialverhalten von Rapsstroh-Polypropylen Compounds

Amer H. Akier

$$\sigma_c = E_m \varphi_m \epsilon_c + E_f \varphi_f \epsilon_c$$



Prof. Manfred H. Wagner, geboren 1948 in Stuttgart, studierte Physik und Physikalische Chemie an der Universität Stuttgart und der Oregon State University, Corvallis/USA. Nach der Promotion zum Dr.-Ing. (1976) an der Universität Stuttgart auf dem Gebiet der rheologisch-thermodynamischen Modellbildung in der Kunststoffverarbeitung war er bis 1979 wissenschaftlicher Assistent am Institut für Polymere der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Danach folgte eine neunjährige Industrietätigkeit bei der damaligen Hoechst-Tochter SIGRI GmbH (heute SGL Carbon AG) in der Elektrographitentwicklung mit vielfältigen internationalen Aufgaben. Daneben war er Lehrbeauftragter der Universität Erlangen-Nürnberg für das Fachgebiet Rheologie der Polymerschmelzen und der Fachhochschule Offenburg für Kunststofftechnik und Grundlagen der Chemie.

1988 wurde er an die Universität Stuttgart auf die neugeschaffene Professur für Numerische Strömungsmechanik/Rheologie berufen. In Stuttgart beschäftigte sich Prof. Wagner mit der Entwicklung von numerischen Verfahren zur Simulation von Deformations- und Strömungsvorgängen in hochviskosen newtonschen und nicht-newtonschen Flüssigkeiten und mit der Entwicklung rheologischer Stoffgesetze für makromolekulare Flüssigkeiten, wie sie in der Polymererzeugung und -verarbeitung, aber auch in der Bio- und Medizintechnik auftreten. 1998-99 war er Dekan der Fakultät Verfahrenstechnik und Technische Kybernetik der Universität Stuttgart. 1999 folgte er einem Ruf der TU Berlin und leitet seitdem das Fachgebiet Polymertechnik/Polymerphysik des Instituts für Werkstoffwissenschaften und -technologien.

Zahlreiche Publikationen auf so verschiedenen Fachgebieten wie Festkörperphysik, Numerische Strömungsmechanik, Rheologie polymerer Schmelzen, Kunststoffverarbeitung, Medizintechnik, Kunstkohle und Elektrographit belegen seine vielfältigen wissenschaftlichen Aktivitäten. Von 1991 bis 2003 war Prof. Wagner Vorsitzender der Deutschen Rheologischen Gesellschaft, von 1996 bis 2005 Sekretär der Europäischen Rheologischen Gesellschaft, und von 2005 bis 2009 war er deren Präsident. Seit 2004 ist er Geschäftsführer des International Committee on Rheology. 1981 erhielt Prof. Wagner den Annual Award der British Society of Rheology, 2002 den Swinburne Award des Institute of Materials, London. Die East China University of Science and Technology, Shanghai, ernannte ihn 2002 zum Gastprofessor.

ISBN 978-3-7983-2308-7 (Druckausgabe)

ISBN 978-3-7983-2309-4 (Online-Version)

ISSN 0174-4003

Berlin 2011

∞ *Gedruckt auf säurefreiem alterungsbeständigem Papier*

Druck/ Endformat, Ges. für gute Druckerzeugnisse mbH

Printing: Köpenicker Str. 187-188, 10997 Berlin

Vertrieb/ Universitätsverlag der TU Berlin

Publisher: Universitätsbibliothek im VOLKSWAGEN-Haus

Fasanenstr. 88, D-10623 Berlin

Tel.: (030)314-76131; Fax.: (030)314-76133

E-Mail: publikationen@ub.tu-berlin.de

<http://www.univerlag.tu-berlin.de/>

***To my Parents, for their support and for showing me how to
keep the right direction under all circumstances, and to my
daughter Raneem.***

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffwissenschaften und –technologien im Fachgebiet Polymertechnik / Polymerphysik an der Technischen Universität Berlin.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. Manfred H. Wagner für die Bereitstellung des Themas und die Unterstützung während der Bearbeitung.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Fachgebiets für die angenehme Arbeitsatmosphäre. Ganz besonders danke ich Herrn Dieter Mähler, der nun schon in seinem verdienten Ruhestand ist sowie Frau Astrid John-Müller, Herrn Dr. Lutz Rautenberg und Herrn Tobias Himmel, die mir während der gesamten Arbeitsphase stets hilfreich zur Seite standen.

Der libyschen Regierung danke ich sehr für die großzügige finanzielle Unterstützung.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die Eignung von Rapsstroh als neue Rohstoffquelle für die Herstellung von Naturfaser-Compounds untersucht. Dazu werden Versuche an Prüfkörpern mit bis zu 30 % Rapsstrohanteil durchgeführt. Die Untersuchung umfasst dabei die Änderung der Dichte, der Wasseraufnahme und die Analyse der mechanischen Eigenschaften mittels Zug- und Biegeversuch sowie der Schlagzähigkeit. Die Ergebnisse werden mit den entsprechenden Daten für die Compounds mit Flachs- und Hanffasern verglichen und bewertet.

Eine bisher wenig beachtete Variante der Verbesserung der Fasereinbettung durch eine nachträgliche γ -Bestrahlung wurde auf ihre Tauglichkeit untersucht.

Weiterhin wurden thermoplastische Elastomere als neuartige Additive für die Compoundierung von Naturfasern betrachtet und bewertet.

Abstract

The present work investigates the usability of straw from rape for the production of natural fiber compounds. It is done with samples containing up to 30 % of straw from rape. Analyzed are the change in density and the water uptake. The mechanical properties are tested by tensile tests, flexural tests, and impact tests. The results were compared to the data of compounds containing fibers of flax and hemp.

The unusual method of a γ - ray treatment of the produced compounds to enhance the embedding of the fibers into the polymer is tested.

Furthermore, thermoplastic elastomers were used and evaluated as novel additives for compounding of natural fibers.

Inhalt

Danksagung	iv
Eidesstattliche Erklärung.....	v
Kurzfassung	vi
Abstract	vii
1 Einleitung.....	13
2 Stand der Technik.....	15
2.1 Naturfasern.....	17
2.2 Aufbau von Naturfasern	18
2.3 Mechanische Eigenschaften von Naturfasern.....	22
2.4 Temperaturbeständigkeit von Naturfasern.....	23
2.5 Wasseraufnahme von Naturfasern	26
2.6 Anwendungen von Naturfasern	27
2.7 Raps	27
2.8 Compounds aus nachwachsenden Rohstoffen	32
2.9 Faser-Matrix Haftung.....	33
2.10 Theoretische Aspekte der Fasereinbettung.....	37
3 Verwendete Materialien	40
3.1 Polypropylen.....	40
3.2 Rapsstroh	41
3.3 Additive.....	43
3.3.1 Geniomer 140.....	43
3.3.2 Elastollan 685 AU	43
4 Untersuchungsverfahren	45
4.1 Herstellung der Probekörper.....	45
4.2 Dichtemessungen	47

4.3	Wasseraufnahme.....	48
4.4	Zugversuch.....	49
4.5	Biegeversuch.....	50
4.6	Schlagzähigkeit	51
4.7	Elektronenmikroskopische Untersuchungen	52
4.8	Gamma-Bestrahlung.....	53
5	Ergebnisse	54
5.1	Änderung der Dichte	54
5.2	Wasseraufnahme.....	55
5.3	Zugeigenschaften.....	58
5.4	Biegeeigenschaften	62
5.5	Schlagzähigkeit	64
5.6	Mikroskopische Bilder	65
6	Diskussion.....	69
7	Ausblick	71
	Abbildungsverzeichnis.....	72
	Tabellenverzeichnis.....	74
	Literaturverzeichnis.....	75
	Symbolverzeichnis.....	75
	Anhang.....	82

Symbolverzeichnis

A	Querschnittsfläche
ASTM	International (ursprünglich American Society for Testing and Materials)
b	Breite der Proben
b _N	Verbleibende Breite am Kerbgrund
DIN	Deutsches Institut für Normung
DTA	Differentialthermoanalyse
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN	Europäischen Normen
FTIR	FourierTransformations-Infrarotspektrometer
Gew.-%	Gewichtsprozent
ISO	Internationale Organisation für Normung
h	Dicke der Proben
l	Länge der Proben
c	Wasseraufnahme in Prozent
m ₁	Gewicht nach Wasserlagerung
m ₂	Gewicht vor Wasserlagerung
MAH	Maleinsäureanhydrid
MAHPP	Maleinsäureanhydrid-modifiziertes Polypropylen
MFI	Schmelzindexprüfung (Melt Flow Index)
MPa	Megapascal
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
R	Radius
TGA	Thermogravimetrische Analyse
UV	Ultraviolettstrahlung

acU	Schlagzähigkeit
E_f	E-Modul der Faser
E_m	E-Modul der Polymermatrix
l_c	kritische Faserlänge
ρ	Dichte
ε	Dehnung
ε_B	Bruchdehnung
ε_c	Dehnung des Compounds
σ_B	Bruchspannung
σ_c	Zugspannung des Compounds
σ_M	Matrixzugspannung
σ_f^*	querschnittbezogene Faserfestigkeit
φ	Faservolumengehalt
φ_f	Faservolumenanteil
φ_m	Volumenanteil der Polymermatrix
τ_m	Scherfestigkeit der Faser

1 Einleitung

Die Anwendung von Compounds aus Polymeren und Naturfasern ist schon seit langem weit verbreitet. Das beste Beispiel stellt hier wohl die Möbelindustrie dar. Zahlreiche Wohnmöbel bestehen aus den sogenannten Pressspanplatten. Dahinter verbirgt sich im Prinzip ein Compound aus Holzfasern, die in einen polymeren Klebstoff eingebettet wurden. Da bei der Herstellung von Teilen aus Massivholz hohe Mengen an Sägespänen anfallen, hat man somit einen guten Weg gefunden dieses Abfallprodukt noch einer sinnvollen Verwendung zuzuführen. Aus den eigenen Erfahrungen weiß man jedoch, dass ein Regalboden aus Pressspan bei weitem nicht so stabil ist, wie einer aus Massivholz. Allerdings reicht die Belastbarkeit für die meisten Einsatzbereiche im Wohnbereich aus und Pressspanmöbel sind bedeutend billiger als Möbel aus Massivholz. Es ist also deutlich, dass man durch die Verwendung eines Abfallproduktes als Zuschlagstoff für die Polymerverarbeitung immerhin noch brauchbare Produkte herstellen kann, die über eine absehbare Zeit eine Verwendung finden. Anschließend können diese Produkte immer noch thermisch entsorgt werden. Bevor man also anfallende Abfälle aus nachwachsenden Rohstoffen gleich verbrennt, kann man über einen weiteren Einsatz nachdenken.

Leider ist es nicht immer problemlos möglich solche Naturstoffe in Polymere einzuarbeiten. Es macht daher nur Sinn sich mit solchen nachwachsenden Rohstoffen zu befassen, die auch über eine längere Zeit in hohem Maße zur Verfügung stehen. In den vergangenen Jahren haben sich so die Fasern aus Flachs, Hanf, Jute oder auch Kokos besonderes bewährt. Ein Haupteinsatzbereich von Compounds mit diesen Fasern findet sich in der Automobilindustrie. Hier werden viele Teile, die keiner besonderen Belastung ausgesetzt sind und sich im nicht sichtbaren Bereich befinden, aus solchen Compounds hergestellt.

Wie erwähnt sollte der nachwachsende Rohstoff in hohem Maße verfügbar sein. Gerade in den letzten Jahren hat sich nun ein völlig neuer Rohstoff in den Mittelpunkt der Öffentlichkeit gedrängt. Durch die immerwährende Debatte um die Verknappung der Erdölressourcen und die massive Diskussion der CO₂ – Bilanz der Erde ist die Rapspflanze vor allem in Deutschland zu neuer Größe gewachsen. Innerhalb weniger Jahre wurden viele Agrarflächen nur noch mit Raps bepflanzt, um daraus Biodiesel zu gewinnen. Für diesen Zweck ist allein das Rapsöl, das man aus der Pflanze pressen kann, von Bedeutung. Für das

anschließend anfallende Rapsstroh war jedoch keinerlei Verwendung. Einige Firmen haben diese neuartige Rohstoffquelle erkannt und zumindest als Einstreu für den Reitsport einen neuen Markt erschlossen. Im Vergleich zu den üblichen Fasern, die bei der Compoundierung eingesetzt werden, scheint Raps gleiche Eigenschaften aufzuweisen. Zuvor war Raps nur eine unbedeutende Pflanze, so dass erst durch die Wandlungen der letzten Jahre sein Vorkommen und die nun anfallende Abfallmenge ihn als nachwachsende Naturfaser interessant machen.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten Rapsstroh als neuen nachwachsenden Rohstoff für die Compoundierung mit Polypropylen zu etablieren. Dabei wird auf Erkenntnisse der bereits funktionierenden Compoundierung mit anderen Fasern zurückgegriffen. So ist zum Beispiel das Problem der Haftvermittlung zwischen Faser und Polymer bekannt, aber es stehen bereits Lösungen zur Verfügung, so dass hier nicht gesondert darauf eingegangen wird. Hingegen wird das Problem der Wasseraufnahme durch die Zugabe von, bisher in diesem Bereich unüblichen, Additiven gründlich untersucht.

2 Stand der Technik

Eine allgemein gültige Meinung ist, dass Füllstoffe Polymeren zugesetzt werden, um ihre physischen und mechanischen Eigenschaften sowie ihre Verarbeitbarkeit zu verbessern und bzw. oder ihren Preis zu senken. Seit sehr langer Zeit beschäftigen sich Wissenschaftler und Industriebetriebe damit, Polymere mit Füllstoffen zu versetzen, um die bereits erwähnten Ziele zu erreichen. Allerdings kann man bei weitem nicht davon sprechen, dass die Technologie der fasergefüllten Polymere in ihrer Gesamtheit bereits vollständig erforscht ist. Immer noch ist es eine Herausforderung Füllstoffe überhaupt in eine Polymermatrix einzubetten. Auch sind die zur Verfügung stehenden Verarbeitungsverfahren für gefüllte Polymere nicht immer optimal ausgelegt. Jedoch muss man auch zugeben, dass es nie gelingen wird, alle Probleme der gefüllten Polymere zur vollsten Zufriedenheit zu lösen.

Eine interessante Übersicht über Füllstoffe auf mineralischer, organischer und synthetischer Basis findet sich in (1). Gerade in den letzten Jahrzehnten sind jedoch die nachwachsenden Rohstoffe und hier vor allem Flachs- und Hanffasern als weitere Füllstoffe hinzugekommen. Die Eigenschaften der reinen Polymere sind meist weitestgehend bekannt, so dass sich daraus mögliche Anwendungen ableiten lassen. Durch die Zugabe von Füllstoffen ist man aber immer wieder auf der Suche nach Lösungen, um etwaige Nachteile der Reinstoffe durch einen Füllstoff auszugleichen. Hier sei zum Beispiel auf Glasfasern verwiesen, die eben dafür sorgen, dass die mechanischen Eigenschaften verbessert werden. Weiterhin sind heute jedem die Kunststofffenster aus PVC bekannt. Dabei wird dem reinen Polymer zum Beispiel Calciumcarbonat zugesetzt, damit die Fenster auch der täglichen UV-Belastung standhalten. Es zeigt sich insgesamt, dass die gefüllten Polymersysteme zu einer eigenen Werkstoffgruppe neben den reinen Polymeren geworden sind.

Gerade für die Polymere, die mit nachwachsenden Rohstoffen gefüllt sind, weiß man, dass sich der Aufwand nur lohnt, um eine Kosteneinsparung zu realisieren. Allerdings gibt es drei Fragen, die dabei immer wieder auftauchen. Ist es möglich mit dem gefüllten Polymer die gleiche Festigkeit zu erreichen wie sie bei dem reinen Polymer vorliegt? Wie kann man sicherstellen, dass sich das gefüllte Polymer in gleicher Weise verarbeiten lässt, wie das reine Polymer? Wie kann man Polymer und Füllstoff am besten miteinander vermischen, um keine

zusätzliche Energie aufwenden zu müssen und ohne die Eigenschaften des Polymers und des Füllstoffs zu schädigen? Seit langem werden diese Fragen intensiv diskutiert, siehe (2), (3) und (4), und mit dem bekannten Wissen lassen sich auch schon einige Antworten geben. Je nachdem welchen Füllstoff man dem Polymer zugibt, kann man die Festigkeiten erhöhen, gleich halten oder erniedrigen. Ein gutes Beispiel sind die glasfaserverstärkten Polymere. Die Zugabe der Fasern führt zu einer deutlichen Erhöhung der Festigkeiten. Allerdings geschieht dies nur, wenn die Glasfasern entsprechend vorbehandelt werden, so dass die Polymermatrix die Fasern richtig einbetten kann. Werden unbehandelte Fasern in ein Polymer eingearbeitet, so sinkt die Festigkeit drastisch. Auch die Frage nach der gleichbleibenden Verarbeitung lässt sich teilweise beantworten. Durch die Zugabe geeigneter Fließadditive lässt sich der Produktfluss verbessern. Selbst reinem Polymer wird stets eine gewisse Menge an Fließadditiven zugesetzt, um den Schmelzfluss gleichmäßig zu halten. Für die bereits erwähnten Glasfasern ist jedoch durch deren Zugabe mit einer stärkeren Abrasion im Verarbeitungsprozess zu rechnen. Damit sind also mitunter die Materialanforderungen für die Verarbeitungsmaschinen unterschiedlich, wenn gefüllte Polymere eingesetzt werden. Auch für die dritte Frage hat sich quasi eine Standardantwort herausgestellt. Am besten lassen sich Fasern auf Doppelschneckenextrudern einarbeiten. Diese bringen während der Verarbeitung hohe Scherkräfte in das Material, was zu einer guten Durchmischung und zu einer weitestgehend homogenen Füllstoffverteilung führt. Speziell auf den Einsatz von Fasern aus nachwachsenden Rohstoffen lassen sich die drei Fragen noch einmal folgendermaßen beantworten. Die Einmischung von Naturfasern erfolgt am besten auf Doppelschneckenextrudern. Dabei können Fließadditive hinzugegeben werden, um den Schmelzfluss konstant zu halten. Die entstehenden Compounds hingegen werden im besten Fall die Festigkeiten des reinen Polymers erreichen.

Aus einer aktuellen Studie (5) geht hervor, dass allein in der deutschen Automobilindustrie im Jahr 2005 30.000 t Naturfaser-Verbundwerkstoffe eingesetzt wurden, wobei Holz hier nicht mit einbezogen ist. Hauptsächlich wurde dafür europäischer Flachs und Hanf verwendet. Ein Viertel der Naturfasern wurde sogar aus Asien bezogen. Ob der Transport über diese Distanz ökologisch sinnvoll ist, sei dahin gestellt. Standardmäßig werden die Naturfaser-Compounds in Formpressen verarbeitet und für die Herstellung von Innenraumbauteilen in Mittel- und Oberklassewagen eingesetzt.

Europaweit wird für die Compounds in der Automobilindustrie eine Fasermenge von über 30.000 t benötigt. Heimischer Flachs ist hier zwar von großer Bedeutung, die Einfuhr von asiatischen Fasern ist aber im Rahmen einer CO₂ – Bilanz völlig unnötig. Sollten die Mengen an bisher geernteten europäischen Fasermaterialien nicht ausreichen, so gibt die nachstehende Tabelle einen positiven Ansatz.

Tabelle 1 - Anbauflächen nachwachsender Rohstoffe in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2005 in Hektar (6)

	2002	2003	2004	2005
Rapsöl	664.930	668.753	859.907	1.061.923
Naturfasern	2.000	1.500	1.500	1.575

Der Tabelle 1 ist zu entnehmen, dass die Anbaufläche für die Erzeugung von Rapsöl im Zeitraum von 2002 bis 2005 fast um das Doppelte gestiegen ist und die Fläche für den speziellen Anbau von Naturfasern nur ein Bruchteil davon beträgt. Hier wird ganz klar deutlich, dass Rapsstroh, sollte es sich zum Compoundieren eignen, eine große Zukunft besitzt.

2.1 Naturfasern

In den letzten Jahren ist der Begriff „nachwachsende Rohstoffe“ zu einem Schlagwort geworden, mit dem man anscheinend die Probleme dieser Welt lösen kann. Unter nachwachsenden Rohstoffen versteht man die Gesamtheit aller pflanzlichen, tierischen und mikrobiellen Biomasse, die auf der photosynthetischen Primärproduktion basiert und vom Menschen zweckgebunden außerhalb des Nahrungs- und Futtermittelbereichs stofflich oder energetisch verwendet wird (7). Diese Definition zeigt, dass die Menschheit schon immer auf nachwachsende Rohstoffe zurückgegriffen hat, denn schon die einfachste Bambushütte unserer Urahnen bestand demnach aus nachwachsenden Rohstoffen. In der Mitte des letzten Jahrhunderts standen die synthetischen Baustoffe vermehrt im Vordergrund. Besonders die aufstrebende Polymertechnik schien die nachwachsenden Rohstoffe für moderne Konstruktionen überflüssig zu machen. Nachdem sich nun die Kunststoffe fest in der Materialienauswahl etabliert haben, kommen die nachwachsenden Rohstoffe wieder verstärkt zum Einsatz, da erkannt wurde, dass eine Kombination aus beiden Materialien

durchaus vorteilhaft sein kann. Besondere Bedeutung haben dabei die Naturfasern. In Abbildung 1 sind die Kategorien, in die sich die Naturfasern einteilen lassen, zusammen mit einigen Beispielen dargestellt. Die Einteilung ist in einer Norm geregelt (8).

Prinzipiell kann man alle Fasertypen versuchen in eine Polymermatrix einzuarbeiten. Allerdings wird sich zum Beispiel für Seide eine weitaus bessere Anwendung finden, als dieses kostbare Naturprodukt in irgendein Kunststoffbauteil zu integrieren.

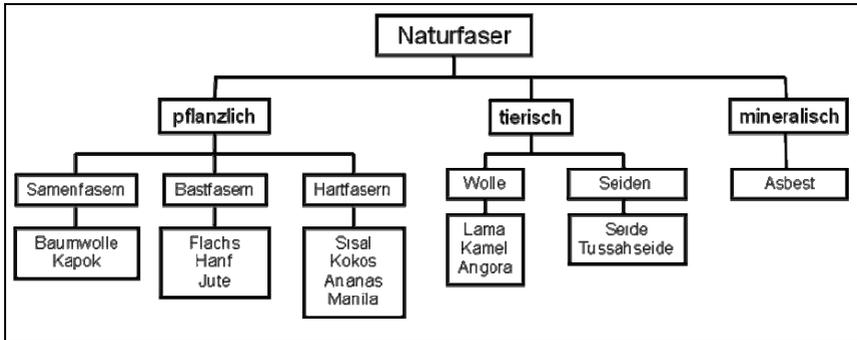


Abbildung 1 - Einteilung der Naturfasern

Die pflanzlichen Naturfasern hingegen werden zum Teil speziell für die Kunststoffindustrie angebaut oder stehen dieser als Abfallprodukt anderer Verwertungsbetriebe zur Verfügung. Aus der Gruppe der pflanzlichen Naturfasern werden vor allem Flachs, Hanf, Jute, Ramie und Kenaf zur Verstärkung von Kunststoffen eingesetzt. Auch finden sich Anwendungen von Sisal, Kokos und Ananasfasern. Die Verwendung von Holz ist insbesondere in der Möbelindustrie weit verbreitet.

2.2 Aufbau von Naturfasern

Um die Naturfaser als Werkstoff zu verstehen, muss man wissen, wie diese Fasern aufgebaut sind. Die Abbildung 2 zeigt ein detailliertes Bild vom Aufbau einer Naturfaser. Die Fasern sind vielschichtig aufgebaut, wobei die Bedingungen während des Wachstums (Sorte, Standort, Klima, Bodenverhältnisse), der Ernte (Reifegrad, Witterung, Erntetechnik) und des Aufschlusses (Röste, Trocken- oder Nassaufschluss) diesen Aufbau und die daraus resultierenden Fasereigenschaften stark beeinflussen (9). Für die Compounding solcher

Fasern sind neben der natürlichen Uneinheitlichkeit des Materials vor allem der hohe Wassergehalt und die schwer entfernbare Restfeuchte, die niedrige Temperaturstabilität sowie eine starke Geruchsentwicklung bei der Verarbeitung problematisch. Dennoch lohnt sich die Compoundierung, da neben geringen Materialkosten die Fasern eine geringe Dichte im Vergleich zu mineralischen Füllstoffen besitzen, im Vergleich zur Glasfaser ein isotropes Schwindungsverhalten der Bauteile vorliegt und die Fasern ein gutes akustisches Dämmverhalten besitzen.

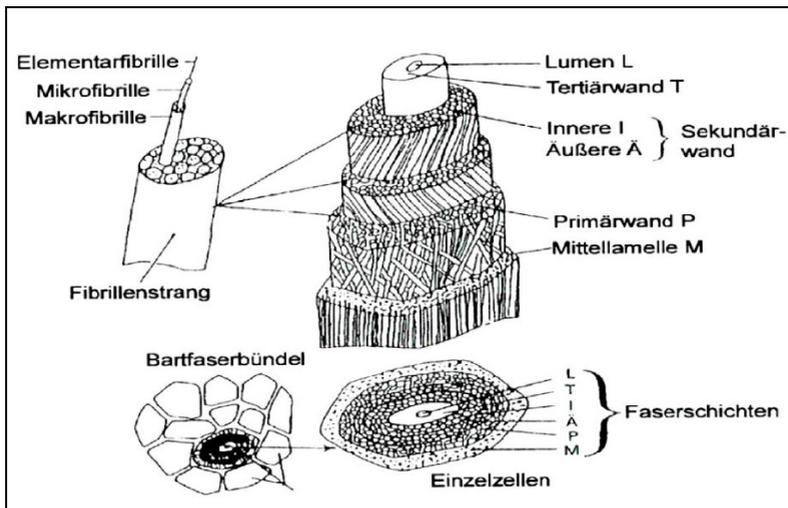


Abbildung 2 - Aufbau von Naturfasern

In (10) findet sich eine gute Beschreibung des Faseraufbaus. Pflanzliche Naturfasern bestehen nämlich aus Faserbündeln (technische Fasern), die sich aus einzelnen Faserzellen (Elementarfasern) zusammensetzten. Die Faserzellen bilden einen mehrschichtigen Verbund, wodurch Naturfasern schon in sich als Faserverbundwerkstoffe angesehen werden können. Die Elementarfasern sind innerhalb der technischen Fasern durch die sogenannte Mittellamelle (Kittsubstanz) miteinander verbunden und bestehen aus mehreren Schichten, siehe Abbildung 3. Die Einzelschichten bestehen aus kristallinen Fibrillen, die durch amorphe Hemicellulose und Lignin verklebt sind.

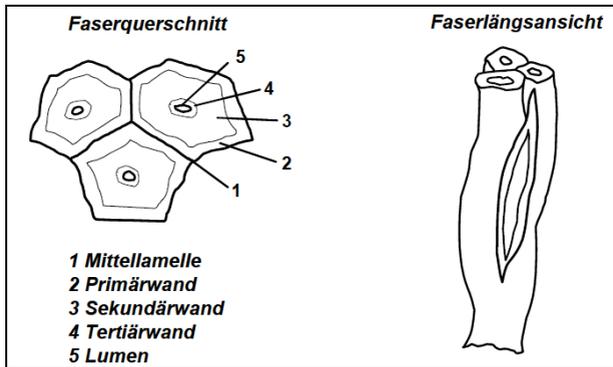


Abbildung 3 - Schematischer Aufbau von Bastfasern

Die nach der Mittellamelle folgende Primärwand ist sehr dünn und hat eine netzförmige Struktur. Die dickere Sekundärwand besteht aus mehreren Schichten von Mikrofibrillen. Je nach Faserart haben die Fibrillen verschiedene Längen und Durchmesser und sind unterschiedlich ausgerichtet, siehe Abbildung 4.

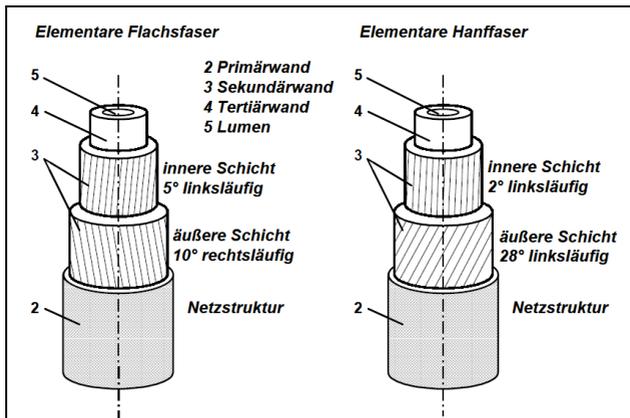


Abbildung 4 - Verlauf der Mikrofibrillen bei elementaren Flachs- und Hanffasern (11)

Beispielsweise bei Flachs- und Hanffasern haben die Mikrofibrillen einen geringeren Winkel gegenüber der Faserlängsachse. Dadurch ergeben sich ein hoher Orientierungsgrad sowie ein großer Anteil geordneter bzw. kristalliner Bereiche von Cellulosemolekülen. Da die mechanischen Eigenschaften maßgeblich vom Aufbau der Sekundärwand beeinflusst werden, spiegelt sich ein geringerer Fibrillenwinkel in hohen Faserfestigkeiten und geringen Reißdehnungen von Flachs- und Hanffasern wieder. Naturfasern wie Sisal und Baumwolle dagegen haben höhere Fibrillenwinkel (12), (13) und (14), woraus niedrigere Faserfestigkeiten und höhere Reißdehnungen resultieren. Die Tertiärwand ist wieder eine dünne Schicht, welche das Lumen umschließt. Das Lumen wird von eingetrockneten Protoplasmaresten ausgefüllt (11) und ist je nach Fasertyp und Reifegrad unterschiedlich ausgebildet.

Trotz der mehrschichtigen Faserstruktur und den botanischen Unterschieden zwischen den einzelnen Pflanzen bestehen die Naturfasern nun im Wesentlichen aus Cellulose, Hemicellulose, Pektin, Lignin und mineralischen Bestandteilen. Die Tabelle 2 zeigt die gewichtsbezogenen Anteile dieser Stoffe für einige Faserarten. Der strukturelle Aufbau der vor allem der Cellulosegehalt bestimmen die Fasereigenschaften wie Festigkeit, Dehnung, E-Modul und Feuchteaufnahme. In der Literatur finden sich dazu detaillierte Angaben (9), (15), (11), (16) und(16).

Tabelle 2 - Zusammensetzung einiger Fasertypen (10)

	Cellulose [m%]	Hemicellulose [m%]	Pektin [m%]	Lignin [m%]	Mineralische Bestandteile [m%]
Röstflachs	70,4	7,2	2,4	4,8	1,5
Grünhanf	65,6	7,1	5,2	5,1	3,8
Ramie	73,1	6,1	6,5	2,3	3,1
Jute	54,2	13,1	13,3	14,6	1,1
Sisal	55,3	23,8	9,1	6,7	1,1

Für die Bestandteile einer Naturfaser lassen sich die verschiedenen Funktionen für den Aufbau noch etwas genauer beschreiben (17). Die Cellulose bildet das Stützgerüst der sekundären Zellwand, wobei deren einzelne Moleküle über Wasserstoffbrückenbindungen vernetzt sind. Die Hemicellulose ist eine Gruppe von Polysacchariden, die zusammen mit

Pektinen die Hauptbestandteile der primären Zellwand bildet. Gemeinsam bilden sie den klebenden Zusammenhalt der Mikrofibrillen in der Zellwand. Das Lignin füllt die größeren Zwischenräume zwischen den Fibrillen. Es ist ein hochmolekulares Polymer des Coniferylalkohols. Das Pektin dient als Ionenaustauscher in der Zellwand und ist verantwortlich für die Verklebung der Elementarfaser. Pektin besteht aus Glucoron- und Galacturonsäure. Mit der Beschreibung der einzelnen Bestandteile wird deutlich, dass sich zwischen den Eigenschaften der frischen Faser auf dem Feld und der getrockneten Faser in der Verarbeitung starke Unterschiede ergeben müssen. So wird zwangsläufig die klebende Wirkung des Pektins in der trockenen Faser nicht mehr so hoch sein. Das bedeutet, dass sich die einzelnen Fibrillen leichter voneinander trennen lassen. Für die Verarbeitung ist es daher wichtig, Material mit der größtmöglichen Trockenheit zu bekommen. Nur dann hat die Faser eine Restfestigkeit mit der sich die mechanischen Eigenschaften der Compounds einigermaßen gleichmäßig bestimmen lassen.

2.3 Mechanische Eigenschaften von Naturfasern

Besondere Vorsicht ist bei der Anwendung mechanischer Kennwerte bei Naturfasern gegeben. Die Tabelle 3 gibt die mechanischen Fasereigenschaften für einige Faserarten an.

Tabelle 3 - Mechanische Fasereigenschaften einiger Fasertypen (10)

	Dichte [g/cm ³]	Reißfestigkeit [N/mm ²]	Reißdehnung [%]	E-Modul [MPa]
Röstflachs	1,48	658,6	1,37	48100
Grünhanf	1,50	826,4	1,20	68900
Ramie	1,48	475,1	2,53	18800
Jute	1,44	535,7	1,22	44000
Sisal	1,37	801,2	1,82	36900

Zahlreiche Untersuchungen kommen immer wieder zu anderen Ergebnissen (9), (18) und (16). Neben den, zum Teil sehr unterschiedlichen Prüfbedingungen, ist vor allem die Variation im natürlichen Faseraufbau dafür verantwortlich. Daher können der Literatur nur schwer genaue Kennwerte entnommen werden. Die Schwierigkeiten bei der Zugprüfung an pflanzlichen Naturfasern bestehen darin, dass die technischen Fasern aus einer Vielzahl von

Elementarfasern bestehen, die während der Prüfung aufspießen können. Außerdem ist die Bestimmung des wahren Faserquerschnitts schwierig, da die Dicke und die Querschnittsform der Naturfaser über die Faserlänge nicht konstant sind. Bei der Kennwertermittlung an Naturfasern sind weiterhin die bekannten Abhängigkeiten der Zugfestigkeit und des Moduls von der Einspannlänge und der Prüfgeschwindigkeit sowie bei der Faserprüfung auftretende Dehnungsfehler zu beachten. Weiterhin muss zwischen Faserbündel- und Einzelfaserprüfung unterschieden werden. Zur Ermittlung der wahren Faserfestigkeit sollten bei Naturfasern möglichst Einzelfaserprüfungen mit geringen Einspannlängen durchgeführt werden. Bei der Faserbündelprüfung werden in der Regel zu niedrige Festigkeiten gemessen, da nicht alle einzelnen Fasern gleichzeitig, sondern nacheinander reißen. In der Literatur wird die Reißfestigkeit häufig auch auf eine Einspannlänge von 0 mm extrapoliert. Nach (8) werden dabei aber für kurze Einspannlängen oft unrealistische hohe Faserfestigkeiten errechnet (10).

2.4 Temperaturbeständigkeit von Naturfasern

Für den Einsatz von pflanzlichen Naturfasern als Füllstoff für thermoplastische Polymere ist die Temperaturbeständigkeit eine wesentliche Eigenschaft. Eine Thermoplastschmelze wird sich immer in einem Temperaturbereich um 200 °C während der Verarbeitung befinden. Schon nach kurzer Wegstrecke im Extruder besitzt das Material eine homogene Temperatur. Insgesamt kann die Verweilzeit des Materials je nach Anwendung in der Maschine mehrere Minuten betragen. Die Kunststoffe werden daher vom Hersteller direkt mit thermischen Stabilisatoren ausgestattet, damit das entstehende Produkt eine konstante Qualität besitzt, die nicht durch thermische Belastung beeinflusst wird. Für die Zugabe von Naturfasern ist zunächst einmal davon auszugehen, dass es sich um trockenes Material handelt. Andernfalls würde bei den üblichen Verarbeitungstemperaturen Wasserdampf in der Maschine entstehen, der dann dazu führen kann, dass keine gleichmäßige Verarbeitung möglich ist. Dennoch befinden sich auch im trockenen Fasermaterial Komponenten, die sich durch die Einwirkung von Wärme bei der Verarbeitung zersetzen. In der Literatur findet sich eine ganze Reihe von Untersuchungen an pflanzlichen Naturfasern mit den üblichen Analyseverfahren. Die folgende Liste (10) gibt eine Übersicht.

- Thermogravimetrische Analyse (TGA) von Naturfasern (16), (19), (20), (21)
- Differentialthermoanalyse (DTA) von Naturfasern (20), (21), (22)
- Temperaturbehandlung von Fasern mit anschließender Prüfung der Restfestigkeit (16), (23)
- Temperaturbehandlung und Bestimmung des Polymerisationsgrades (16), (19), (23)
- Wärmelagerung mit nachfolgender Bestimmung der Kristallinität (16), (24)
- Fouriertransformierte Infrarot-Spektroskopie (FTIR) zur Untersuchung der Zersetzungsgase beim thermischen Abbau von Naturfasern (19)

Weiterhin finden sich allgemeine Angaben, dass Naturfasern eine Temperaturbeständigkeit bis 280 °C aufweisen können (18), (19), (22). Im Gegensatz dazu stehen jedoch TGA Untersuchungen anderer Autoren (10), (16), (25), die belegen, dass bereits vor der Zersetzung und dem damit verbundenen Substanzverlust schon eine Minderung der mechanischen Eigenschaften der Faser eintritt. Die Ableitung von thermischen Beständigkeiten allein aus TGA Ergebnissen ist damit nicht möglich. In der Abbildung 5 wird dies verdeutlicht.

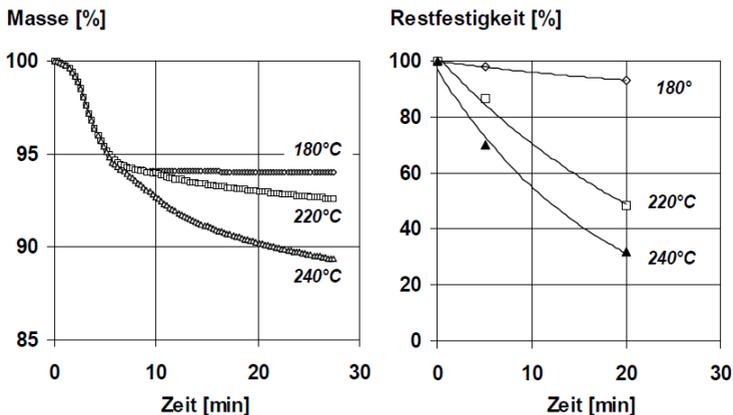


Abbildung 5 - TGA-Kurven und Festigkeitsabbau von Röstflachfasern (10)

Abgeleitet aus den Bedingungen bei der Verarbeitung ist es daher besser die Reißfestigkeit der Naturfasern bei verschiedenen Temperaturen und nach verschiedenen Verweilzeiten bei

höheren Temperaturen zu Prüfen. Je nach Verarbeitungsverfahren können dabei Verweilzeiten bis zu 10 Minuten interessant sein. Die Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse einer sehr umfangreichen Studie.

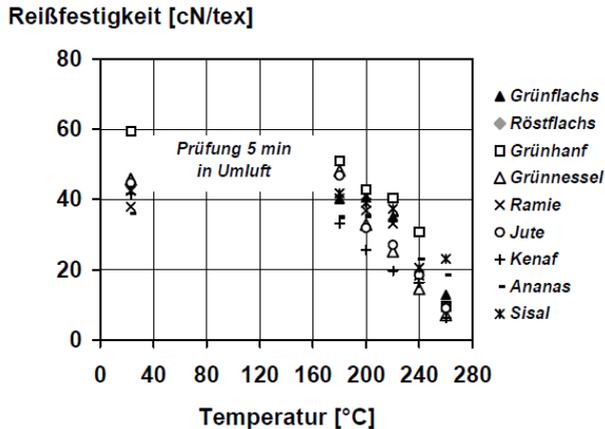


Abbildung 6 - Reißfestigkeit von Naturfasern in Abhängigkeit der Temperatur (10)

Aus den weitreichenden Analysen, die in der Literatur zu finden sind, lässt sich generell der Schluss ziehen, dass Naturfasern mit zunehmender Temperatur in zunehmendem Maße ihre mechanische Festigkeit verlieren. Der Mechanismus der thermischen Schädigung hängt von der chemischen Grundstruktur der Naturfasern ab (10). Maßgeblich wird der Abbau durch den Cellulosegehalt und den Polymerisationsgrad der Cellulose bestimmt (19), (26), (27). Jedoch sind auch die anderen Faserbestandteile wie Hemicellulose, Lignin und Pektin für die Ausprägung der thermischen Stabilität verantwortlich (27), (28), (29). Zusätzlich haben gerade die FTIR Untersuchungen an den Zersetzungsgasen gezeigt, dass diese zum einen zu einer Porenbildung während der Verarbeitung führen können, aber vielmehr noch zu einer starken Geruchsbildung im Verarbeitungsprozess und vor allem beim Endprodukt führen. Aus diesem Grund sind zum Beispiel Anwendungen entsprechender Compounds im Automobil – Innenraum nicht ohne weiteres möglich (30).

2.5 Wasseraufnahme von Naturfasern

Jeder Mensch weiß, dass eine Pflanze, die kein Wasser bekommt vertrocknet. Bekannt ist den Biologen ebenso, wie Pflanzenwurzeln Nährstoffe und Wasser aufnehmen und über die Pflanzenfasern bis in die Spitze der höchsten Bäume transportiert. Es ist also unnötig zu diskutieren, ob pflanzliche Naturfasern Wasser aufnehmen, sondern nur möglich zu klären wie stark die Wasseraufnahme ist und wie sie in einem Compound verringert werden kann. Bekannt ist, dass die Wassermoleküle in den Fasern intermolekular gebunden sind und dass die Wasseraufnahme maßgeblich von der Reinheit, der Morphologie und der Kristallinität des Celluloseanteils bestimmt wird (11), (16). Ebenso sind aber gerade Begleitstoffe in der Faser, wie Fette und Wachse, von besonderer Bedeutung, wenn es um die Wasseraufnahme geht (31). Für die Rohstoffe zur Compoundierung wird davon ausgegangen, dass diese nur noch eine sehr geringe Restfeuchte aufweisen. Ansonsten ist, wie an anderer Stelle bereits erwähnt, die Verarbeitung durch den ausgasenden Wasserdampf stark gestört. Interessant ist dann die Wasseraufnahme der Compounds. Die Feuchtezunahme bei Lagerung in feuchter Luft für eine Reihe trockener Naturfasern ist in Abbildung 7 zu sehen.

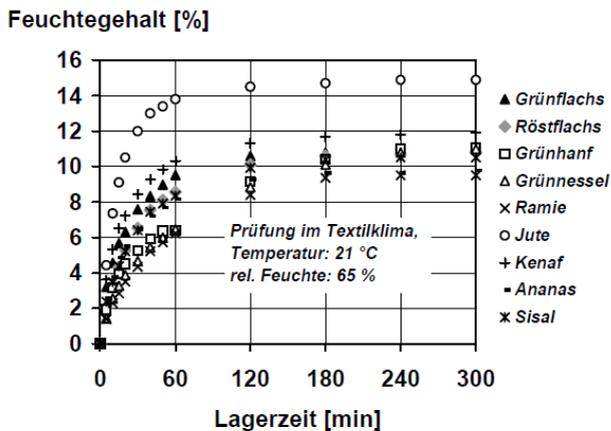


Abbildung 7 - Feuchteaufnahme von Naturfasern in Abhängigkeit der Lagerzeit (10)

Da Raps bisher in der Literatur nicht behandelt worden ist, lassen sich im Vorfeld auch keinerlei Aussagen über die Stärke der Wasseraufnahme im Vergleich zu den üblichen Fasern machen. In der vorliegenden Arbeit wird die Wasseraufnahme entsprechender Compounds noch eingehend untersucht.

2.6 Anwendungen von Naturfasern

Aufgrund der geringen Dichte sind nachwachsende Rohstoffe als Füllstoff beliebt bei Anwendungen, bei denen Gewichtseinsparungen eine zentrale Rolle spielen. Die Hauptanwendung findet sich daher in der Automobilindustrie. Jedes eingesparte Kilogramm bedeutet entweder einen geringeren Verbrauch oder den Einbau eines Kilogramms sicherheitsrelevanter Elektronik bei gleichem Kraftstoffverbrauch. In der Abbildung 8 ist beispielhaft gezeigt, welche Komponenten in einem Auto aus Compounds mit nachwachsenden Rohstoffen bestehen können.



Abbildung 8 - Bauteile mit Füllstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen im Auto (32)

Aufgrund der starken Eigenschaftsschwankungen von Naturfasern und der geringen mechanischen Festigkeit werden entsprechende Compounds nur im nicht sicherheitsrelevanten Bereich eingesetzt.

2.7 Raps

Die Rapspflanze (*Brassica napus*) entstand vermutlich aus der Kreuzung zwischen Rüben und Kohl und gehört zu der Familie der Kreuzblütler. Der Name kann vom lateinischen *rapum* – Wurzel, Rübe abgeleitet werden. Raps ist eine Ölfrucht und hat in Europa eine große Bedeutung. Die Abbildung 9 zeigt ein botanisches Schaubild zur Bestimmung der einzelnen Pflanzenteile der Rapspflanze.

Raps wurde schon ab dem 17. Jahrhundert kultiviert und war schon den Römern bekannt. Ursprünglich stammt der Raps aus dem östlichen Mittelmeerraum und wurde zur Gewinnung von Speise- und vor allem Lampenöl genutzt. Mit der Industrialisierung wurde Raps für die Seifenherstellung und als Schmieröl für Dampfmaschinen verwendet. In Deutschland gelang der Durchbruch erst ab 1970 durch die Einführung neuer Sorten mit einem reduzierten Anteil an Erucasäure und Senfglykogen als Kulturpflanze für Speiseöl und Futtermittel.



Abbildung 9 - Botanische Übersicht über die einzelnen Pflanzenteile der Rapspflanze (33)

Heute ist Raps in Deutschland mit über einer Million Hektar Anbaufläche die bedeutendste Kulturpflanze. Die Entwicklungen der letzten Jahre in den Bereichen Anbaufläche und Ernteertrag, Rapsölverwendung sowie Biodieselproduktion wird aus den Abbildung 10 bis Abbildung 12 deutlich.

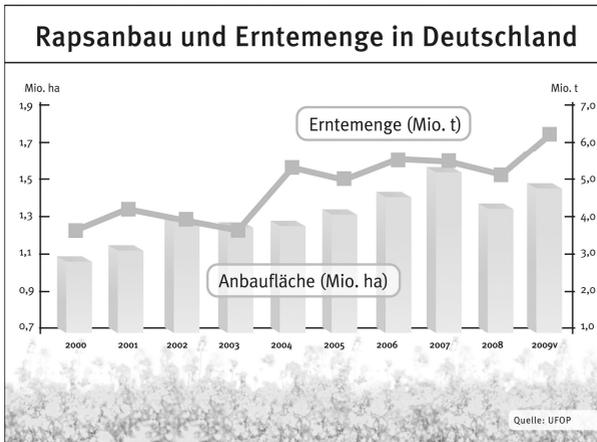


Abbildung 10 - Entwicklung der Anbaufläche und der der Erntemenge für Raps (34)

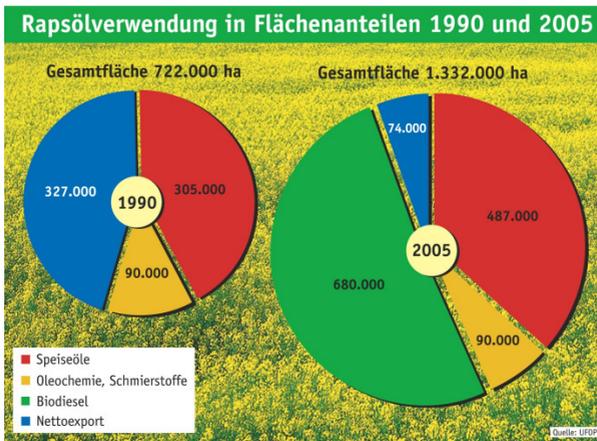


Abbildung 11 - Zunahme der Rapsanbaufläche in Deutschland (34)



Abbildung 12 - Entwicklung der Produktionskapazität für Biodiesel (34)

In Deutschland wird hauptsächlich Winterraps angebaut, wobei Kornerträge bis zu fünf Tonnen je Hektar bei einem Ölgehalt von 40 bis 50 % realisiert werden können. Darüber hinaus ist der Raps als Blattfrucht ein wichtiges Glied in der getreidebetonten Fruchtfolge.

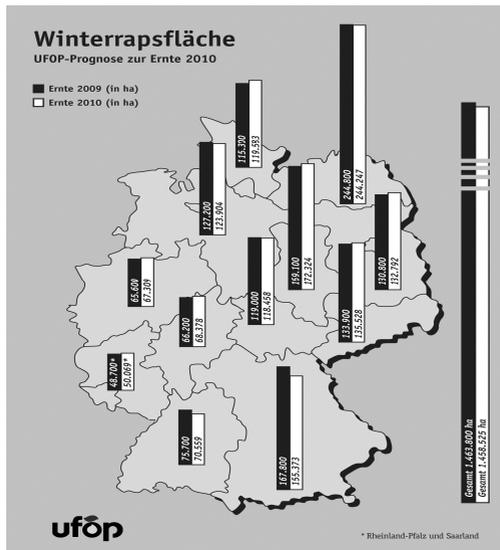


Abbildung 13 - Prognose der Anbaufläche für Winterraps in 2010 (34)

Die Abbildung 13 zeigt das Bild der Prognose für die Anbaufläche des Winterapses in 2010. Daraus wird deutlich, dass Raps deutschlandweit eine gefragte Kulturpflanze ist. Aus der Abbildung 14 geht hervor, dass aktuell fast 400 Euro pro Tonne geerntetem Raps verdient werden können. Somit ist der Rapsanbau derzeit ein lukratives Geschäft.

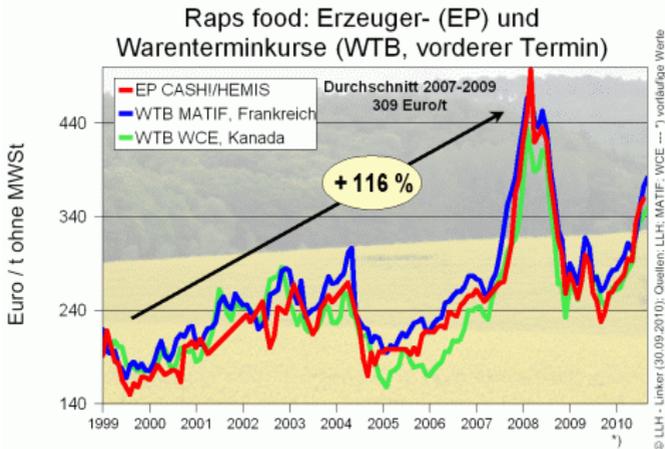


Abbildung 14 - Kursentwicklung der Rapspreise (35)

Welche Produkte bisher, aus den bereits erwähnten fünf Tonnen pro Hektar, erzeugt werden, zeigt die Abbildung 15. Dabei darf nicht vergessen werden, dass am Ende immer noch große Mengen an Rapstroh anfallen, für die es momentan keinerlei Verwendung gibt.

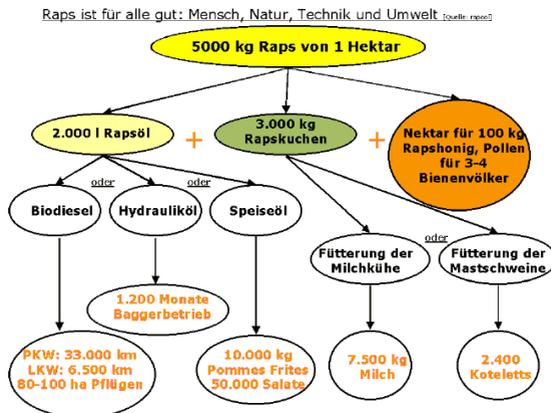


Abbildung 15 - Verwertung der Rapserte (36)

In der Abbildung 16 ist der Weg der Verwertung der Rapspflanze noch einmal schematisch deutlicher dargestellt.

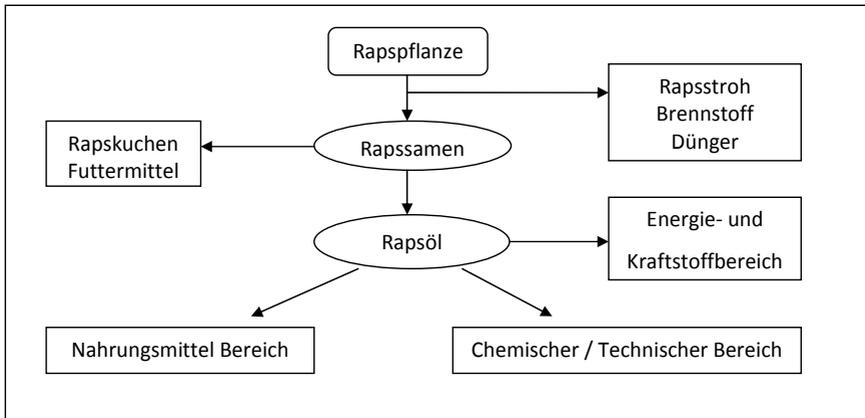


Abbildung 16 - Verwertung von Raps

Die gezeigten Übersichten geben ein klares Bild darüber, welch großes Wertstoffpotenzial im anfallenden Rapsstroh liegt. Gelingt es, aus den Abfällen der bereits etablierten Rapsverwertung weiteren Nutzen zu ziehen, so kann hier ein völlig neuer Wertstoffzyklus entstehen.

Da Raps bisher keine Bedeutung für die Compoundierung besaß, finden sich in der Literatur keinerlei Angaben über die mechanischen Eigenschaften der Rapsfasern. Auch können bisher keine Aussagen über den Anteil der Faserbausteine Cellulose, Hemicellulose, Lignin und Pektin getroffen werden, da diese Werte nicht publiziert sind und im Rahmen dieser Arbeit keine Möglichkeit zur Bestimmung gegeben war. Allerdings haben diese Daten nur informativen Charakter und geben keinerlei Auskunft über die späteren Eigenschaften der Compounds.

2.8 Compounds aus nachwachsenden Rohstoffen

Für die Compoundierung von Naturfasern eignen sich prinzipiell thermoplastische Massenkunststoffe wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) oder Polyvinylchlorid (PVC). Im Gegensatz zum Einsatz von Glasfasern, die die mechanischen Eigenschaften eines Kunststoffbauteils verbessern, ist bei der Zugabe von Naturfasern davon auszugehen, dass

diese einen negativen Einfluss auf die Festigkeit des Bauteils besitzen. Daher ist es nicht ratsam hochwertige Kunststofftypen für die Compoundierung zu verwenden. Durch den Einsatz der Naturfaser kann jedoch für Anwendungen, die keiner besonderen Belastung unterliegen, eine Materialeinsparung des verwendeten Polymers von Vorteil sein. Da es sich bei der Compoundierung um ein Mischen von stark unterschiedlichen Materialien handelt, ist dies nicht problemlos möglich. Um überhaupt eine Mischung der Polymerschmelze mit dem Fasermaterial zu ermöglichen, ist es nötig hohe Scherkräfte aufzubringen. Aus diesem Grund ist die Verwendung von Doppelschneckenextrudern unbedingt notwendig, um weitestgehend homogene Compounds zu erhalten. Weiterhin ist darauf zu achten, dass die Fasern möglichst trocken sind, da bei einer Verarbeitungstemperatur um 180°C enthaltenes Wasser verdampft, was zu zusätzlichen Problemen führt. Auch sind sehr ölhaltige Fasern ungeeignet, da das Öl einen Verbund zwischen Faser und Polymer verhindert. Aus den erwähnten Gründen ist es ersichtlich, dass, sobald ein geeignetes Verfahren gefunden ist, versucht wird möglichst alle Faserarten damit zu verarbeiten. Im Laufe der letzten Jahre hat sich somit für die Herstellung von Naturfaser-Compounds die Verarbeitung auf Doppelschneckenextrudern mit Polypropylen als Matrixwerkstoff und mit Maleinsäureanhydrid modifiziertem Polypropylen (MAHPP) als Haftvermittler etabliert (37).

Das compoundierte Material wird nach der Extrusion oft granuliert und dann einer weiteren Verarbeitung zugeführt. Hier ist insbesondere das Fließpressen momentan die Hauptanwendung. Die Einführung der Verarbeitung von Granulat aus Naturfaser-Compounds mittels Spritzguss hat aber in den vergangenen Jahren stark zugenommen. Hier lag das Hauptproblem in der geringen thermischen Stabilität der Naturfasern, so dass die Spritzgussverarbeiter erst die korrekte Handhabung dieses Granulat erlernen mussten. Inzwischen gibt es aber in Deutschland zum Beispiel schon eine ganze Reihe von Anbietern für Spritzgussteile aus Naturfaser-Compounds (38).

2.9 Faser-Matrix Haftung

Bei der Einbettung von Fasern, bzw. Füllstoffen allgemein, in eine Polymermatrix ergibt sich immer das Problem der Faser-Matrix Haftung. Die in sehr vielfältigen Anwendungen vorkommenden Glasfasern werden zum Beispiel bereits während ihrer Herstellung mit entsprechenden Haftvermittlern getränkt, die speziell auf die Polymermatrix abgestimmt

sind, in die die Fasern eingebettet werden sollen. Die entscheidende Größe für die Faser-Matrix Haftung ist die Grenzflächenhaftung der Faser. Über die Grenzfläche zwischen Faser und Polymer findet eine Kraftübertragung statt und Schubspannungen werden von der Matrix in die Faser übertragen. Bei schlechter Faser-Matrix Haftung tritt während der Beanspruchung des Compounds ein reibungsbehaftetes Gleiten in der Grenzfläche auf. Dadurch kommt es zu einer Verschiebung zwischen Faser und Matrix was schließlich zum sogenannten Faser-pull-out führt (39). Die Qualität der Faser-Matrix-Haftung hängt sowohl von der Ausbildung chemischer Bindungen als auch von rein physikalischen Gegebenheiten, wie dem Form- oder Kraftschluss ab. Zur Verbesserung der Grenzflächenhaftung gibt es daher folgende Möglichkeiten (10).

- Vorbehandlung der Verstärkungsfasern zur gezielten Beeinflussung der Faseroberfläche.
- Modifizierung der Polymermatrix zur Angleichung der Oberflächenenergien von Faser und Matrix.

Unterschiedliche Varianten zur Verbesserung der Faser-Matrix Haftung werden an verschiedenen Stellen in der Literatur diskutiert (40), (41) und (42). Als Haftvermittler haben sich bisher vor allem Silane, Polyvinylalkohol, Polyvinylacetat und Maleinsäureanhydrid als geeignet erwiesen. Näheres findet sich in (16).

Im Vergleich zu den bereits erwähnten Glasfasern bringen die Naturfasern zusätzliche Probleme mit sich, die sich nachteilig auf die Faser-Matrix Haftung auswirken (10).

- Naturfasern haben eine raue Oberfläche und liegen in der Regel nur als Stapelfasern vor.
- Verunreinigungen aus Wachstum, Ernte und Aufschluss erschweren die Zugänglichkeit zu den Cellulosemolekülen.
- Naturfasern haben einen hohen Feuchtegehalt.
- Die Möglichkeiten zur definierten Aufbringung von Haftvermittlern auf die Faseroberfläche sind begrenzt.

Als Beispiel soll kurz auf die Haftvermittlung zwischen Cellulosefaser und Polypropylen (PP) mittels Maleinsäureanhydrid (MAH) eingegangen werden.

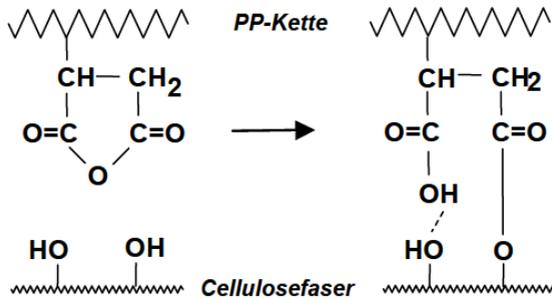


Abbildung 17 - Anbindung von MAH-PP-Haftvermittler an eine Cellulosefaser (10)

Die Abbildung 17 zeigt schematisch, wie die Säureanhydridgruppen der MAH-PP-Haftvermittler durch die Ausbildung von Wasserstoffbrücken und kovalenten Esterbindungen eine feste Verankerung mit den Hydroxylgruppen der Cellulosefaser herstellen. Da ein Maleinsäureanhydrid-Polypropylen-Copolymer zur Haftvermittlung eingesetzt wird, führt die lange PP-Kette des Haftvermittlers gleichzeitig zu einer Angleichung der Oberflächenenergien zwischen Faser und Polymermatrix (43). Letztlich wird somit eine bessere Benetzung der Fasern realisiert (44).

Die Hersteller entsprechender Haftvermittler bieten Copolymere mit unterschiedlichen MAH-Konzentrationen an. In (10) findet sich eine aufschlussreiche Gegenüberstellung von drei Typen von MAH-Haftvermittlern. Die Tabelle 4 gibt die eingesetzten Typen an.

Tabelle 4 - Vergleich von MAH-Haftvermittlern (10)

Bezeichnung	MAH-Gehalt [m%]
Hostaprime HC5	4,9
Hostamont TPAR 504	4,5
Exxelor PO 1020	1,1

Als Ergebnis des Vergleichs konnte anhand des E-Moduls und vor allem der Zugfestigkeit gezeigt werden, dass die Compouneigenschaften durch die Zugabe von MAH-Haftvermittlern verbessert werden kann, siehe Abbildung 18 und Abbildung 19.

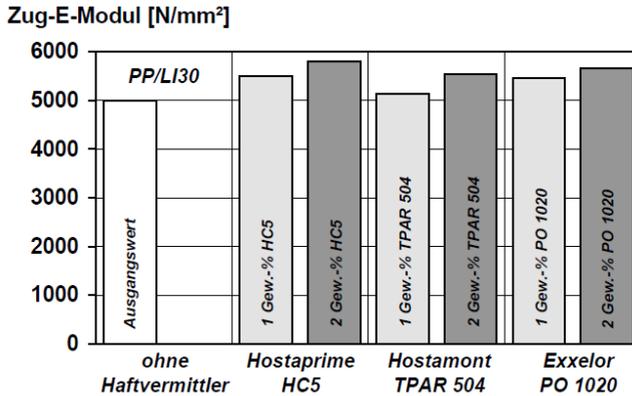


Abbildung 18 - Vergleich der E-Moduln bei Anwendung verschiedener Haftvermittler (10)

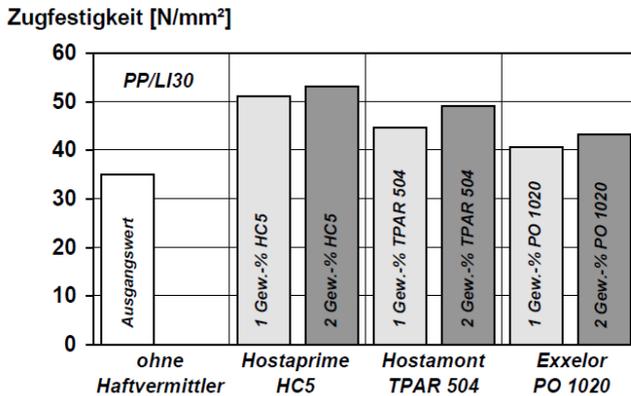


Abbildung 19 - Vergleich der Zugfestigkeit bei Anwendung verschiedener Haftvermittler (10)

Aus der Untersuchung folgt, dass der Haftvermittler mit der höchsten MAH-Konzentration die beste Wirkung zeigt und diese noch durch die Erhöhung der Zugabemenge steigt. Wie aus den Abbildungen zu erkennen ist, ist der Effekt bei den E-Moduln nicht so deutlich. Dies liegt aber daran, dass im Bereich geringer Verformungen, wo der E-Modul bestimmt wird, die Faser-Matrix Haftung noch kaum Einfluss auf die Verbundeigenschaften hat.

2.10 Theoretische Aspekte der Fasereinbettung

Die Theorie zur Beschreibung von Verbundfestigkeiten führt zwangsläufig zu einer sehr detaillierten mathematischen Beschreibung der Spannungsverhältnisse im betrachteten Bauteil unter Berücksichtigung der Kraftflüsse und des Zusammenwirkens von Faser und Polymermatrix. Für die Betrachtung von Naturfasern ist es nicht nötig sich komplett dieser theoretischen Betrachtung zu widmen. Es gibt so viele Einflussfaktoren für den Aufbau der Naturfasern, dass an dieser Stelle nur eine kurze Beschreibung der Theorie der Faserverbunde reichen soll (45). Man kann im einfachsten Fall annehmen, dass eine Zugspannung, die auf ein Faserverbundbauteil wirkt (σ_c), additiv auf die Faser (f) und die Polymermatrix (m) verteilt wird.

$$\sigma_c = E_m \varphi_m \varepsilon_c + E_f \varphi_f \varepsilon_c$$

In der obigen Gleichung bezeichnet E den Zugmodul, φ den Volumenanteil und ε_c die Dehnung des Compounds. Dieser simple Zusammenhang ist jedoch nur gültig, solange man eine kontinuierliche Faser betrachtet. Für die Beschreibung eines Compounds mit endlichen Fasern ergibt sich eine etwas andere Gleichung, da die Spannung ungleich über die Faserlänge verteilt ist, siehe Abbildung 20.

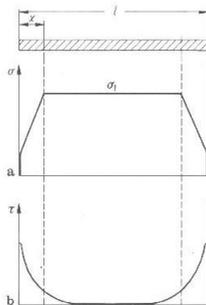


Abbildung 20 - Spannungsverlauf (a) und Schubspannung an der Grenzfläche (b) für eine endliche Faser der Länge l (45)

Die Spannung wird durch die Polymermatrix in die Faser gebracht. Die Faser soll beschrieben werden durch ihre Querschnittsfläche A , ihren Radius r und ihre Länge l . Weiterhin soll es ein Endsegment wie in ABB mit der Länge x geben. Stellt man das mechanische Gleichgewicht für dieses Endsegment auf, so ergibt sich:

$$\sigma_x \pi r^2 = \int_0^x \tau(x) 2\pi R dx + \sigma_m \pi r^2$$

Die Terme ergeben sich wie folgt.

$\sigma_x \pi r^2$ Zugspannung, die an das Endsegment durch den Rest der Faser übertragen wird.

$\int_0^x \tau(x) 2\pi R dx$ Teil der Zugspannung, der durch Schubspannungen über die Mantelfläche in die Faser geleitet wird.. Zu bemerken ist, dass $\tau(x)$ für ein elastisches Material variabel ist, ist es bei einer Polymermatrix als konstant anzunehmen.

$\sigma_m \pi r^2$ Teil der Zugspannung, der durch Normalspannungen von der Polymermatrix an die Endflächen der Faser übertragen wird.

Es stellt sich nun die Frage, wodurch die an die Faser übertragbare Spannung begrenzt ist. Dies führt auf die Definition der kritischen Faserlänge l_c . Für $x \geq l_c$ wird die an die Faser übertragene Spannung maximal und es gilt:

$$\sigma_x A_f = E_f \epsilon_f A_f = \int_0^{x=l_c} \tau(x) 2\pi r dx$$

Wie bereits erwähnt gilt in einer Polymermatrix $\tau(x)=\tau_m$ und damit:

$$E_f \epsilon_f A_f = \tau_m 2\pi r l_c$$

Definiert man nun die maximale Zugspannung der Faser

$$\left(E_f \epsilon_f \right)_{\max} = \sigma_f^t$$

so folgt nach Einsetzen:

$$l_c = \frac{\sigma_f^* r}{2\tau_m}$$

Bringt man nun noch den Faserdurchmesser ein und berücksichtigt, dass die Faser zwei Enden hat (bisher wurde nur ein Ende betrachtet), so ergibt sich die kritische Faserlänge zu:

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_m}$$

Eine noch genauere Beschreibung findet sich in (10). Dort finden sich auch interessante Ergebnisse einer theoretischen Berechnung auf Grundlage der hier skizzierten Ansätze, die die Verbundfestigkeiten in Abhängigkeit der Faserlängen für verschiedene Fasermodelle zeigen, siehe Abbildung 21.

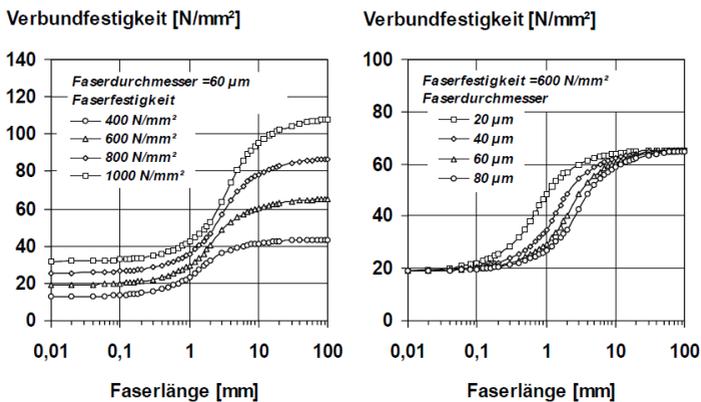


Abbildung 21 - Theoretische Festigkeiten von naturfaserverstärktem Polypropylen (10)

Es wird aus der obigen Abbildung deutlich, dass für die unterschiedlichsten Annahmen bezüglich der Faserfestigkeit und des Faserdurchmessers erst ab 1 mm Faserlänge überhaupt eine erhöhte Verbundfestigkeit zu erwarten ist. Für die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit ist das ein wichtiger Punkt, der bei der Herstellung der Fasercompounds berücksichtigt wird.

3 Verwendete Materialien

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit sind an Compounds aus Polypropylen und Rapsstroh durchgeführt worden. Zusätzlich kamen zwei weitere Kunststoffe als Additive zur Anwendung. Im Folgenden werden diese Materialien kurz charakterisiert.

3.1 Polypropylen

Wie bereits im Abschnitt 2.8 erläutert, eignet sich Polypropylen sehr gut zur Compoundierung von nachwachsenden Rohstoffen. Aus der Fülle der auf dem Markt zur Verfügung stehenden Typen wurde das Polypropylen der Firma Sabic Typ 579S ausgewählt. Der Hersteller gibt als Hauptanwendung die Herstellung dünnwandiger Behälter im Spritzguss an. Der Vorteil dieses Materials ist darin zu sehen, dass es für die genannte Anwendung sehr gute Fließeigenschaften besitzt. Da bei der Compoundierung nachwachsender Rohstoffe Partikel unterschiedlicher Größe und vor allem mit undefinierter Oberflächenrauigkeit von der Polymermatrix umströmt und in dieser fest eingebettet werden müssen, wird hierfür eine gute Fließfähigkeit des Polypropylens gefordert. Das Material ist zwar zusätzlich noch antistatisch, diese Eigenschaft war jedoch nicht entscheidend bei der Auswahl. In Tabelle 5 sind einige Herstellerangaben für das Material zusammengestellt.

Tabelle 5 – Materialeigenschaften laut Hersteller des Polypropylens 579S (Sabic)

Eigenschaft	Wert	Prüfnorm
Dichte (23°C)	905 kg/m ³	ISO 1183
MFI-Wert (230°C, 5kg)	158 g/10min	ISO 1133
Streckspannung	41 MPa	ISO 527
Bruchspannung	55 MPa	ISO 527
Bruchdehnung	500 %	ISO 527
Biegemodul	1900 MPa	ASTM D 790
Izod-Kerbschlagzähigkeit (23°C)	2,0 kJ/m ²	ISO 180/4A

Das Material liegt als Granulat vor, wie die Abbildung 22 zeigt.



Abbildung 22 - Polypropylengranulat

3.2 Rapsstroh

Ein häufiges Problem bei Untersuchungen mit nachwachsenden Rohstoffen ist die Verfügbarkeit des Materials in guter Qualität und die Verfügbarkeit einer Liefermenge, die bei Versuchen im Labormaßstab gut zu handhaben ist. Auf Nachfrage bei verschiedenen Rapsverwertern war die Bereitschaft Material zur Verfügung zu stellen zwar stets vorhanden, jedoch wurden nur Abkippungen ganzer Lastwagencontainer angeboten, bei denen dann feuchtes und öliges Rapsstroh vorgelegen hätte. Dieses Material erwies sich also von vornherein als ungeeignet. Ein Bereich, der das anfallende Rapsstroh aus der Rapsölproduktion als verwertbares Produkt für sich entdeckt hat, ist der Reitsport. Hier kommen üblicherweise Sägespäne oder Stroh zum Ausstreuen der Pferdeboxen zum Einsatz. Im Gegensatz zu den Sägespänen liegt beim Rapsstroh der große Vorteil darin, dass das Material staubfrei ist. Beworben wird das Rapsstroh daher als Alternative für den Pferdestall, damit eine angenehmere staubfreie Luft vorliegt. Für die durchgeführten Untersuchungen in dieser Arbeit wurde nun Rapsstroh mit dem Handelsnamen Rapsodie in Ballen je 22 kg aus dem Reitsporthandel bezogen, siehe Abbildung 23.



Abbildung 23 - Ballenware Rapsstroh

Die Rapsstrohballe bestehen aus trockenem, öl- und staubfreiem Rapszerschnitt. Die Schnittlänge beträgt im Mittel 7 cm und ist damit noch zu groß, um der Compoundierung zugeführt zu werden. Aufgrund der Trockenheit des Materials ließ sich das Rapsstroh ohne Probleme mittels einer Herbold Schneidmühle (Modell SML 180/100) zunächst grob in kleinere Stücke teilen und anschließend in einer Stiftmühle fein zermahlen. Die Abbildung 24 zeigt das Material vor und nach dem Mahlen.



Abbildung 24 - Rapsstroh; links: dem Strohballe entnommene Fasern, rechts: nach dem Mahlen

Die Faserlänge nach dem Mahlen betrug maximal 7 mm. Das so aufbereitete Rapsstroh wurde dann für die Herstellung der Compounds verwendet. Somit handelt es sich bei den Ergebnissen dieser Arbeit, um Untersuchungen an Rapsstroh-Polypropylen Compounds mit Langfaserzugabe. Im Gegensatz dazu stehen Kurzfasern, wobei dafür das Stroh noch auf eine maximale Faserlänge von 1 mm herunter gemahlen werden müsste.

3.3 Additive

Im Gegensatz zur Anwendung handelsüblicher Additive zur Herstellung von Compounds aus Thermoplast und nachwachsenden Rohstoffen, wie sie zum Beispiel von der Firma Struktol vertreiben werden oder in (46) beschrieben sind, sind zwei völlig untypische Kunststoffe als Additiv eingesetzt worden. Es handelt sich dabei um thermoplastische Elastomere auf Silikon- bzw. Polyurethanbasis. Den Anstoß für den Einsatz solcher Additive lieferten die Ergebnisse, die aus der Dissertation von (47) hervorgehen. Darin werden diese beiden Stoffe als neuartige Verarbeitungshilfsmittel zur Unterdrückung des Sharkskin-Effekts bei der Extrusion von Polyethylen beschrieben. Der Vorteil dieser Additive liegt in der Ausbildung einer Gleitschicht, die zu besseren Produkteigenschaften führt. Im Hinblick auf Compounds aus nachwachsenden Rohstoffen gibt es stets das Problem eine gute Adhäsion der Polymermatrix zur Naturfasern herzustellen. Die bereits erwähnten handelsüblichen Additive enthalten daher Haftvermittler und zusätzlich Gleitadditive. Durch die Wahl des niedrigviskosen Polypropylens wurde von Beginn an auf eine gute Umströmung und eine feste Einbettung der Rapsfasern gesetzt. Die thermoplastischen Elastomere wurden nur zur Verbesserung der Gleiteigenschaften und damit zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften eingesetzt und auf ihre Anwendbarkeit hin untersucht.

3.3.1 Geniomer 140

Das thermoplastische Silikon-Copolymer Geniomer 140 der Firma Wacker Chemie zeichnet sich durch seine Transparenz und Tieftemperaturelastizität aus. Häufige Anwendungen sind technische Elastomer-Bauteile, transparente Folien und wasserdampfdurchlässige Textilbeschichtungen (48).

3.3.2 Elastollan 685 AU

Die Elastollan-Typen sind Produkte der Firma Elastogran, einer Tochter der BASF-Gruppe. Hierbei handelt es sich um ein transparentes, thermoplastisches Polyester-Polyurethan-Elastomer. Einige Herstellerangaben finden sich in Tabelle 6.

Tabelle 6 – Materialeigenschaften laut Hersteller des Elastollans 685 AU (Elastogran)

Eigenschaft	Wert	Prüfnorm
Dichte	1,21 g/cm ³	DIN EN ISO 1183-1-A
Bruchspannung	50 MPa	DIN 53504-S2
Bruchdehnung	600 %	DIN 53504-S2
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (23°C)	kein Bruch	DIN EN ISO 179-1

Beide Additive liegen als Granulat vor. Die Abbildung 25 zeigt eine Probe des Elastollans.



Abbildung 25 - Granulat des Additivs E685

4 Untersuchungsverfahren

Für die Durchführung aller nachstehend aufgeführten Untersuchungsverfahren sind jeweils Probekörper nach demselben Herstellungsvorgang verwendet worden, der zuerst beschrieben wird.

4.1 Herstellung der Probekörper

Bezüglich der Untersuchungen an Compounds ist es wichtig, möglichst einheitliche Probekörper zu erhalten. Die homogene Einmischung von Fasern ist jedoch ein allgemeines Problem in der Kunststoffverarbeitung. Gerade die Einarbeitung von relativ großen und unregelmäßig geformten Naturfasern bereitet hier besondere Probleme. Üblicherweise werden solche Compounds auf Doppelschneckenextrudern hergestellt.

Wie bereits im Abschnitt 3.2 erläutert, wurde das vorliegende Rapsstroh mittels einer Schneidmühle grob zerkleinert und anschließend in einer Stiftmühle auf eine durchschnittliche Faserlänge von 7 mm gebracht. Die Einmischung des Rapsstrohs in PP wurde mit 10, 20 und 30 % vorgenommen. Von Beginn an war klar, dass sich die mechanischen Eigenschaften der Compounds durch die Naturfasern verschlechtern würden. Daher bilden die Proben mit 30 % Rapsstroh eine sinnvolle Obergrenze an zuzusetzendem Fasermaterial, obwohl in der Literatur oft auch Proben mit bis zu 50 % Faseranteil beschrieben werden, siehe z. B. (49). Handelsübliches Granulat aus Compounds mit nachwachsenden Rohstoffen besteht hingegen aus 30 % Fasern, 65 % PP und 5 % Additiven (50). Die Einarbeitung des Strohs in die Polymermatrix erfolgte in einem Leistritz Doppelschneckenextruder Modell LSM 30/34 bei einer Temperatur von 180°C. Um jedoch schon weitestgehend homogen gemischtes Material dem Extruder zuzuführen, wurde zuvor in einem Trockenmischer der Firma Lödige das PP-Granulat mit der entsprechenden Menge an Rapsstroh sowie den Additiven gemischt. Die Tabelle 7 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Kombinationen von PP, Rapsstroh und Additiv. Insgesamt sind somit 16 verschiedene Arten von Probekörper hergestellt und untersucht worden.

Nachdem Compoundieren im Doppelschneckenextruder sind die erzeugten Stränge erneut in der Schneidmühle zerkleinert worden, um anschließend das Granulat in einer Spritzgießmaschine der Firma Boy Typ 30A zu Zugprüfstäben vom Typ 1A nach DIN EN ISO 527 zu verarbeiten. An diesen Prüfstäben wurden dann alle nachstehend erläuterten Versuche durchgeführt bzw. sind zum Beispiel die Prüfkörper für den Kerbschlagversuch aus diesen Stäben entnommen worden.

Tabelle 7 – Übersicht der Zusammensetzung der Probenkörper

Probenkategorie	Anteil PP [%]	Anteil Rapsstroh [%]	Anteil Additiv [%]	Additivart
A	100	-	-	-
B	90	10	-	-
C	80	20	-	-
D	70	30	-	-
E	89	10	1	E685
F	89	10	1	G140
G	88	10	2	E685
H	88	10	2	G140
I	79	20	1	E685
J	79	20	1	G140
K	78	20	2	E685
L	78	20	2	G140
M	69	30	1	E685
N	69	30	1	G140
O	68	30	2	E685
P	68	30	2	G140

Die Abbildung 26 verdeutlicht noch einmal die Vorgehensweise zur Herstellung der Prüfkörper.



Abbildung 26 - Verfahrensablauf zur Herstellung der Probekörper

4.2 Dichtemessungen

Durch die Zugabe der Rapsstrohfasern ändert sich natürlich die Dichte des Compounds im Vergleich zur Probe aus reinem PP. Die Messung der Dichte erfolgte mittels einer Mohr-Westphalschen Dichtewaage, wie sie in Abbildung 27 zu sehen ist. Die Dichte in g/cm^3 berechnet sich dann über die folgende Formel:

$$\rho = \frac{1,01 - \text{Trockenwert}}{\text{Nasswert} - \text{Trockenwert}} \cdot \rho_{\text{Tauchflüssigkeit}}$$

Das bedeutet, dass die Probe zunächst trocken gewogen wird und anschließend durch Eintauchen in die Flüssigkeit der Nasswert bestimmt wird. Die Dichte der Tauchflüssigkeit wurde mittels Areometern bestimmt. Da die Dichte der Proben unterhalb der von reinem Wasser liegt, wurde eine Mischung aus Methanol und Wasser als Tauchflüssigkeit verwendet.

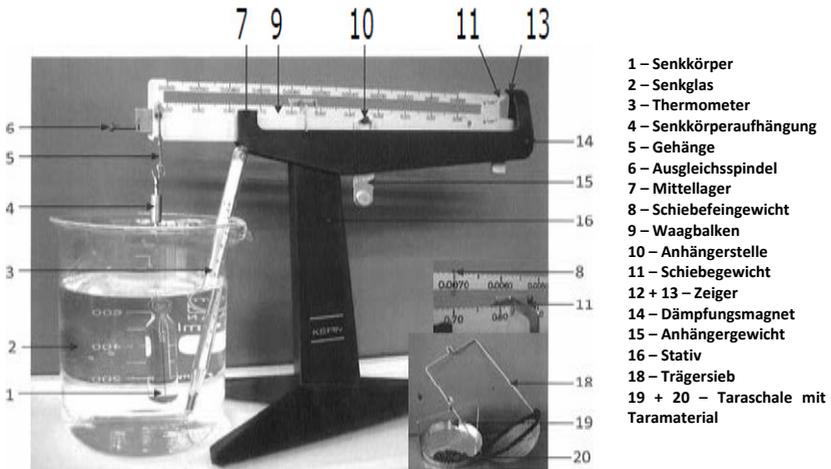


Abbildung 27 – Dichtewaage

Eine häufige Fehlerquelle bei der Anwendung der Dichtewaage liegt darin, dass am Trägersieb beim Eintauchen in die Flüssigkeit Luftblasen hängen bleiben. Durch leichtes Klopfen lassen sich diese jedoch entfernen.

4.3 Wasseraufnahme

Für das reine PP kann man davon ausgehen, dass die Wasseraufnahme verschwindend gering ist. Für die Compounds jedoch ist die Wasseraufnahme eine starke Einflussgröße. Die Naturfasern sind zwar in der Polymermatrix eingebettet, dort jedoch nicht vor den natürlichen biologischen Zersetzungsprozessen geschützt. Das bedeutet, dass die Fasern durch die Aufnahme von Wasser im Laufe der Zeit verfaulen können. Die Messung der Wasseraufnahme erfolgt nach DIN EN ISO 62 über einen Zeitraum von 84 Tagen bei Raumtemperatur. Die spritzgegossenen Zugprüfstäbe wurden dabei in destilliertem Wasser gelagert und in gewissen Zeitabständen zur Wägung dem Wasserbad kurzzeitig entnommen. Aus den Wiegedaten wurde die Wasseraufnahme c in Prozent mittels der folgenden Formel berechnet:

$$c = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100$$

Dabei bezeichnet m_1 die Masse des Probekörpers vor dem Eintauchen und m_2 die jeweilige Masse zum Zeitpunkt der Messung.

4.4 Zugversuch

Ein zentrales Untersuchungsverfahren für die Anwendbarkeit von naturfaserverstärktem Kunststoff ist der Zugversuch. Allgemein liegt der Nutzen der Zugabe von Naturfasern darin, ein Abfallprodukt aus der Verarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen, wie zum Beispiel das Rapsstroh, in eine Polymermatrix einzuarbeiten, um somit den Materialeinsatz an hochwertigem Polymer zu reduzieren. Neben den völlig anderen optischen Eigenschaften solcher Compounds werden insbesondere die mechanischen Eigenschaften verändert. Es ist prinzipiell davon auszugehen, dass die Festigkeit und die Belastbarkeit von Naturfasercompounds niedriger sind, als vom reinen Polymer. Um wie viel niedriger diese Werte sind, ist letztlich ausschlaggebend für die weitere Anwendung der Compounds als Konstruktionswerkstoff. Der normierte Zugversuch nach DIN EN ISO 527 bietet hier die Möglichkeit, den Einfluss der Naturfasern auf die mechanischen Eigenschaften genau zu untersuchen und qualitativ zu bewerten. Wie bereits im Abschnitt 4.1 erläutert, sind Probekörper nach Typ 1A der genannten Norm hergestellt worden. Diese wurden dann in einer Zugprüfmaschine der Firma Zwick Modell 63336/101 geprüft, siehe Abbildung 28.



Abbildung 28 - Zugprüfmaschine

Die Abbildung 29 ist der Norm entnommen und zeigt den prinzipiellen Verlauf im Spannungs-Dehnungs-Diagramm für verschiedene Kunststoffe. Während für reines PP ein Kurvenverlauf der Form b zu erwarten ist, wird sich für ein Naturfasercompound ein Verlauf der Kurve a zeigen. Damit wird deutlich, dass es sich nicht lohnt alle möglichen Werte, die im Zugversuch ermittelt werden können, zu vergleichen. Sinnvoll ist es demnach nur die E-Moduln sowie die Streckspannungen zur Bewertung heranzuziehen. Wie von der Norm gefordert, sind die Proben vor der Prüfung entsprechend konditioniert worden. Die Prüfgeschwindigkeiten wurden ebenfalls normgerecht gewählt.

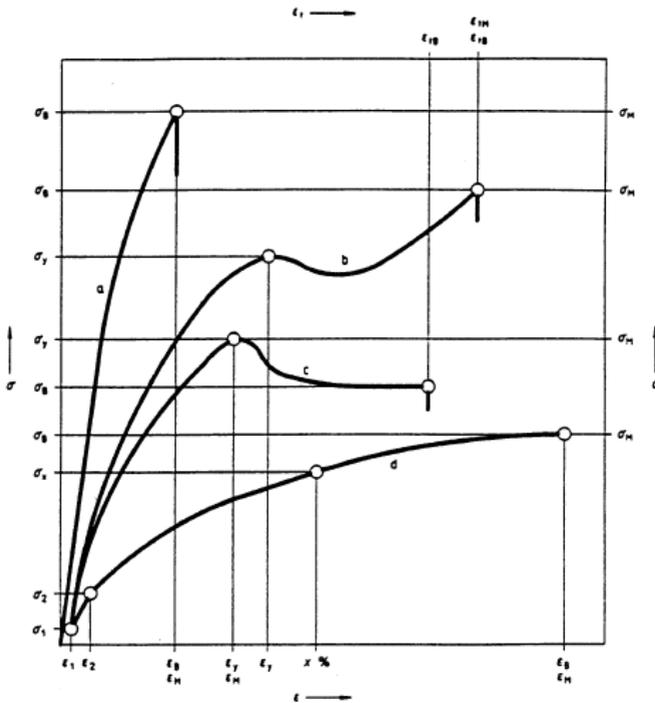


Abbildung 29 - Prinzipieller Kurvenverlauf verschiedener Kunststoffe im Spannungs-Dehnungs-Diagramm; Kurve a: spröder Werkstoff, Kurve b und c: zähe Werkstoffe mit Streckpunkt, Kurve d: zähe Werkstoffe ohne Streckpunkt (51)

4.5 Biegeversuch

Im normierten Biegeversuch nach DIN EN ISO 178 sind an den Prüfkörpern von der Kategorie A bis D (siehe Tabelle 7) die Biegemodule und Biegefestigkeiten ermittelt worden. Man kann

davon ausgehen, dass die eingesetzten Additive keinen Einfluss auf die Biegeeigenschaften haben, so dass auf die Prüfung solcher Proben verzichtet wurde. Der Biegeversuch wurde als 3-Punkt-Biegung an einer Prüfmaschine der Firma Instron durchgeführt, siehe Abbildung 30.

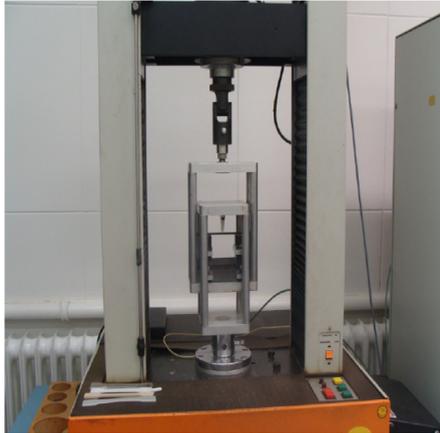


Abbildung 30 - Prüfmaschine für die 3-Punkt-Biegung

Die Proben für den Biegeversuch wurden den entsprechenden Zugprüfstäben entnommen und, wie in der Norm beschrieben, konditioniert.

4.6 Schlagzähigkeit

In einer letzten Versuchsreihe zur umfassenden Analyse der mechanischen Eigenschaften der Rapsstroh-Polypropylen Compounds ist die Schlagzähigkeit nach DIN EN ISO 180 bestimmt worden. Es handelt sich dabei um die Prüfung nach Izod. Wie bei der Bestimmung der Biegeeigenschaften sind nur Proben der Kategorie A bis D verwendet worden, siehe Tabelle 7. Die Prüfung erfolgte an ungekerbten Prüfkörpern, die nach Norm konditioniert wurden. Als Prüfmaschine stand ein Pendelschlagwerk der Firma Zwick Modell 5102 bereit, siehe Abbildung 31.



Abbildung 31 - Pendelschlagwerk zur Bestimmung der Schlagzähigkeit

Die Art der Probeneinspannung ist in Abbildung 32 zu sehen.

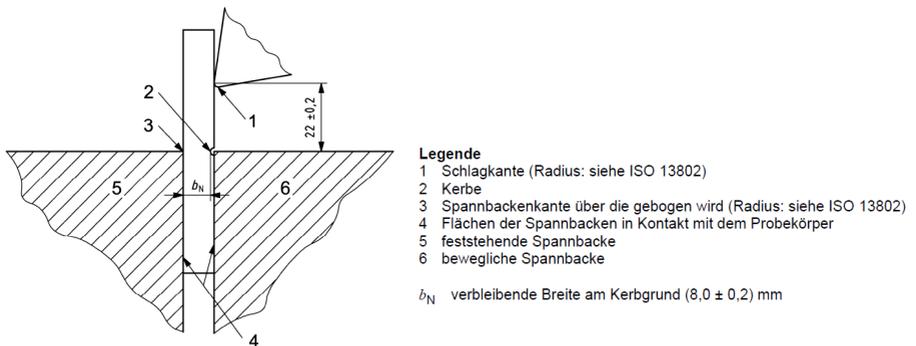


Abbildung 32 - Probeneinspannung für die Prüfung der Schlagzähigkeit nach (52)

4.7 Elektronenmikroskopische Untersuchungen

Um die Frage der Fasereinbettung in die Polymermatrix beantworten zu können, wird standardmäßig eine Untersuchung von Bruchflächen an den Probekörpern mittels der Elektronenmikroskopie durchgeführt. Die später gezeigten Bilder sind an einem Rasterelektrodenmikroskop mit Wolframkathode der Firma Hitachi Modell S-2700 aufgenommen worden. Die Bilder sind von den Mitarbeitern der Zentraleinrichtung Elektronenmikroskopie der Technischen Universität erstellt worden. Die Aufnahmen wurden jeweils an Bruchflächen des Prüfbereiches der aus compoundiertem Material hergestellten Zugprüfkörper gemacht. Die Proben sind dafür in flüssigen Stickstoff getaucht worden und anschließend per Hand gebrochen worden.

4.8 Gamma-Bestrahlung

Die Anwendung von γ – Strahlung in der kunststoffverarbeitenden Industrie ist sicherlich kein Standardverfahren, jedoch auch nicht unbekannt. Insbesondere die Sterilisation von Kunststoffprodukten für die Medizin ist hier eine Hauptanwendung. Da die Anwendung energiereicher Strahlung mit starken Sicherheitsauflagen verbunden ist, fehlen leider eingehende Untersuchungen zum Verhalten von Kunststoffen unter Bestrahlung. Bekannt ist, dass Kunststoffe eben leicht durch Strahlung sterilisiert werden können, aber auch ab einer bestimmten Dosis eine Vernetzung eintritt, bevor eine Schädigung einsetzt. Großer Vorteil ist, dass der Kunststoff nach einer Strahlenexposition selbst keine Strahlung aussendet. Im Rahmen dieser Arbeit ergab sich die Möglichkeit Probekörper bei der Gamma Service Produktbestrahlung GmbH einer γ – Strahlung auszusetzen. Die Strahlendosis betrug dabei $3 \cdot 10^4$ Gy und lag damit in einem Bereich, in dem eine Vernetzung stattfinden kann. Die bestrahlten Proben wurden anschließend im Zugversuch entsprechend Abschnitt 4.4 untersucht.

5 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Untersuchungsergebnisse dargestellt, die mit Hilfe der zuvor beschriebenen Versuche ermittelt wurden. Vorab lässt sich sagen, dass die Herstellungsmethode für die Probekörper sehr geeignet war, da sich die Proben untereinander stets gut vergleichen ließen.

5.1 Änderung der Dichte

Die Dichte des Rapsstrohs ist schwer anzugeben, da es sich dabei um einen Naturstoff handelt, dessen Aufbau nur grob beschrieben werden kann. Hinzu kommt, dass der Faseraufbau durch unterschiedliches Wachstum ebenfalls stark variiert. Allgemein kann man jedoch davon ausgehen, dass die Dichte größer als 1 g/cm^3 ist. Die Dichte des reinen PP wurde zu $0,9016 \text{ g/cm}^3$ bestimmt und liegt damit sehr nahe der Spezifikation im Produktdatenblatt der Herstellerfirma, siehe Tabelle 5. Erwartungsgemäß wird durch Zumischen des Rapsstrohs mit höherer Dichte die Dichte des Compounds steigen. Die Tabelle 8 zeigt die gemessenen Dichtewerte. Die Abweichungen der Messwerte betragen maximal 2%.

Tabelle 8 - Dichtemessung

Probenkategorie	Zusammensetzung	Dichte [g/cm^3]
A	100 % PP	0,9016
B	90 % PP + 10 % Rapsstroh	0,9510
C	80 % PP + 20 % Rapsstroh	0,9695
D	70 % PP + 30 % Rapsstroh	0,9884

Aus den gemessenen Dichtewerten kann eine grobe Abschätzung der Dichte des Fasermaterials über eine einfache Mischungsregel nach folgender Gleichung bestimmt werden.

$$\rho_{\text{Compound}} = \varphi_{\text{PP}} \cdot \rho_{\text{PP}} + \varphi_{\text{Rapsstroh}} \cdot \rho_{\text{Rapsstroh}}$$

Damit ergibt sich eine durchschnittliche Dichte des Rapsstrohs von $1,2759 \text{ g/cm}^3$. Wie bereits erwähnt, ist dieser Wert nur als grober Richtwert anzusehen liegt aber im Vergleich

mit den Daten der Tabelle 3, die Werte für andere Naturfasern enthält, in einer sinnvollen Größenordnung.

Bei der Bestimmung der Dichte wurde auf die Untersuchung der Proben mit Additiv verzichtet. Laut Herstellerangaben liegt zwar die Dichte für das Additiv E685 bei $1,21 \text{ g/cm}^3$, jedoch ist davon auszugehen, dass eine Beimischung von maximal 2 % die Dichte des Compounds nicht wesentlich beeinflusst.

5.2 Wasseraufnahme

Die Ergebnisse der Wasseraufnahme sind von besonderer Bedeutung in dieser Arbeit. Zunächst ist bekannt, dass PP kein Wasser aufnimmt. Damit ist klar, dass eine Wasseraufnahme nur durch die zugesetzten Rapsstrohfasern entstehen kann. Voraussetzung dafür ist, dass die Oberfläche der Probekörper nicht aus einer geschlossenen PP – Hülle besteht, sondern die Fasern auch in der Oberfläche liegen. Dies ist aber bei jedem fasergefüllten Kunststoff der Fall. Auch, wenn die Oberfläche mit dem bloßem Auge als glatt erscheint, so liegen stets Fasern ebenso an der Oberfläche. Durch diese Fasern in der Oberfläche erfolgt dann die Wasseraufnahme in die Probe. Da die Fasern von Hohlräumen durchzogen sind und sich die einzelnen Fasern durchaus berühren, ist somit ein Kapillarsystem in der Probe vorhanden, das es erlaubt, dass das Wasser bis in den Kern der Probe eindringen kann. Insbesondere bei Naturfasern entsteht damit das Problem, dass durch das eindringende Wasser die Fasern einer biologischen Zersetzung ausgesetzt werden und es zum Verfaulen der Fasern kommen kann. Gerade für den Bereich der Außenanwendung solcher Compounds ist dies von großem Nachteil, weil damit die Haltbarkeit extrem sinkt. Nur durch eine geschlossene, faserfreie Oberfläche kann dies verhindert werden.

Für die Wasseraufnahme der Probenkategorie B bis D, also reiner Zugabe von Rapsstroh, ist nun davon auszugehen, dass mit steigendem Faseranteil zum einen mehr Fasern an der Oberfläche liegen und zum anderen mehr Kanäle im Inneren der Probe vorliegen, was die Wasseraufnahme begünstigt. In der Abbildung 33 sind die Messergebnisse dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass über die Messzeit von 84 Tagen bei der Probe mit nur 10 % Rapsstroh schon nach ca. 30 Tagen eine Sättigung eintritt, während bei der Probe mit 30 % Rapsstroh auch nach den 84 Tagen noch keine Abnahme der Wasseraufnahme zu erkennen ist.

Insgesamt wird bestätigt, dass mit Zunahme des Faseranteils auch die Wasseraufnahme erheblich steigt.

Für die Proben mit Additiv ergeben sich ähnliche Ergebnisse, aber in einer ganz anderen Qualität. Der Einsatz der verwendeten Additive ist begründet durch die Verbesserung der Fließeigenschaften der Schmelze des Compounds. Die Additive wirken sich jedoch nicht nur auf die Verarbeitung aus, sondern zeigen bei der Analyse der Wasseraufnahme ein komplett neues Anwendungsgebiet auf. Die Untersuchungen zeigen, dass die Wasseraufnahme zwar immer noch mit steigendem Faseranteil zunimmt, aber in einem deutlich reduzierten Maße.

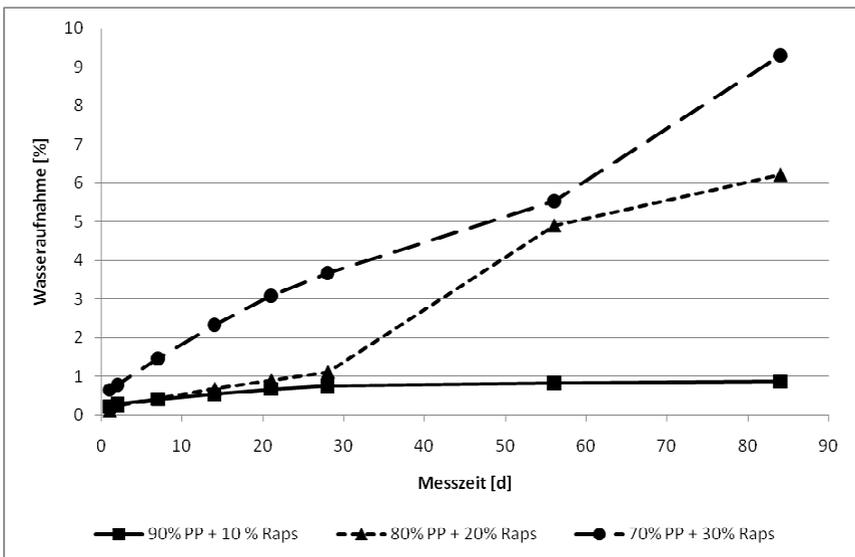


Abbildung 33 - Wasseraufnahme durch Zugabe von Rapsstroh

Eine übersichtliche Darstellung der Messwerte gibt die Tabelle 9, in der nur die Werte der Wasseraufnahme für die verschiedenen Proben am Ende der Messzeit nach 84 Tagen eingetragen sind. Die maximale Abweichung der Messdaten beträgt 1%. Die Daten belegen den positiven Einfluss der Additive auf die Oberflächeneigenschaften. Während die Probe mit 10 % Rapsstroh 0,87 % Wasser aufgenommen hat, zeigt sich bei der Probe mit zusätzlich 1 % E685 eine reduzierte Wasseraufnahme von 0,54 %. Wesentlich deutlicher sind jedoch die Verhältnisse bei den Proben mit 20 % Rapsstroh. Im Vergleich zur Probe ohne Additiv, sinkt die Wasseraufnahme maximal um 75 % bei der geringen Zugabe von 1 % E685. Für die

Probekörper mit 30 % Rapsstroh liegt immerhin noch eine Reduktion um 45 % bei 1 % E685 vor.

Aus den Ergebnissen der Wasseraufnahme lassen sich nun einige bedeutende Schlüsse ziehen. Erstens konnte gezeigt werden, dass die Zugabe der ausgewählten Additive zu einer stark verminderten Wasseraufnahme führt. Die Oberfläche der Probekörper wird anscheinend quasi versiegelt. Am deutlichsten ist dieser Effekt bei Proben mit 20 % Rapsstroh. Bei den Proben mit 30 % Rapsanteil scheinen immer noch so viele Fasern unbedeckt in der Oberfläche zu liegen, dass die Wasseraufnahme durch die zugesetzten Additive zwar geringer ist, aber ausgeprägter ist als bei den Proben mit 20 % Rapsstroh.

Tabelle 9 - Wasseraufnahme nach 84 Tagen

Probenkategorie E bis H		Probenkategorie I Bis L		Probenkategorie M bis P	
Zusammen- setzung	Wasseraufnahme [%]	Zusammen- setzung	Wasseraufnahme [%]	Zusammen- setzung	Wasseraufnahme [%]
10 % Rapsstroh	0,87	20 % Rapsstroh	6,22	30 % Rapsstroh	9,30
10 % Rapsstroh + 1 % E685	0,54	20 % Rapsstroh + 1 % E685	1,53	30 % Rapsstroh + 1 % E685	5,07
10 % Rapsstroh + 1 % G140	0,63	20 % Rapsstroh + 1 % G140	2,34	30 % Rapsstroh + 1 % G140	5,75
10 % Rapsstroh + 2 % E685	0,55	20 % Rapsstroh + 2 % E685	1,74	30 % Rapsstroh + 2 % E685	5,22
10 % Rapsstroh + 2 % G140	0,65	20 % Rapsstroh + 2 % G140	2,51	30 % Rapsstroh + 2 % G140	5,80

Weiterhin lässt sich feststellen, dass die Qualität der Verminderung der Wasseraufnahme in erster Linie von der Art des Additivs abhängt. Hier zeigt das E685 bessere Eigenschaften im Vergleich zum G140. Außerdem wird deutlich, dass es ausreichend ist, bereits die geringe Menge von 1 % zuzugeben, um die Wasseraufnahme zu verringern. In der Abbildung 34, entnommen aus (47), ist die Wasseraufnahme der reinen Additive zu sehen. Bemerkenswert ist, dass aus den dortigen Messungen hervorgeht, dass das G140 deutlich weniger Wasser aufnimmt als das E685. In der Anwendung als Verarbeitungshilfsmittel für Polyethylen mit der Zugabemenge von 1 % hingegen liegen beide Proben dicht beieinander, wobei für G140

die Wasseraufnahme wiederum höher erscheint. Ein Ergebnis, das vollständig mit den Messungen dieser Arbeit korreliert.

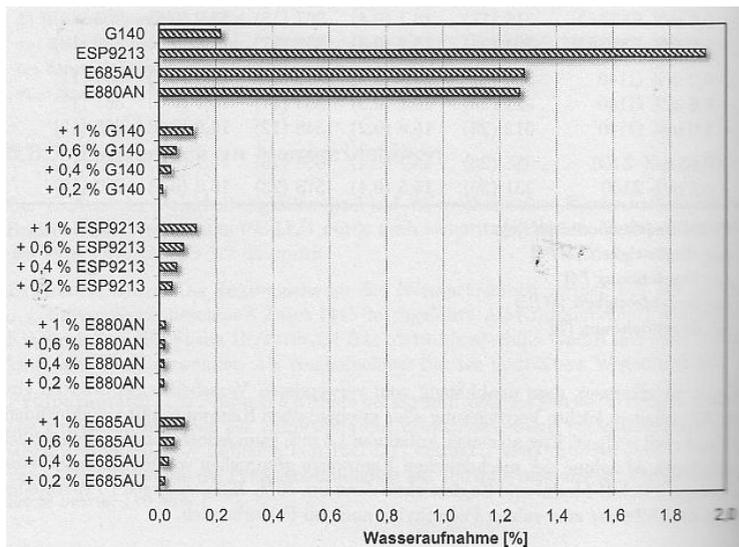


Abbildung 34 - Wasseraufnahme der reinen Additive und Proben aus Polyethylen mit den angegebenen Beimischungen (47)

Die Verminderung der Wasseraufnahme durch die Zugabe der Additive wurde im Vorfeld nicht in dieser Ausprägung erwartet. Diese neue Erkenntnis ist von großem Nutzen für die weitere Anwendung nachwachsender Rohstoffe als Füllstoff für die Polymerverarbeitung.

5.3 Zugeigenschaften

Die Bestimmung der Zugeigenschaften erfolgt zwar wie in Abschnitt 4.4 beschrieben nach Norm, doch durch das stark inhomogene Material ergeben sich starke Streuungen. Allgemein ist es problematisch für Compounds mit nachwachsenden Rohstoffen verlässliche Messergebnisse aus dem Zugversuch zu erhalten. Stets ist unklar, wie sich nun in der zu prüfenden Probe Fasern und Polymermatrix miteinander verbunden haben. Für die Ergebnisse dieser Arbeit sei noch einmal darauf hingewiesen, dass es nicht das Ziel war die Kompatibilität zwischen Faser und Polymer durch die zugegebenen Additive zu erhöhen.

Damit wurde gleichzeitig die zu erwartende Abweichung der Messwerte in Kauf genommen. Für eine spätere Anwendung der Rapsstroh-Polypropylen Compounds kann auf bereits bekannte Haftvermittler für Naturfasern zurück gegriffen werden. Entsprechende Produkte sind im Handel zu erwerben und sind daher nicht in der vorliegenden Untersuchung mit berücksichtigt worden. Einzig die neuartige Variante der γ – Bestrahlung als Methode zur Vernetzung der Polymermatrix und damit der besseren Fasereinbettung wurde im Zugversuch besonders analysiert.

Für die Auswertung des Zugversuchs an den vorliegenden Proben eignen sich die Kennwerte des E – Moduls und der Streckspannung. Für das reine PP gibt der Hersteller zum Beispiel eine Bruchdehnung von 500 % an. Dies ist zwar ein typischer Wert für PP, aber für den Vergleich der Compounds völlig nutzlos. Die Abbildung 35 zeigt einen Prüfstab mit Rapsstrohanteil und verdeutlicht, dass im Vergleich zum reinem PP bereits nach geringer Dehnung ein Sprödbruch auftritt.



Abbildung 35 - Bruchverhalten der Compounds; links: vor der Prüfung, rechts: nach der Prüfung

Generell tritt für alle Prüfkörper aus compoundiertem Material frühzeitig Materialversagen ein. Daher können die Proben nur sinnvoll über die Spannung im Versagensfall charakterisiert werden, die sich dann mit der Streckspannung des reinen PP vergleichen lässt.

In der Literatur (53) findet sich die folgende anschauliche Erklärung für das Verhalten der geprüften Verbundwerkstoffe. Für Verbundwerkstoffe kann zwischen einer Verstärkung und Versteifung unterschieden werden. Verstärken bedeutet dabei die Steigerung der Festigkeit,

d. h. der zumutbaren Belastung (Spannung). Ein Versteifen bewirkt hingegen die Erhöhung des E – Moduls. Es gilt, dass Verstärken stets auch ein Versteifen zur Folge hat, eine Versteifung jedoch nicht immer eine Verstärkung bewirkt, sondern oftmals zu einer geringeren Zugbeanspruchung führt. So ist bekannt, dass durch Füllstoffe die Zugfestigkeit sinkt, während der Zugmodul mäßig ansteigt. Er steigt aber nur so lange, wie noch ein allseitiges Umschließen des Füllstoffs durch die Matrix möglich ist. Der Modul wird wieder kleiner, wenn während der Belastung Ablösungen zwischen Matrix und Füllstoffoberfläche auftreten.

Die Tabelle 10 zeigt die Messergebnisse aus dem Zugversuch für einige ausgewählte Proben.

Tabelle 10 - Messdaten des Zugversuchs

Probe	E – Modul [MPa]	Streckspannung [MPa]	Standardabweichung der Streckspannung
PP rein	1194	32,8	0,19
PP rein nach γ – Bestrahlung	1540	35,0	0,38
PP + 10 % Rapsstroh	2034	28,5	0,21
PP + 20 % Rapsstroh	1805	27,6	0,15
PP + 30 % Rapsstroh	2204	24,9	-

Laut Herstellerangaben sollte die Streckspannung für das reine PP bei 41 MPa liegen. Der selbst ermittelte Wert liegt mit 32,8 MPa etwas niedriger. Allerdings gibt es viele Einflussfaktoren während der Herstellung der Probenkörper, so dass diese Abweichung durchaus vertretbar ist.

Anhand der obigen Tabelle lassen sich schon einige Ergebnisse ableiten. Zum einen wird deutlich, dass die Bestrahlung durch γ – Strahlen durchaus einen positiven Effekt auf den Polymerverbund des reinen PP hat. Zwar ist der Anstieg in der Streckspannung von 32,8 auf 35,0 MPa gering, jedoch aufgrund der allgemein geringen Standardabweichung bei den Werten der Streckspannung wirklich als Anstieg zu deuten. Weiterhin ist ein erhöhter E – Modul für die Compounds zu erkennen, der die zitierte Theorie bestätigt. Bei Betrachtung der Streckspannung wird hingegen der schwächende Einfluss der zugesetzten Fasern sichtbar. Je mehr Fasermaterial zugegeben wird, desto geringer ist die Zugfestigkeit der Proben.

Weitere Ergebnisse sind der Abbildung 36 zu entnehmen. Hier ist zur Bewertung der unterschiedlichen Compounds die Streckspannung aufgetragen. Die maximale Abweichung der Messwerte beträgt 2 %. Die Fehlerbalken sind zur besseren Übersicht nicht eingezeichnet. Pro Spalte werden in der Abbildung stets Proben mit unterschiedlichem Anteil an Rapsstroh, aber gleicher Additivmenge verglichen. In der ersten Spalte sind die Referenzwerte für reines PP vor und nach der Bestrahlung angegeben.

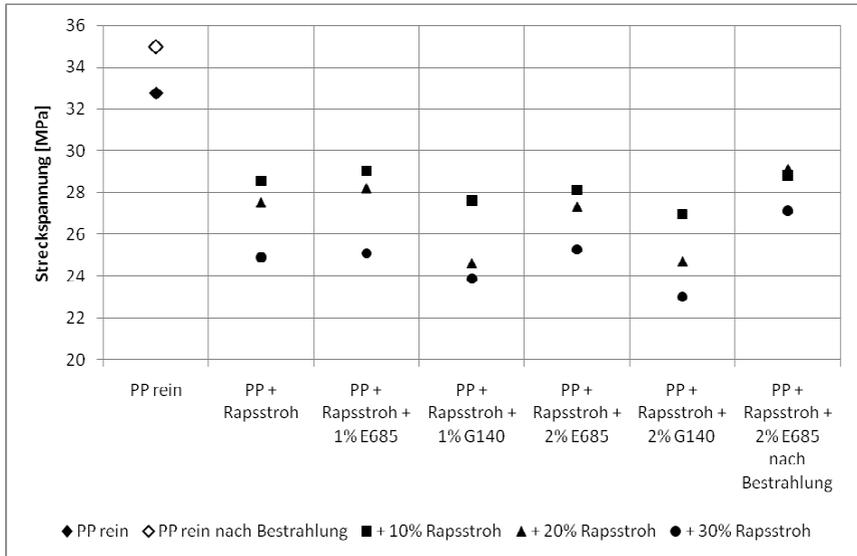


Abbildung 36 - Messergebnisse für die Streckspannung

Die erste Information, die man aus dem Diagramm ablesen kann, ist, dass die Zugabe von Rapsstroh die Zugfestigkeit auf jeden Fall verringert. Dabei sinkt die Festigkeit mit zunehmendem Rapsstrohgehalt. Weiterhin liegen die Werte bei der Zugabe von G140 immer etwas niedriger im Vergleich zur Anwendung von E685. Die Verwendung von E685 hat hingegen keinen merklichen Einfluss auf die Festigkeit. Hierzu sein noch einmal auf die Arbeit von (47) verwiesen, der in seinen Zugversuchen ab einer Zugabemenge von 1 % der Additive eine beginnende Absenkung der E – Modulwerte feststellte. Eine Bewertung der Modulwerte für die Compounds kann, wie bereits beschrieben, aufgrund der Probenart nicht sinnvoll erfolgen. Für die Spannungen hingegen zeigt sich das E685 als neutrales Additiv, während das G140 einen negativen Einfluss hat. Anders gesagt führt die Zugabe

eines Silikonadditivs in Verbindung mit dem Einsatz von Rapsstroh zu einer zusätzlichen Festigkeitsminderung.

Die Anwendung der γ – Strahlen führte für das reine PP zu einer leichten Steigerung der Zugfestigkeit. In der Anwendung für compoundierte Proben geht dieser Effekt jedoch wieder verloren. Das bedeutet, dass die Materialschwächung durch die Rapsstrohfasern stärker ist, als ihr durch die Vernetzung aufgrund der Bestrahlung entgegen gewirkt werden kann. Die bestrahlten Proben enthielten zusätzlich 2 % E685. Dies scheint jedoch keinen Einfluss zu haben.

5.4 Biegeeigenschaften

Im Gegensatz zu den Zugeigenschaften, steigen die Kennwerte der Biegeeigenschaften mit zunehmendem Fasergehalt. In Abbildung 37 sind die Werte für den Biegemodul aufgetragen. Die maximale Abweichung der Modulwerte ist durch die Fehlerbalken dargestellt und beträgt 20 %.

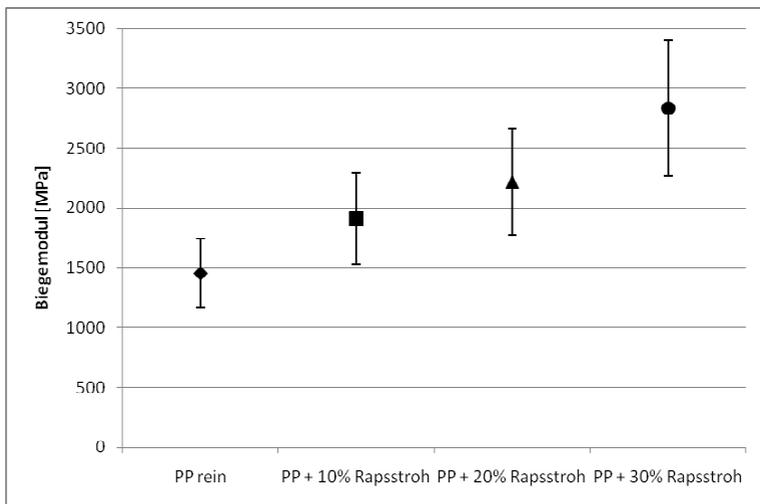


Abbildung 37 - Gemessene Werte des Biegemoduls

Laut den Herstellerangaben liegt der Biegemodul für das reine Material bei 1900 MPa. Die eigenen Messwerte geben, wie bei den Kennwerten für die Zugeigenschaften, einen etwas

niedrigeren Wert. Die Prüfung der Biegeeigenschaften erfolgte nur an den Proben ohne Additivzugabe, da davon auszugehen ist, dass diese keinerlei Einfluss auf das Biegeverhalten besitzen. Wie bereits bei den Zugeigenschaften beschrieben, ist die Diskussion des Einflusses von Fasern am Modul nicht unbedingt sinnvoll. Besser ist daher, sich die Ergebnisse für die Biegefestigkeiten anzusehen, siehe Abbildung 38. Die maximale Abweichung der Festigkeitswerte beträgt 2 %. Während im Zugversuch die Festigkeiten mit zunehmendem Anteil an Rapsstroh kleiner werden, steigen sie in Bezug auf die Biegung an. Dabei ergibt sich für die Probe mit 30 % Rapsstroh ein Anstieg von ca. 30 % in der Biegefestigkeit, der verbunden ist mit einem Abfall von ca. 24 % in der Zugfestigkeit. Die höhere Biegefestigkeit lässt sich darüber erklären, dass die meist quer zur Biegerichtung orientierten Fasern während der Biegung erst aufspießen und anschließend brechen und somit ein Rissfortschreiten in der Probe verlangsamen. Dies führt zu einer höheren Durchbiegung bis zum Bruch der Probe und somit zu höheren Werten der Biegefestigkeit. Im Zugversuch hingegen sind die Fasern in Belastungsrichtung orientiert und reißen, abgesehen von einer schlechten Haftung zwischen Polymer und Fasern, aufgrund ihrer geringen Reißdehnung früh, so dass die maximal ertragbare Spannung mit steigendem Fasergehalt sinkt.

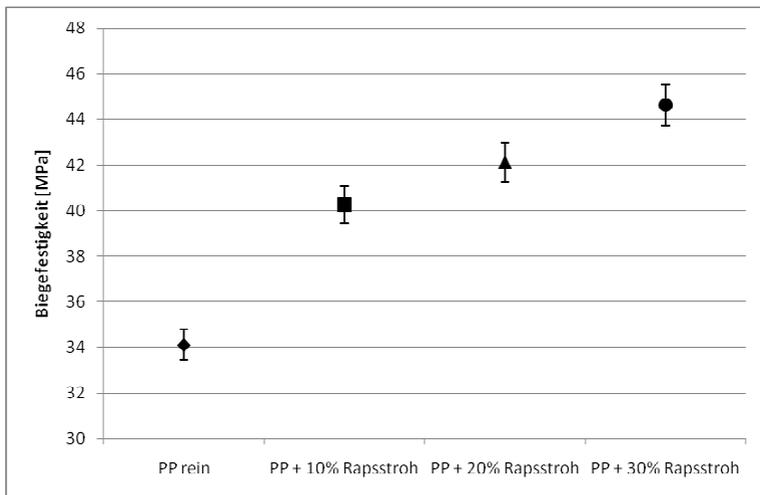


Abbildung 38 - Gemessene Biegefestigkeit

Die positiven Effekte der Faserbeigabe lassen sich leider nur schwer für konstruktive Zwecke nutzen. Die Hauptbeanspruchung in einem Bauteil ist die Zugbeanspruchung. Außer bei frei

gelagerten Konstruktionen, erfolgt bei der Durchbiegung von am Rand angebondenen Teilen immer die Einleitung einer Zugspannung. Somit kann die, durch die Fasern mögliche, höhere Durchbiegung aufgrund der erniedrigten Zugfestigkeit nicht genutzt werden. Anwendungen mit freigelagerten Bauteilen, wo die höhere Biegefestigkeit genutzt werden könnte, sind nicht bekannt.

5.5 Schlagzähigkeit

Für die mechanische Eigenschaft der Schlagzähigkeit kann von vornherein davon ausgegangen werden, dass die Proben mit Faseranteil eine wesentlich niedrigere Schlagzähigkeit aufweisen. Im Gegensatz zur Durchbiegung erfolgt eine schlagartige Krafteinleitung. Der prinzipiell spröde Aufbau aus Polymer und Rapsstrohfaser ist dann dafür verantwortlich, dass die Arbeit, die aufgenommen wird, um die Probe zu brechen deutlich geringer ist, als bei reinem PP. Damit sinkt dann auch der Wert für die Izod-Schlagzähigkeit a_{1U} . Obwohl für das Additiv E685 laut Hersteller kein Bruch während der Schlagprüfung ermittelt wird, siehe Tabelle 6, ist davon auszugehen, dass sich die geringen Additivmengen nicht besonders stark auf die Schlagzähigkeit auswirken. Die Ergebnisse sind in Abbildung 39 dargestellt. Die maximale Abweichung ist durch die Fehlerbalken dargestellt und beträgt 20 %.

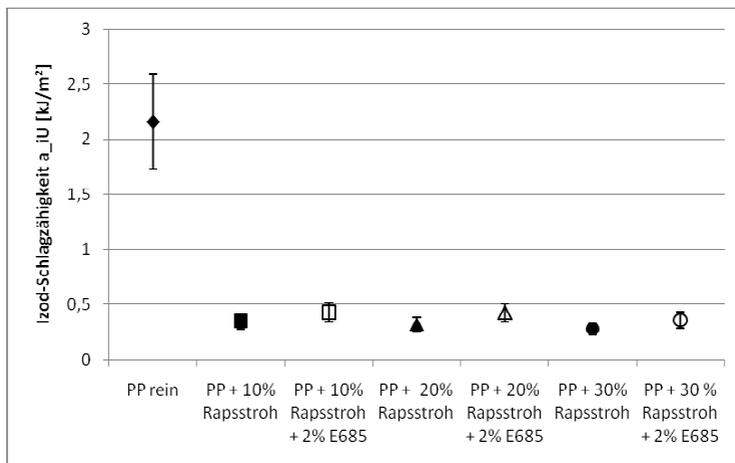


Abbildung 39 - Gemessene Izod-Schlagzähigkeit

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Rapsstrohfasern die Schlagzähigkeit drastisch vermindern. Für die geringe Beimengung von 10 % Rapsstroh liegt die Schlagzähigkeit nur noch bei ca. 16 % der Schlagzähigkeit des reinen PP. Zwar sinken die Werte weiter mit steigendem Faseranteil, aber das Niveau bleibt gleich. Das Additiv E685 in der Zugabemenge von 2 % hat hier einen positiven Einfluss, kann jedoch die ausgeprägte Absenkung nicht ausgleichen. Eine größere Zugabemenge des Additivs könnte die Schlagzähigkeit noch verbessern.

5.6 Mikroskopische Bilder

Um einen ersten Eindruck von der Faserlage im Material zu gewinnen, sind Lichtmikroskopische Bilder im Auflicht aufgenommen worden, siehe Abbildung 40. Deutlich sind die Langfasern des Rapsstrohs zu erkennen. In der 16fachen Vergrößerung sieht man, dass es sich bei den Compounds um stark inhomogenes Polymer – Faser – Gefüge handelt.



Abbildung 40 - Lichtmikroskopische Aufnahmen einer PP Probe mit 10 % Rapsstroh;
links: Vergrößerung 6,4fach; rechts: Vergrößerung 16fach

Für die Bewertung von Faserverstärkten Polymeren werden üblicherweise Bilder vom Elektronenmikroskop ausgewertet. Hier sei noch einmal darauf hingewiesen, dass in der vorliegenden Arbeit nicht nach der optimalen Fasereinbettung gesucht wurde. Daher dienen die folgenden Bilder vor allem, um ein umfassendes Bild von den Rapsstroh-Polypropylen Compounds zu erhalten.

In der Abbildung 41 ist eine eingebettete Rapsstrohfaser zu sehen. Deutlich wird dabei, dass die makroskopische Faser in der mikroskopischen Betrachtung ihre Fibrillenstruktur zeigt. Dieser allgemein bekannte Aufbau macht noch einmal klar, über welche Kanäle zum Beispiel die Wasseraufnahme in die Compounds stattfinden kann. Die Abbildung 42 gibt noch einmal

ein ähnliches Bild nur mit einer kleineren Auflösung. Die Faser scheint hier gut in die umliegende PP – Matrix eingebettet zu sein. Auf dem Bild erkennt man, dass sich das PP bei der Probenvorbereitung nicht sauber gebrochen hat, sondern eher abgeschält wurde. Allerdings ist dies hier nicht weiter von Bedeutung.

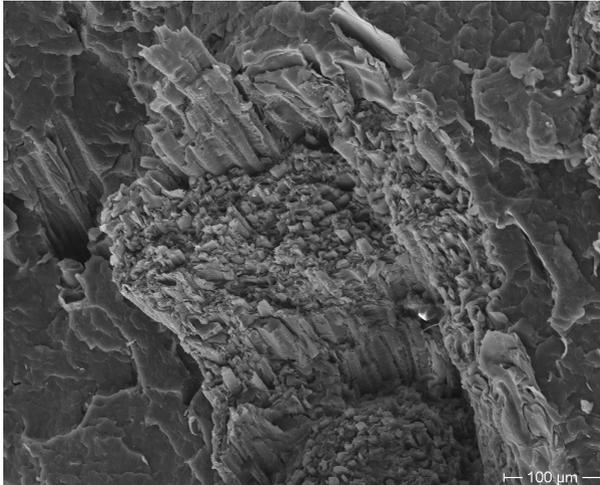


Abbildung 41 - Bild einer eingebetteten Rapsstrohfaser, die aus vielen Fibrillen besteht.

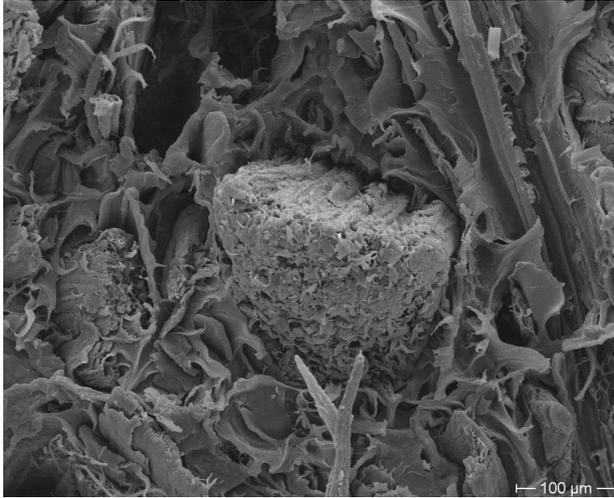


Abbildung 42 - Eingebettete Rapsstrohfaser. Das PP hat sich hier beim Bruch nicht sauber getrennt, sondern abgeschält.

Das bereits erwähnte Problem der schlechten Fasereinbettung ist der Abbildung 43 zu entnehmen. Hier wurde beim Bruch der Probe eine Faser aus dem Material gerissen, so dass ein Hohlraum entstanden ist. Direkt daneben ist noch eine Faser im Material verblieben. Für diese war die Einbettung auf dieser Seite der Probe besser. An dem entstandenen Hohlraum lässt sich aufgrund der glatten Wandung abschätzen, dass die Fasern mitunter gar keinen direkten Kontakt zum PP haben, sondern von diesem nur allseitig umschlossen sind.

Die Abbildung 44 zeigt, wie sich nun die Hohlräume über die gesamte Bruchfläche einer Probe verteilen können. Für eine weitere Anwendung der Compounds muss daher unbedingt ein Haftvermittler für die bessere Fasereinbettung verwendet werden.

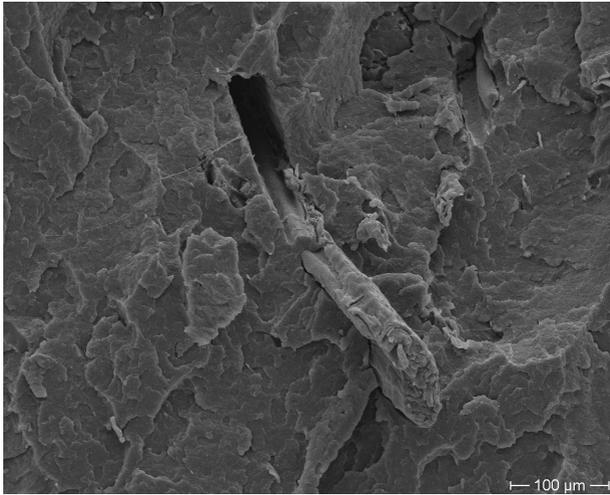


Abbildung 43 - Rapsstrohfaser eingebettet in PP. Daneben ein Hohlraum aus dem die Faser beim Bruch herausgerissen wurde. Damit wird die schlechte Haftung zwischen Faser und PP deutlich.

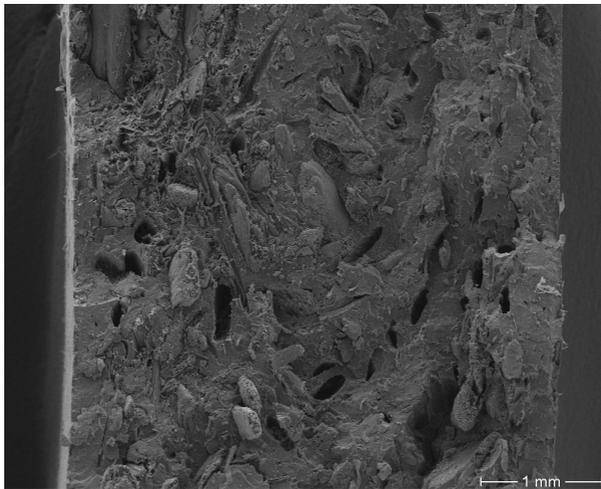


Abbildung 44 - Querschnitt der gesamten Bruchfläche. Es sind zahlreiche Hohlräume zu erkennen.

6 Diskussion

Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, inwieweit sich Rapsstroh als Naturfasermaterial für die Compoundierung eignet. Aufgrund der hohen Bedeutung der Rapspflanze als Nutzpflanze zur Ölgewinnung fallen sehr große Mengen an Rapsstroh an, für die noch keine umfangreiche Verwendung gefunden wurde. Da die Automobilindustrie einen hohen Bedarf an Naturfaser-Compounds hat, bietet es sich an, das heimische Rapsstroh als neue Rohstoffquelle zu untersuchen. Die Ergebnisse können direkt mit den Werten für bereits bekannte Naturfasern verglichen werden. Somit fällt eine Bewertung leicht. Durch die Einarbeitung von Naturfasern in eine Polymermatrix sinken zwangsläufig die mechanischen Festigkeiten. Im Gegenzug wird wertvolles Polymer eingespart. Für den Vergleich dient Tabelle 11, in der Messdaten aus (17) für Compounds mit Flachs und Hanf mit den eigenen Messwerten für Rapsstroh verglichen werden.

Tabelle 11 - Vergleich ausgewählter mechanischer Eigenschaften von Naturfaser-PP-Compounds

30 % Faseranteil	Flachs	Hanf	Rapsstroh
Zugfestigkeit [MPa]	35	40	25
Zug-E-Modul [MPa]	4182	1602	2204
Biegefestigkeit [MPa]	51	57	45
Biege-E-Modul [MPa]	3806	2394	2834

Die Werte für Rapsstroh liegen zwar in Bezug auf die Festigkeiten etwas niedriger als bei den Vergleichswerten, dabei muss jedoch beachtet werden, dass die Werte für Flachs und Hanf aus einer Untersuchung stammen, bei der das eingesetzte Polypropylen speziell für die Compoundierung mit entsprechenden Haftvermittlern versehen war. Somit lässt sich sagen, dass Rapsstroh durchaus vergleichbare Werte liefert. Damit steht fest, dass es von hoher wirtschaftlicher Bedeutung ist, Rapsstroh als neuen Rohstoff für die Compoundierung von Naturfasern einzuführen.

Ein weiteres Ergebnis dieser Arbeit, das noch von größerer Bedeutung ist, ergibt sich aus den Untersuchungen zur Wasseraufnahme. Hier wurde der Einfluss zweier neuartiger Additive untersucht. Es wurden thermoplastische Elastomere bis maximal 2 % als Additiv der Verarbeitung zugegeben. Besonders das Additiv E685 zeigte eine drastische Verringerung der Wasseraufnahme der Compounds. Da gerade die Wasseraufnahme zu einer schnellen

Unbrauchbarkeit der Compounds führt, wurden hier bedeutende Ergebnisse erzielt. Bemerkenswert ist außerdem, dass bereits die Zugabe von 1 % ausreicht, um die Wasseraufnahme zu reduzieren. Es kann davon ausgegangen werden, dass das thermoplastische Elastomer sich als dünner Schutzfilm an der Oberfläche anlagert und somit herausstehende Fasern ummantelt. Dadurch entsteht eine Art Oberflächenversiegelung, die sich positiv auf die Wasseraufnahme auswirkt. Zusätzlich erleichtert das thermoplastische Additiv die Verarbeitung, da sich die Fließigenschaften der Compoundschmelze verbessern.

Insgesamt ergibt die Untersuchung zum Materialverhalten von Rapsstroh-Polypropylen-Compounds ein sehr positives Ergebnis. Die Eignung des als Abfallprodukt anfallenden Rapsstrohs als neue Rohstoffquelle für die Compoundierung wurde bewiesen und die Wirkung neuartige Additive beschrieben.

7 Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt die Ergebnisse einer Untersuchung, die Rapsstroh als neue Rohstoffquelle für die Herstellung von Naturfaser-Compounds erkunden soll. Das Resultat ist durchweg positiv und Rapsstroh stellt sich als gleichwertiges Material zu bereits bekannten Fasern aus Flachs oder Hanf dar. Für die Zukunft ist es besonders aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten ratsam Rapsstroh in der Industrie bekannt zu machen und für seinen Einsatz zu werben.

Weiterhin konnte im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden, welchen großen Nutzen man aus dem Einsatz von thermoplastischen Elastomeren als Additive für die Compoundierung von Naturfasern ziehen kann. Eine deutlich verminderte Wasseraufnahme der Compounds führt zwangsläufig zu einer längeren Haltbarkeit der Produkte und kann mitunter neue Anwendungen ermöglichen. Auch hier muss der Kontakt zur Industrie gesucht werden, um die Ergebnisse in eine Anwendung zu überführen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Einteilung der Naturfasern	18
Abbildung 2 - Aufbau von Naturfasern	19
Abbildung 3 - Schematischer Aufbau von Bastfasern	20
Abbildung 4 - Verlauf der Mikrofibrillen bei elementaren Flachs- und Hanffasern (11)	20
Abbildung 5 - TGA-Kurven und Festigkeitsabbau von Röstflachsfasern (10).....	24
Abbildung 6 - Reißfestigkeit von Naturfasern in Abhängigkeit der Temperatur (10)	25
Abbildung 7 - Feuchteaufnahme von Naturfasern in Abhängigkeit der Lagerzeit (10).....	26
Abbildung 8 - Bauteile mit Füllstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen im Auto (32)	27
Abbildung 9 - Botanische Übersicht über die einzelnen Pflanzenteile der Rapspflanze (33)	28
Abbildung 10 - Entwicklung der Anbaufläche und der der Erntemenge für Raps (34)	29
Abbildung 11 - Zunahme der Rapsanbaufläche in Deutschland (34)	29
Abbildung 12 - Entwicklung der Produktionskapazität für Biodiesel (34).....	30
Abbildung 13 - Prognose der Anbaufläche für Winterraps in 2010 (34).....	30
Abbildung 14 - Kursentwicklung der Rapspreise (35)	31
Abbildung 15 - Verwertung der Rapsernte (36).....	31
Abbildung 16 - Verwertung von Raps	32
Abbildung 17 - Anbindung von MAH-PP-Haftvermittler an eine Cellulosefaser (10)	35
Abbildung 18 - Vergleich der E-Moduln bei Anwendung verschiedener Haftvermittler (10).....	36
Abbildung 19 - Vergleich der Zugfestigkeit bei Anwendung verschiedener Haftvermittler (10).....	36
Abbildung 20 - Spannungsverlauf (a) und Schubspannung an der Grenzfläche (b) für eine endliche Faser der Länge l (45).....	37
Abbildung 21 - Theoretische Festigkeiten von naturfaserverstärktem Polypropylen (10).....	39
Abbildung 22 - Polypropylengranulat	41
Abbildung 23 - Ballenware Rapsstroh	42
Abbildung 24 - Rapsstroh; links: dem Strohballen entnommene Fasern, rechts: nach dem Mahlen.....	42
Abbildung 25 - Granulat des Additivs E685.....	44
Abbildung 26 - Verfahrensablauf zur Herstellung der Probekörper	47
Abbildung 27 – Dichtewaage	48
Abbildung 28 - Zugprüfmaschine	49
Abbildung 29 - Prinzipieller Kurvenverlauf verschiedener Kunststoffe im Spannungs-Dehnungs-Diagramm; Kurve a: spröder Werkstoff, Kurve b und c: zähe Werkstoffe mit Streckpunkt, Kurve d: zähe Werkstoffe ohne Streckpunkt (51).....	50
Abbildung 30 - Prüfmaschine für die 3-Punkt-Biegung.....	51
Abbildung 31 - Pendelschlagwerk zur Bestimmung der Schlagzähigkeit	52
Abbildung 32 - Probeneinspannung für die Prüfung der Schlagzähigkeit nach (52).....	52

Materialverhalten von Rapsstroh-Polypropylen Compounds

Abbildung 33 - Wasseraufnahme durch Zugabe von Rapsstroh	56
Abbildung 34 - Wasseraufnahme der reinen Additive und Proben aus Polyethylen mit den angegebenen Beimischungen (47).....	58
Abbildung 35 - Bruchverhalten der Compounds; links: vor der Prüfung, rechts: nach der Prüfung.....	59
Abbildung 36 - Messergebnisse für die Streckspannung	61
Abbildung 37 - Gemessene Werte des Biegemoduls	62
Abbildung 38 - Gemessene Biegefestigkeit.....	63
Abbildung 39 - Gemessene Izod-Schlagzähigkeit	64
Abbildung 40 - Lichtmikroskopische Aufnahmen einer PP Probe mit 10 % Rapsstroh;	65
Abbildung 41 - Bild einer eingebetteten Rapsstrohfaser, die aus vielen Fibrillen besteht.	66
Abbildung 42 - Eingebettete Rapsstrohfaser. Das PP hat sich hier beim Bruch nicht sauber getrennt, sondern abgeschält.	67
Abbildung 43 - Rapsstrohfaser eingebettet in PP. Daneben ein Hohlraum aus dem die Faser beim Bruch herausgerissen wurde. Damit wird die schlechte Haftung zwischen Faser und PP deutlich.	68
Abbildung 44 - Querschnitt der gesamten Bruchfläche. Es sind zahlreiche Hohlräume zu erkennen.....	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Anbauflächen nachwachsender Rohstoffe in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2005 in Hektar(6)	17
Tabelle 2 - Zusammensetzung einiger Fasertypen (10)	21
Tabelle 3 - Mechanische Fasereigenschaften einiger Fasertypen (10)	22
Tabelle 4 - Vergleich von MAH-Haftvermittlern (10)	35
Tabelle 5 – Materialeigenschaften laut Hersteller des Polypropylens 579S (Sabic)	40
Tabelle 6 – Materialeigenschaften laut Hersteller des Elastollans 685 AU (Elastogran)	44
Tabelle 7 – Übersicht der Zusammensetzung der Probenkörper	46
Tabelle 8 - Dichtemessung	54
Tabelle 9 - Wasseraufnahme nach 84 Tagen	57
Tabelle 10 - Messdaten des Zugversuchs	60
Tabelle 11 - Vergleich ausgewählter mechanischer Eigenschaften von Naturfaser-PP-Compounds	69

Literaturverzeichnis

1. **Katz, H. S. and Milewski, V.** *Handbook of Fillers and Reinforcements for Plastics*. New York : Van Nostrand Reinhold Co., 1978.
2. **Nielsen, L. E.** *Mechanical Properties of Polymers and Composites*. New York : Marcel Dekker, 1974.
3. **Titow, W. and Lanham, B.** *Reinforced Thermoplastics*. London : Applied Sci. Publ., 1975.
4. **Folkes, M. J.** *Short-fiber Reinforced Thermoplastics*. New York : John Wiley, 1982.
5. **European Industrial Hemp Association.** *Wachsende Nachfrage nach europäischen Hanffasern*. Hürth : nova-Institut GmbH, 2010.
6. **Agentur für LandEntwicklung und LandErlebnis .** *Recherche zu Forschungs-, Entwicklungs- und Modellvorhaben mit Beiträgen zur innovativen Nutzung und Erhaltung von Agrarbioidiversität*. s.l. : Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Verbraucherschutz.
7. **nova Institut.** *Entwicklung von Förderinstrumenten für die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland*. Hürth : nova-Institut, 2010.
8. **Deutsches Institut für Normung.** *Textile Faserstoffe. DIN 60001*. 2001.
9. **Rüegg, J.** Ramie - Hochleistungsfaser aus der Natur. *Textilveredelung*. 1994, 29, pp. 9-13.
10. **Reußmann, T.** Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Langfasergranulat mit Naturfaserverstärkung. *Dissertation TU Chemnitz*. Chemnitz : s.n., 2002.
11. **Wilbrandt, G.** *Faserstofflehre*. Leipzig : Fachbuchverlag Leipzig, 1973.
12. **Mukherjee, P. S. and Satyanarayana, K. G.** An empirical evaluation of structure-property relationship in natural fibers and their fracture behaviour. *Journal of Material Science*. 1986, 21, pp. 4162-4168.
13. —. Structure and properties of some vegetable fibers. *Journal of Material Science*. 1984, 19, pp. 3925-3934.

14. **Zeronian, S. H.** The mechanical properties of cotton fibers. *Journal of Applied Polymer Science*. 1991, 47, pp. 445-461.
15. **Bledzki, K. and Gassan, J.** Natürliche Verstärkungsfasern für Kunststoffe. *Spektrum der Wissenschaft*. 1996, pp. 96-100.
16. **Gassan, J.** Naturfaserverstärkte Kunststoffe. *Dissertation*. s.l. : GH Kassel, 1997.
17. **Widdecke, H. and Marek, A.** Herstellung von Polypropylen-Naturfasercomposites. 3. *Internationales Symposium Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen*. Erfurt : s.n., 2001.
18. **Fölster, Th.** Nachwachsende Rohstoffe in technischen Anwendungen am Beispiel Fasern / Vliese. *Textilveredelung*. 1995, 30, pp. 2-8.
19. **Höck, P.** Verstärkung von Polypropylen auf gleichdralldoppelschneckenextrudern. *Dissertation*. s.l. : RWTH Aachen, 1994.
20. **Yang, P. and Kokot, S.** Thermal analysis of different cellulosic fabrics. *Journal of Applied Polymer Science*. 1996, 60, pp. 1137-1146.
21. **Karmaker, A.** Jutefaserverstärkte thermoplastische Verbundwerkstoffe. *Dissertation*. s.l. : TU Berlin, 1993.
22. **von Hornuff, G. and Müller, G.** Beiträge zur thermischen Analyse von Cellulosefaserstoffen. *Acta Polymerica*. 1972, 23, pp. 466-477.
23. **Testa, G., et al.** The kinetics of cellulose fiber degradation and correlation with some tensile properties. *Acta Polymerica*. 1994, 45, pp. 47-49.
24. **Nakao, T., Okano, T. and Nishimura, H.** Effect of heat treatment on cellulose crystallinities of wood. *Journal of Polymer Science: Polymer Letters*. 1985, 23, pp. 647-649.
25. **Hanselka, H., Herrmann, A. and Prömper, E.** *Automobil-Leichtbau durch den Einsatz von Naturfaser-Verbundwerkstoffen*. Düsseldorf : VDI-Fahrzeug- und Verkehrstechnik Jahrbuch, 1996.
26. **Calahorra, M. E., et al.** Thermogravimetric analysis of cellulose: Effect of the molecular weight on thermal decomposition. *Journal of Applied Polymer Science*. 1989, 37, pp. 3305-3314.

27. **Ramiah, M. V.** Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose, hemicellulose and lignin. *Journal of Applied Polymer Science*. 1970, 14, pp. 1323-1337.
28. **Sapieha, S., Pupo, J. F. and Schreiber, H. P.** Thermal degradation of cellulose-containing composites during processing. *Journal of Applied Polymer Science*. 1989, 37, pp. 233-240.
29. **Basch, A. and Lewin, M.** The influence of fine structure on the pyrolysis of cellulose; I. Vacuum pyrolysis. *Journal of Polymer Science*. 1973, 11, pp. 3071-3092.
30. *Smell and emission of natural fiber composites in the car industry.* **Angermaier, B.** Kassel : s.n., 2000. 3rd International Wood and Natural Fiber Composites Symposium.
31. *Naturfaserverstärkte Kunststoffe in KFZ-Außenanwendungen.* **Knothe, J and Schlößer, T.** Kassel : s.n., 2000. 3rd International Wood and Natural Fiber Composites Symposium.
32. **Springer Automotive Media.** Automobiltechnik für Automobilindustrie & Automobilzulieferer. [Online] [Cited: August 30, 2010.] www.atzonline.de.
33. Koehlers Medizinalpflanzen, Tafeln. [Online] 12 10, 2001. [Cited: 10 15, 2010.] <http://caliban.mpiz-koeln.mpg.de/koehler>.
34. **Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V.** UFOP. [Online] [Cited: 10 15, 2010.] www.ufop.de.
35. **Agrarberatung Hessen.** Agrarberatung Hessen. [Online] [Cited: 10 15, 2010.] www.agrarberatung-hessen.de.
36. **Verein zur Förderung von Biomasse in Freiberg (Sachsen).** Verein zur Förderung von Biomasse in Freiberg (Sachsen). [Online] [Cited: 10 15, 2010.] www.biomasse-freiberg.de.
37. **Twite-Kabamba, E., Mechraoui, A. and Rodrigue, D.** Rheological Properties of Polypropylene/Hemp Fiber Composites. *Polymer Composites*. 2009, pp. 1401 - 1407.
38. **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.** *Produktkatalog Naturfaser-Spritzguss.* Hürth : nova-Institut, 2010.
39. **Ehrenstein, G. W.** *Faserverbund-Kunststoffe.* München Wien : Carl Hanser Verlag, 1992.

40. **Raj, R. G., et al.** Use of wood fibers in thermoplastics. VII. The effect of coupling agents in polyethylene-wood fiber composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 1989, 37, pp. 1089-1103.
41. **Felix, J. M. and Gatenholm, P.** The nature of adhesion in composites of modified cellulose fibers and polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*. 1991, 42, pp. 609-620.
42. **Maldas, D., Kokta, B. V. and Daneault, C.** Influence of coupling agents and treatments on the mechanical properties of cellulose fiber-polystyrene composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 1989, 37, pp. 751-775.
43. **Mieck, K.-P., Nechwatal, A. and Knobelsdorf, C.** Faser-Matrix-Haftung in Kunststoffverbunden aus thermoplastischer Matrix und Flachs, 2. Die Anwendung von funktionalisiertem Polypropylen. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*. 1995, 225, pp. 37-49.
44. **Aurich, T. Menning, G.** Spritzgießen von naturfaserverstärktem Polypropylen. *Kunststoffe*. 1999, 89, pp. 30-32.
45. **Berlin, A. A., et al.** *Principles of Polymer Composites*. Berlin Heidelberg : Springer, 1986.
46. **Endres, H.J., Hausmann, K. and Helmke, P.** Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Haftvermittler und Haftvermittlergehalte auf PP-Holzmehl-Compounds. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*. 2006, Vol. 59, pp. 399 - 404.
47. **Müller, M.** Thermoplastische Elastomere als neuartige Additive für die Kunststoffverarbeitung. *Dissertation*. Berlin : Technische Universität Berlin, 2009.
48. **Wacker Chemie.** Geniomer 140. *Produktbeschreibung*. 2009.
49. **van den Oever, M. J. A. and Snijder, M. H. B.** Jute Fiber Reinforced Polypropylene Produced by Continuous Extrusion Compounding, Part 1: Processing and Aging Properties. *Journal of Applied Polymer Science*. 2008, 110, pp. 1009-1018.
50. **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.** *Naturfaserverstärkte Kunststoffe*. Gülzow : nova-Institut GmbH, 2008.

51. **Deutsches Institut für Normung.** Bestimmung der Zugeigenschaften (Kunststoffe). *DIN EN ISO 527*. 1996.
52. —. Bestimmung der Izod-Schlagzähigkeit (Kunststoffe). *DIN EN ISO 180*. 2007.
53. **Menges, G. and Brintrup, H.** Verbundwerkstoffe. [book auth.] Hans Batzer. *Polymere Werkstoffe Band III*. Stuttgart : Thieme, 1984.
54. **Wuttke, B.** Flachsfaserverstärktes Polypropylen - Mikromechanik und Wasseraufnahmeverhalten. *Dissertation*. s.l. : TU Berlin, 1996.
55. **Tubach, M. and Kessler, W.** Marktsituation und Einsatzbereiche von Flachs. *Textilveredelung*. 1994, 29, pp. 2-8.
56. *Reduction of Moisture Sensitivity in Wood an Natural Fibers for Polymer Composites.*
Pott, G., Huetting, D. and van Deursen, J. Kassel : s.n., 200. 3rd International Wood and Natural Fiber Composites Symposium.
57. **Kelly, A. and Tyson, W. R.** Tensile properties of fibre-reinforced metals. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1965, 13, pp. 329-350.

Symbolverzeichnis

A	Querschnittsfläche
ASTM	International (ursprünglich American Society for Testing and Materials)
b	Breite der Proben
b_N	Verbleibende Breite am Kerbgrund
DIN	Deutsches Institut für Normung
DTA	Differentialthermoanalyse
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN	Europäischen Normen
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
Gew.-%	Gewichtsprozent
ISO	Internationale Organisation für Normung
h	Dicke der Proben
l	Länge der Proben
c	Wasseraufnahme in Prozent
m_1	Gewicht nach Wasserlagerung
m_2	Gewicht vor Wasserlagerung
MAH	Maleinsäureanhydrid
MAHPP	Maleinsäureanhydrid-modifiziertes Polypropylen
MFI	Schmelzindexprüfung (Melt Flow Index)
MPa	Megapascal
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
R	Radius
TGA	Thermogravimetrische Analyse
UV	Ultraviolettstrahlung

$\alpha_c U$	Schlagzähigkeit
E_f	E-Modul der Faser
E_m	E-Modul der Polymermatrix
l_c	kritische Faserlänge
ρ	Dichte
ε	Dehnung
ε_B	Bruchdehnung
ε_c	Dehnung des Compounds
σ_B	Bruchspannung
σ_c	Zugspannung des Compounds
σ_M	Matrixzugspannung
σ_f^*	querschnittbezogene Faserfestigkeit
φ	Faservolumengehalt
φ_f	Faservolumenanteil
φ_m	Volumenanteil der Polymermatrix
τ_m	Scherfestigkeit der Faser

Anhang

A. Messwerte Wasseraufnahme

➤ Probenkategorie E bis H

Probe	Probengewicht nach x Tagen Wasserlagerung [g] (prozentuale Zunahme)								
	0	1	2	7	14	21	28	56	84
10 % Rapsstroh	8,178 {0,00%}	8,196 {0,22%}	8,201 {0,28%}	8,212 {0,42%}	8,222 {0,54%}	8,233 {0,67%}	8,240 {0,76%}	8,246 {0,83%}	8,249 {0,87%}
10 % Rapsstroh + 1 % E685	8,141 {0,00%}	8,147 {0,07%}	8,150 {0,11%}	8,155 {0,17%}	8,158 {0,21%}	8,161 {0,25%}	8,163 {0,27%}	8,173 {0,39%}	8,185 {0,54%}
10 % Rapsstroh + 1 % G140	8,117 {0,00%}	8,126 {0,11%}	8,131 {0,17%}	8,134 {0,21%}	8,138 {0,26%}	8,143 {0,32%}	8,146 {0,36%}	8,158 {0,51%}	8,168 {0,63%}
10 % Rapsstroh + 2 % E685	8,134 {0,00%}	8,139 {0,06%}	8,145 {0,14%}	8,149 {0,18%}	8,152 {0,22%}	8,155 {0,26%}	8,157 {0,28%}	8,168 {0,42%}	8,179 {0,55%}
10 % Rapsstroh + 2 % G140	8,148 {0,00%}	8,161 {0,16%}	8,163 {0,18%}	8,165 {0,21%}	8,168 {0,25%}	8,174 {0,32%}	8,177 {0,36%}	8,190 {0,52%}	8,201 {0,65%}

➤ Probenkategorie I bis L

Probe	Probengewicht nach x Tagen Wasserlagerung [g] (prozentuale Zunahme)								
	0	1	2	7	14	21	28	56	84
20 % Rapsstroh	8,379 {0,00%}	8,389 {0,12%}	8,399 {0,24%}	8,414 {0,42%}	8,436 {0,68%}	8,455 {0,91%}	8,473 {1,12%}	8,790 {4,91%}	8,900 {6,22%}
20 % Rapsstroh + 1 % E685	8,554 {0,00%}	8,572 {0,21%}	8,577 {0,26%}	8,587 {0,38%}	8,599 {0,52%}	8,606 {0,61%}	8,614 {0,70%}	8,647 {1,09%}	8,685 {1,53%}
20 % Rapsstroh + 1 % G140	8,543 {0,00%}	8,567 {0,28%}	8,573 {0,35%}	8,594 {0,60%}	8,612 {0,81%}	8,629 {1,01%}	8,639 {1,12%}	8,685 {1,66%}	8,743 {2,34%}
20 % Rapsstroh + 2 % E685	8,535 {0,00%}	8,555 {0,23%}	8,559 {0,27%}	8,568 {0,39%}	8,575 {0,47%}	8,590 {0,64%}	8,601 {0,77%}	8,640 {1,23%}	8,684 {1,74%}
20 % Rapsstroh + 2 % G140	8,609 {0,00%}	8,639 {0,35%}	8,642 {0,38%}	8,667 {0,67%}	8,685 {0,88%}	8,690 {0,94%}	8,717 {1,25%}	8,764 {1,80%}	8,825 {2,51%}

➤ Probenkategorie M bis P

Probe	Probengewicht nach x Tagen Wasserlagerung [g] (prozentuale Zunahme)								
	0	1	2	7	14	21	28	56	84
30 % Rapsstroh	8,756 {0,00%}	8,813 {0,65%}	8,825 {0,79%}	8,884 {1,46%}	8,960 {2,33%}	9,026 {3,08%}	9,078 {3,68%}	9,240 {5,53%}	9,570 {9,30%}
30 % Rapsstroh + 1 % E685	8,890 {0,00%}	8,949 {0,66%}	8,959 {0,77%}	8,995 {1,17%}	9,037 {1,65%}	9,076 {2,09%}	9,111 {2,48%}	9,228 {3,80%}	9,341 {5,07%}
30 % Rapsstroh + 1 % G140	9,022 {0,00%}	9,069 {0,51%}	9,080 {0,65%}	9,126 {1,15%}	9,184 {1,80%}	9,236 {2,37%}	9,280 {2,86%}	9,412 {4,32%}	9,541 {5,75%}
30 % Rapsstroh + 2 % E685	8,940 {0,00%}	8,993 {0,59%}	9,004 {0,71%}	9,042 {1,13%}	9,090 {1,67%}	9,140 {2,23%}	9,172 {2,59%}	9,302 {4,04%}	9,407 {5,22%}
30 % Rapsstroh + 2 % G140	9,016 {0,00%}	9,065 {0,54%}	9,078 {0,69%}	9,128 {1,24%}	9,185 {1,87%}	9,237 {2,45%}	9,281 {2,93%}	9,408 {4,34%}	9,539 {5,80%}

: Trocken- bzw. Bezugswert

B. Messwerte Zugversuch

➤ PP rein

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	40,00	1166	32,8	8,40	25,7	16,87
2	40,00	1174	32,9	8,30	26,9	15,44
3	40,00	1198	32,8	8,36	26,4	20,40
4	40,00	1009	32,4	8,31	28,8	14,50
5	40,00	1423	32,9	8,18	26,3	13,18
Mittelwert	40,00	1194	32,8	8,30	26,8	16,10
Standard- abweichung	0,00	133	0,19	0,07	1,06	2,47

➤ PP rein nach γ -Bestrahlung

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	45,32	1315	29,4	7,65	29,1	9,08
2	38,22	1488	34,7	8,03	34,7	8,41
3	38,61	1752	35,3	7,69	35,2	8,33
4	38,61	1519	35,4	8,07	34,8	10,97
5	39,20	1402	34,5	8,17	34,0	10,98
Mittelwert	39,66	1540	35,0	8,00	34,7	9,70
Standard- abweichung	0,35	130	0,38	0,18	0,43	1,30

Fehlversuch

➤ PP + 10 % Rapsstroh

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	40,00	2035	28,5	4,11	28,3	4,73
2	40,00	2073	28,8	4,27	28,7	4,66
3	40,00	1994	28,3	4,05	28,2	4,38
Mittelwert	40,00	2034	28,5	4,10	28,4	4,6
Standard- abweichung	0,00	32	0,21	0,09	0,22	0,15

Materialverhalten von Rapsstroh-Polypropylen Compounds

➤ PP + 20 % Rapsstroh

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	40,00	2055	27,7	3,76	27,5	4,24
2	40,00	1568	7,7	0,42	7,7	0,42
3	40,00	1554	27,4	3,74	27,1	4,31
Mittelwert	40,00	1805	27,6	3,80	27,3	4,30
Standard- abweichung	0,00	251	0,15	0,42	0,20	0,03

Fehlversuch

➤ PP + 30 % Rapsstroh

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	40,00	2204	24,9	2,60	24,9	2,60
2	40,00	1761	6,2	0,33	6,2	0,33
3	40,00	2108	5,8	0,28	5,8	0,28
Mittelwert	40,00	2204	24,9	2,60	24,9	2,60
Standard- abweichung	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00

Fehlversuch

Fehlversuch

➤ PP + 10 % Rapsstroh + 1 % E685

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	37,83	1841	29,7	5,90	29,3	6,92
2	38,61	1667	29,2	6,29	27,8	7,22
3	39,00	1595	28,2	6,41	27,7	7,93
4	39,00	1658	28,9	6,56	28,3	8,40
5	38,00	1501	29,3	5,22	29,1	5,53
Mittelwert	38,49	1652	29,1	6,10	28,4	7,20
Standard- abweichung	0,49	111	0,50	0,48	0,66	0,98

Materialverhalten von Rapsstroh-Polypropylen Compounds

➤ PP + 10 % Rapsstroh + 1 % G140

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	39,60	1652	27,4	5,27	27,2	5,77
2	38,61	1576	28,1	6,06	27,3	8,37
3	39,00	1799	27,9	5,67	27,3	7,55
4	39,00	1623	27,8	5,53	27,2	6,90
5	40,00	1608	26,8	5,42	26,7	5,89
Mittelwert	39,24	1652	27,6	5,60	27,1	6,90
Standard- abweichung	0,49	78	0,46	0,27	0,22	0,99

➤ PP + 10 % Rapsstroh + 2 % E685

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	38,61	1643	29,0	6,21	29,0	6,21
2	39,39	1608	27,8	6,36	27,4	7,25
3	39,00	1245	27,4	6,07	26,9	7,29
4	38,61	1260	28,6	6,06	28,5	6,17
5	39,00	1724	27,9	5,16	27,8	5,40
Mittelwert	38,92	1496	28,1	6,00	27,9	6,50
Standard- abweichung	0,29	202	0,58	0,42	0,75	0,72

➤ PP + 10 % Rapsstroh + 2 % G140

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	39,00	1791	27,5	5,19	26,0	5,76
2	38,22	1555	27,2	5,25	27,0	5,77
3	40,00	1575	27,1	5,84	26,3	8,10
4	40,00	1519	26,7	5,50	26,3	6,72
5	40,00	1584	26,4	5,29	26,2	5,77
Mittelwert	39,44	1605	27,0	5,40	26,4	6,40
Standard- abweichung	0,72	96	0,39	0,24	0,34	0,92

Materialverhalten von Rapsstroh-Polypropylen Compounds

➤ PP + 20 % Rapsstroh + 1 % E685

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	37,24	2209	28,6	4,62	27,7	6,12
2	39,00	1959	27,5	5,03	26,9	6,17
3	37,62	2256	28,6	4,83	27,4	6,32
4	37,62	1707	28,3	4,66	28,0	5,20
5	37,62	1891	28,2	4,92	27,6	6,50
Mittelwert	37,82	2004	28,2	4,80	27,5	6,10
Standard- abweichung	0,61	204	0,40	0,15	0,37	0,45

➤ PP + 20 % Rapsstroh + 1 % G140

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	40,00	1765	25,0	4,25	24,2	6,08
2	40,00	1892	24,6	3,52	24,3	3,73
3	39,60	1823	24,4	3,90	24,1	4,71
4	40,00	1878	24,6	3,80	23,3	4,09
5	40,00	1876	24,6	3,87	24,5	4,20
Mittelwert	39,92	1847	24,6	3,90	24,1	4,60
Standard- abweichung	0,16	47	0,20	0,23	0,41	0,82

➤ PP + 20 % Rapsstroh + 2 % E685

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	40,00	1932	26,9	4,51	26,3	5,51
2	40,00	1989	27,7	4,51	26,6	6,05
3	40,00	1409	27,3	4,76	27,0	5,46
4	40,00	2053	27,6	4,51	27,0	5,74
5	40,00	2123	27,3	4,30	27,0	4,87
Mittelwert	40,00	1901	27,4	4,5	26,8	5,50
Standard- abweichung	0,00	254	0,28	0,15	0,29	0,39

Materialverhalten von Rapsstroh-Polypropylen Compounds

➤ PP + 20 % Rapsstroh + 2 % G140

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	39,60	1749	25,0	4,04	23,9	4,64
2	38,61	1816	24,9	4,03	24,4	4,98
3	38,61	2076	24,7	4,28	24,1	5,66
4	39,00	1897	24,8	4,03	24,6	4,42
5	39,60	2006	24,2	3,75	23,9	4,48
Mittelwert	39,08	1909	24,7	4,00	24,2	4,80
Standard- abweichung	0,44	120	0,28	0,17	0,28	0,46

➤ PP + 30 % Rapsstroh + 1 % E685

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	40,00	2256	24,9	3,38	24,4	3,82
2	40,00	2108	23,6	2,25	23,6	2,27
3	40,00	2474	25,6	3,66	24,8	4,46
4	40,00	2394	25,8	3,91	25,2	4,89
5	40,00	2470	25,6	3,69	24,6	4,88
Mittelwert	40,00	2340	25,1	3,40	24,5	4,10
Standard- abweichung	0,00	140	0,81	0,59	0,53	0,98

➤ PP + 30 % Rapsstroh + 1 % G140

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	39,61	2341	24,3	3,26	23,0	3,59
2	39,00	2136	23,9	3,28	23,7	3,72
3	39,60	2267	23,7	3,15	23,1	3,78
4	38,61	2391	24,2	3,10	23,5	3,78
5	39,60	2034	23,3	2,99	23,2	3,19
Mittelwert	39,08	2234	23,9	3,20	23,3	3,60
Standard- abweichung	0,44	132	0,36	0,11	0,26	0,22

Materialverhalten von Rapsstroh-Polypropylen Compounds

➤ PP + 30 % Rapsstroh + 2 % E685

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	40,00	2259	25,2	3,60	24,6	4,11
2	40,00	2265	25,2	3,79	24,5	4,69
3	40,00	2242	25,2	3,68	25,0	4,21
4	40,00	1870	25,3	3,85	24,9	4,67
5	40,00	2263	25,5	3,74	25,1	4,33
Mittelwert	40,00	2180	25,3	3,70	24,8	4,40
Standard- abweichung	0,00	155	0,12	0,09	0,23	0,24

➤ PP + 30 % Rapsstroh + 2 % G140

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	38,61	2154	23,0	3,58	22,6	4,32
2	38,61	2004	22,7	3,45	22,2	4,03
3	38,61	1994	23,2	3,50	22,9	4,06
4	38,61	2000	22,8	3,43	22,1	3,97
5	38,61	2077	23,3	3,47	22,7	4,08
Mittelwert	38,61	2046	23,0	3,50	22,5	4,10
Standard- abweichung	0,00	62	0,23	0,05	0,30	0,12

➤ PP + 10 % Rapsstroh + 2 % E685 nach γ -Bestrahlung

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	39,60	1802	27,5	3,32	27,5	3,32
2	38,22	1686	29,8	4,81	29,8	4,96
3	38,22	1631	29,5	4,35	28,9	4,46
4	38,22	1587	27,2	2,74	27,2	2,74
5	38,22	1542	30,1	5,03	30,1	5,03
Mittelwert	38,50	1650	28,8	4,10	28,7	4,10
Standard- abweichung	0,55	90	1,22	0,88	1,17	0,92

Materialverhalten von Rapsstroh-Polypropylen Compounds

➤ PP + 20 % Rapsstroh + 2 % E685 nach γ - Bestrahlung

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	38,22	1893	29,0	4,10	28,7	4,81
2	39,20	1724	28,3	4,07	27,3	4,59
3	38,22	1815	29,4	3,74	29,3	3,86
4	38,22	1870	29,5	4,19	29,1	4,94
5	38,22	1737	29,6	4,11	29,2	4,74
Mittelwert	38,42	1808	29,2	4,00	28,7	4,60
Standard- abweichung	0,39	68	0,48	0,16	0,74	0,38

➤ PP + 30 % Rapsstroh + 2 % E685 nach γ - Bestrahlung

Nr.	Querschnitt [mm ²]	E-Modul [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	σ_B [MPa]	ϵ_B [%]
1	38,22	2398	27,1	3,18	26,9	3,54
2	38,22	2303	27,0	3,30	26,8	3,62
3	38,22	2168	27,4	3,37	26,9	4,26
4	38,22	2242	27,2	3,20	26,9	3,58
5	38,22	2228	26,9	3,15	26,7	3,32
Mittelwert	38,22	2268	27,1	3,20	26,8	3,70
Standard- abweichung	0,00	78	0,17	0,08	0,08	0,32

C. Messwerte Biegeversuch

	PP rein	PP + 10 % Rapsstroh	PP + 20 % Rapsstroh	PP + 30 % Rapsstroh
Biegefestigkeit [MPa]	34,10	40,26	42,12	44,63
Biegemodul [MPa]	1453	1912	2218	22834

Alle Messwerte des Biegeversuchs besitzen eine maximale Abweichung von 30%.

D. Messwerte Schlagzähigkeit

➤ PP rein

Nr.	a_{cU} [kJ/m ²]	b [mm]	h [mm]
1	2,06	10,00	3,96
2	1,94	10,03	4,00
3	2,22	9,92	3,99
4	2,03	9,90	3,97
5	2,58	9,92	3,98
Mittelwert	2,16	9,95	3,98
Standard-abweichung	0,25	0,06	0,02

➤ PP + 10 % Rapsstroh

Nr.	a_{cU} [kJ/m ²]	b [mm]	h [mm]
1	0,35	10,05	3,96
2	0,37	10,09	3,95
3	0,43	9,98	3,94
4	0,25	9,99	3,97
5	0,33	10,13	3,97
Mittelwert	0,35	10,05	3,96
Standard-abweichung	0,06	0,06	0,01

➤ PP + 20 % Rapsstroh

Nr.	a_{cU} [kJ/m ²]	b [mm]	h [mm]
1	0,26	3,96	10,09
2	0,32	3,96	9,94
3	0,42	3,98	10,18
4	0,31	3,99	10,10
5	0,30	3,97	10,01
Mittelwert	0,32	3,97	10,06
Standard-abweichung	0,06	0,01	0,09

➤ PP + 30 % Rapsstroh

Nr.	α_{cU} [kJ/m ²]	b [mm]	h [mm]
1	0,23	9,94	3,97
2	0,31	10,06	3,93
3	0,24	10,22	3,92
4	0,27	10,15	3,92
5	0,37	10,11	3,95
Mittelwert	0,28	10,10	3,94
Standard- abweichung	0,06	0,11	0,02

➤ PP + 10 % Rapsstroh + 1 % E685

Nr.	α_{cU} [kJ/m ²]	b [mm]	h [mm]
1	0,37	9,89	3,96
2	0,35	10,05	3,95
3	0,50	9,74	3,94
4	0,50	9,83	3,89
5	0,48	9,78	3,88
Mittelwert	0,44	9,85	3,92
Standard- abweichung	0,07	0,07	0,03

➤ PP + 10 % Rapsstroh + 2 % E685

Nr.	α_{cU} [kJ/m ²]	b [mm]	h [mm]
1	0,34	9,79	3,96
2	0,35	10,00	3,95
3	0,50	9,98	3,87
4	0,47	9,83	3,89
5	0,49	9,76	3,90
Mittelwert	0,43	9,87	3,91
Standard- abweichung	0,07	0,07	0,02

➤ PP + 20 % Rapsstroh + 1 % E685

Nr.	α_{cU} [kJ/m ²]	b [mm]	h [mm]
1	0,45	9,93	3,96
2	0,40	9,85	9,95
3	0,35	9,98	3,95
4	0,51	10,00	3,88
5	0,48	9,76	3,90
Mittelwert	0,44	9,90	3,92
Standard-abweichung	0,04	0,06	0,03

➤ PP + 20 % Rapsstroh + 2 % E685

Nr.	α_{cU} [kJ/m ²]	b [mm]	h [mm]
1	0,40	9,81	3,96
2	0,48	9,85	3,95
3	0,37	9,98	3,98
4	0,42	10,00	3,98
5	0,44	9,76	3,90
Mittelwert	0,42	9,88	3,95
Standard-abweichung	0,04	0,06	0,03

➤ PP + 30 % Rapsstroh + 1 % E685

Nr.	α_{cU} [kJ/m ²]	b [mm]	h [mm]
1	0,34	9,86	3,84
2	0,34	9,89	3,88
3	0,31	9,77	3,85
4	0,28	10,00	3,90
5	0,32	9,82	3,85
Mittelwert	0,32	9,86	3,84
Standard-abweichung	0,04	0,07	0,03

➤ PP + 30 % Rapsstroh + 2 % E685

Nr.	α_{cU} [kJ/m ²]	b [mm]	h [mm]
1	0,38	9,82	3,94
2	0,34	10,02	3,88
3	0,41	9,93	3,87
4	0,39	10,00	3,85
5	0,28	9,89	3,90
Mittelwert	0,36	9,93	3,88
Standard- abweichung	0,04	0,16	0,04

Schriftenreihe Kunststoff-Forschung

der Technischen Universität Berlin

Herausgegeben von Helmut Käufer

ISSN 0174-4003. 1. 1980. ff.

- 32: Heschke, Peer: Demontage von Klebverbindungen für eine praktikablere Instandhaltung und ein optimiertes Recycling.** - . - 1995. - 160 S., zahlr. graph. Darst., 29 Photos, z.T. farbig, A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1663-5
ISBN-13: 978-3-7983-1663-8 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 33: Karras, Wolf: Differenzierte Aufbereitung zum wirtschaftlichen Recycling von Polyolefinen.** - . - 1996. - 204 S., zahlr. graph. Darst. u. Photos, 2 Farbphotos, A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1671-6
ISBN-13: 978-3-7983-1671-3 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 34: Kämmler, Georg: Fixierzeitmodulierte Präzisionseinstellung von Kunststoffgleitlagern.** - . - 1996. - 172 S., zahlr. graph. Darst., 10 Photos, A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1679-1
ISBN-13: 978-3-7983-1679-9 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 35: Xing, Zhijie: Verarbeitung, Struktur und Eigenschaften von hochgefüllten teilkristallinen Thermoplasten.** - . - 1996. - 152 S., zahlr. Photos, z.T. farbig, A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1675-9
ISBN-13: 978-3-7983-1675-1 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 36: Quast, Oliver von: Universelle Methode zur Dehalogenierung von Thermoplasten.** - . - 1996. - 197 S., zahlr. graph. Darst., A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1689-9
ISBN-13: 978-3-7983-1689-8 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 37: Weinlein, Roger: Vergleichende Umweltanalyse von Thermoplast-Bauteilen aus Recyclyat und Neuware.** - . - 1996. - 224 S., 20 Photos, zahlr. graph. Darst., A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1697-X
ISBN-13: 978-3-7983-1697-3 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 38: Martin, Jan: Kunststoff und Holz als Werkstoffe für den Baubereich - ein technischer Vergleich.** - . - 1996. - 140 S., zahlr. graph. Darst., A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1704-6
ISBN-13: 978-3-7983-1704-8 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 39: Wagenblast, Joachim: Verfahrens- und maschinentechnische Verbesserungen bei der Verarbeitung von Thermoplasten mit Schneckenmaschinen.** - . - 1997. - 188 S., 3 Photos, zahlr. graph. Darst., A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1718-6
ISBN-13: 978-3-7983-1718-5 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 40: Zoll, Günther B.: Entwicklung von Kunststoffprodukten mit systemtechnischen Methoden.** - . - 1997. - 170 S., zahlr. graph. Darst. u. Tab., A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1729-1
ISBN-13: 978-3-7983-1729-1 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 41: Siebert, Martin: Entfärben von Thermoplasten beim Recycling über Lösen.** - . - 1997. - 140 S., zahlr. graph. Darst., 13 Photos, A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1723-2
ISBN-13: 978-3-7983-1723-9 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 42: Giese, Dagmar: Recycling über Lösen von Elastomeren und faserverstärkten Thermoplasten.** Konzeption einer Technikumsversuchsanlage. - . - 1998. - 160 S., 33 S. Anh., zahlr. graph. Darst. u. Photos, A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1770-4
ISBN-13: 978-3-7983-1770-3 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 43: Bongers, Alexander: Polymere Implantate durch spezielle Oberflächenfibrillierung.** - . - 1997. - 132 S., graph. Darst., 39 Photos, A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1756-9
ISBN-13: 978-3-7983-1756-7 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 44: Sambale, Harald: Recycling von Thermoplasten durch Direktverarbeitung von Lösungen.** - . - 1999. - 120 S., Abb., A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1797-6
ISBN-13: 978-3-7983-1797-0 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 45: Tief, Kerstin: Variable Kalkulationsmethodik zur Analyse von Kunststoffrecyclingverfahren anhand von wirtschaftlichen und umweltrelevanten Kriterien.** - . - 1998. - 206 S., zahlr. graph. Darst. u. Tab., A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1777-1
ISBN-13: 978-3-7983-1777-2 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 46: Bosewitz, Stefan: Kapselungstechnik zur Optimierung der Aufstellung von Anlagen am Beispiel Recycling über Lösen.** - . - 1999. - 192 S., Farbfotos, A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1807-7
ISBN-13: 978-3-7983-1807-6 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 47: Shaik-El-Eid, Sliman: Biokompatibilität und Zellzahlbestimmung von Fibroblasten auf integralen und normalen Polymerimplantaten.** - . - 1998. - 132 S., graph. Darst. u. Tab., A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1788-7
ISBN-13: 978-3-7983-1788-8 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 48: Klein, Frank: Verfahrensentwicklung, Werkstoffeigenschaften und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für das Kunststoffrecycling über Lösen von Mischthermoplasten.** - . - 1999. - 152 S., A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1811-5
ISBN-13: 978-3-7983-1811-3 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 49: Kaya, Yasar: Kunststoffanwendungen bei der Entwicklung extrakorporaler Medikalprodukte und Implantate.** - . - 1999. - 152 S., A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1795-X
ISBN-13: 978-3-7983-1795-6 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 50: Karras, Wolf; Bosewitz, Stefan; Weinlein, Roger; Tief, Kerstin; Seifert, Daniel; Glandorf, T.: Vergleichende Normierende Betrachtung bei der Verwertung von Abfällen aus Kunststoffverpackungsverpackungen.** - . - 1999. - 200 S., A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1817-4
ISBN-13: 978-3-7983-1817-5 unverbindl. Preis EUR 2,60

- 51: Müller, Thomas: Polymere Implantate mit Formgedächtnis am Beispiel von Stents.** - - 2000. - V, 128 S., A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1843-3
ISBN-13: 978-3-7983-1843-4 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 52: Bedekar, Aravind: Verbund von polymeren Zahnwurzelimplantaten mit Knochen.** - - 2001. - 184 S., A 5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1844-1
ISBN-13: 978-3-7983-1844-1 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 53: Seifert, Daniel: Quantitative Analyse von Polyolefinblends zur Prozeßregelung einer Recyclingsanlage.** - - 2002. - 125 S., A 5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1898-0
ISBN-13: 978-3-7983-1898-4 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 54: Käufer, Helmut: Highlights unbekannt? Kunststoffe.** - - 2001. - 120 S., A 4. - Br
ISBN-10: 3-7983-1874-3
ISBN-13: 978-3-7983-1874-8 unverbindl. Preis EUR 2,60
- 55: Ziesche, Bernhard Dieter: Dimensionierung von großen Rechteckbehältern aus Thermoplasten.** - - 2003. - 168 S., A 5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1899-9
ISBN-13: 978-3-7983-1899-1 unverbindl. Preis EUR 7,90
- 57: Käufer, Helmut: Highlights - unbekannt? Kunststoff - Entstehung.** - - 2004. - 154 S., zahlr. farb. Abb., A 4. - Br
ISBN-10: 3-7983-1929-4
ISBN-13: 978-3-7983-1929-5 Preis EUR 8,90

Schriftenreihe Kunststoff-Forschung

der Technischen Universität Berlin

Herausgegeben von Prof. Dr. Manfred Wagner

ISSN 0174-4003. 1. 1980. ff.

- 56: John, Ingo: Beurteilung von vernetztem UHMWPE hinsichtlich seiner Eignung als Implantatwerkstoff für Hüftgelenksschalen.** - - 2003. - 124 S., A 5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1934-0
ISBN-13: 978-3-7983-1934-9 unverbindl. Preis EUR 7,90
- 58: Zygalsky, Frank: Herstellung und Charakterisierung von oxidischen hochtemperatursupraleitenden dünnen Filmen aus Polymer-Metall-Precursoren.** - - 2004. - 111 S., zahlr. Tab. u. Abb., A 5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1946-4
ISBN-13: 978-3-7983-1946-2 unverbindl. Preis EUR 7,90
- 59: Yu, Erkang: Herstellung und Charakterisierung von Blends aus technischen und hochtemperaturbeständigen Thermoplasten.** - - 2004. - 104 S., A 5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1947-2
ISBN-13: 978-3-7983-1947-9 unverbindl. Preis EUR 7,90
- 60: Wache, Hans-Martin: Optimierung des Memory-Verhaltens von Kunststoffen am Beispiel eines polymeren Stents.** - - 2004. - IV, 116 S., A 5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1954-5
ISBN-13: 978-3-7983-1954-7 unverbindl. Preis EUR 7,90
- 61: Prockat, Jan: Developing Large Structural Parts for Railway Application using a Fibre Reinforced Polymer Design.** - - 2005. - XII, 139 S., A 5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1955-3
ISBN-13: 978-3-7983-1955-4 Preis EUR 19,90
- 62: Tartakowska, Diana Joanna: Degradationskinetik von medizinisch relevanten bioabbaubaren Copolymeren unter statischen und dynamischen Bedingungen.** - - 2005. - 123 S., A 5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1967-7
ISBN-13: 978-3-7983-1967-7 Preis EUR 18,90
- 63: Hentrich, Axel: Herstellung von polymeren Stents als Drug Delivery Systeme durch Tauchen aus der Polymerlösung.** - - 2005. - III, 139 S., A 5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1975-8
ISBN-13: 978-3-7983-1975-2 Preis EUR 19,90
- 64: Kabaha, Eiad: Kleinprüfstäbe zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften thermoplastischer Polymere.** - - 2005. - 151 S., A 5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1980-4
ISBN-13: 978-3-7983-1980-6 Preis EUR 18,90
- 65: Käufer, Helmut: Highlights - unbekannt? Kunststoff - Zukunft.** Trilogie Band 3. - - 2006. - 158 S., zahlr. farb. Abb., A 4. - Br
ISBN-10: 3-7983-2018-7
ISBN-13: 978-3-7983-2018-5 Preis EUR 18,90
- 66: Kheirandish, Saeid: Constitutive Equations for Linear and Long-Chain-Branched Polymer Melts.** - - 2005. - IV, 186 S., A 5. - Br
ISBN-10: 3-7983-1997-9
ISBN-13: 978-3-7983-1997-4 Preis EUR 17,90
- 67: Hetschel, Martin: Abformung von Nanostrukturen im Spritzgießverfahren zur Erzeugung von Antireflexoberflächen.** - - 2005. - 132 S., A5. - Br
ISBN-10: 3-7983-2003-9
ISBN-13: 978-3-7983-2003-1 Preis EUR 16,90
- 68: Rolón Garrido, Victor Hugo: Molecular Structure and Constitutive Modelling of Polymer Melts.** - - 2007. - VII, 147 S., A 5. - Br
ISBN: 978-3-7983-2064-2 Preis EUR 17,90
- 69: Müller, Marco: Thermoplastische Elastomere als neuartige Additive für die Kunststoffverarbeitung.** - - 2009. - 161 S., zahlr. Abb., A 5. - Br
ISBN: 978-3-7983-2172-4 Preis EUR 19,90

- 70: Navarro González, Manuel: Rheology and engineering parameters of bitumen modified with polyolefins, elastomers and reactive polymers.** - . - 2010. - VIII, 187 S., zahlr. Tab. u. Abb., A 5. - Br
ISBN: **978-3-7983-2229-1** Preis EUR **21,90**
- 71: Kübler, Michael: Verfahrensentwicklung zur Herstellung gebrauchsbständiger kleinststrukturierter Kunststoffbauteile.** - . - 2010. - XVIII, 136 S., zahlr. Abb., A 5. - Br
ISBN: **978-3-7983-2270-7** Preis EUR **12,90**
- 72: Schubert, Mario: Biopolymere als definierte Permeationschicht für aktive Lebensmittelverpackungen.**
- . - 2010. - 180 S., zahlr. Tab. u. Abb., A 5. - Br
ISBN: **978-3-7983-2271-4** Preis EUR **20,90**
- 73: Akier, Amer H.: Untersuchungen zum Materialverhalten von Rapsstroh-Polypropylen Compounds.** - . - 2011. - XII, 93 S., zahlr. Tab. u. Abb., A 5. - Br
ISBN (online): **978-3-7983-2309-4**
ISBN (print): **978-3-7983-2308-7** Preis EUR **11,90**

Nicht aufgeführte Bd.-Nrn. sind vergriffen. Bei Abnahme mehrerer Exemplare eines Titels wird Preisnachlass gewährt; Näheres auf Anfrage. Die Preise sind unverbindlich und gelten für den Barverkauf. Bei Bestellungen wird zusätzlich eine Versandpauschale erhoben: für das 1. Exemplar 2,00 Euro; für jedes weitere Exemplar 0,50 Euro.

**Vertrieb/
Publisher** Universitätsverlag der TU Berlin
Universitätsbibliothek
Fasanenstr. 88 (im VOLKSWAGEN-Haus), D-10623 Berlin.
Tel.: (030) 314-76131, Fax.: (030) 314-76133
E-Mail: publikationen@ub.tu-berlin.de
<http://www.univerlag.tu-berlin.de>