

# Verarbeitung von Biokunststoffen – ein Leitfaden –

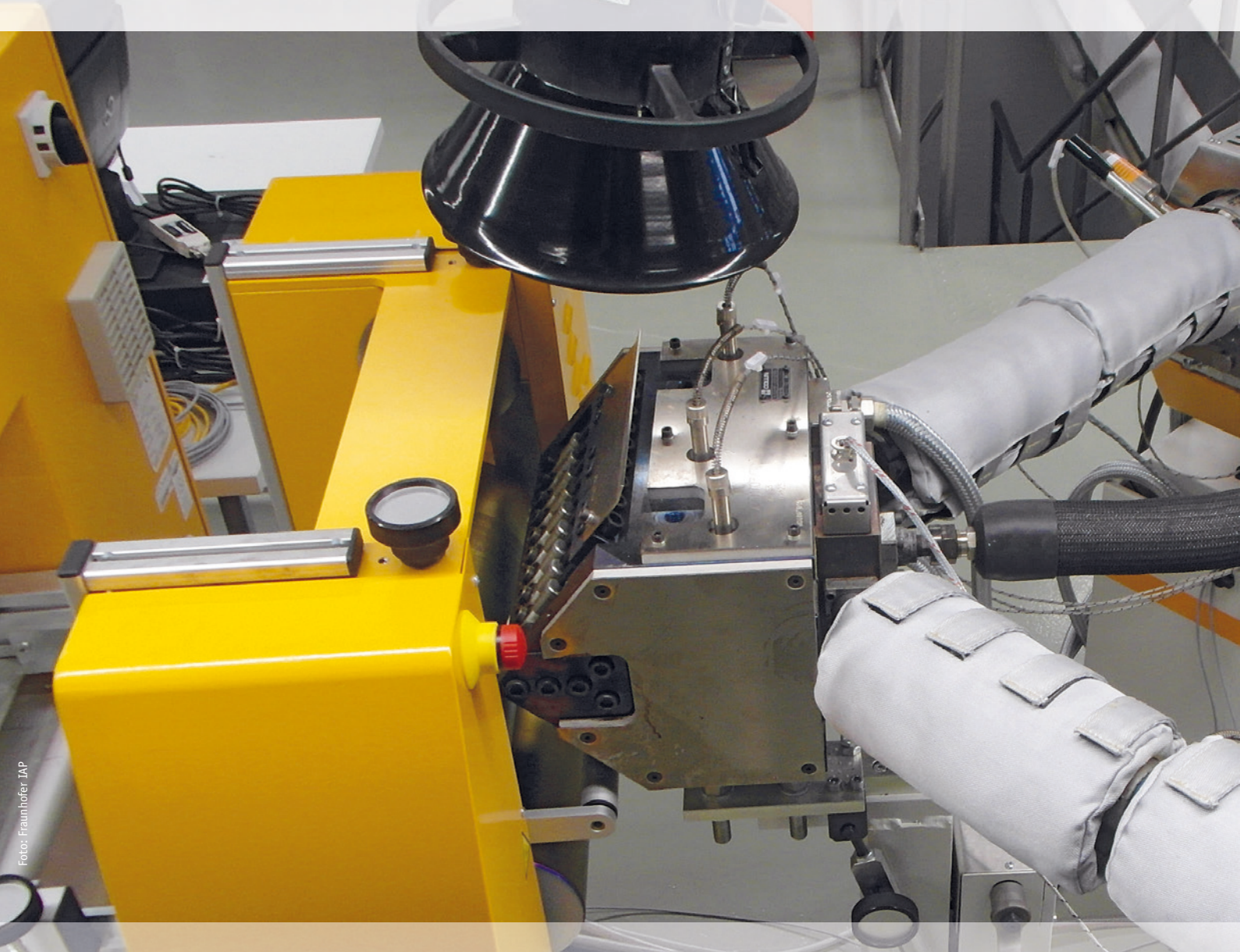


Foto: Fraunhofer IAP



Foto: Fraunhofer IAP



Foto: Fraunhofer IAP



Foto: IfBB

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

## Grußwort



Seit mehr als 20 Jahren fördert das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über seinen Projektträger Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) die Forschung und Entwicklung von Energie und Produkten auf Basis nachwachsender Rohstoffe.

Biokunststoffe waren in diesem Kontext immer ein wichtiger Schwerpunkt. Nie aber war die Förderung dichter an der Praxis als mit dem Verbundvorhaben „Kompetenznetzwerk zur Verarbeitung von Biokunststoffen“, das seit Anfang 2013 vom BMEL finanziell unterstützt wird.

Mit der Einrichtung von vier regionalen Kompetenzzentren zur werkstofflichen Verarbeitung von biobasierten Polymeren hat die Forschungsförderung die Labore verlassen und sich an die Seite der Anwender gestellt. Hierbei ist das Ziel des Verbundvorhabens, einerseits den Transfer von Know-How aus der Forschung und Entwicklung hin zu den Verarbeitern von Biokunststoffen zu beschleunigen, und andererseits die Anregungen, Fragen und Probleme vor allem der vielen Mittelständler, die gerne innovative Ansätze verfolgen wollen, aufzugreifen und zu lösen. In den vergangenen drei Jahren sind die vier Verbundpartner diesem Ziel ein gutes Stück näher gerückt.

Ein wichtiges Ergebnis dieser Arbeit halten Sie heute in Form dieser Broschüre in den Händen. Die Broschüre gibt einen Überblick zu den in den letzten drei Jahren zusammengetragenen Daten zur Verarbeitung von Biokunststoffen. Dabei versteht sich die Broschüre vor allem als Schaufenster, das Sie ermutigen will, tiefer zu blicken, denn die konkreten materialtechnischen und verarbeitungstechnischen Daten finden Sie im Internet, in der dazugehörigen Datenbank. Die Broschüre und die Datenbank sind wichtige Bausteine, die den Biokunststoffen den weiteren Weg in den Markt erleichtern, und vor allem Ihnen neue, innovative Ansätze für einen Wandel hin zu einer biobasierten Wirtschaft aufzeigen sollen.

Das Verbundvorhaben wird weiterhin bis 31.01.2018 gefördert. Wenn Sie Fragen zur Verarbeitung und Anwendung von Biokunststoffen haben, sind Sie herzlich aufgerufen, Ihre Anliegen an die Partner dieses Konsortiums heranzutragen.

*Dr.-Ing. Andreas Schütte*  
*Geschäftsführer*  
*Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.*

### Impressum

Hochschule Hannover, IfBB – Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe  
Texte: IAP – Fraunhofer Institut für Angewandte Polymerforschung  
IfBB – Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe, Hochschule Hannover  
SKZ, Das Kunststoff-Zentrum  
SLK, Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, Technische Universität Chemnitz  
Redaktion: Jan Offers und Nuse Lack  
Gestaltung: Frank Heymann, Hannover  
Druck: H-A-N-N-O-P-R-I-N-T GmbH

1. Auflage, März 2016



## Inhaltsverzeichnis

Biokunststoffe – Chancen und Möglichkeiten	4
Compoundieren	6
Spritzgießen	8
Mehrkomponentenspritzgießen	12
Schäumen	14
Vernetzen	16
Einfärben	18
Verarbeitungsverhalten	21
Extrusionsblasformen	22
Flachfolienherstellung	24
Tiefziehverhalten	26
Faserverstärkung	27
Blasfolienherstellung aus Biokunststoffen	28
Faserherstellung im Schmelzspinnprozess	30
Verbindungstechnik	32
Profil-, Rohr- und Coextrusion	34
Spritzblasen und Spritzstreckblasen	36
Kunststoff-Fließpressen	38

# Biokunststoffe – Chancen und Möglichkeiten

## Biokunststoffe

Ein Alltag ohne Kunststoffe ist heute undenkbar. In nahezu allen Lebensbereichen, wie z. B. medizinischen Anwendungen, Verpackungen, Büroartikeln, Spielzeugen, Sportgeräten und Haushaltsartikeln bis hin zu technischen Anwendungen, wie z. B. in der Automobilindustrie – überall dort haben sie sich bewährt und durchgesetzt. Jedoch basieren die meisten Kunststoffe auf einer endlichen Ressource – dem Erdöl. Dies wird deutlich stärker verbraucht, als es sich regeneriert, was zwangsläufig dazu führt, dass dieser Rohstoff irgendwann nicht mehr verfügbar sein wird. Biobasierte Kunststoffe bieten hier eine Alternative. Zudem werden Verbraucher in ihrem Konsumverhalten zunehmend umweltbewusster, was bedeutet, dass zukunftsfähige biobasierte Materialien anstelle konventioneller Kunststoffe immer häufiger eingesetzt werden.

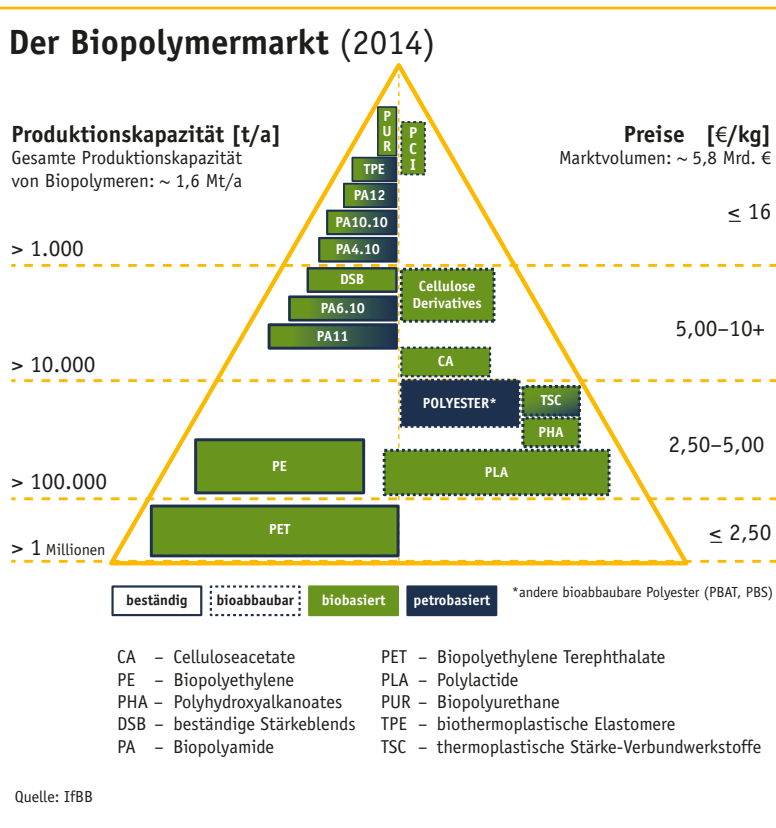
Damit dies gelingt, müssen der Kunststoffbranche Informationen zur Verfügung stehen, die einen unkomplizierten Einsatz und eine problemlose Verarbeitung dieser biobasierten Kunststoffe ermöglichen.

Hier setzt das Projekt zur Verarbeitung von Biokunststoffen, gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft unter der Projektträgerschaft der FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., an.

Die Motivation der Projektpartner für dieses gemeinsame Vorhaben liegt darin, die Informationslücken rund um die Verarbeitung von Biokunststoffen zu schließen. Oftmals nicht vorliegende Materialdatenblätter oder unzureichende verarbeitungsrelevante Informationen erschweren der Industrie die Verarbeitung der Biokunststoffe und führen zu nicht optimalen Produktergebnissen. Hier schafft dieses Vorhaben mit den Arbeiten der Verbundpartner Abhilfe, indem diese fehlenden Daten, die der Industrie bei der Verarbeitung faktisch hilfreich sind, ermittelt und anschaulich dargestellt werden.

Grundsätzlich kann die Bandbreite der verfügbaren Biokunststoffe heute bereits viele Anwendungsfelder abdecken.

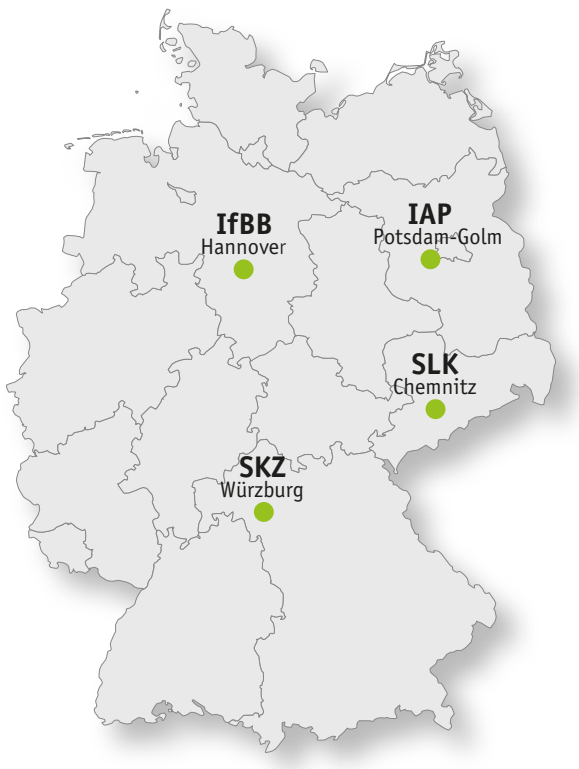
In der Praxis kommt es jedoch häufig noch zu Verarbeitungsproblemen, wenn auch nur scheinbar kleine Informationslücken bestehen. Um die Umstellung von einem petrochemischen Werkstoff auf einen geeigneten Biokunststoff zu erleichtern, müssen diese Lücken geschlossen und die entsprechenden Informationen für die Verarbeiter in leicht zugänglicher Form bereit gestellt werden. Dies ist Gegenstand des Vorhabens, denn nur so kann die Marktdurchdringung von Biokunststoffen signifikant gesteigert werden.



Zusammengefasst gilt: Das Marktvolumen der Biopolymere ist noch gering. Kalkulierbare Produktionsmengen seitens der Materialhersteller tragen zu konstanteren und mit zunehmender Materialmenge auch zu sinkenden Preisen bei. Damit Biokunststoffe eine bedeutende Rolle im Bioökonomieprozess der Bundesregierung und der Gesellschaft spielen, muss dafür gesorgt werden, dass Verarbeitungsprozesse in der Praxis einfach umsetzbar sind.

Ein enges Miteinander von Praktikern und Forschern ist an dieser Stelle die Voraussetzung: Fragestellungen aus der Praxis wurden durch die Verbundpartner unter die Lupe genommen und am Ende so aufbereitet, dass jeder Praktiker sie als Hilfestellung im Verarbeitungsbereich nutzen kann. Im Rahmen des Projektes wurden daher marktgängige Materialien wie z. B. PLA, PLLA, Bio-PE und PBT eingesetzt. Die ausführliche Aufstellung der einzelnen Materialien kann unserer Verarbeitungsdatenbank entnommen werden und wird in den jeweilig folgenden Kapiteln auszugsweise genannt.

Bei den erfolgten Kooperationen zwischen Industrie und Projektpartnern stand zunächst die regionale Zugehörigkeit des Industriepartners im Vordergrund. Darüber hinaus fand aber auch eine enge Zusammenarbeit der Partner untereinander statt, wenn es um verarbeitungsrelevante Fragestellungen und den Wissensaustausch hierzu ging.



Letztlich mündet das Ergebnis dieses Vorhabens in einer Datenbank, die den Verarbeitern schnell und unkompliziert aufzeigt, bei welchem Verfahren welche verarbeitungstechnisch relevanten Maßnahmen beachtet werden müssen.

In der Broschüre sind wichtige, grundlegende Hinweise und Informationen zu vielen der relevanten Verarbeitungsverfahren und den potenziell geeigneten Biokunststoffen enthalten. Zudem vermittelt sie einen ersten exemplarischen Eindruck, was die Datenbank in einer ausführlich aufbereiteten Ergebnisdarstellung bietet.

Sollten Sie hierzu Fragen haben, dann zögern Sie nicht, einen der Partner zu kontaktieren.  
(siehe Adressen auf der Rückseite der Broschüre)

## Die Ergebnisdatenbank

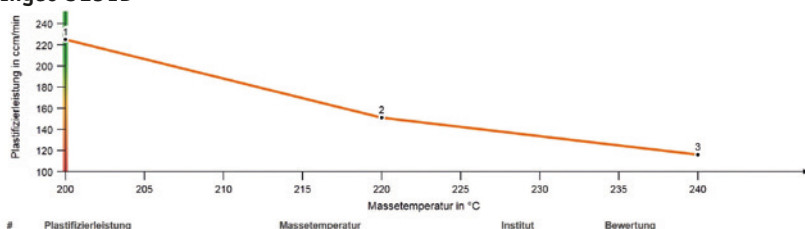
Die umfangreichen über 12.000 Datensätze beinhaltenden Versuchsdaten über marktgängige Biokunststoffe der vier Projektpartner sind übersichtlich angeordnet und frei im Internet zugänglich. Die Datenbank bietet dem Nutzer die Möglichkeit, sich aus materialtechnischer oder verfahrenstechnischer Sicht der Verarbeitung von Biokunststoffen zuzuwenden. Für den ersten Fall kennt der Verarbeiter sein herkömmliches Material und begibt sich auf die Suche nach einem Biokunststoff, der seinen Materialansprüchen gerecht wird und durch den sich sein konventioneller Kunststoff ersetzen lässt. Im zweiten Fall ist dem Praktiker das Verarbeitungsverfahren vorgegeben und er sucht nach dem passenden Biokunststoff, der sich für diesen Verarbeitungsprozess eignet.



Für eine schnelle Orientierung erfolgen die ersten Auswertungen für den Datenbanknutzer anhand eines Ampelsystems. Hat der Datenbanknutzer darüber seine Vorauswahl getroffen, kann er nun tiefer in das Thema einsteigen, indem er sich die im Projekt ermittelten Daten anzeigen lässt. In Form von Berichten können die Daten vom Nutzer auf die eigene Maschine übertragen werden.

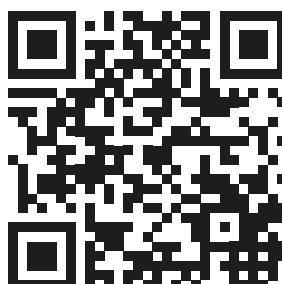
Vestamid Terra HS16	
<b>Allgemeine Informationen</b>	
Projektdatei	
Arbeitspaket	I.1.3 Entformungsverhalten
Untersuchungsziel	Bestimmen des Entformverhaltens von Biokunststoffen mit und ohne Zugabe von Entformhilfsmitteln in Abhängigkeit von Nachdruckhöhe und -zeit. Dafür wird nach dem Spritzvorgang einer Hülse (Becher ohne Boden) dieser vom Werkzeugkern abgestriffen und die resultierenden Entformkräfte aufgezeichnet.
<b>Bewertung</b>	
Versuchsreihe	●●●
Gesamterfahrung	●●●
<b>Ergebnisse</b>	
Spritzgießen	
1K Spritzguss	
Verfahrensbewertung	●●●
Materialkonditionierung	
Gerätename	Trockenluft-Granulattrockner KOCH CKT 200
Temperatur	80 °C

## Ingeo 3251D



Abgeleitet von den inhaltlichen Schwerpunkten des Projektes werden die unterschiedlichsten Verarbeitungseigenschaften wie z. B. die Blasformierung oder das Entformungsverhalten im Spritzguss abgedeckt. Die Grundlagen der Daten bilden sowohl wissenschaftliche Laborversuche als auch Versuchsaufbauten aus der Praxis. Sie dienen dem Anwender als Leitfaden bei der Verarbeitung von Biokunststoffen und werden noch weiter ergänzt.

[www.biokunststoffe-verarbeiten.de](http://www.biokunststoffe-verarbeiten.de)



# Compoundierung

– stellt nach der Herstellung des Grundpolymers den ersten Aufbereitungsprozess zur Veredelung und Modifizierung von Kunststoffen mittels Extrusion dar. Durch die Aufbereitung können Kunststoffe in ihrem Eigenschaftsprofil gezielt verändert und damit an den anschließenden Prozess und die gewünschten Produkteigenschaften angepasst werden. Dabei erfolgt im Extruder das Aufschmelzen des Kunststoffs, wobei dieser mit Additiven, Füllstoffen, Verstärkungsstoffen oder einer Kombination hieraus vermischt wird. Nach einer Homogenisierung und Entgasung des Compounds wird es durch ein Werkzeug i. d. R. zu Strängen geformt, gekühlt und zu Kunststoffgranulat verarbeitet.

## Materialien

Bei den im Kapitel Compoundierung untersuchten Biokunststoffen handelt es sich um die in Tabelle 1 genannten Materialklassen. An dieser Stelle erfolgt keine typengenaue Nennung eingesetzter Biokunststoffe. Die im Folgenden genannten Ergebnisse sind als generelle Verarbeitungsrichtlinien nach Materialklasse zu verstehen und wurden auf einer breiten Datengrundlage ermittelt.

**Tabelle 1: Übersicht der im Abschnitt Compoundierung untersuchten Materialien**

Materialklasse	Typ
CA	Celluloseacetat
PA	Polyamid
PBS	Polybutylensuccinat
PBS-Blend	Polybutylensuccinat-Blend
PE	Polyethylen
PHBV	Polyhydroxybutyrat-cohydroxyvaleriat
PLA	Polymilchsäure
PLA-Blend	Polymilchsäure-Blend
PLLA	Poly-L-Milchsäure
TPS	Thermoplastische Stärke
TPS-Blend	Thermoplastische-Stärke-Blend

Im Compoundierprozess gibt es vor und während der Verarbeitung eine Vielzahl von Einflussfaktoren, die, je nach Kunststofftyp, unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Diese betreffen die mechanischen, thermischen, (chemischen) und rheologischen Eigenschaften. Daher sind die folgenden Ergebnisse als Orientierungs- und Entscheidungshilfe zu verstehen. Sofern Angaben seitens des Materialherstellers verfügbar sind, wird empfohlen, diese Verarbeitungsdaten zu verwenden. Da dies jedoch für Biokunststoffe häufig noch nicht der Fall ist, sind in Tabelle 2 grundlegende Hinweise zu verarbeitungsrelevanten Punkten gängiger Biokunststoffe aufgeführt.

**Tabelle 2:**

**Prozessfenster und Verarbeitungshinweise für Biokunststoffe**

Material	Verarbeitungshinweis	Verarbeitungsbereich [°C]	Trocknungsdauer	Trocknung [°C]	Max. Feuchte [%]
CA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beginn der Depolymerisation bei <math>T &gt; 230\text{ °C}</math> (Essiggeruch, Rauchbildung)</li> <li>• Feuchtigkeit <math>&gt; 0,15\%</math> → Aufschäumen</li> <li>• Feuchtigkeit <math>&lt; 0,15\%</math> → Fließfähigkeit sinkt</li> </ul>	160–230	2–4 h	60	$< 0,15$
PA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vortrocknung bei geschlossenem Extruder erforderlich</li> <li>• Die Verarbeitungstemperatur ist in Abhängigkeit vom verwendeten Typ zu wählen</li> <li>• Faustregel: Je größer die Typenzahl, desto geringer die Verarbeitungstemperatur. Bsp.: Die Verarbeitungstemperatur von PA 11 liegt bei <math>180\text{ °C}</math>, während die von PA 4.10 ca. <math>250\text{ °C}</math> beträgt</li> <li>• Teilkristallines Bio-PA → Trocknung nach Extrusion im Kristallisator</li> </ul>	200–208	4–6 h	80	$< 0,05$
PBS	Keine Daten vorhanden				
PBS-Blend	Keine pauschale Aussage, da hohe Anzahl an Kombinationen möglich				
PE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extrusionstechnische Verarbeitung mit petrobasiertem PE identisch</li> <li>• Die Verarbeitungstemperatur ist in Abhängigkeit von der verwendeten Type zu wählen</li> </ul>	150–190	3–4 h	90	–
PHBV	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lagerung an kühlen (<math>T &lt; 50\text{ °C}</math>) Orten sowie bei geringer Luftfeuchtigkeit</li> <li>• Vortrocknung erforderlich → hydrolytischer Abbau</li> <li>• Leichte thermische Zersetzung → kleines Verarbeitungsfenster</li> <li>• Bei <math>T \leq 190\text{ °C}</math> thermische Schädigung</li> <li>• Anpassen Gehäusetemperatur an Verarbeitungstemperatur</li> <li>• Hohe Wärmespeicherkapazität → Unterwassergranulierung</li> <li>• Nach Extrusion → Trocknung im Kristallisator</li> </ul>	130–180	2 h	100	$< 0,025$
PLA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vortrocknung erforderlich → hydrolytischer Abbau</li> <li>• Bei Feuchtigkeit <math>&gt; 0,025\%</math> <math>\text{H}_2\text{O}</math> steigt Einfluss der Hydrolyse; das Material wird durch Kettenabbau fließfähiger (niedrigviskos)</li> <li>• Geringer Aufschmelzbereich</li> <li>• Scharfe Aufschmelzzone</li> <li>• Gestuftes Temperaturprofil → schnelles + schonendes Aufschmelzen (gut für Fasereinbeitung)</li> <li>• Nach Extrusion → Trocknung im Kristallisator</li> </ul>	180–200	6 h	80	–
PLA-Blend	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine pauschale Aussage, da hohe Anzahl an Kombinationen möglich</li> <li>• Abhängig von Mischbarkeit ist eine relativ scharfe Mischzone zu wählen</li> </ul>				
PLLA	• Vergleichbare Verarbeitung wie PLA	190–220	6 h	80	$< 0,025$
TPS	Keine Daten vorhanden				
TPS-Blend	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine pauschale Aussage, da hohe Anzahl an Kombinationen möglich</li> <li>• TPS-Anteil führt zu hydrokopsichen Eigenschaften (Feuchtigkeitsaufnahme)</li> </ul>				

## Materialvortrocknung im Vergleich zur Prozessentgasung im Compounder

Ähnlich wie beim konventionellen Kunststoff PET gibt es auch bei den Biokunststoffen Materialien, bei denen ein besonderes Augenmerk auf deren Restfeuchtegehalt gelegt werden muss, da sie zur Feuchtigkeitsaufnahme neigen (hydrophil sind). Um diese Materialien mittels Compoundierung verarbeiten zu können, stehen allgemein zwei unterschiedliche Methoden zur Verfügung:

- die Materialvortrocknung im Sinne der Feststofftrocknung durch geeignete Trocknungsgeräte und
- die Prozessentgasung während des Compoundiervorgangs.

Die Untersuchungen des Trocknungseinflusses selbst sind für hydrolyseanfällige Biokunststoffe sehr umfangreich. Deshalb wird anhand des Biokunststofftyps PLA (Ingeo 3251D der Firma NatureWorks) in der folgenden Tabelle exemplarisch dargestellt, inwieweit eine Vortrocknung des Materials für nachfolgende Prozesse erforderlich ist bzw. wie effektiv die Prozessentgasung im Compounder sein kann. Für die Untersuchung wird ein Teil des Materials („EXTR dry“) vor der Extrusion bei 80 °C für 16 Stunden getrocknet. Der andere Teil („EXTR wet“) wird ungetrocknet verarbeitet (vorherige Lagerung unter Normklima bei 23 °C und 50 % r. F.).

**Tabelle 3: Konditionierung von Ingeo 3251D vor Extrusion und rheometrischer Messung**

Bezeichnung	Konditionierung vor Extrusion	Konditionierung vor rheometrischer Messung	Wassergehalt vor rheometrischer Messung [%]
EXTR dry (80 °C)	getrocknet 16 h, 80 °C	getrocknet 16 h, 80 °C	0,0182
EXTR dry (23 °C, 50 % r. F.)	getrocknet 16 h, 80 °C	Lagerung bei 23 °C, 50 % r. F.	0,3517
EXTR wet (80 °C)	Lagerung bei 23 °C, 50 % r. F.	getrocknet 16 h, 80 °C	0,0187
EXTR wet (23 °C, 50 % r. F.)	Lagerung bei 23 °C, 50 % r. F.	Lagerung bei 23 °C, 50 % r. F.	0,3482

Das Ergebnis der Untersuchung war, dass der Wassergehalt des geprüften PLA vor der Verarbeitung keinen signifikanten Einfluss auf den Prozess und die resultierende Materialqualität hat, wenn durch entsprechende Entgasungszonen bei der Aufbereitung das enthaltene Wasser frühzeitig abgeführt werden kann. Somit werden die Hydrolyse und der damit einhergehende Abbau der Polymerketten reduziert und bei optimalen Prozessbedingungen beinahe gänzlich verhindert.

## Zusammenfassung

Im Vergleich zu herkömmlichen Kunststoffen wird für Biokunststoffe verhältnismäßig oft eine Trocknung vor der Verarbeitung empfohlen. Untersuchungen im Projekt haben jedoch gezeigt, dass bei hydrophilen Biokunststoffen mittels entsprechender Verfahrensanpassungen und geeigneter Entgasung während der Compoundierung oft keine Vortrocknung erfolgen muss. Leider sind nicht immer Herstellerangaben zur Verarbeitung vorhanden. Hält man jedoch die Verarbeitungsempfehlungen ein (sofern vorhanden), sind die untersuchten Biokunststoffe wie vergleichbare herkömmliche Kunststoffe zu verarbeiten. Um das Informationsdefizit zu reduzieren, dienen die Projektergebnisse als Hilfestellung.

Weiterführende und detaillierte Ergebnisse finden Sie in der Online-Datenbank dieses Verbundprojektes unter:  
[www.biokunststoffe-verarbeiten.de](http://www.biokunststoffe-verarbeiten.de)

# Spritzgießen

– ist das mit am häufigsten verwendete Verarbeitungsverfahren von Kunststoffen. Kleinsteile bis hin zu großen Kunststoffformteilen lassen sich so direkt verwertbar in hoher Stückzahl kostengünstig herstellen. Dabei wird der Kunststoff in der Spritzgießmaschine aufgeschmolzen und unter hohem Druck in ein formgebendes Werkzeug gespritzt. Faktoren, die den Verarbeitungsprozess beeinflussen und somit auch die Verarbeitbarkeit und Qualität der Materialien und Produkte, sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Im Rahmen des Projekts wurden die benannten Einflussfaktoren für die Biokunststoffe untersucht.

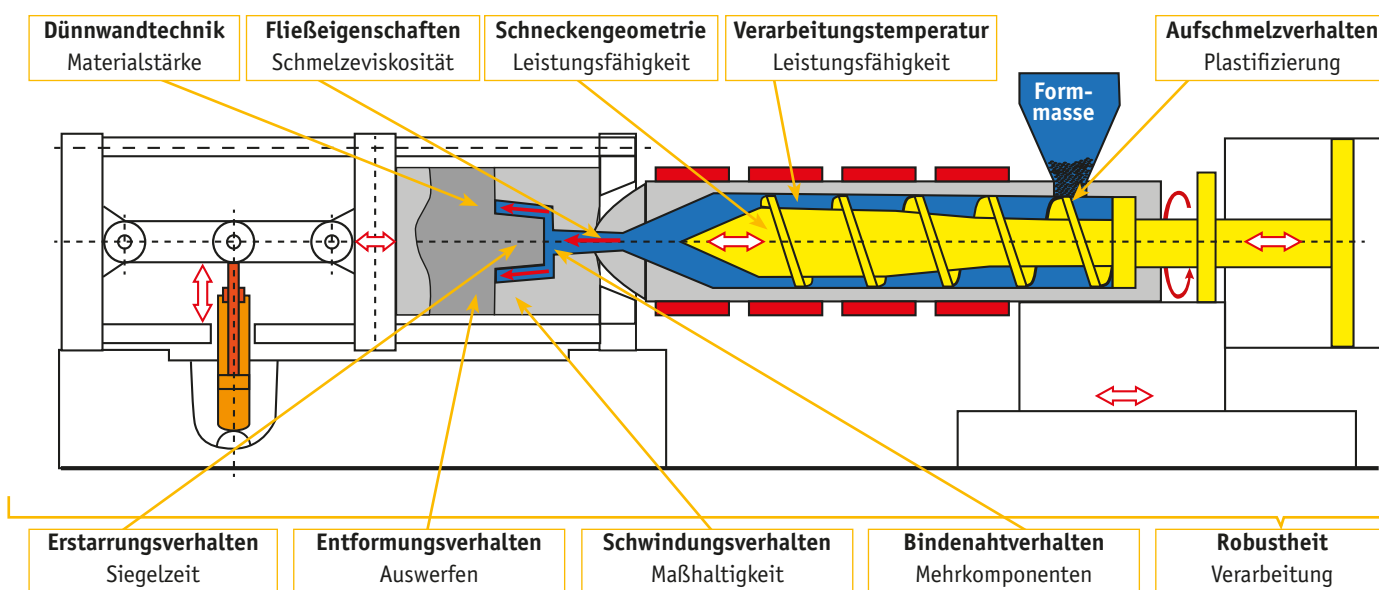


Abbildung 1: Faktoren mit Auswirkungen auf den Spritzgießprozess

## Materialien

Bei den im Kapitel Spritzgießen untersuchten Biokunststoffen handelt es sich um kommerziell erhältliche Biokunststoffe mit entsprechender Marktrelevanz. Die untersuchten Materialien sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Übersicht der im Abschnitt Spritzgießen untersuchten Materialien

Materialklasse	Hersteller	Typ
PLA	NatureWorks	Ingeo 3251D
PLA	NatureWorks	Ingeo 6202D
PLA	NatureWorks	Ingeo 3052D
PLLA	Zhejiang Hisun Biomaterials	Revode 190
PBS	Showa Denko	Bionolle 1020MD
Bio-PA 6	Evonik	Vestamid Terra HS16
Bio-PE-Compound	Jelu	WPC Bio PE H50-500-20
PLA-Compound	Jelu	WPC Bio PLA H60-500-14
PHB	Metabolix	Mirel P1004
Bio-PE	FKuR	Terralene HD 3505

## Entformungsverhalten

Der letzte Arbeitsschritt eines jeden Spritzgießzyklus ist das Entformen des Spritzlings aus der Kavität.

Über Aktuatoren (Stifte, Platten etc.) wird der Spritzling dabei von der Werkzeugwand gelöst und aus der Kavität ausgeworfen oder durch ein Handlingsystem übernommen. Um einen gesicherten Produktionsablauf zu gewährleisten, ist es wichtig, dass das Entformen reibungslos abläuft und nach dem Auswerfen keine Spritzlinge im Werkzeug verbleiben. Die Kräfte, die dabei auf das Auswerferpaket wirken, hängen von der Schwindung, dem Reibwert zwischen Spritzling und Werkzeugwand und der Steifigkeit des Materials ab. In der Regel sind Entformschrägen und Schwindmaße eines Spritzgießwerkzeugs auf einen Kunststoff ausgelegt. Werden andere Kunststoffe mit einem anderen Schwindungsverhalten genutzt, sind häufig Entformprobleme die Folge. Da zum Zwecke der Abmusterung von Biokunststoffen häufig zunächst vorhandene Werkzeuge eingesetzt werden, sind Probleme bei der Entformung nicht unbekannt. Auswerferstifte können durch steigende Entformkräfte beispielsweise dünne Teile durchstoßen oder zu stark in die Oberfläche eingedrückt werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden verschiedene Entformungshilfsmittel genutzt, um entstehende Entformkräfte zu senken. Diese Hilfsmittel wurden durch Auftrommeln und Compoundieren in PLA eingearbeitet. Die im Prüfwerkzeug entstehenden Entformkräfte konnten je nach Entformungshilfsmittel deutlich redu-



ziert werden. Besonders Entformungshilfsmittel auf Basis von N,N'-Ethylendi(stearamid) haben sehr gute Ergebnisse gezeigt. Weiterhin wurde das Entformungsverhalten von PHB, Bio-PE, PLA und Bio-PA untersucht.

### Maßhaltigkeit

Ist die Siegelzeit beendet, wird das erkaltete Formteil aus dem Werkzeug ausgeworfen. Hierbei kann es material- und werkzeugbedingt zu Entformungsproblemen kommen, die i. d. R. mit einem werkstoffgerechten Werkzeug sowie aufseiten des Werkstoffes mit Hilfe von Entformungsadditiven behoben werden können. Ein wichtiger zu beachtender Aspekt beim Wechsel von einem herkömmlichen Kunststoff auf einen Biokunststoff, ebenso wie beim Wechsel auf einen anderen petrobasierten Kunststoff, ist das unterschiedliche Schwindungsverhalten der verschiedenen Werkstoffe. Die Bauteilshwindung lässt maßgebliche Aussagen darüber zu, ob der gewählte Werkstoff für das vorhandene Werkzeug weiter verwendet werden kann und ob mit einem Bauteilverzug gerechnet werden muss. Weist das zu substituierende Material ein stark unterschiedliches Schwindungsverhalten auf, führt dies meist zu Prozessproblemen und erfordert eine entsprechende Anpassung des Werkzeugs. Somit lässt sich nicht pauschal sagen, dass eine niedrige Schwindung „gut“ und eine hohe Schwindung „schlecht“ ist. Allgemein gilt, dass wenn das Werkzeug nicht werkstoffgerecht ausgelegt werden kann, der Biokunststoff ein ähnliches Schwindungsverhalten aufweisen sollte, wie der zu substituierende petrochemische Werkstoff. Zudem führen bei Biokunststoffen ebenso wie bei konventionellen Kunststoffen stark unterschiedliche Schwindungseigenschaften längs und quer zur Fließrichtung zu einem Bauteilverzug. Die in Tabelle 1 dargestellten und untersuchten Biokunststoffe weisen ein isotropes, d. h. ähnliches Schwindungsverhalten längs und quer zur Fließrichtung auf. Die Verzugsgefahr ist somit gering.

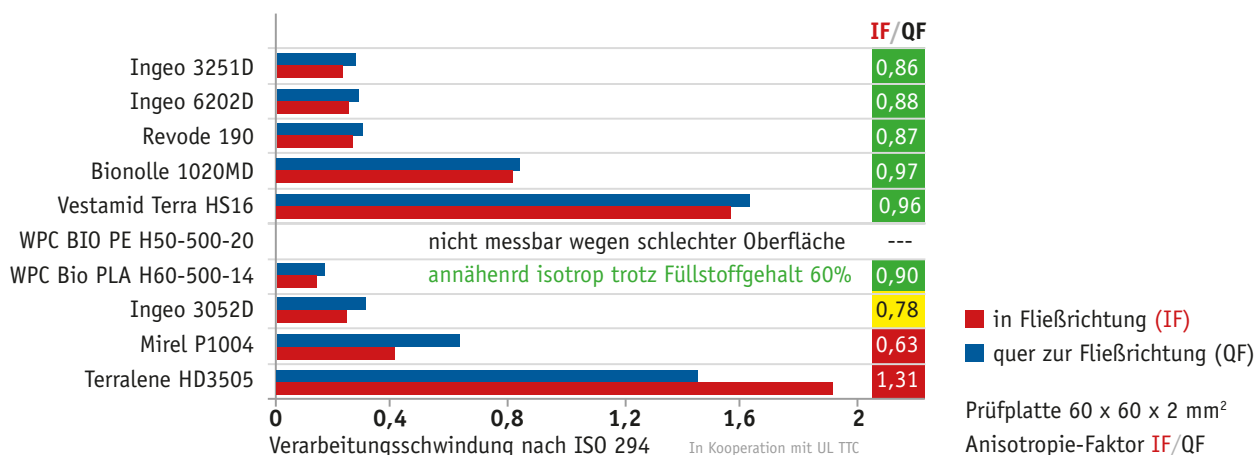


Abbildung 2: Schwindung und Verzug von Biokunststoffen

### Plastifizierleistung

Am Anfang jedes Spritzgießvorgangs steht der Materialeinzug für den folgenden Materialeintrag in die Maschine, der durch Granulatgröße und -geometrie beeinflusst wird. Hinsichtlich der Plastifizierleistung hat die Massetemperatur und die Viskosität maßgeblichen Einfluss auf die erzielbare Zykluszeit und sollte daher innerhalb der Restkühlzeit des vorherigen Formlings erfolgt sein.

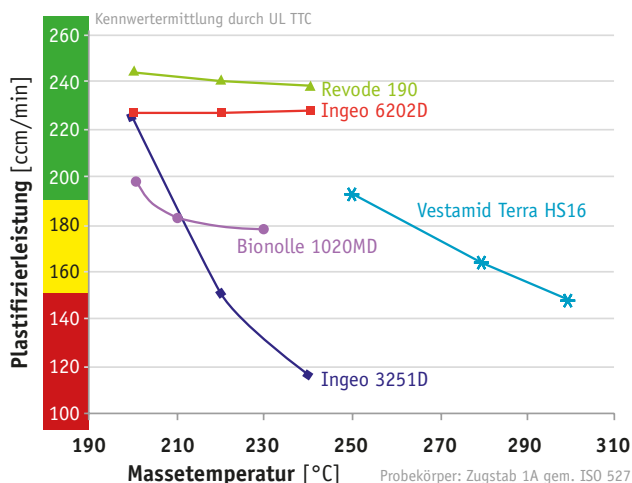


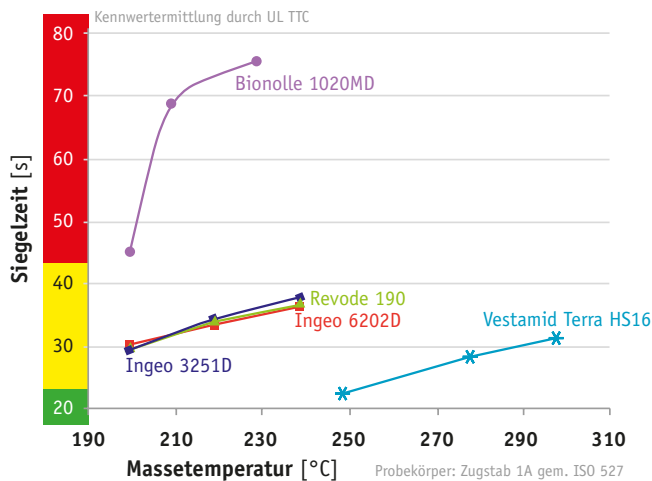
Abbildung 3: Plastifizierleistung von Biokunststoffen

Ein langsamer Materialeinzug sorgt für Prozessverzögerungen und führt zu unwirtschaftlichen Produktionskosten. Die hier untersuchten Biokunststoffe weisen, verglichen mit etablierten herkömmlichen petrochemischen Kunststoffen, eine gute bis ausreichende Plastifizierleistung auf. Zu beachten ist jedoch, dass die Prozesstemperaturen eine entscheidende Rolle für die optimale Verarbeitung spielen. Hier sind die Plastifizierleistung in Abhängigkeit zur Massetemperatur sowie die durch DSC-Analysen (Differential-Scanning Calorimeter) ermittelten Temperaturempfehlungen der untersuchten Materialien aufgeführt. Als grober Richtwert liegt die Verarbeitungstemperatur ca. 30–40 °C über der Schmelztemperatur und die Werkzeugtemperatur ca. 30 °C unterhalb der Glasübergangstemperatur  $T_g$ .

**Tabelle 2: Temperaturempfehlungen für die Verarbeitung**  
(Methode: DSC/Prüfgerät: Mettler DSC822e/Norm: IEC 1006)

Typ	T <sub>g</sub> [°C]	T <sub>s</sub> [°C]	Empfehlung T <sub>Verarbeitung</sub> [°C]	Empfehlung T <sub>Werkzeug</sub> [°C]
Ingeo 3251D	59	164	200	30
Ingeo 6202D	59	166	200	30
Revode 190	58	174	200	30
Bionolle 1020MD	44	113	180	30
Vestamid Terra HS16	119	223	250	80

Ist das Material plastifiziert und auf die richtige Verarbeitungstemperatur gebracht worden, erfolgt der Einspritzvorgang. Die rheologischen Eigenschaften (Fließeigenschaften) der untersuchten Biokunststoffe sind dabei vergleichbar mit denen erdölbasierter Kunststoffe. Nachdem der Einspritzvorgang abgeschlossen ist, beginnt der Abkühlprozess des Materials im Werkzeug, der mittels der Siegelzeit („Erstarrungszeit“) beschrieben werden kann. Die Siegelzeit hängt stark von der vorliegenden Massetemperatur sowie dem Erstarrungsverhalten der Werkstoffe selbst ab und hat, wie auch die Plastifizierleistung, maßgeblichen Einfluss auf die realisierbaren Zykluszeiten.



**Abbildung 4: Siegelzeiten von Biokunststoffen**

Die untersuchten Biokunststoffe liegen, mit Ausnahme des PBS, in einem als akzeptabel zu bewertenden Bereich. Die untersuchten Biokunststoffe schneiden hier nur geringfügig schlechter als der Durchschnitt der etablierten Massenkunststoffe ab.

## Systemkompetenz

Bei einer ganzheitlichen Betrachtung des Spritzgießprozesses zeigt sich bei den biobasierten Polyestern wie PLA und PHB, dass eine hohe Restfeuchte im Material während der Verarbeitung auf der Spritzgießmaschine die größte Auswirkung auf das mechanische und rheologische Verhalten hat. Der steigende Schmelzindex und die sinkenden mechanischen Werte bei der Verarbeitung von feuchtem Material sind auf den Molekulargewichtsabbau durch Hydrolyse zurückzuführen. Die Parameter Schneckenumfangsgeschwindigkeit, Schneckenvorlaufgeschwindigkeit, Staudruck, Einspritztemperatur, Werkzeugtemperatur und Kühlzeit zeigen dagegen keinen signifikanten Einfluss, sodass von einem scher- und temperaturunempfindlichen Verhalten von PLA ausgegangen werden kann. Lediglich das PHB zeigte ab einer Verarbeitungstemperatur von 200 °C messbare Auswirkungen auf das Fließverhalten und ist damit gegenüber höheren Verarbeitungstemperaturen etwas empfindlicher als PLA. Eine Heißkanalverarbeitung ist ebenfalls möglich.

## Mehrkomponentenspritzgießen

Ein Verfahren, das bedingt durch die wachsende Komplexität technischer Kunststoffformteile zunehmend zur Anwendung kommt. Die Eignung von Biokunststoffen wurde innerhalb dieser Verfahren bisher nicht untersucht. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine Versuchsordnung für sog. „hart/hart“-Verbunde entwickelt und damit eine Kompatibilitätsmatrix für die Verwendung von Biokunststoffen im Mehrkomponentenspritzgießen erarbeitet. Weiterhin wurden relevante Einflussparameter (z. B. Werkzeugtemperatur, Schmelztemperatur) auf die Verbundhaftung biobasierter 2K-Formteile ermittelt. So sind beispielsweise die biobasierten Polyester PLA und PHB sowie die Celluloseester in mehrkomponentigen Bauteilen stoffschlüssig kombinierbar. Darauf aufbauend wurde die Verwendung von Biokunststoffen im Sandwichspritzgießen getestet. Im Vorfeld dazu wurden die Verfahren des chemischen und physikalischen Schäumens speziell hinsichtlich der Verarbeitungseigenschaften von biobasierten Polyestern untersucht.

## Bindenahtproblematik

Dieses Thema darf durch zunehmend komplexer designte technische Bauteile und deren Fertigungsverfahren nicht unberücksichtigt bleiben.

Der Trend, verschiedene Fertigungsverfahren in einen einzelnen komplexen Fertigungsprozess zu integrieren, ist ungebrochen. Das Hinterspritzen von zuvor im selben Spritzgießwerkzeug umgeformten Organoblechen ist ein bekanntes Beispiel. Dadurch bedingt sind die Fließwege des Kunststoffes immer verzweigter und in den Strukturbauteilen entstehen immer mehr Bindenähte, die die mechanischen Eigenschaften maßgeblich beeinflussen. Zusätzlich beeinträchtigen Bindenähte die Optik, wenn sie im Sichtbereich auftreten.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde der Einfluss der Schmelzetemperatur und Werkzeugtemperatur auf die optischen und mechanischen Eigenschaften von Bindenähten verschiedener marktgängiger Biokunststoffe untersucht. Diesen letzten Satz im Absatz streichen und ersetzen durch: Durch die Anpassung von Prozessparametern konnte gezeigt werden, dass die Bindenahtbildung von biobasierten Kunststoffen, genau wie bei erdölbasierten Kunststoffen, positiv beeinflusst werden kann und hier die gleichen Maßnahmen zum Erfolg führen.

## Inline-Oberflächenbeschichtung

In diesem Verfahren werden thermoplastische Trägermaterialien innerhalb eines Spritzgießprozesses mit kratzfesten Polyurethanlacken beschichtet. Das Verfahren wird zur Herstellung hochglänzender, kratzester Bauteile im Sichtbereich genutzt. Biokunststoffe fanden als Trägermaterial zur Polyurethanbeschichtung bisher keine Verwendung. Innerhalb dieses Forschungsvorhabens konnte umfassende Systemkompetenz bei der Verarbeitung von Biokunststoffen im Inline-Oberflächenbeschichtungsprozess erarbeitet werden, indem die Eignung verschiedener Biokunststoffe als Trägermaterialien für Polyurethan-Lacksysteme untersucht wurde. Die Kompatibilität verschiedener biobasierter Thermoplaste mit diesen Beschichtungen wurde durch Abhebefestigkeitsuntersuchungen quantifiziert. Zusätzlich erfolgten mikroskopische Untersuchungen der Grenzfläche zwischen Trägermaterial und Deckschicht. Als geeignete Trägermaterialien für die Polyurethanbeschichtung haben sich Polylactidsäure (PLA), Polyhydroxybutyrat (PHB) sowie diverse Celluloseester erwiesen.

## Zusammenfassung

Die untersuchten Biokunststoffe sind kommerziell verfügbar und weisen für den Bereich Spritzgießen meist vergleichbare Verarbeitungseigenschaften wie ihre erdölbasierten Gegenstücke auf. Wichtig ist, dass die Werkzeugauslegung und die Verarbeitungseigenschaften des neuen Werkstoffes mit den petrobasierten Vorgängern kompatibel sind. Maßgeblich für die optimale Verarbeitung von Biokunststoffen ist zudem die Wahl der korrekten Prozessparameter (insbesondere Temperaturen), da einige Biokunststoffe ein etwas kleineres Prozessfenster haben. Grund dafür ist die sensiblere Reaktion auf thermische Belastungen gegenüber herkömmlichen Kunststoffen. Auch in den weiterführenden Untersuchungen zur Maschinengängigkeit und in Bezug auf den Einsatz einer Standardschnecke zeigten die untersuchten Biokunststoffe eine gute Verarbeitbarkeit. Nur wenige Materialien erfordern die Nutzung von speziellen Schneckengeometrien. Aus verarbeitungstechnischer Sicht stellen Biokunststoffe beim Spritzgießen eine interessante Alternative zu erdölbasierten Kunststoffen dar und haben das Potenzial, diese zu substituieren. Die Prozess- und Werkzeugparameter müssen lediglich an den Biokunststoff als neuen Werkstoff angepasst werden – exakt so wie auch bei der Umstellung von einem petrochemischen auf einen anderen petrochemischen Polymerwerkstoff.

Weiterführende und detaillierte Ergebnisse finden Sie in der Online-Datenbank dieses Verbundprojektes unter:  
[www.biokunststoffe-verbatim.de](http://www.biokunststoffe-verbatim.de)

# Mehrkomponentenspritzgießen

– Verbunde aus thermoplastischen Elastomeren (TPE) und harten Thermoplasten sind allgegenwärtig. Ihren Einsatz finden Sie vor allem dort, wo ein Soft-Touch-Effekt, Griffigkeit oder eine Sicherung gegen Verrutschen erforderlich sind. Auch bei Bauteilen die in Kontakt zu flüssigen Medien oder Feuchtigkeit stehen, werden häufig TPEs für Abdichtungen verwendet, um Dichtungsgeometrien direkt in einem Fertigungsschritt anzuspitzen. Weiterhin ermöglicht die fortschreitende Materialentwicklung und -optimierung von TPEs zunehmend den Einsatz auch in weiteren Anwendungsgebieten, wie z. B. für Schwingungs- und Dämpfungselemente, die zuvor vernetzten Elastomeren vorbehalten waren.

Für alle genannten Anwendungen ist eine anwendungsspezifische, ausreichende Verbundhaftung zwischen den Hart- und Weichkomponenten notwendig. Welche Haftung sich zwischen den Kontaktpartnern ausbildet und welche Eigenschaften ein Verbund aufweist, kann im Vorfeld aufgrund mehrerer potenziell wirksamen Haftungsmechanismen meist nur unzureichend abgeschätzt werden. Eine reproduzierbare und absolut vergleichbare Methode zur Ermittlung der Verbundeigenschaften ist damit sowohl im Bereich der Materialentwicklung wie auch bei der Auswahl von Materialpaarungen für Serienprozesse/-produkte von großer Wichtigkeit.

## Materialien

Bei den im Rahmen dieser Arbeiten untersuchten Biokunststoffen handelt es sich um kommerziell erhältliche Biokunststoffe mit entsprechender Marktrelevanz. Die untersuchten Materialien sind in Tabelle 1 aufgeführt.

**Tabelle 1: Übersicht der im Abschnitt Mehrkomponentenspritzgießen untersuchten Hartkomponenten**

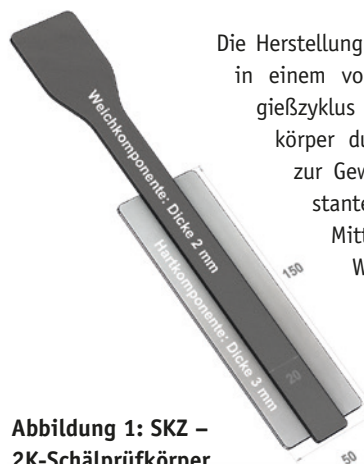
Materialklasse	Hersteller	Typ
PLA	NatureWorks	Ingeo 3251D
PLA	FKuR	Bio-Flex S 9533
PHB	Metabolix	Mirel P1004
PLA	Tecnar	Arboblend 2628V
Lignin	Tecnar	Arboblend LV100
PLA	RTP	RTP 2099 X 124790 E
CA	Albis	Cellidor B500-10
CP	Albis	Cellidor CP 400-10
PA 1010 (100 % biobasiert)	Evonik	Vestamid Terra DS16
PA 410 (biobasiert)	DSM	EcoPaXX
PE (biobasiert)	Braskem	Green PE SHC7260

**Tabelle 2: Übersicht der im Abschnitt Mehrkomponentenspritzgießen untersuchten Weichkomponenten**

Materialklasse	Typ
TPE-S 01	TPE-S, modifiziert für PC/ABS-Haftung
TPE-S 02	TPE-S, modifiziert für PLA/CP/CA-Haftung
TPE-S 03	TPE-S, modifiziert für PA10/10-4/10-Haftung
TPE-V	TPE-V, modifiziert für PC/ABS-Haftung
TPE-E	TPE-E, Standardtype
TPE-E 01	TPE-E, teilweise biobasiert
TPE-E 02	TPE-E, teilweise biobasiert
TPE-U	TPE-U, teilweise biobasiert
Bio-TPE 01	Biobasiertes TPE, polar
Bio-TPE 02	Biobasiertes TPE, unpolar

## Untersuchung

Die Bewertung der Verarbeitbarkeit und Kompatibilität der eingesetzten Kunststoffkombinationen war mit Hilfe eines 2-Komponenten-Schälprüfkörpers möglich, welcher zusammen mit dem zugehörigen Spritzgießwerkzeug speziell für derartige Fragestellungen entwickelt wurde. Als Prüfmethode kam eine Schälprüfung mit Schlittenführung zum Einsatz, die neben der Messung der dehnungsüberlagerten Schälkraft (Traversenweg der Zugprüfmaschine) zusätzlich den tatsächlichen Schälweg (Schlittenweg) erfasste.



Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte in einem vollautomatischen Spritzgießzyklus mit Entnahme der Prüfkörper durch ein Handlinggerät zur Gewährleistung eines konstanten Spritzgießprozesses. Mittels einer umfassenden Werkzeugsensorik und einem Inline-Thermografie-System konnte eine hohe Prozesskonstanz und Reproduzierbarkeit sichergestellt werden.

**Abbildung 1: SKZ – 2K-Schälprüfkörper**

Neben Bauteilen aus einem 2K-Zyklus und dem Überspritzen von separat hergestellten „erkalteten Hartteilen“ waren Versuche mit variothermer Temperierung zur Beeinflussung der Verbundhaftung Bestandteil der Spritzgießarbeiten. Die Ermittlung der Kennwerte erfolgte nach 24 Stunden sowie nach 240 Stunden Lagerung im Normklima und nach einer Warmlagerung der Prüfkörper, um das Langzeitverhalten der hergestellten Verbunde zu beurteilen.

Tabelle 3 zeigt einen Auszug der Ergebnisse nach 24-stündiger Lagerung.



**Tabelle 3: Auszug geprüfter Hart/Weich-Kombinationen nach 24-stündiger Lagerung**

Hartkomponenten		Weichkomponenten									
Handelsname	Typ	TPE-S 01	TPE-S 02	TPE-S 03	TPE-V	TPE-E 01	TPE-E 02	TPE-E 03	TPE-U	Bio-TPE 01	Bio-TPE 02
		TPE-S hfmod. PC, ABS	TPE-S hfmod. PLA, CA, CP	TPE-S hfmod. PA10/10 & 4/10	TPE-V hfmod. PC, ABS	TPE-E	TPE-E teilw. biobasiert	TPE-E teilw. biobasiert	TPE-U teilw. biobasiert	Bio-basiert polar	Bio-basiert unpolar
Ingeo 3251D	PLA	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Mirel P1004	PHB	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Arboblend 2628V	PLA-Basis	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Arboform L V100	Lignin-Basis	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Bio-Flex S 9533	PLA-Blend	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Vestamid Terra DS16	Bio-PA 10/10	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
RTP 2099 X 124790-E	PLA + Talkum	■	■		■	■	■	■	■	■	■
Cellidor B 500-10	Celluloseacetobutyrat	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cellidor CP 400-10	Cellulosepropionat	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
EcoPaXX	Bio-PA 4/10			■		■	■	■	■	■	■
Braskem SHC7260	Bio-PE										■
Arboblend 2649VB	Bio-X, unpolar										■

■ < 10 N keine Haftung      ■ 20–60 N gute Haftung  
■ 10–20 N schlechte Haftung      ■ > 60 N sehr gute Haftung

## Zusammenfassung

Bisher konnten im SKZ mehrere hundert konventionelle Materialkombinationen und Versuchsreihen innerhalb von Forschungs- und Industrieprojekten erfolgreich hergestellt und geprüft werden. Die Arbeiten im Rahmen des FNR-Projektes umfassten mehr als 80 weitere Materialpaarungen bei denen mindestens ein Biokunststoff je Kombination seine Verwendung fand. Die Ergebnisse zeigen, dass schon jetzt eine große Anzahl möglicher Hart/Weich-Kombinationen mit biobasierten Kunststoffen möglich ist und diese sich in Ihren (Haftungs-)Eigenschaften ähnlich wie Verbunde aus konventionellen, verfügbaren Thermoplast/TPE-Kombinationen verhalten.

Als großer Vorteil zur Auswertung der gemessenen Schälkraft/Weg-Kurven stellte sich die Messung des Schlittenwegs (tatsächlicher Schälweg) heraus, mit dem sehr viel effizienter und präziser gearbeitet werden konnte als mit dem Traversenweg. Vor allem die Vergleichbarkeit von sehr unterschiedlichen Materialkombinationen (z. B. bei stark unterschiedlichen Kraftniveaus und/oder Dehnungen) ist mit der Schlittenwegmessung gegeben. Ein weiterer Vorteil liegt in der möglichen direkten lokalen Zuordnung von Haftungsänderungen/-effekten entlang des überspritzten Bereichs.

Interessant sind insbesondere die Ergebnisse für die teilweise biobasierten Weichkomponenten TPE-U und TPE-E. Das auf Bernsteinsäure aufgebaute TPE-U zeigte auf allen Materialien eine sehr gute Haftung. Mit konventionellen TPE-U-Typen ist diese Festigkeit nicht oder nur schwer erreichbar. Im Gegensatz dazu war keine Haftung bei den untersuchten TPE-E-Typen erreichbar, die ebenso wie die PLAs der Gruppe der Polyester zugehörig sind.

Die variotherme Temperierung von Werkzeugen bzw. Werkzeugteilbereichen, die für die Abformungen von Mikrostrukturen, der Verbesserung der Oberflächengüte von geschäumten oder faserverstärkten Bauteilen sowie zur Verbesserung von Bindenähten einsetzbar ist, eignet sich ebenfalls zur Steigerung der Verbundhaftung von Mehrkomponentenbauteilen. Je nach Materialkombination ist damit eine deutliche Verbesserung realisierbar.

Weiterführende Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit und den (Gebrauchs-)Eigenschaften zeigten, dass die auf dem Markt verfügbaren biobasierten Polymere für künftige Produkte eine sinnvolle Alternative darstellen. Diese Materialien befinden sich mittlerweile in der dritten bzw. vierten Entwicklungs-generation, sodass frühere Einschränkungen beispielsweise bezüglich der Scherempfindlichkeit, thermischen Schädigungen (Verweilzeit), Fließfähigkeit und Entformbarkeit keine Probleme mehr darstellen. Ebenso haben sich die Materialpreise vor allem von PLA-basierten Materialien mittlerweile auf ein wettbewerbsfähiges Niveau eingependelt, mit weiterhin sinkender Tendenz.

# Schäumen

– von Kunststoffen ist eine Verarbeitungsmethode, um das Materialgewicht bzw. die Dichte zu reduzieren. Außerdem weisen Schaumstrukturen isolierende Eigenschaften auf. Beim Schäumen wird dem Kunststoff während der Verarbeitung ein Treibmittel zugesetzt, wodurch dem Werkstoff/Bauteil eine spezifische, zweiphasige Schaumstruktur verliehen wird. Da biobasierte Kunststoffe zum Teil eine höhere Dichte als erdölbasierte Kunststoffe aufweisen, liegt es nahe, dichterduzierende Möglichkeiten auszureizen, um verbesserte Eigenschaften zu entwickeln. Im Projekt wurde eine theoretische Betrachtung der Schäumbarkeit von Biokunststoffen durchgeführt. Hier werden vorrangig die verarbeitungstechnischen Besonderheiten und Schwierigkeiten des Schäumens von Biokunststoffen aufgeführt, weshalb auch nicht auf konkrete Biokunststofftypen eingegangen wird.

## Möglichkeiten und Anforderungen für Biopolymere

Grundsätzlich lassen sich auch Biopolymere auf Basis nachwachsender Rohstoffe durch den gezielten Einsatz von funktionellen Additiven in einigen Schäumverfahren verarbeiten. Der dabei erzielbare Schaum hängt von der minimal erreichbaren Dichte und Qualität des Biowerkstoffes ab. Bei der Verschäumung von (Bio-)Polymeren gelten folgende Richtsätze:

- Ein Material kann umso besser verschäumt werden, je mehr molekulare Verzweigungen es aufweist. In diesem Zusammenhang spielt die Schmelzfestigkeit des Materials eine bedeutende Rolle.
- Weist das Material einen hohen Kristallinitätsgrad auf, so verringert sich sein Verarbeitungsfenster. Eine Schaumerzeugung in kristallinen Gebieten ist ausgeschlossen.

Da beim Bioschaumstoff im Vergleich zum erdölbasierten Gegenstück weitestgehend identische oder zumindest sehr ähnliche Eigenschaftsprofile vorausgesetzt werden, müssen an der Anlagentechnik keine nennenswerten maschinentechnischen Erweiterungen erfolgen. Der Optimierungsrahmen umfasst ausschließlich Rezepturanpassungen sowie Einflüsse relevanter Prozessparameter wie Temperaturen und Drücke.

## Hydrolytische Auswirkung von chemischen Treibmitteln auf Biopolymere

Während beim physikalischen Schäumen weitestgehend „reine“ Treibmittel verwendet werden und deren Verhalten auf die Polymerschmelze theoretisch ermittelt werden kann, wird dies beim Einsatz von chemischen Treibmitteln voraussichtlich weitaus schwieriger ausfallen. Chemische Treibmittel hinterlassen bei ihrer Zersetzungsreaktion neben dem wirksamen Treibgas auch Zersetzungsrückstände wie z. B.  $\text{NH}_3$  oder  $\text{H}_2\text{O}$ , die sich durchaus negativ auf die zu schäumende Polymermatrix auswirken. Eine Eigenschaftenschlechterung kann zum einen auf die chemische Reaktion zwischen Polymer und den Zersetzungsprodukten und zum anderen auf die Zusammensetzung des chemischen Treibmittels an sich zurückzuführen sein. Das chemische Treibmittel würde demnach Trägermaterialien beinhalten, welche sich auf petrochemische Polymere unproblematisch, jedoch auf Biopolymere durchaus negativ auswirken.

## Entgasung und Vortrocknung

Da während des chemischen Kunststoffschäumens und unabhängig von der Anlagentechnik grundsätzlich nicht entgast werden kann, sollte beim Verarbeiten hygroskopischer Biokunststoffe zusätzlich auf eine Vorbehandlung in Form einer effektiven Vortrocknung zurückgegriffen werden. Dieses Problem kann nur beim physikalischen Schäumen umgangen werden, wenn auf einer Anlage aus zwei zusammengeschalteten Extrudern, einer sogenannten Tandemanlage, geschäumt wird. Dabei ist es möglich, noch vor Einbringung des physikalischen Treibmittels im primären Extruder effektiv zu entgasen.

## Thermosensitivität und Abbauverhalten

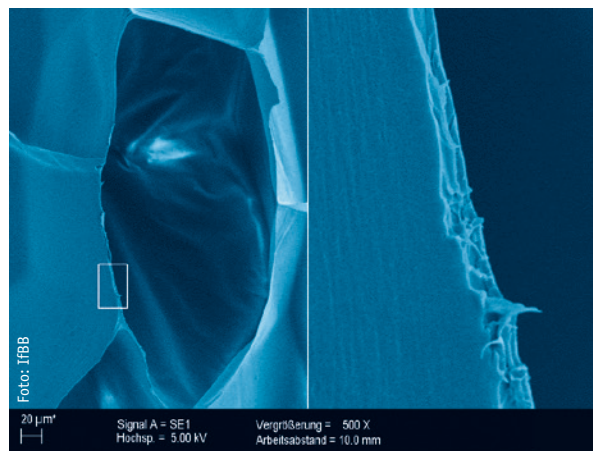
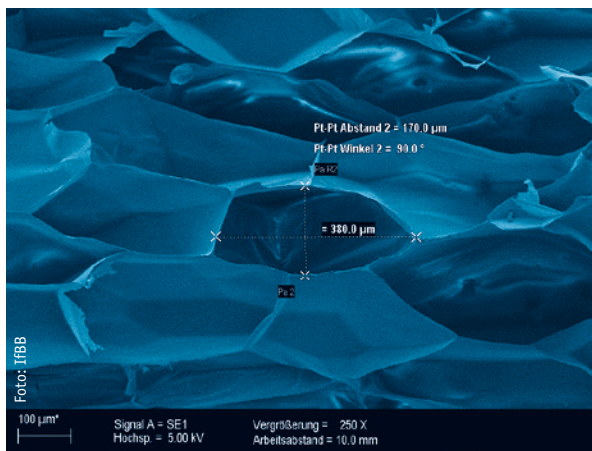
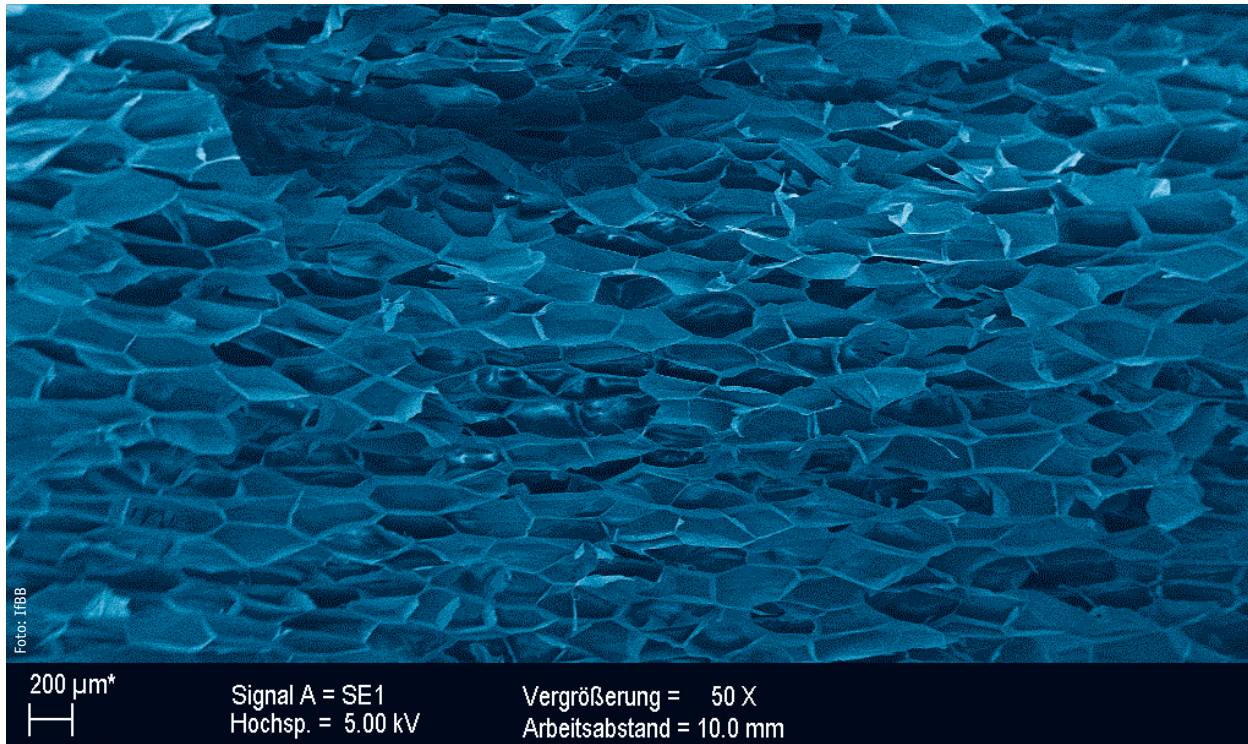
Um beim Verschäumen von biobasierten Kunststoffen thermische Schädigungen bzw. Abbaumechanismen zu unterbinden, muss bei den Prozesseinstellungen und dem Prozessaufbau wesentlich stärker achtgegeben werden. Das gilt zum einen dann, wenn nicht druck- und temperaturstabile Rohstoffe zum Einsatz kommen. Aus gleichem Grund sollte des Weiteren ein zu langer Verfahrensaufbau vermieden werden. Neben den geringeren Gebrauchstemperaturen lassen sich auf Stärke basierende Biokunststoffe zwar relativ gut verschäumen, weisen jedoch aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Neigung, Feuchtigkeit aufzunehmen, ein sehr ungünstiges Abbauverhalten auf. Dieses Verhalten grenzt den Verwendungsbereich derartiger Schaumstoffe deutlich ein.



Stärkebasiertes Verpackungsmaterial

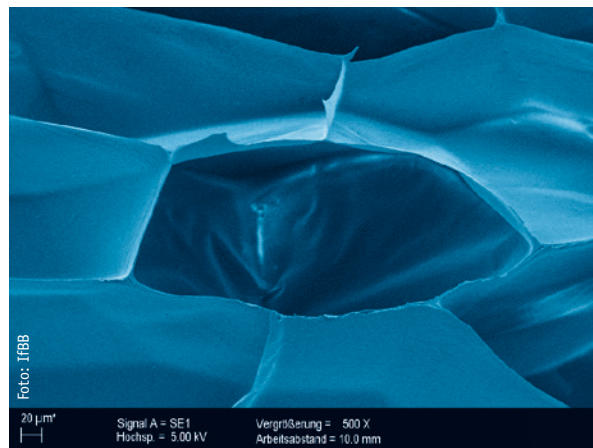


## Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von Schaumstrukturen



### Zusammenfassung

Das Schäumen von Kunststoffen ist auch beim Einsatz von Biokunststoffen ein komplexer Vorgang. Biobasierte Kunststoffe sind generell ähnlich verschäumbar wie herkömmliche Kunststoffe und bedürfen keiner Erweiterung der Anlagentechnik. Es gibt jedoch auf diesem Gebiet immer noch zu wenig allgemein zugängliche Verarbeitungsinformationen. Erschwert wird der Verarbeitungsprozess zusätzlich durch Besonderheiten, die manche Biopolymere mit sich bringen. So lassen sich zum einen stabile Schaumstrukturen nur dann erzeugen, wenn eine Kompatibilität/Verträglichkeit zwischen dem Biokunststoff und dem jeweils wirksamen Treibmittel gegeben ist und zum anderen können Biokunststoffe, die zur Aufnahme von Feuchtigkeit neigen, durch ihr spezifisches Abbauverhalten nicht dauerhaft für Langzeitanwendungen eingesetzt werden.

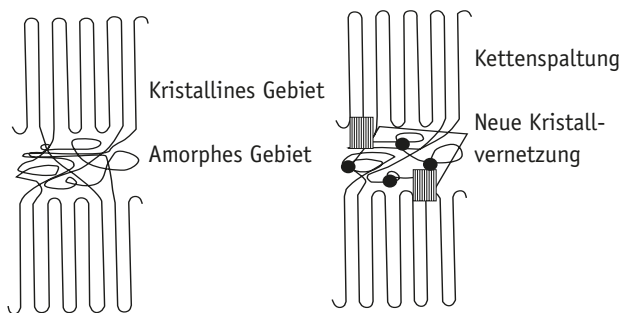


Weiterführende und detaillierte Ergebnisse finden Sie in der Online-Datenbank dieses Verbundprojektes unter:  
[www.biokunststoffe-verarbeiten.de](http://www.biokunststoffe-verarbeiten.de)

# Vernetzung

– ist ein denkbarer Ansatz zur Aufwertung von Kunststoffen durch energiereiche Strahlung. Hierbei ermöglicht die Rekombination strahleninduzierter Radikale eine dreidimensionale Kettenverzweigung und somit eine Verbesserung der Materialeigenschaften des vernetzten Kunststoffs. Die verschiedenen Polymere reagieren unterschiedlich auf Strahlung, insbesondere wenn es um die Vernetzung im Vergleich zur Kettenspaltung geht. Diese Reaktionen sind neben den Bestrahlungsparametern und Umgebungsbedingungen (An-/Abwesenheit von Sauerstoff, Temperatur) von der chemischen Strukturen der Polymere abhängig und diese wiederum lassen sich grob in drei Gruppen aufteilen:

1. den Vernetzungstyp,
2. den Abbautyp und
3. den strahlungsresistente Typ.



**Abbildung 1: Wirkung von Strahlenvernetzung auf die Morphologie eines nicht bestrahlten und eines bestrahlten teilkristallinen Polymers**

Die Vernetzung eines thermoplastischen Kunststoffs verändert seine Polymerstruktur, sodass sie der eines Duroplasten ähnelt. Ferner wurde für den Zweck der praktischen Forschungen ein PLA ausgewählt, um die Veränderungen gegenüber reinen PLA-Spritzgießtypen sowie die Wirkung von Vernetzungshilfen aufzuzeigen. Das untersuchte PLA zeigt Veränderungen der mechanischen und thermischen Eigenschaften durch Elektronenbestrahlung. Abbildung 2 stellt den Einfluss der Elektronenbestrahlung auf PLA mit und ohne Vernetzungshilfsmittel (VHM) im Vergleich zum Referenzmaterial dar. Eine große Schwankung von mechanischen und thermischen Eigenschaften beim PLA ohne VHM bedeutet, dass das bestrahlte Material beginnt sich abzubauen. Im Gegensatz dazu zeigt PLA mit VHM verbesserte mechanische Eigenschaften, was insbesondere hinsichtlich der Biegefestigkeit sichtbar wurde. Die verbesserten mechanischen Eigenschaften erlauben damit den Schluss, dass die Polymerketten eine Vernetzung erfuhren. Dies bestätigt die DSC-Untersuchung: Das bestrahlte PLA zeigt keine Anzeichen typischer Kristallisationsbereiche auf und wurde somit vernetzt.

## Materialien

Im Rahmen des Projektes wurde die Möglichkeit der Vernetzung von Biokunststoffen untersucht. Hierzu erfolgte eine Forschungsabfrage, um die Wahrscheinlichkeit einer Vernetzung der Biopolymeren auf der Grundlage ihrer chemischen Struktur und der physikalisch-chemischen Eigenschaften zu bewerten. Tabelle 1 enthält Informationen über die Reaktion marktgängiger Biokunststoffe auf Elektronenbestrahlung.

**Tabelle 1: Reaktion von Biokunststoffen auf Elektronenbestrahlung**

Biokunststoff	Primärstrahlenwirkung (virgin)	Effektive Vernetzungshilfsmittel (PFM)	Vernetzung mit PFM
PA 610	Abbau/Neutral	TAIC	leicht
PA 1010			
PA 410			
PA 11			
PBAT, PBST	Vernetzung	keine Angabe	mittel
PBS	Vernetzung	TMAIC	leicht
PBT	Neutral (vor Strahlung stabil)	TAIC	leicht
PCL	Vernetzung	TMAIC	leicht
PE	Vernetzung	TAC, AMA (allyl methacrylate)	leicht
PET	Neutral (vor Strahlung stabil)	Potenziell TAIC	schwer
PHAs (PHB/PHV)	Abbau	keine Angabe	mittel, leichter für Copolymer PHBV
PLA	Abbau	TAIC, Di-, Triacrylate	leicht
PPA	Neutral	Keine Angabe	mittel bis schwer
PVOH	Abbau/Vernetzung in Wasser löslich	keine Angabe	schwer



## Einfluss der Bestrahlung auf PLA

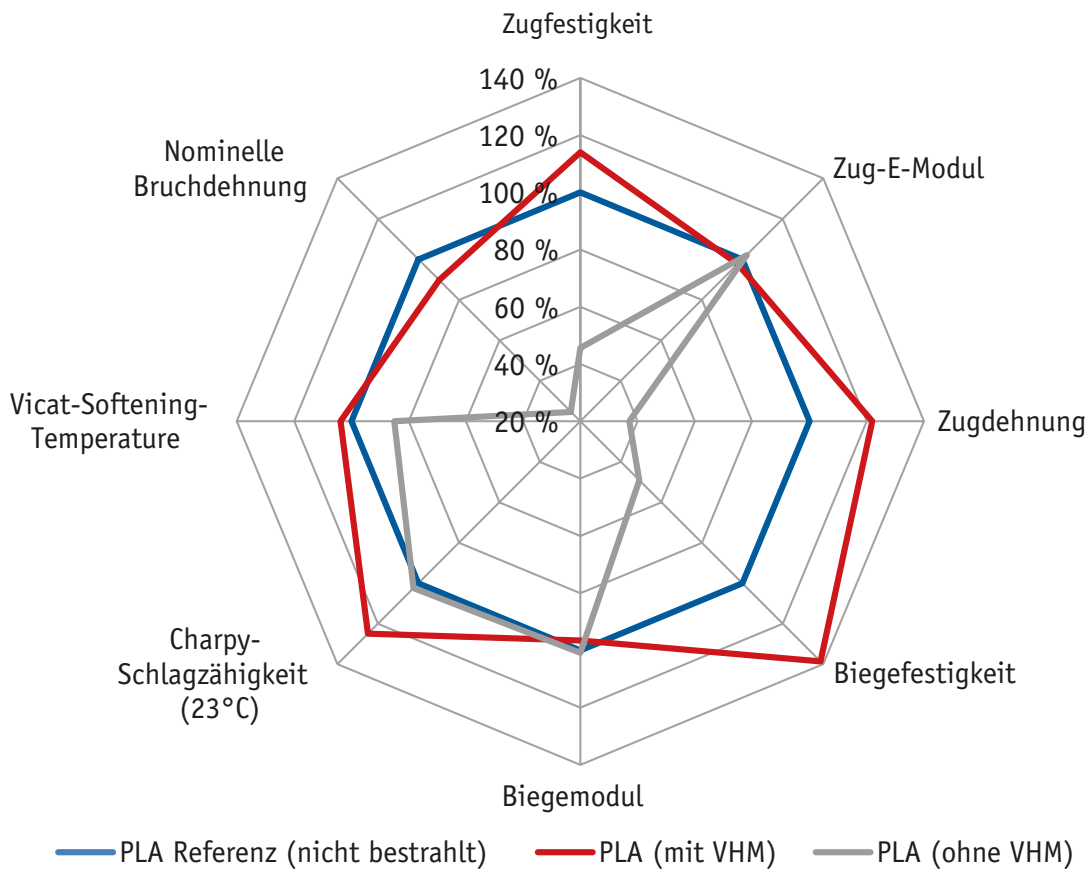


Abbildung 2: Einfluss durch Bestrahlung auf die Eigenschaften von PLA

### Zusammenfassung

Die Untersuchungen bestätigen, dass die Vernetzung von Biopolymeren möglich ist und zu signifikanten Eigenschaftsveränderungen führen kann. Wie stark sich die Eigenschaften verändern, hängt von der Bestrahlungsdosis und der damit einhergehenden Veränderung der Makrostruktur des Materials ab. Für erfolgreiche Vernetzungen wird jedoch häufig ein polymer-spezifisches Vernetzungshilfsmittel benötigt. Materialbestrahlungen in Abwesenheit von VHM verursachen einen Abbau des Materials und reduzieren die Materialeigenschaften.

Grundsätzlich bietet die Elektronenbestrahlung von Polymeren im Vergleich zu anderen Vernetzungsverfahren viele Vorteile. Der Vernetzungsgrad kann leicht durch die Dosis gesteuert werden. Es ist ein sauberer Prozess, der durch weniger (oder keine) Verwendung von Additiven kaum (oder keine) unerwünschte(n) Rückstände im Produkt hinterlässt. Dies ist insbesondere im medizinischen Bereich von großer Bedeutung. Zudem führt die Bestrahlung auch gleichzeitig zur Sterilisation des Materials. Die Bestrahlung steht im Gegensatz zur herkömmlichen thermomechanischen Vernetzung, bei der bereits Umgebungstemperaturen Reaktionen auslösen. Allerdings ist die Elektronenbestrahlung im Allgemeinen teurer als die Silan- oder Peroxidvernetzung. Die Rentabilität der industriellen Elektronenbestrahlungsverfahren und der damit verbundene Produktmehrwert kann nur bei hohem Produktdurchsatz gewährleistet werden.




# Einfärben

– ist für Biokunststoffe gleichermaßen von Bedeutung wie für herkömmliche Kunststoffe. Es existiert fast kein Kunststoffprodukt, das nicht eingefärbt wird. Einer der Hauptgründe hierfür ist die Steigerung der Produktanmutung, was wiederum zu höheren Absatzzahlen führt. Für den Bereich der Biokunststoffe lagen bisher jedoch kaum entsprechende Erkenntnisse vor.

## Einfärbevarianten und Farbmittel

Beim Einfärben von Kunststoffen jeder Art gibt es, je nach Form und Dosiermöglichkeit, mehrere Varianten. Die gängigsten werden hier aufgeführt.

**Tabelle 1: Einfärbevarianten von Kunststoffen**

Masterbatch	Flüssigfarben	Pulverfarben
Granulatform	flüssig/pastös	Pulverform
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Direkte Dosierung möglich</li> <li>• Pigmente sind in Trägerpolymer eingebracht</li> <li>• Zugabe bei ca. 1–5 Gew.-%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Direkte Dosierung möglich</li> <li>• Pigmente/Farbstoffe sind in Flüssigkeit gebunden</li> <li>• Zugabe bei ca. 0,01–1 Gew.-%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Direkte Dosierung nicht möglich, vorherige Dispergierung in einem Mischer notwendig</li> </ul>
		

Ein wichtiger Faktor beim Einfärben ist die Art und Qualität der Einfärbung. Nach DIN 55943 wird unter dem Begriff „Farbmittel“ die Gesamtheit aller farbgebenden Substanzen verstanden. Diese wiederum werden in die Gruppen „Farbstoff“ und „Pigment“ unterteilt und können sowohl organischen als auch anorganischen Ursprungs sein. Farbstoffe sind im Anwendungsmedium löslich und Pigmente unlöslich. Einige Farbmittel sind dabei beständiger als andere. Rot beispielsweise ist i. d. R. ein gegen UV-Einwirkungen weniger beständiges Farbmittel. Üblicherweise erfolgt das Einfärben von Kunststoffen während der Extrusion oder im Spritzgießprozess.

## Materialien

Bei den im Kapitel Einfärben untersuchten Biokunststoffen handelt es sich um kommerziell erhältliche Materialien mit entsprechender Marktrelevanz. Die untersuchten Materialien sind in Tabelle 2 aufgeführt.

**Tabelle 2: Einfärbevarianten von Kunststoffen**

Materialklasse	Hersteller	Typ
PLA	NatureWorks	Ingeo 3251D
Bio-PE	FKuR	Terralene HD 3505
PLA+PBT	BASF	Ecovio IS 1335
PHB	Metabolix	Mirel P1004
PLA	FKuR	Bio-Flex S 9533

Bei den eingesetzten Farben handelt es sich um Flüssigfarben mit nachfolgenden Spezifikationen:

**Tabelle 3: Eingesetzte Flüssigfarben**

Farbe	Farbname	Code	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Lichtechtheit
	White	DLC 0.1212	1,32	8
	Black	DLC 9.1214	1,03	8
	Yellow	DLC 1.1215	1,32	8
	Orange	DLV 2.1216	1,07	7
	Warm Red	DLC 3.1217	1,21	6
	Red	DLC 3.1218	1,19	6
	Rubin Red	DLC 3.1219	1,37	6
	Rhodamine Red	DLC 3.1220	1,30	7
	Purple	DLC 4.1221	1,07	8
	Violet	DLC 4.1222	1,43	6
	Blue	DLC 5.1223	1,50	7
	Reflex Blue	DLC 5.1224	1,52	8
	Process Blue	DLV 5.1225	1,32	8
	Green	DLC 6.1226	1,20	7

## Untersuchungen

Um die gesamte Farbpalette der verfügbaren Flüssigfarben untersuchen zu können, wurde die Auswahl auf drei Biokunststoffe als Matrixpolymer begrenzt. Diese drei Materialien wurden mit jeder der verfügbaren Farben zu einem Anteil von 0,1 Gew.-% verarbeitet. Ziel war es, umfangreiche Aussagen zur Verarbeitbarkeit, zum optischen Verhalten und zum Einfluss des Einfärbens auf die mechanischen Kennwerten zu erhalten. Die Materialien wurden auf einer Spritzgießmaschine der Firma KraussMaffei vom Typ 50-180AX zu Farbplatten mit den Abmessungen 90 x 55 x 2 mm verarbeitet. Diese Platten wurden für die weiterführenden Untersuchungen herangezogen.

## Verarbeitbarkeit

Die Flüssigfarben konnten im Spritzgießprozess problemlos in die Biokunststoffe PLA Ingeo 3251D und Bio-PE Terralene 3505 HD eingearbeitet werden. Dabei wurde lediglich eine Farbkonzentration von 0,1 Gew.-% aufgewendet, die beim Bio-PE bereits zu einer blickdichten Einfärbung führte. Das PLA wies durch seine lichtdurchlässigen Eigenschaften keine vollständige Blickdichtigkeit auf. Als Herausforderung erwies sich die Einfärbung des Biokunststoffes PLA+PBT. Hier trat ein inhomogenes und schwaches Farbbild auf, das erst durch ein Erhöhen der Farbkonzentration auf 0,5 Gew.-% verbessert werden konnte. Ein großer Vorteil der Flüssigfarben kann für die Bereiche Dosiermenge und Farbwechsel festgehalten werden, denn es waren lediglich zehn Zyklen nötig, um von einer Farbe auf die nächste zu wechseln. Dies ist mit den meistens verwendeten Masterbatches nicht möglich. Nachfolgend sind in Tabelle 4 die verwendeten Spritzgießparameter ersichtlich, die zur Herstellung der Farbpaletten verwendet wurden.

**Tabelle 4: Spritzgießparameter zur Herstellung der Farbpaletten**

### PLA-Spritzgießparameter

Zeit	[s]
Einspritzzeit	1,5–2
Kühlzeit	32–36
Zykluszeit	54–58
Druck	[bar]
Spritzdruck	1200
Nachdruck	450–480
Kraft	[kN]
Zugkraft	470–485
Geschwindigkeit	[mm/s]
Einspritzgeschwindigkeit	40
Temperatur	[°C]
Einzug/Zone 1/ Zone 11	50/180/240
Werkzeugtemperatur	2 x 25

### Bio-PE-Spritzgießparameter

Zeit	[s]
Einspritzzeit	1,5–2
Kühlzeit	25–28
Zykluszeit	44–47
Druck	[bar]
Spritzdruck	1200
Nachdruck	600–625
Kraft	[kN]
Zugkraft	485
Geschwindigkeit	[mm/s]
Einspritzgeschwindigkeit	70
Temperatur	[°C]
Einzug/Zone 1/ Zone 11	30/155/195
Werkzeugtemperatur	2 x 45

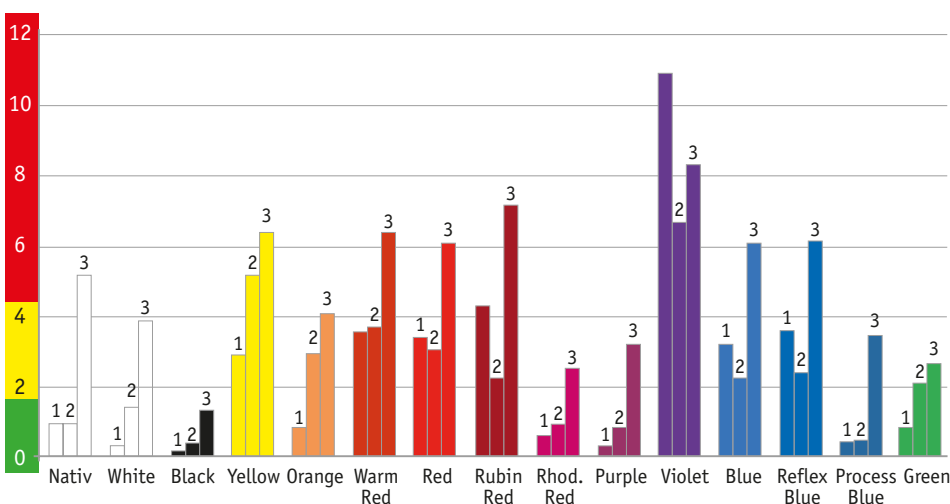
## UV-Stabilität

Diese Untersuchung gibt Aufschluss über die Auswirkungen der eingearbeiteten Flüssigfarben auf Farbveränderungen des Materials nach UV-Bestrahlung. Dabei gibt  $\Delta E$  den Wert für den Farbabstand zwischen der unbestrahlten und der bestrahlten Probe an. Ab einem  $\Delta E$ -Wert von 2 erkennt das Auge i. d. R. eine Abweichung bei Farben, Abweichungen bei Grautönen werden schon deutlich früher erkannt. Bei einem Wert von 4 ist die Abweichung als sofort erkennbar einzustufen. Abbildung 1 zeigt den Farbabstand aller Flüssigfarben in Kombination mit den eingesetzten Biokunststoffen.

Das eingefärbte PLA und Bio-PE zeigen durch die vierzehntägige UV-Bestrahlung überwiegend als „normal“ zu bewertende Farbabweichungen. Auffällig ist, dass einige Farben (White, Black, Rhodamine Red, Purple, Process Blue) sogar eine UV-stabilisierende Wirkung gegenüber dem nativen (ungefärbten) Biokunststoff aufweisen. Farben wie Yellow, Warm Red, Red, Rubin Red, Violet, Blue und Reflex Blue hingegen zeigen deutliche Abweichungen und sollten daher für Formteile, die starkem Sonnenlicht ausgesetzt sind, zusätzlich mit UV-Stabilisatoren versehen werden.

### PLA+PBT-Spritzgießparameter

Zeit	[s]
Einspritzzeit	1,2
Kühlzeit	14–16
Zykluszeit	27–30
Druck	[bar]
Spritzdruck	900
Nachdruck	630
Kraft	[kN]
Zugkraft	485
Geschwindigkeit	[mm/s]
Einspritzgeschwindigkeit	75
Temperatur	[°C]
Einzug/Zone 1/ Zone 11	60/155/210
Werkzeugtemperatur	2 x 25



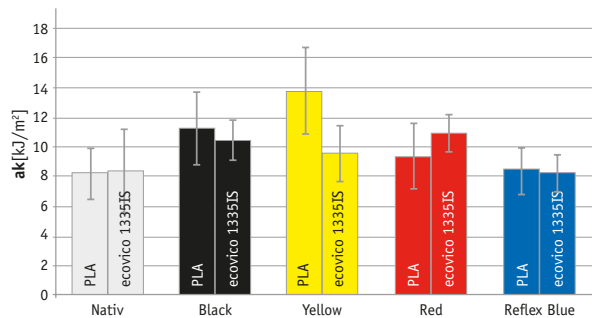
**Abbildung 1: Farbabstand nach 14-tägiger UV-Bestrahlung**

Farbmessung nach DIN EN ISO 5033-4; D65/10°; n=9

Reihenfolge der Messung: Ingeo 3251D (1), Terralene HD 3505 (2), Ecovio IS 1335 (3)

## Mechanische Eigenschaften

Die Auswertung der mechanischen Eigenschaften erfolgt anhand der Charpy-Schlagzähigkeitsprüfung nach vierzehntägiger UV-Bestrahlung, da die Biokunststoffe Bio-PE und PLA+PBT im unbehandelten Zustand zu keinem Bruch führten. Bei dieser Prüfung (DIN EN ISO 179/2) wird die Kraft ermittelt, die zum Durchschlagen eines Prüfkörpers benötigt wird. Die Prüfung wurde für ausgewählte Farben durchgeführt.



**Abbildung 2: Schlagzähigkeitsergebnisse nach 14-tägiger UV-Bestrahlung**

Schlagbiegeversuch nach DIN EN ISO 179/2; Typ 2;  
5J-Pendel; n=12

Ingeo 3251D und Ecovio IS 1335 + 0,1 % Einfärbung

Auffällig bei den durchgeführten Untersuchungen ist, dass alle Flüssigfarben zu Kennwertsteigerungen bei der Charpy-Prüfung führen. Somit kann eine positive Wirkung auf die Zähigkeit dieser Biokunststoffe festgehalten werden.

## Einfärben mit Masterbatch

Zum Vergleich der unterschiedlichen Einfärbemethoden wurden die beiden Werkstoffe NatureWorks Ingeo 3251D (PLA) und Metabolix Mirel P1004 (PHB) jeweils mit einem blauen und einem grünen Masterbatch eingefärbt. Das Masterbatch basiert auf PLA, ist kommerziell erhältlich und erfüllt die Norm EN 13432 bezüglich der biologischen Abbaubarkeit.

Bei der Verarbeitung von Ingeo 3251D traten bei der Verwendung einer Standard-Dreizonenschnecke ohne Mischelemente leichte Farbschlieren an der Oberfläche auf. Eine wesentliche Verbesserung der Farbhomogenität, die zur Beseitigung der Schlierenbildung führte, konnte durch den Einsatz einer Schnecke mit zusätzlichen Zahnscheibenmischteilen vor der Rückstromsperre erreicht werden. Auch ein höherer Staudruck bewirkte eine Reduzierung der Schlierenbildung. Die Verarbeitungsparameter zeigten insgesamt einen geringen Einfluss auf den resultierenden Farbton. Lediglich eine Erhöhung der Masstemperatur führte zu einer leichten Veränderung der Farbe, die allerdings deutlich unterhalb der sichtbaren Wahrnehmungsschwelle lag. Somit zeigte sich das Ingeo 3251D robust gegenüber potenziell farbverändernden Einflussgrößen im Spritzgießprozess.

Obwohl die Werkstoffe PLA und PHB in ihrer molekularen Struktur relativ ähnlich sind, wurde bei der Einfärbung von Mirel P1004 eine Inkompatibilität mit dem Trägermaterial der Masterbatches festgestellt. Die Ursache lag dabei in der unterschiedlichen Viskosität der beiden Materialien. Dies führte bei Verwendung der Standard-Dreizonenschnecke zu sehr starken Schlierenbildungen am Bauteil. Durch Einsatz einer Schnecke mit Mischelementen wurden die Bauteile optisch wesentlich homogener, allerdings zeigten die Farbmessungen deutliche Streuungen im laufenden Prozess. Auf die mechanischen Eigenschaften hatte die Einfärbung keinen Einfluss.

## Zusammenfassung

Die untersuchten Biokunststoffe weisen für den Bereich Einfärben gute Ergebnisse auf. Die Verarbeitbarkeit der eingesetzten Flüssigfarben konnte problemlos im Spritzgießprozess erfolgen. Bereits ein Farbanteil von 0,01 Gew.-% hat bei den Biokunststoffen PLA und Bio-PE zu guten Ergebnissen geführt. Beim PLA+PBT war die Farbwirkung jedoch weniger ausgeprägt und konnte erst ab einem Farbanteil von 0,5 Gew.-% zu guten Ergebnissen führen. Besonders positiv hervorzuheben ist die geringe Zykluszahl, die bei einem Farbwechsel notwendig ist. Die untersuchten Biokunststoffe weisen im eingefärbten Zustand ein „typisches Verhalten“ hinsichtlich ihrer UV-Stabilität auf. In Kombination mit Farben wie z. B. Rot sind nach längerer UV-Bestrahlung deutliche Farbabweichungen erkennbar, wohingegen die Einfärbung mit z. B. Schwarz zu einer UV-Stabilisierung führt. Besonders interessant ist, dass das Einfärben mit Flüssigfarben die Zähigkeit der untersuchten Biokunststoffe erkennbar steigert.

Insgesamt ist für das Einfärben von Biokunststoffen mit Flüssigfarben festzuhalten, dass dies ohne Einsatz von besonderen oder zusätzlichen Maßnahmen möglich ist und zu guten Ergebnissen führt.

Beim Einfärben mit Masterbatch zeigen Biokunststoffe die gleichen Schwierigkeiten im Prozess wie konventionelle Thermoplaste. So können beim Einsatz einer Standard-Dreizonenschnecke ohne Mischelemente Farbschlieren aufgrund unzureichender Homogenisierung auftreten. Ist das Trägermaterial des Masterbatches nicht mit dem einzufärbenden Kunststoff kompatibel, kann kein reproduzierbarer Farbton erzeugt werden. Dies gilt für Biokunststoffe gleichermaßen wie für konventionelle Kunststoffe.

Weiterführende und detaillierte Ergebnisse finden Sie in der Online-Datenbank dieses Verbundprojektes unter:  
[www.biokunststoffe-verarbeiten.de](http://www.biokunststoffe-verarbeiten.de)



# Verarbeitungsverhalten

– spielt z. B. dann eine Rolle, wenn es um das Bedrucken von Kunststoffen geht. Eine hochwertige Bedruckung ist für Biokunststoffe gleichermaßen von Bedeutung wie für herkömmliche Kunststoffe, um die Produkte nach dem Herstellungsprozess zu dekorieren und die Produktattraktivität zu steigern. Ein wichtiger Markt ist hier u. a. die Verpackungsbranche, die für den Einsatz von Biokunststoffen grundlegende Informationen über die Bedruckbarkeit von Biokunststoffen benötigt. Auch für die Spielzeugindustrie ist eine nachträgliche Veredelung zur Steigerung der Produktnutzung essentiell.

## Materialien

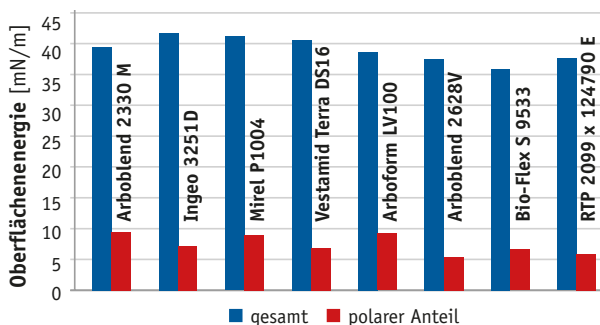
Bei den im Kapitel Bedrucken untersuchten Biokunststoffen handelt es sich um kommerziell erhältliche Materialien mit entsprechender Marktrelevanz. Die untersuchten Materialien sind in Tabelle 1 aufgeführt.

**Tabelle 1: Übersicht der im Abschnitt Bedrucken untersuchten Materialien**

Materialklasse	Hersteller	Typ
PLA	NatureWorks	Ingeo 3251D
PHB	Metabolix	Mirel P1004
PLA	FKuR	Bio-Flex S 9533
PLA	Tecnaro	Arboblend 2330 M
PLA	Tecnaro	Arboblend 2628V
PLA	Tecnaro	Arboform LV100
PLA	RTP	RTP 2099 x 124790 E
Bio-PA	Evonik	Vestamid Terra DS16

## Untersuchung

Die Bedruckbarkeit wird maßgeblich durch die Benetzbarkeit der Oberfläche bestimmt und ist von der chemischen Zusammensetzung des Substrats abhängig. Die Bestimmung der Oberflächenenergie durch eine Kontaktwinkelmessung erlaubt Rückschlüsse auf die Bedruckbarkeit von Kunststoffen. Die Biokunststoffe, insbesondere PLA und PHB, zeigen bedingt durch ihre relativ hohe Polarität grundsätzlich eine gute Benetzbarkeit mit Farben und Lacken. So konnten im Tampondruck bereits durch 1K-Farbsysteme gute Ergebnisse erzielt werden. Tabelle 2 zeigt die Oberflächenspannung einiger Biokunststoffe und deren polaren Anteil.



**Abbildung 1: Oberflächenenergie**

– spielt auch bei der mechanischen Bearbeitung von Kunststoffen eine Rolle. Bei der Fertigung von spritzgegossenen Kunststoffteilen ist häufig, wie zum Beispiel für die Entfernung von Angüssen, ein zusätzlicher spanabhebender Bearbeitungsschritt notwendig. Auch viele Halbzeuge aus Kunststoff werden häufig durch spanende Verarbeitungsverfahren wie Drehen, Bohren oder Fräsen in ihre endgültige Form gebracht, obwohl wenig spezielle Schneidwerkzeuge auf dem Markt zur Verfügung stehen. Häufig kommen Werkzeuge zum Einsatz, die auch für die Bearbeitung von Aluminium oder Stahl geeignet sind.

## Materialien

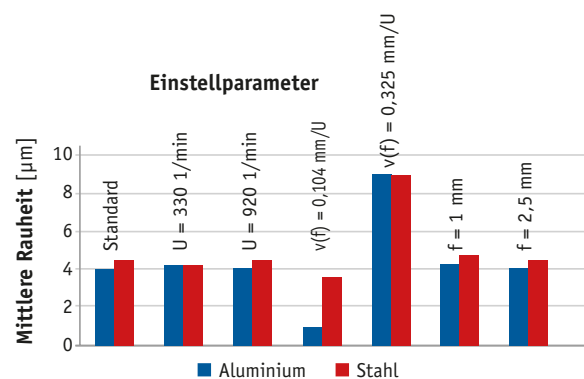
Bei den im Kapitel **Mechanische Bearbeitung** untersuchten Biokunststoffen handelt es sich um kommerziell erhältliche Materialien mit entsprechender Marktrelevanz. Die untersuchten Materialien sind in Tabelle 2 aufgeführt.

**Tabelle 2: Übersicht der im Abschnitt Mechanische Bearbeitung untersuchten Materialien**

Materialklasse	Hersteller	Typ
PLA	NatureWorks	Ingeo 3251D
PHB	Metabolix	Mirel P1004
PLA	FKuR	Bio-Flex S 9533

## Untersuchung

Um die Eignung von Biokunststoffen für die spanende Bearbeitung zu untersuchen, wurde die Rauheit der Oberfläche von gedrehten Teilen in Abhängigkeit von der Drehzahl  $U$ , Vorschub  $v(f)$  und Zustellung  $f$  der Drehmaschine gemessen. Messungen der während der Bearbeitung auftretenden Temperaturerhöhung an der Kunststoffoberfläche erfolgten mit Hilfe einer Thermographiekamera. Trotz hoher Oberflächentemperaturen von bis zu 120 °C konnten bei Schneiden für Aluminium- und Stahlwerkstoffe Rauheitswerte von 4  $\mu\text{m}$  erreicht werden. Die Biokunststoffe verschmierten bei der Verarbeitung nicht. Exemplarisch ist in Abbildung 2 die mittlere Rauheit von einem Rundkörper aus dem Werkstoff Ingeo 3251D für verschiedene Verarbeitungsparameter und Werkzeuge dargestellt.



**Abbildung 2: Mittlere Rauheit von Ingeo 3251D abhängig von den Einstellparametern**

## Extrusionsblasformen

– gehört zu den Standardverfahren zur Herstellung von Kunststoffhohlkörpern technischer Formteile (Kanister, Kraftstofftanks, Luftführungen im Kraftfahrzeug etc.) und dem Verpackungsbereich (insbesondere Kunststoffflaschen und -dosen etc.). Bei diesem Verfahren wird der im Extruder aufgeschmolzene Kunststoff als Schlauch, dem sogenannten Vorformling, extrudiert und mittels Druckluft in eine Hohlform hinein aufgeblasen. Das Material erstarrt an der gekühlten Wand der Kavität und der Artikel kann entnommen werden. Trotz des großen möglichen Einsatzfeldes für Biokunststoffe im Blasformen liegen für ihren Einsatz bisher nur wenige Erfahrungen vor. Eine einfache Substitution eines konventionellen Materials durch einen Biokunststoff ist in der Regel nicht möglich, da eine spezifische Anpassung von Maschinen- und Prozessparametern (Temperaturführung etc.) notwendig ist.

### Materialien

Bei den im Kapitel Extrusionsblasformen untersuchten Biokunststoffen handelt es sich um kommerziell erhältliche Materialien mit entsprechender Marktrelevanz. Die in Kooperation mit der Dr. Reinhold Hagen Stiftung (RHS) untersuchten Materialien sind in Tabelle 1 aufgeführt.

**Tabelle 1: Verwendete Materialien**

Materialklasse	Hersteller	Typ
Bio-PE	Braskem	GreenPE SFG 4950
Bio-PE-Compound	FKuR	Terralene LL 1303
Cellulose Blend	FKuR	Biograde 9550
PA 4.10	DSM	EcoPaXX Q170E
PA 4.10	DSM	EcoPaXX Q-X07633
PBAT+PLA	BASF	Ecovio F Blend C2224
PBAT+PLA	BASF	Ecovio FS 2224
PBAT+PLA	BASF	Ecovio T2308
PLA	NatureWorks	Ingeo 4043D
PLA	NatureWorks	Ingeo 4060D
PLA-Blend	FKuR	Bio-Flex F 6510
TPS-Blend	Novamont	Mater-Bi CF06A
TPS-Blend	Novamont	Mater-Bi DI01A
TPS-Blend	Novamont	Mater-Bi EF05B
TPS-Blend	Novamont	Mater-Bi EF05S

### Extrusionsverhalten

Eine Bewertung der grundlegenden Eigenschaften und eine Einstufung, ob ein Material grundsätzlich für das Blasformen geeignet ist, erfolgt anhand von standardisierten Versuchen auf einer Laborblasformmaschine sowie an einem Laborextruder. Im Mittelpunkt steht die Bildung des Vorformlings. Dieser ist die wesentliche Eingangsgröße für den Aufblasvorgang und damit entscheidend für die Eigenschaften des ausgeformten Artikels. Zentrale Parameter sind die Schmelzsteifigkeit (Dehnavisiosität) sowie das Schwell- und Auslängenverhalten. Die Versuche geben Hinweise auf das zu erwartende Verarbeitungstemperatur- und Verarbeitungszeitfenster und damit auch auf die notwendige Maschinenausstattung. Viele niedrigviskose Werkstoffe erfordern den Einsatz eines Speicherkopfes, da damit die Verarbeitungszeiten deutlich kürzer als bei der kontinuierlichen Extrusion sind.

#### Bio-PE

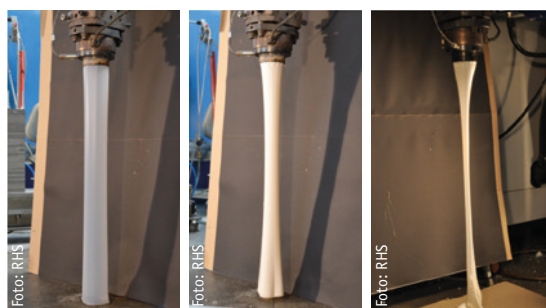
gut geeignet

#### PLA-Blend

geeignet

#### TPS-Blend

wenig geeignet



**Abbildung 1: Vorformlingsbildung im Extrusionsversuch**


### Produktionsversuche


Für geeignete Materialien wurden weitergehende Produktversuche auf einer Serien-Produktionsanlage durchgeführt. Ziel war es, den Blasformprozess zu optimieren und die wesentlichen Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften an ausgewählten Artikeln zu ermitteln. Dabei sind Verarbeitungsparameter für einige Biokunststoffe zusammengefasst worden. Es ließen sich von vier TPS-Blends drei eingeschränkt und eins überhaupt nicht verarbeiten. Die Verarbeitungstemperaturen im Blasformen liegen in der Regel unter den Temperaturen beim Spritzgießen. Es wird eine ausreichende Schmelzsteifigkeit benötigt, allerdings kann eine zu hohe Steifigkeit während des Aufblasprozesses zur Rissbildung führen. Einige Werkstoffe können daher nur mit einem Speicherkopf gefertigt werden. Hierbei wird die Schmelze zunächst in einen ringförmigen Speicherraum gefördert und anschließend mit relativ hoher Geschwindigkeit ausgestoßen. Der Einsatz eines Speicherkopfes ist dann notwendig, wenn die Schmelzsteifigkeit zu gering ist. Durch den kurzen Zeitraum zwischen Vorformlingsextrusion („Ausstoßen“) und dem Aufblasvorgang wird ein Auslängen und ggf. Abreißen des Vorformlings vermieden. Außerdem sollte ein Speicherkopf zum Einsatz kommen, wenn das Material sehr schnell, d. h. in einem zu engen Temperaturfenster erstarrt und damit nicht mehr ausformbar ist. Die Bewertung des Extrusionsverhaltens der untersuchten Biokunststoffe ist in Tabelle 2 aufgeführt.


**Tabelle 2: Übersicht zur Verarbeitung mittels Blasformen**

in Kooperation mit RHS

		PLA-Blend	Cellulose-Blend	PA 4.10	PBAT+PLA	Bio-PE	Bio-PE-Compound	TPS-Blend
<b>Vorformlingsbildung</b>								
<b>Artikelproduktion</b>								noch nicht untersucht
<b>Verarbeitungsparameter Extrusionsversuche</b>								
Temperatur Einzugszone	°C	145	145	200	145	140	140	160
Temperaturverlauf Extruder	°C	175–170	215–200	270–260	170–165	195–190	150–155	165–155
Temperatur Kopf	°C	170	200	260	165	190	155	155
<b>Materialtrocknung</b>		ja	ja	ja	ja	nein	empfehlensw.	ja
<b>Bauteilswindung</b> (gemittelt) Länge/Breite; Werkzeugtemperatur 15 °C	%	0,46	0,49	0,5	0,49	1,66	2,5	–
<b>Bemerkungen</b> Alle Angaben beziehen sich auf einen spezifischen Materialtyp			Artikel sehr hart und spröde		starkes Wanddickenquellen			Blasformfähigkeit abhängig vom Mat.-Typ

 Material geeignet

 Material mit Einschränkungen geeignet  
*Einsatz eines Speicherkopfes notwendig*

 Material ungeeignet

## Zusammenfassung

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass sich die Verarbeitungsparameter und auch die notwendigen Anpassungen des Extrusionsblasformprozesses für Biokunststoffe im Rahmen der auch für konventionelle Kunststoffe notwendigen Anforderungen liegen (z. B. Substitution eines Polyolefin durch ein Copolyester). Allerdings gibt es in der Gruppe der Biokunststoffe wenige Materialtypen, die bzgl. des Blasformprozesses optimiert wurden. Bei fast allen untersuchten Materialien handelt es sich um Folien- oder Extrusionstypen. Hier sind die Materialhersteller gefordert, Anpassungen durchzuführen und anzubieten. Dann steht dem Extrusionsblasformen von Biokunststoffen nichts entgegen.

Weiterführende und detaillierte Ergebnisse finden Sie in der Online-Datenbank dieses Verbundprojektes unter:  
**[www.biokunststoffe-verarbeiten.de](http://www.biokunststoffe-verarbeiten.de)**

## Flachfolienherstellung

– ist ein weit verbreitetes Verfahren zur Herstellung von biobasierten oder kompostierbaren Kunststofffolien, die mittlerweile zu unserem Alltag gehören. Einkaufsstätten mit Biobased- oder Keimling-Zeichen werden von nahezu jeder großen Supermarkt- oder Drogeriekette angeboten. Ein weiteres Beispiel stellt knisternde „Blumenfolie“ dar, welche aus transparenten Biokunststoffen hergestellt wird. Nicht zuletzt ist die kompostierbare Mulchfolie zu nennen, die zwischen zwei Vegetationsperioden unterpflügt im Boden zumeist vollständig abgebaut wird.



**Abbildung 1: Drei-Schicht-Folienextrusionsanlage**

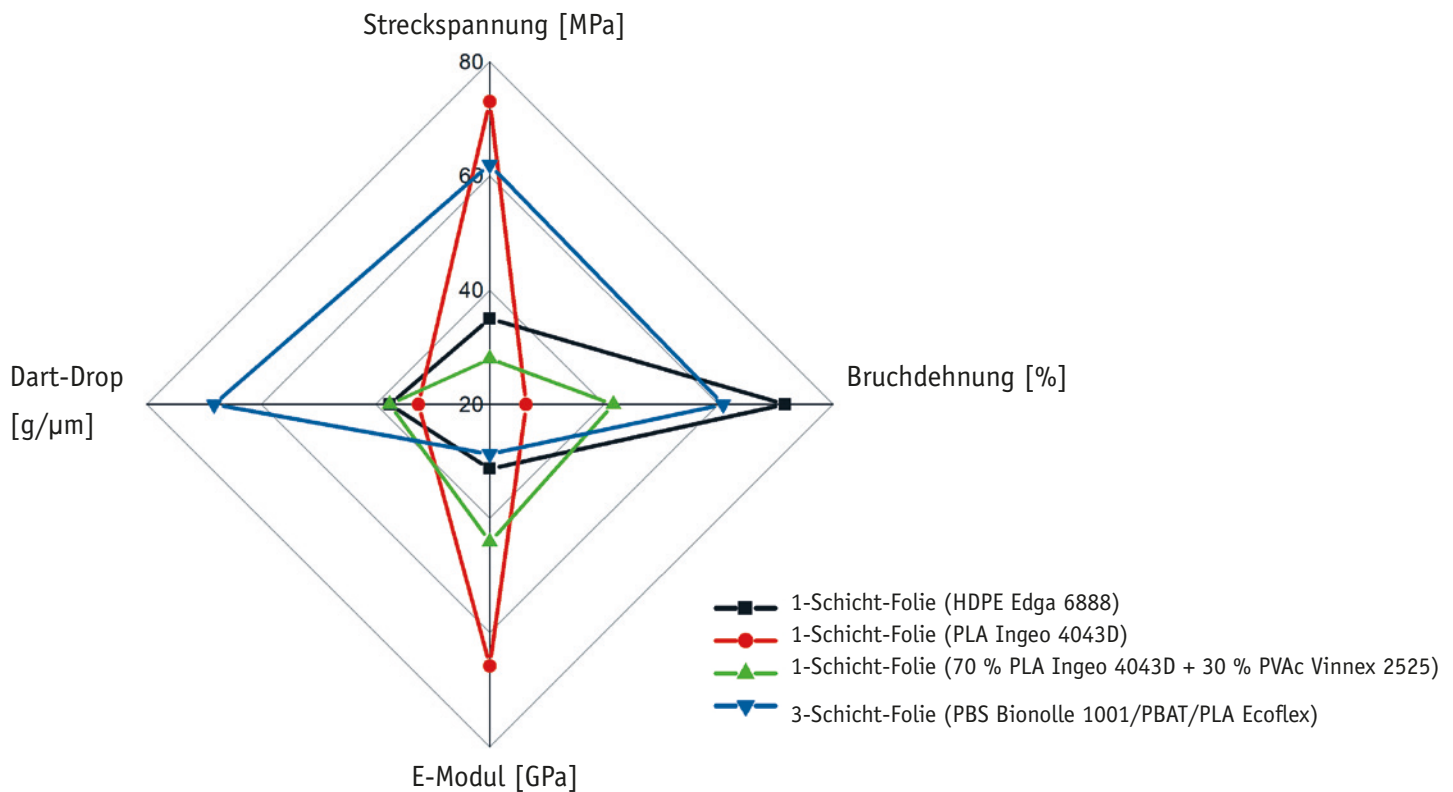
Eine aktuelle Analyse des Biokunststoffmarktes zeigt eine große Vielfalt an Biokunststoffen auf, die speziell für Folienanwendungen entwickelt und mit der Standard-Anlagentechnik verarbeitbar sind. Zu erkennen ist aber auch die Tendenz, über die o. g. einfachen Produktanwendungen hinaus, in Marktsegmente anspruchsvoller Produkte vorzudringen, welche aktuell durch petrochemische Standardkunststoffe besetzt werden. Hierzu gehören z. B. thermogeformte Verpackungen für Molke- und Fleischprodukte. Aus materialtechnischer Sicht sind oft die Eigenschaftsdefizite wie unzureichende Barriereigenschaften oder zu niedrige Durchstoß- und Weiterreißfestigkeit von Biokunststoffen für eine eingeschränkte Marktdurchdringung im höherwertigen Verpackungssegment verantwortlich. Eine wirksame Abhilfe kann hier durch mehrschichtigen Folienaufbau geschaffen werden, bei dem positive Eigenschaften unterschiedlicher Biokunststoffe miteinander kombiniert sind.

In der Folienbranche ist die Herstellung von Mehrschichtfolien mit 3, 5, 7 und in Einzelfällen sogar 9 Schichten Stand der Technik. Die Gründe dafür sind potentielle Kosteneinsparungen, die durch die Kombination von günstigen und kostenintensiven Kunststoffen oder durch den Einsatz von Regranulaten erzielt werden können sowie die signifikante Verbesserung der Gas-, Dampf-, Aromabarriere und die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Durch einen mehrschichtigen

Aufbau können zudem die Optik, Haptik, Siegelfähigkeit oder Bedruckbarkeit gezielt eingestellt werden.

Damit dem potentiellen Anwender ein möglichst breites Spektrum an verfahrenstechnischen Informationen in Bezug auf Ein- und Mehrschichtfolienextrusion von Biokunststoffen zugänglich gemacht werden kann, wurden im Rahmen des Projektes marktrelevante Biokunststoffe analytisch sowie verfahrensspezifisch umfassend untersucht. Der Fokus lag auf biobasierten Kunststoffen wie PLA, Bio-PA 11 oder Bio-PE. Aber auch kompostierbare Copolyester wie PBS, PBAT oder PBSeT, die eine petrochemische Rohstoffbasis nutzen und dennoch zu den Biokunststoffen zählen sowie biologisch abbaubare Additive und Bindemittel auf Polyvinylacetat-Basis (PVAc) wurden charakterisiert. Nicht zuletzt wurde die Veränderung der Eigenschaften von Biokunststoffen durch das Blenden mit anderen Biokunststoffen sowie Additiven untersucht. Als ein repräsentatives Beispiel ist das PLA-PVAc-Blend hervorzuheben. Eine relativ geringe Zugabemenge von 10 Gew.-% PVAc bewirkt im PLA einen signifikanten Anstieg der Bruchdehnung bei moderater Absenkung der Zugfestigkeit. Auch bei der Energieaufnahme durch schlagartige Belastung und bei Weiterreißfestigkeit sind positive Veränderungen zu verzeichnen. Bei einem Mischungsverhältnis von 7 Anteilen PLA zu 3 Anteilen PVAc entsteht ein zum HDPE konkurrenzfähiges und zu 70 % biobasiertes Produkt.





**Abbildung 2: Vergleich der Eigenschaften un- und modifizierter Biokunststofffolien**

Die Untersuchungen zeigen, dass der Einsatzbereich von Biokunststoffen durch die Mehrschichttechnik beträchtlich erweitert werden kann. Die Kombinationsfähigkeit unterschiedlicher biobasierter Copolyester mit interessanten mechanischen Eigenschaften zu einem 3-Schichtverbund, der ohne den Einsatz von Haftvermittlerschichten auskommt, bietet dank der resultierenden Festigkeiten Potenzial zur Dickenreduzierung und somit zur Produktkostenminimierung. Dabei fungiert PBS aufgrund seiner PE-ähnlichen Haptik und einer guten Bedruckbarkeit als Außenschicht. Die Innenschicht bietet die Möglichkeit, aus weicherem und flexibel eingestelltem PBAT/PLA für Anwendungen, in denen heute LDPE zum Einsatz kommt, oder aus härterem und nicht sehr dehnfähigen PBAT/PLA-Typen für HDPE-Anwendungen hergestellt zu werden. Dadurch steigt die Bruchdehnung signifikant und das Durchstoßverhalten des Verbundes kann erheblich (Faktor 7–10) verbessert werden. Im Vergleich zu PE-Folien wird die hohe Sauerstoffdurchlässigkeit deutlich reduziert. Aufgrund der gleichen Polarität der beteiligten Kunststoffe wird auch ohne Haftvermittler eine hervorragende Haftfestigkeit zwischen den einzelnen Schichten erreicht. Durch diese Kombination können teure konventionelle 5-Schicht-Folien, bestehend aus 3 Schichten Polymer (z. B. Außenschicht aus PE, Innenschicht aus PA) und 2 Schichten Haftvermittler (z. B. EVA) substituiert werden, wenn die beschriebenen Festigkeiten durch eine PA-Innenschicht in Verbindung mit PE-Außenschichten mit konventionellen Rohstoffen erreicht werden sollen. Zusätzlich können die höheren Materialkosten für Biokunststoffe durch den Wegfall der Anwendungen für Haftvermittler und eine effiziente Produktion kompensiert werden.

Ein weiterer untersuchter Aspekt ist der Wiedereinsatz von aufbereiteten Biokunststoff-Produktionsabfällen. Auch hier konnte gezeigt werden, dass sämtliche Biokunststoff-Regenerate in produktionsüblichen Mengen bis 10 Gew.-% dem neuen Material beigemischt werden können, ohne negative Auswirkungen auf die Qualität oder die mechanischen Eigenschaften des Folienhalbzeugs zu verzeichnen.

### Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen, dass die Verarbeitung von Biokunststoffen zu Flachfolien und deren Leistungsspektrum durch Zugabe von Additiven in signifikantem Maße gesteigert werden können. Besonders effektiv ist bei PLA das Bindemittel auf Polyvinylacetat-Basis. Sowohl bei Ein- als auch Mehrschichtfolienextrusion kann ein deutlich duktileres Materialverhalten erzielt werden, ohne dabei die Steifigkeit des Materials maßgeblich herabzusetzen. Bei Mehrschichtfolienextrusion existieren bei polaren Bio-Polyestern und dessen Blends zahlreiche sinnvolle Kombinationsmöglichkeiten. Besonders ist hier die (PLA-PVAc)/(PLA-PBAT)-Kombination hervorzuheben. Die mechanischen Eigenschaften, insbesondere Durchstoßfestigkeit und Bruchdehnung, sind um den Faktor 7 bis 10 höher, als bei einschichtigen Folien vergleichbarer Foliendicke. Der Wegfall von Haftvermittlerschichten ergibt zudem ein enormes Einsparpotential.

## Tiefziehverhalten

– spielt eine Rolle bei der Weiterverarbeitung von Flachfolien zu Verpackungen im Lebensmittelbereich, die sehr häufig durch Thermoformen erfolgt. Mit diesem Umformverfahren können hocheffizient Schalen, Becher und andere Behältnisse hergestellt werden. Es ist auch möglich die Herstellung der Behälter, das Befüllen, Verschließen und Verpacken in einem Inline-Verfahren zu kombinieren. Außerhalb der Lebensmittelverpackungen sind Klappblister für alle möglichen Kleinartikel besonders bekannt. Das Thermoformen bietet die Chance, die Verpackung an die oft komplexen Geometrien der zu verpackenden Artikel anzupassen. So erhält man eine moderne Verpackung, in der zum Beispiel elektronische Kleingeräte ohne zusätzliche Polsterung sicher gelagert und transportiert werden können.

Thermoformwerkzeuge können aus Aluminium oder sogar aus Holz hergestellt werden und sind auf Grund des einseitigen Formkontakts mit der Folie sehr günstig zu fertigen. Gerade für kleine oder mittlere Serien stellt das Thermoformen eine wirtschaftliche Alternative zum Spritzgießen dar.

### Materialien

Die am Markt vorhandenen thermoplastischen Biokunststoffe sind prinzipiell alle für das Thermoformen geeignet. Unterschiede bestehen hinsichtlich Verstreckungsgrad, Faltenbildung und Stanzbarkeit. Die Auswahl des geeigneten Werkstoffes hängt von der Anwendung ab und muss sich dabei in erster Linie an den geforderten Eigenschaften der zu produzierenden Thermoformteile wie Transparenz, Steifigkeit oder Permeabilitätseigenschaften orientieren. Durch Materialkombinationen in Mehrschichtsystemen und/oder Einarbeiten von Additiven lassen sich die Eigenschaftsprofile gezielt an die Anwendung anpassen. Dabei können auch synthetische, nicht biobasierte Materialien wie Polyvinylalkohol zum Beispiel für Barrierschichten in Betracht gezogen werden, soweit sie auf Grund des niedrigen Anteils dem Konzept der Biokunststoffe nicht widersprechen.

Hochtransparente Tiefziehfolien lassen sich aus reinem PLA herstellen, diese sind jedoch äußerst spröde und deshalb nur in wenigen Fällen einsetzbar. Durch die Modifikation von PLA mit einem weichmachenden Bindemittel wie PVAc-Festharz (Vinnex 2525) und die Kombination mit einer PA11-Mittelschicht lassen sich hochtransparente und zudem hochfeste Folien herstellen.

Bei der Verwendung von Biokunststoffen im Bereich der Lebensmittelverpackungen spielen die Barriereigenschaften gegenüber Wasserdampf, Sauerstoff, Aromastoffen, Ölen und Fetten eine große Rolle. Neben der schon oben erwähnten Möglichkeit der Verwendung mehrschichtiger Folien, können diese Eigenschaften auch durch Beschichtungen verbessert werden. Die Versuche im Rahmen des Projektes haben gezeigt, dass sich die Sauerstoffdurchlässigkeit von PLA durch eine wenige Mikrometer starke Schicht aus Nanocellulose um etwa das Hundertfache verringert.

Die niedrige Erweichungstemperatur des PLA ist auf der einen Seite ein Verarbeitungsvorteil, beschränkt aber auf der anderen Seite den Einsatzbereich auf Kaltverpackungen. Ob sich hochtemperaturstabiles Stereokomplex-PLA auch für die Folienherstellung und das anschließende Thermoformen eignet, ist noch nicht genügend erforscht.

Bei der Fertigung von Thermoformteilen ist besonders bei mehrschichtigen Folien die Verstreckung des Materials zu beachten. Das Material dehnt sich formbedingt meist ungleichmäßig. Dadurch reduziert sich die Wandstärke des verformten Teils in einigen Bereichen. Das kann Einfluss auf die Barriereigenschaften der Schichtstruktur haben. Die Dicke der Ausgangsfolie, die Schichtdicken der einzelnen Komponenten und der Verstreckungsgrad sind entsprechend anzupassen.

### Zusammenfassung

Mehrschichtfolien aus Biokunststoff lassen sich wie im Artikel zur Folienherstellung gezeigt gut siegeln. Die Kombination der Schichten sollte auch mit Blick auf gute siegelbare Außenschichten gewählt werden. Die Bedruckbarkeit war bei allen untersuchten Bio-Materialien besser als die von Folien aus PE. Die Produktionsrückstände wie Stanzgitter, Spannränder oder Ähnliches können leicht gemahlen und dem Verarbeitungszklus bei der Flachfolienherstellung wieder zugeführt werden.

Das Thermoformverfahren ist prädestiniert, um Biokunststoffe im Verpackungsmarkt auch für dünnwandige Verpackungen einzusetzen. Es muss anwendungsbezogen eine gute Abstimmung zwischen Folienhersteller oder -lieferant und dem Thermoformer erfolgen.

Weiterführende und detaillierte Ergebnisse finden Sie in der Online-Datenbank dieses Verbundprojektes unter:  
[www.biokunststoffe-verbatim.de](http://www.biokunststoffe-verbatim.de)

# Faserverstärkung

– eignet sich, um die mechanischen und thermomechanischen Eigenschaften polymerer Werkstoffe deutlich zu verbessern. Mit diesem Konzept ist eine aufwendige chemische Modifizierung der Polymere verzichtbar und es können neue Einsatzgebiete für Polymerwerkstoffe erschlossen werden. Das gilt natürlich gleichermaßen für Biopolymere. Folgt man dem Prinzip der Nachhaltigkeit, richtet sich der Blick auf pflanzliche Naturfasern und biobasierte Faserwerkstoffe. Glasfasern oder Hochleistungsfasern wie Aramid- oder Kohlenstofffasern lassen sich ebenfalls zur Verstärkung von Biopolymeren verwenden, werden hier aber nicht weiter betrachtet.

## Materialien

Fasern zur Verstärkung thermoplastischer Biopolymere müssen gute mechanische Eigenschaften mitbringen, unschmelzbar sein und ein hohes Aspektverhältnis besitzen. Naturfasern haben den Nachteil, dass ihre Eigenschaften in hohem Maße von den schwankenden Wachstumsbedingungen abhängen.

Die kommerziell verfügbare Cellulose-Regenerat-Faser Cordenka CR eignet sich hervorragend als Verstärkungsfaser. Sie steht als endlose Hochleistungsfaser zur Verfügung und wird bisher hauptsächlich zur Seitenwandverstärkung von Reifen, die für Geschwindigkeiten über 190 km/h zugelassen sind, eingesetzt. Die vom Hersteller gelieferte Cordenka CR-Faser besteht aus 1350 Filamenten mit einem Gesamtiter von 2440 tex. Eine solche Faser kann, anders als eine Glasfaser, **nicht** direkt in einen Extruder eingezogen und dann während des Compoundierens zerkleinert werden. Zur Herstellung von Schnitffasern musste die Cordenka CR mit einem speziellen Faserschneidkopf geschnitten werden. Die kleinste Schnitflänge (entspricht der höchstmöglichen Zahl von Messern) betrug 1,5 mm. Davon ausgehend wurde die Schnitflänge jeweils verdoppelt und Schnitffasern von 3 mm, 6 mm und 12 mm Länge produziert.

Als Matrixpolymer wurde die PLA-Spritzgusstype Ingeo 3251D verwendet. Die Compoundierung erfolgte mit einem Doppelschneckenextruder Leistritz ZSE 18HP. Dieser Extruder hat einen Schneckendurchmesser von 18 mm und eine Verfahrenslänge von 50 D. Durch eine spezielle Temperaturführung wurde dafür gesorgt, dass das PLA bereits in den ersten vier Extruderzonen vollständig aufgeschmolzen war. Die Dosierung der Fasern erfolgte erst in Zone 5. Dadurch sollte eine schonende Einarbeitung der Fasern in die Polymerschmelze erreicht werden. Der Schnecken Aufbau des Extruders war ebenfalls darauf ausgerichtet, eine faserschonende Verarbeitung zu ermöglichen. Die Schnitffasern wurden dem PLA bei einer Barrel-Temperatur von 180 °C zugegeben.

Insgesamt entstanden bei gleichen Extrusionsbedingungen vier PLA-Rayon-Compounds mit einem Faseranteil von 20 %. Aus dem Granulat wurde anschließend auf einem Spritzgussautomaten BOY 22A Normprüfkörpern hergestellt.

## Einfluss der Faserlängenverteilung auf das Eigenschaftsprofil des Verbunds

Durch die Verarbeitung der Cellulosefasern im Extruder und anschließendem Granulieren des Strangs werden die Fasern eingekürzt. Tabelle 1 zeigt den Median der optischen Faserlängenbestimmung für die jeweiligen Compounds. Es fällt auf,

dass die Fasern mit zunehmender Ausgangslänge durch den Verarbeitungsprozess stärker eingekürzt werden. Bei der hier gewählte Gerätekonfiguration blieb die Ausgangsfaserlänge von 3 mm am besten erhalten.

Tabelle 1: Mittlere Faserlängenverteilung

Proben-Nr.	Faserlänge vor Compoundierung [mm]	Faserlänge im Prüfkörper [mm]
342	1,5	0,5
340	12	1,1
339	6	1,5
343	3	1,9

In Tabelle 2 sind die ermittelten mechanischen Eigenschaften der Prüfkörper in Abhängigkeit von der mittleren Faserlänge im Prüfkörper dargestellt. Die Cordenkafasern haben einen deutlichen Verstärkungseffekt, der sich besonders bei der Schlagzähigkeit der ungekerbten Proben zeigt. Auch alle anderen Kennwerte verbessern sich mit zunehmender Faserlänge. Die Effekte sind bei der Festigkeit nicht so gravierend, beim E-Modul ist eine Erhöhung um 50 % erreicht worden.

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit von der Faserlänge

Faserlänge [mm]	Charpy ungekerbt [kJ/m <sup>2</sup> ]	Charpy gekerbt [kJ/m <sup>2</sup> ]	Festigkeit [MPa]	E-Modul [GPa]	Dehnung [%]
ohneFasern	20	2	70	2,9	3,8
0,5	43	5	79	3,9	5,6
1,1	51	7	84	3,9	3,0
1,5	54	8	85	4,0	4,4
1,9	61	9	87	4,0	6,1

Weitere Verbesserungen der mechanischen Eigenschaften der Compounds lassen sich auf jeden Fall durch den Einsatz von Haftvermittlern erreichen.

## Zusammenfassung

Biobasierte Schnitffasern aus dem Cellulosecord Cordenka CR sind hervorragend für die Verbesserung der Schlagzähigkeit von PLA geeignet und bieten die Chance für eine langfristig stabile Produktion und ein ebenso langfristig stabiles Eigenschaftsprofil des Verbundmaterials. In Abhängigkeit von dem geplanten Einsatz des faserverstärkten Biopolymers können die geeignete Verstärkungsfaser und die passenden Additive ausgewählt werden.

# Blasfolienherstellung aus Biokunststoffen

– hat bei weitem noch nicht die Vielfalt erreicht, die konventionelle Kunststoffe bieten, obwohl die Auswahl an für die Blasfolienherstellung geeigneten biobasierten Rohstoffen, die in dauerhaft konstanter Qualität und in ausreichenden Mengen auf dem Markt verfügbar sind, ausgezeichnete Eigenschaften und Möglichkeiten der Anwendung besitzen, die sie für den Einsatz im Folienmarkt interessant machen. Derzeit wird dieser Markt von nicht abbaubaren Folien auf fossiler Basis dominiert. Wie es auch im konventionellen Bereich üblich ist, lassen sich erforderliche Anpassungen der Materialeigenschaften an bestimmte Anwendungen oder gezieltes Verbessern beispielsweise von mechanischen Festigkeiten durch Rohstoffmodifikationen, durch Abmischungen verschiedener Rohstoffe sowie durch Mehrschichtaufbauten in beträchtlichem Umfang erreichen.

## Verarbeitungsverhalten

Die verfügbaren und im Projektrahmen untersuchten Biokunststoffe waren durchweg gut zu verarbeiten. Dabei wurde mit gängigen und nicht modifizierten Verarbeitungsanlagen gearbeitet, wie sie auch für konventionelle Materialien eingesetzt werden. Es ergaben sich viele Parallelen zwischen der Verarbeitung von konventionellen und biobasierten Kunststoffen, sodass im Folgenden vor allem auf die Unterschiede zwischen diesen Rohstoffklassen eingegangen werden soll.

Grundsätzlich ist hervorzuheben, dass sich sämtliche Biokunststoffe problemlos extrudieren ließen, die Schmelzeshomogenität war augenscheinlich gut. Der Einsatz von Schmelzesieben ist zu empfehlen, um die Stippenhäufigkeit zu reduzieren.

Sämtliche Materialien ließen sich nach der Produktion problemlos mit LDPE spülen; es gab über den gesamten Zeitraum keine nennenswerten Verunreinigungen an Schnecke, Zylinder oder an anderen Schmelze führenden Teilen, obwohl eine sehr große Anzahl unterschiedlichster Materialien gefahren wurde.

## Materialien

**Tabelle 1: Übersicht über die im Abschnitt Blasfolienherstellung untersuchten Biokunststoffe**

Materialklasse	Hersteller	Typ
PBAT/PLA	BASF	Ecovio F 2341
PBAT/PLA	BASF	Ecovio F Mulch C 2311
Copolyester/Stärke	Novamont	Mater-Bi CE 01 B
Copolyester/Stärke	Novamont	Mater-Bi CF 06 A
Copolyester/Stärke	Novamont	Mater-Bi EF 51 L
PBS	Mitsubishi Chemical	GS Pla FD 92 WD
PBS	Mitsubishi Chemical	GS Pla FZ 91 PD
PBS	ShowaDenko	Bionolle 1001MD
PLA	NatureWorks	Ingeo 4043D

Die Herstellung von Regenerat aus Produktionsabfällen und Zugabe im Bereich von 10 % oder auch höher war problemlos möglich.

Unterschiede zu konventionellen Materialien waren bei den Fenstern für die Verarbeitungstemperaturen festzustellen, die bei Biopolymeren kleiner sind als bei den bekannten konventionellen Rohstoffen. Bei PLA ist beispielsweise ein Bereich

von +/- 5 °C einzuhalten, PBS-Typen benötigten +/- 10 °C. Diese Temperatursensibilität wurde auch in nachfolgenden Verarbeitungsschritten wie dem Siegeln der hergestellten Folien beobachtet.

Durch das Abmischen von PLA mit PVAc wurden hingegen sowohl die beschriebenen Verarbeitungsfenster vergrößert als auch die Schmelzestabilität soweit verbessert, dass die Produktion unproblematisch wurde.

Eine Trocknung der Biomaterialien ist im Produktionsbetrieb grundsätzlich zu empfehlen (80 min bei 50°C im Trockenluft-trockner), wobei aber auch zu berichten ist, dass bei Materialien aus trockener Innenlagerung in geschlossenen Gebinden auch ungetrocknet keinerlei Nachteile festzustellen waren. Sie werden in der Regel vorgetrocknet angeliefert. Der Feuchtegehalt lag dann mit unter 0,1 % im verarbeitungsgerechten Bereich.

Die erzielbaren Aufblasverhältnisse blieben bei Einsatz der Biokunststoffe PLA und PBS hinter denen von konventionellem PE oder auch auf dem Markt erhältlichen und etablierten PBAT/PLA-Copolyestern zurück. Bei reinem PLA ließen sich Aufblasverhältnisse von maximal 1:2,4 realisieren, PBS ließ immerhin 1:3,3 zu.

## Mechanische Eigenschaften von Folien aus Biokunststoffen

Wichtige Erkenntnisse in Bezug auf die Einsetzbarkeit der hergestellten Folien ergeben sich aus den Zugprüfungen (Tabelle 2 und Abbildungen 1–3).

In den Diagrammen wird eine Auswahl an Folien aus Biokunststoffen zwei einfachen Referenzfolien (den Folien A und B) aus PE gegenübergestellt. Bei den Biofolien handelt es sich entweder um Monofolien aus reinen Materialtypen, um Abmischungen bzw. Compounds oder im Falle der Folien M bis Q um 3-Schichtfolien.

Die Zugfestigkeiten variieren in einem großen Bereich. Mit den 3-Schichtfolien werden Festigkeiten erzielt, die über das Niveau der Monofolien aus Biopolymeren hinausgehen, ohne dabei an Dehnfähigkeit einzubüßen. Der E-Modul dieser Folien bleibt dabei im guten gebrauchsfähigen Bereich.



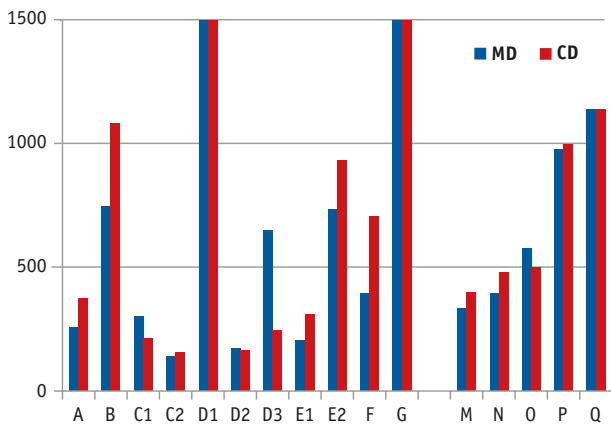


Abbildung 1: E-Modul [MPa]

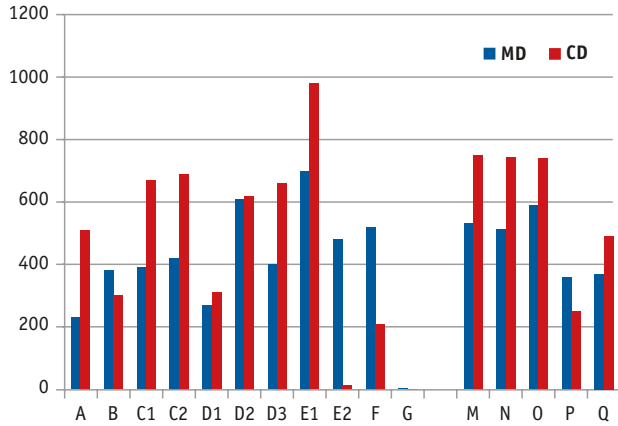


Abbildung 3: Bruchdehnung [%]

Diese Folien können dickenreduziert dort eingesetzt werden, wo heute einfache Standard-PE-Folien verwendet werden. Die gleichen Steigerungsraten gelten auch für die Durchstoßfestigkeiten.

PBAT/PLA-Copolyester und auch reines PBS (C1, D3, E1, F) bieten vielfach hohe Zugfestigkeiten an, die jedoch von hohen Werten für die Bruchdehnung und geringem E-Modul begleitet werden. Diese Folien zeigen ein entsprechend weiches Verhalten, was den Einsatzbereich einschränkt.

Übertrifft die in Längsrichtung (MD) festgestellte Bruchdehnung die Bruchdehnung in Querrichtung (CD), spricht dies für die PLA-typische geringe Weiterreißfestigkeit, was jedoch bekannterweise auch bei HDPE (Folie B) zu erkennen ist.

### Zusammenfassung

Biokunststoffe lassen sich problemlos zu Blasfolien verarbeiten, die sinnvolle Anwendungsgebiete bieten. Die erzielbaren Folieneigenschaften decken einen weiten Bereich ab.

Dieser reicht jedoch nicht an anspruchsvolle Anwendungen mit beispielsweise hohen Anforderungen an die Folienfestigkeiten heran. Dort werden heute PE-Abmischungen unter Einsatz von LLDPE oder mLLDPE verwendet.

Durch die Kombination von Biomaterialien, vor allem mittels eines geeigneten 3-Schichtaufbau, lassen sich jedoch die Folienfestigkeiten in deutlichem Umfang erhöhen, ohne dass dabei die Dehnfähigkeit oder der E-Modul der Folien den gebrauchstüblichen Bereich verlassen. Auf diesem Wege werden die derzeitigen Anwendungsgebiete für Biofolien erweitert, auch wenn es bis zu den ganz hohen Festigkeiten noch Entwicklungsbedarf gibt.

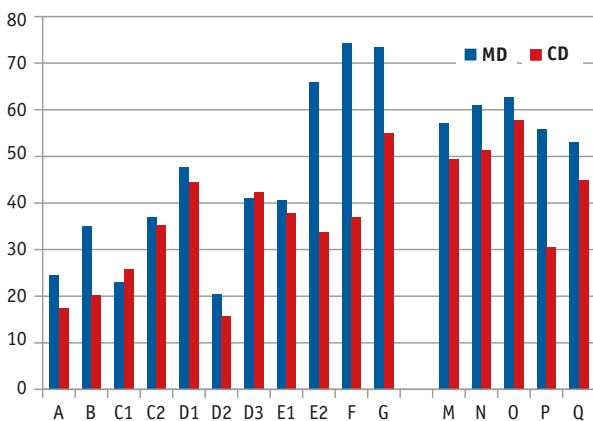


Abbildung 2: Maximale Zugfestigkeit [MPa]

# Faserherstellung im Schmelzspinnprozess

– ist das mit Abstand am häufigsten genutzte Verfahren, um Synthefasern, wie sie in der Bekleidungs-, Filtrations- oder Automobilindustrie zu finden sind, zu erzeugen. Mit knapp 60 % dominieren die aus fossilen Rohstoffen hergestellten Synthefasern deutlich den weltweiten Fasermarkt. Die Rolle der biobasierten und teilbiobasierten Alternativen nimmt aufgrund ihrer Nachhaltigkeit und dem wachsenden ökologischen Bewusstsein allerdings kontinuierlich zu. Biobasierte und teilbiobasierte Thermoplaste lassen sich auf konventionellen Industrieanlagen gut verarbeiten und bieten sich mit ihrem guten Eigenschaftsprofil für zahlreiche Anwendungen in der Textil- oder Möbelindustrie an.

## Materialien

Die in Tabelle 1 aufgeführten Biokunststoffe wurden im Projektrahmen auf einer industriennahen Schmelzspinnanlage der Firma „Fourné Polymertechnik GmbH“ verarbeitet und hinsichtlich ihrer Verspinnbarkeit und den resultierenden mechanischen Eigenschaften untersucht.

**Tabelle 1: Übersicht der im Schmelzspinnprozess untersuchten Materialien**

Materialklasse	Hersteller	Typ
PLA	NatureWorks	Ingeo 6201D
PLA	NatureWorks	Ingeo 6400D
PA 11	Arkema	Rilsan BMNO TL
PA 4.10	DSM	EcoPaXX Q170E



Abbildung 2: Fourné-Schmelzspinnanlage

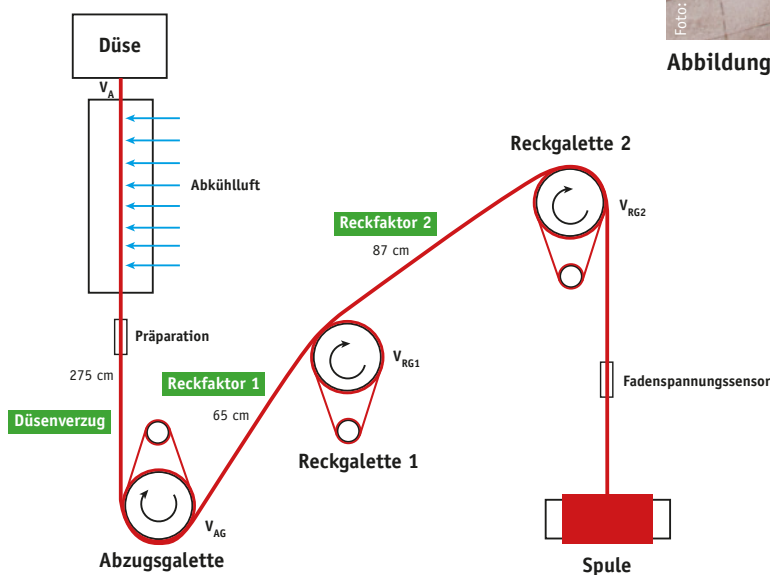


Abbildung 1: Filamentgarnverlauf des Verspinnprozesses

## Verarbeitungsverhalten

Sämtliche untersuchten Materialien zeigen gute Extrusions-eigenschaften und ermöglichen einen gleichmäßigen und kontinuierlichen Förderprozess. Mit Fördermengen von bis zu 3 kg/h und Galettengeschwindigkeiten von bis zu 1800 m/min konnten mit diversen Düsengeometrien (32–120 Loch) Verarbeitungsfenster identifiziert werden, die einen stabilen Filamentgarnherstellungsprozess zulassen.

Um eine stabile Prozessführung zu gewährleisten, sollte das Granulat im Vorfeld der Verarbeitung bis zu einem Feuchtegehalt von 0,01–0,1 % getrocknet werden (24 h bei 50–120 °C/ Vakuumtrockenschrank). Insbesondere die Polyamide zeigen eine starke Abhängigkeit der Viskosität vom Feuchtegehalt. Bei sehr trockenen Granulaten (~ 0,01–0,03 %) ist es daher empfehlenswert, den Spinnprozess in höheren Verarbeitungstemperaturbereichen durchzuführen, um der Viskositätszunahme entgegenzuwirken. Um gleichmäßige mechanische Eigenschaften der Filamente zu realisieren, sollte das Material daher vor dem Verspinnen auf annähernd den gleichen Ausgangsfeuchtegehalt gebracht werden. Eine Abnahme der Viskosität durch erhöhte Temperatur oder höheren Feuchtegehalt führt bei ansonsten konstant gehaltenen Prozessparametern zur Änderung der Filamenteigenschaften und damit zur Uneinheitlichkeit des erzeugten Garnes. Dies trägt in der Regel zur Erhöhung der Bruchdehnung und einer Änderung der Reißfestigkeit sowie des E-Moduls bei.

Eine weitere Schwierigkeit im Spinnprozess von Polyamiden stellt die elektrostatische Aufladung der Filamente dar. Der daraus resultierenden destabilisierenden Aufspreizung der Filamentbündel auf den fadenführenden Elementen kann mit einer geeigneten Spinnpräparation ohne großen technischen Aufwand entgegengewirkt werden. Das Verstrecken der Filamente auf Reckgaletten sollte für sämtliche Materialien oberhalb der Glasübergangstemperatur stattfinden (siehe Tabelle 1). Eine Abnahme der Fadenspannungen dient dabei einerseits der Stabilisierung des Verstreckprozesses, ermöglicht andererseits höhere Reckgrade und führt letztendlich zur Verbesserung mechanischer Eigenschaften.

Um dem thermischen Abbau von PLA entgegenzuwirken, ist es empfehlenswert, die Extrusionsgeschwindigkeiten und Fördermengen möglichst hoch anzusetzen. Die guten Fließ-eigenschaften der Schmelze lassen dies ohne Weiteres zu. Alternativ könnte hierzu auch eine niedrigere Verarbeitungstemperatur angesteuert werden (215–220 °C).

**Tabelle 2: Temperaturempfehlungen für die Verarbeitung (Methode: DSC/Prüfgerät: Perkin Elmer DSC 7)**

Typ	T <sub>g</sub> [°C]	T <sub>s</sub> [°C]	Empfehlung T <sub>Verarbeitung</sub> [°C]
Ingeo 6201D	55	168	230–240
Ingeo 6400D	55	171	230–240
Rilsan BMNO TL	45	192	230–240
EcoPaXX Q170E	60	248	280–290

## Mechanische Eigenschaften des Filamentgarns

Mit den anlagenspezifischen Dimensionen (2 m Abstand zwischen Düse und Abzugsgalette) konnten folgende Gesamtverstreckungen der extrudierten Filamente erzielt werden: Faktor 330 für Ingeo PLA 6400D, Faktor 530 für Ingeo PLA 6201D, Faktor 400 für Rilsan PA 11 und Faktor 450 für EcoPaxx PA 4.10. Die größeren Dimensionen der in der Industrie zur Filamentgarnproduktion eingesetzten Anlagen würden diese Werte sicherlich übertreffen und eine weitere Optimierung der mechanischen Eigenschaften ermöglichen.

Die erzielten mechanischen Eigenschaften der Einzelfilamente sind in Tabelle 3 ausgeführt.

**Tabelle 3: Erzielte mechanische Eigenschaften der Einzelfilamente (Methode: Zugversuch)**

Typ	Reißfestigkeit [cN/tex]	E-Modul [cN/tex]	Bruchdehnung [%]	Titer [dtex]
Rilsan PA 11	≤ 52	≤ 576	≥ 27	≥ 0,6
EcoPaxx PA 4.10	≤ 44	≤ 301	≥ 36	≥ 0,9
PLA Ingeo 6201D	≤ 28	≤ 465	≥ 34	≥ 0,8
PLA Ingeo 6400D	≤ 43	≤ 624	≥ 29	≥ 1,5

## Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die biobasierten bzw. teilbiobasierten Polyamide bezüglich der Verarbeitung und den resultierenden mechanischen Eigenschaften nahezu gleichwertige Alternativen zu den gängigen Spinn-typen von PA 6 und PA 6.6 darstellen. Bei den auf Milchsäure basierten Polyestern erreicht das Eigenschaftsprofil Kennwerte, welche den Einsatz im textilen Bereich erlauben. Gleichzeitig sind diese Kennwerte sowie die thermische Beständigkeit von PLA-Fasern gegenwärtig zu gering, um in technischen Applikationen Einsatz zu finden. In Anbetracht der vorliegenden Bioabbaubarkeit von PLA sowie den daraus resultierenden Vorteilen für die Umwelt ist eine optimistische Prognose für die Zukunft dieser Materialklasse in textilen Anwendungen realistisch.

# Verbindungstechnik

– an dieser Stelle geht es um das Schweißen und Kleben von Kunststoffen. Biokunststoffe finden ihre Verwendung in erster Linie in der Verpackungsindustrie, dem Garten- und Landschaftsbau und der Medizintechnik. Ihre Anwendungsvielfalt und ihr Marktanteil wachsen jedoch zunehmend. Sie werden auch immer häufiger als beständige Polymerwerkstoffe für technische Anwendungen nachgefragt. Um die Biokunststoffe erfolgreich sowohl als Verpackungsmaterialien als auch als technische Werkstoffe anwenden zu können, müssen diese Werkstoffe u. a. über eine gute Schweiß- und Klebbarkeit verfügen.

## Materialien

Bei den im Kapitel Verbindungstechnik untersuchten Biokunststoffen handelt es sich um kommerziell erhältliche Biokunststoffe mit entsprechender Marktrelevanz. Die untersuchten Materialien sind in Tabelle 1 aufgeführt.

**Tabelle 1: Übersicht der im Abschnitt Verbindungstechnik untersuchten Materialien**

Materialklasse	Hersteller	Typ
PLA	NatureWorks	Ingeo 3251D
PLA	NatureWorks	Ingeo 4032D
PLA	NatureWorks	Ingeo 4043D
PLA	NatureWorks	Ingeo 4060D
PLA	Simona	SimoGreen natur
PLA	Simona	SimoGreen grün
PHB	Metabolix	Mirel P1004

## Schweißen

Kunststoffe können generell durch unterschiedliche Schweißverfahren miteinander verbunden werden, wie z. B. durch Wärmekontakt-, Ultraschall-, Hochfrequenz-, Infrarotschweißen etc. Die Verfahrensauswahl wird in den meisten Fällen durch die zu schweißenden Materialien und die entstehenden Kosten vorgegeben, da jedes Verfahren werkstoff- und anwendungsspezifische Vor- und Nachteile hat.

Eine Vielzahl von Einflussfaktoren kann die Schweißnahtqualität beeinflussen. In erster Linie sind hier die Materialeigenschaften wie z. B. E-Modul und Schmelztemperatur aber auch die Schweißparameter zu nennen. Für ein einwandfreies Schweißen liegen für die meisten petrochemisch basierten Kunststoffe vom „Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.“, DVS, Empfehlungen vor. Für Biokunststoffe fehlen solche Empfehlungen jedoch komplett. Deshalb sind in den nachfolgenden Tabellen grundlegende Schweißparameter für ausgewählte Biokunststoffe den Tabellen 2–6 aufgeführt.

**Tabelle 2: Heizelementstumpfschweißen**

Heizelementstumpfschweißen						
Material*	Heizelementtemperatur [°C]	Angleichzeit [s]	Angleichdruck [MPa]	Anwärmzeit [s]	Fügedruck [MPa]	Abkühlzeit [s]
SimoGreen grün	190...250	2	0,05	15...50	0,05	100
Ingeo 3251D	190...250	2	0,25	10...50	0,25	100

\* Untersuchte Probengeometrie: 170 x 15 x 5 mm<sup>3</sup> (Parallelzugstab)

**Tabelle 3: Wärmekontaktschweißen**

Wärmekontaktschweißen			
Material*	Schweißzeit [s]	Schweißdruck [MPa]	Heizelementtemperatur [°C]
Ingeo 4060D	0,1...0,9	1,0...3,5	95...140
Ingeo 4032D	0,1...0,9	1,0...3,5	95...150
Ingeo 4043D	0,1...0,9	1,0...3,5	110...150

\* Untersuchte Probengeometrie: Folie mit einer Dicke von 50 µm

**Tabelle 4: Ultraschallschweißen**

Ultraschallschweißen			
Material*	Schweißzeit [s]	Schweißkraft [N/mm]	Amplitude [µm]
Ingeo 4060D	0,1...0,5	1,2...1,6	15,8...22,1
Ingeo 4032D	0,1...0,5	0,6...1,6	15,8...28,4
Ingeo 4043D	0,1...0,7	1,2...1,6	15,8...25,3

\* Untersuchte Probengeometrie: Folie mit einer Dicke von 50 µm

**Tabelle 5: Hochfrequenzschweißen**

Hochfrequenzschweißen			
Material*	Schweißzeit [s]	Schweißdruck [N/mm]	Spannung an der Elektrode [V]
Ingeo 4060D	0,4...0,9	0,8...3,2	700...1.200
Ingeo 4032D	0,4...0,9	0,8...3,2	700...1.100
Ingeo 4043D	0,4...0,9	0,8...3,2	700...1.100

\* Untersuchte Probengeometrie: Folie mit einer Dicke von 50 µm

**Tabelle 6: Infrarotschweißen**

Infrarotschweißen				
Material*	Leistung [%]	Anwärmzeit [s]	Abkühlzeit [s]	Fügedruck [MPa]
SimoGreen grün	50...80	25...60	30	0,05
Ingeo 3251D	50...70	40...60	30	0,80

\* Untersuchte Probengeometrie: Probekörper Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2



## Kleben

Die Oberfläche der Biokunststoffe PLA und PHB zeigt bedingt durch ihre relativ hohe Polarität grundsätzlich eine gute Benetzung mit Farben, Lacken und Klebstoffen. Durch die Auswahl des richtigen Klebstoffs bzw. Lacks können eine gute Adhäsion und eine entsprechend hohe Verbundfestigkeit erreicht werden.

Ist der Anwender an eine bestimmte Farbe oder einen bestimmten Klebstoff gebunden, kann die Oberfläche der Biokunststoffe gezielt modifiziert werden. So lassen sich die Biokunststoffe PLA und PHB sehr gut mit herkömmlichen Oberflächenvorbehandlungsanlagen wie z. B. Corona, Atmosphärendruck- oder Niederdruckplasma aktivieren. Hierdurch können die resultierende Adhäsion und die Haftung zwischen dem Biokunststoff und dem Klebstoff oder der Farbe deutlich gesteigert werden.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden vier verschiedene Biokunststoffe (drei verschiedene PLA-Typen und ein PHB) auf ihre Klebbarkeit hin untersucht. Unter Berücksichtigung der relativ hohen Festigkeit der eingesetzten PLA-Kunststoffe (Ingeo 3251D, SimoGreen natur sowie SimoGreen grün) sind prinzipiell strukturelle Klebstoffe in der Anwendung als vorteilhaft anzusehen. Mirel P1004 besitzt hingegen eine etwas geringere Zugfestigkeit und höheres Dehnvermögen. Für eine klebtechnische Anwendung mit Mirel P1004 wäre daher ein flexibler Klebstoff zu bevorzugen.

Die klebtechnischen Prozesse in der Kunststofftechnik beinhalten im Wesentlichen vier Verarbeitungsschritte:

- Vorbereitung (reinigen, passend machen usw.)
- Vorbehandlung (Einsatz von spezifischen Vorbehandlungsmethoden oder Primern)
- Kleben (Auftragen des Klebstoffes sowie Fügen)
- Aushärten

Zu Beginn wurden daher die eingesetzten Materialien auf die Verträglichkeit mit typischen Reinigungsmitteln geprüft. Dabei stellte sich heraus, dass Reinigungsmittel mit Keton-Gruppen wie beispielsweise Methylethylketon oder Aceton eine Änderung an den Substratoberflächen durch Löseeffekte hervorrufen können. Diese sind daher für eine Reinigung als kritisch anzusehen. Die typischen Kunststoffreinigungsmittel auf Alkohol-Basis zeigten hingegen eine gute Eignung zum Entfetten der zu klebenden Oberfläche und sollten für diese Aufgabe eingesetzt werden.

Die verwendeten Klebstoffe, die auf Grundlage der Anforderungen sowie der gemessenen Oberflächenenergien ausgewählt wurden, konnten ohne Oberflächenvorbehandlung mit unterschiedlichem Erfolg verwendet werden. So haben die durchgeführten Untersuchungen gezeigt, dass z. B. die eingesetzten Biokunststoffe sich mit zweikomponentigen raumtemperaturhärtenden Polyurethan-Klebstoffen ohne Vorbehandlung mit relativ hohen Festigkeiten (mindestens 5,5 MPa) kleben lassen. Für verwendete zweikomponentige raumhärtende Methacrylat-Klebstoffe lagen die ermittelten Festigkeiten sogar im Bereich von 8,3 MPa. Diese hohen Festigkeiten konnten auch mit entsprechenden Bruchbildern (Kohäsions- oder Substratbruch nach DIN EN ISO 10365) belegt werden.

Die eingesetzten physikalischen Oberflächenvorbehandlungsmethoden (Atmosphärendruckplasma sowie Niederdruckplasma) haben zu einer deutlichen Steigerung der Oberflächenenergie sowie einer Verbesserung der Klebefestigkeit für zweikomponentige raumtemperaturhärtende Epoxy-Klebstoffe (mindestens 5,3 MPa für PLA und 4,3 MPa für PHB) geführt. Dabei sind die Probekörper im Substrat gebrochen. Der Einsatz des Atmosphärendruckplasmas führte außerdem zur deutlichen Verbesserung der mechanischen Zugscherfestigkeit der PHB-Klebung mit silanmodifizierten Polymerklebstoffen (MS-Polymer) von 0,6 auf 1,7 MPa. Hierbei konnte ein kohäsives Bruchbild beobachtet werden.

Das Anschleifen (als Methode zur Verbesserung der mechanischen Adhäsion) zeigte allerdings keine eindeutige Verbesserung der mechanischen Eigenschaften im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen. Diese Methode kann daher als nicht empfehlenswert betrachtet werden. Für eine eindeutige Aussage sollen an dieser Stelle weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

## Zusammenfassung

Die am Markt verfügbaren Biokunststoffe lassen sich hervorragend mit herkömmlichen Schweißverfahren wie u. a. Wärmekontakt-, Ultraschall-, Hochfrequenz-, Heizelementstumpf- und Infrarotschweißen stoffschlüssig verbinden. Erfreulicherweise müssen an Schweißmaschinen keine speziellen konstruktiven Änderungen vorgenommen werden. Jedoch ist zu beachten, dass jeder Werkstoff sein eigenes Verarbeitungsprozessfenster aufweist. Werden Biokunststoffe mit für den Werkstoff geeigneten Schweißbedingungen verarbeitet, führt dies zu einer zielführenden Verbindung (ein Kurzzeit-Schweißfaktor von 1,0 kann ohne Weiteres erreicht werden).

Zur Vorbereitung der Klebefläche der Biokunststoffe PLA und PHB sollten alkoholische Reinigungsmittel verwendet werden, um Löseeffekte zu vermeiden. Das Kleben von PLA-Werkstoffen ohne Oberflächenvorbehandlung kann mit Polyurethan- sowie Methylmethacrylat-Klebstoffen erfolgen. Beim Einsatz von Epoxid-Klebstoffen sollte die Substratoberfläche mit physikalischen Oberflächenvorbehandlungsmethoden (wie z. B. Corona oder Plasma) vorbereitet werden. Für PHB können aufgrund der Werkstoffeigenschaften die flexiblen Klebstoffe (1K-Polyurethane oder MS-Polymere) ebenso in Kombination mit physikalischen Oberflächenvorbehandlungsmethoden eingesetzt werden. In jedem Fall sollten nach der Klebstoffauswahl statistisch abgesicherte Probeklebung zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften durchgeführt werden, um unerwünschte Effekte wie z. B. „kissing bonds“ oder „weak layers“ weitestgehend zu vermeiden.

Weiterführende und detaillierte Ergebnisse finden Sie in der Online-Datenbank dieses Verbundprojektes unter:  
**[www.biokunststoffe-verarbeiten.de](http://www.biokunststoffe-verarbeiten.de)**

## Profil-, Rohr- und Coextrusion

– bezeichnet die kontinuierliche Herstellung von Endlosprodukten mittels Extrudern. Durch Extrusion hergestellte Halbzeuge wie Rohre oder Profile stellen dank ihrem erheblichen Anteil an Kunststoffanwendungen einen Massenmarkt dar und sind in Technik, Bauwesen usw. stark verbreitet. Im Extruder wird der Kunststoff aufgeschmolzen und unter Druck durch ein formgebendes Werkzeug gedrückt. Grund für die geringe Marktdurchdringung von Biopolymeren ist unter anderem die zu geringe Viskosität und Schmelzfestigkeit. Im Rahmen des Projekts wurden die relevanten Einflussfaktoren für Biokunststoffe untersucht und Modifizierungskonzepte erarbeitet, um Biopolymere extrusionsfähig zu machen.

### Materialien

Bei den im Kapitel Extudieren untersuchten Biokunststoffen handelt es sich um kommerziell erhältliche Biokunststoffe mit entsprechender Marktrelevanz. Die untersuchten Materialien sind in Tabelle 1 aufgeführt.

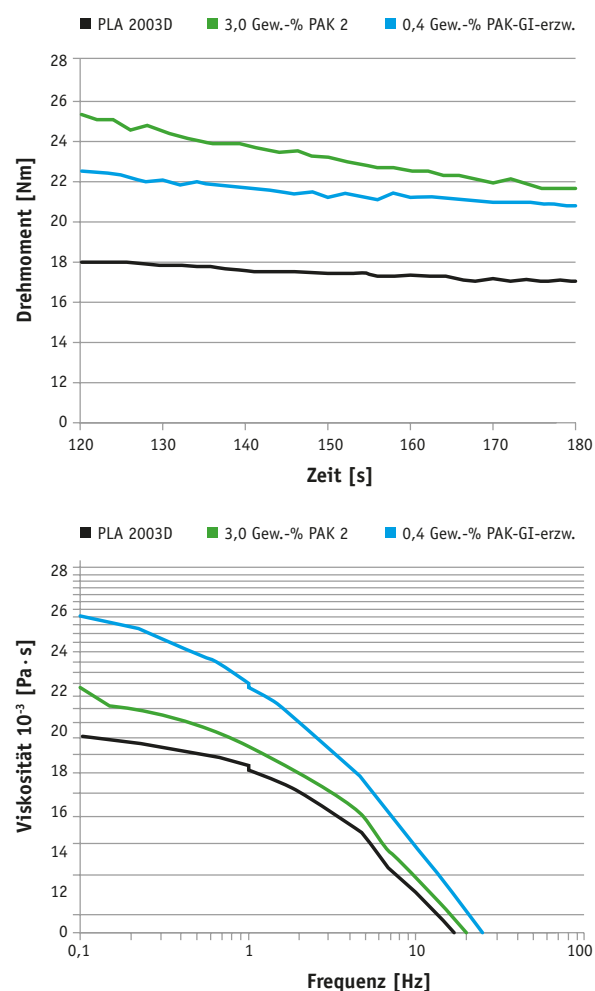
**Tabelle 1: Übersicht der im Abschnitt Profil-, Rohr- und Coextrusion untersuchten Materialien**

Materialklasse	Hersteller	Typ
PLA	NatureWorks	Ingeo 2003D
PLA	NatureWorks	Ingeo 8052D
PLA	NatureWorks	Ingeo 4043D
PLA	NatureWorks	Ingeo 7001D
PLA+Vinnex	NatureWorks	Ingeo 2003D + Vinnex 10, 20, 30 %
PBS	Showa Denko	Bionolle 1001MD
PBSA	Showa Denko	Bionolle 3001MD
PLA+PBA+Vinnex		
Green PE	Braskem	SHC 7260
Green PE	Braskem	SGD 4960

Im Bereich der extrudierten Kunststoffprofile sucht man vermehrt nach biobasierten Alternativen, da die verfügbaren Ausgangsstoffe nur selten den Anforderungen entsprechen. Biokunststoffe werden deshalb überwiegend zu Verpackungsmaterialien verarbeitet, wie beispielsweise PLA im Spritzgieß- oder Folienextrusionsverfahren. Die Profilextrusion selbst steckt hier noch in den Kinderschuhen und dementsprechend sind am Markt nur bedingt geeignete Typen für diesen Prozess erhältlich. Erste Versuche zur Monoextrusion von PLA zu Profilen schlugen fehl. Grund dafür waren die zu geringen Fließeigenschaften als auch die zu geringe Schmelzestabilität. Für die Etablierung von Biokunststoffen zur Herstellung von Halbzeugen war es deshalb zum Teil notwendig, mittels gezielter Modifikation den negativen Trends entgegenzuwirken und somit die Kunststoffe für die Extrusion zu modifizieren.

### Modifikation und Extrusion

Mit Hilfe chemischer und physikalischer Modifikationen konnten die Schmelzfestigkeit und Viskosität von handelsüblichen PLA-Typen signifikant um einen Faktor von bis zu 25 % erhöht werden.



**Abbildung 1: Rheologische Kurven von chemisch und physikalisch modifiziertem PLA**

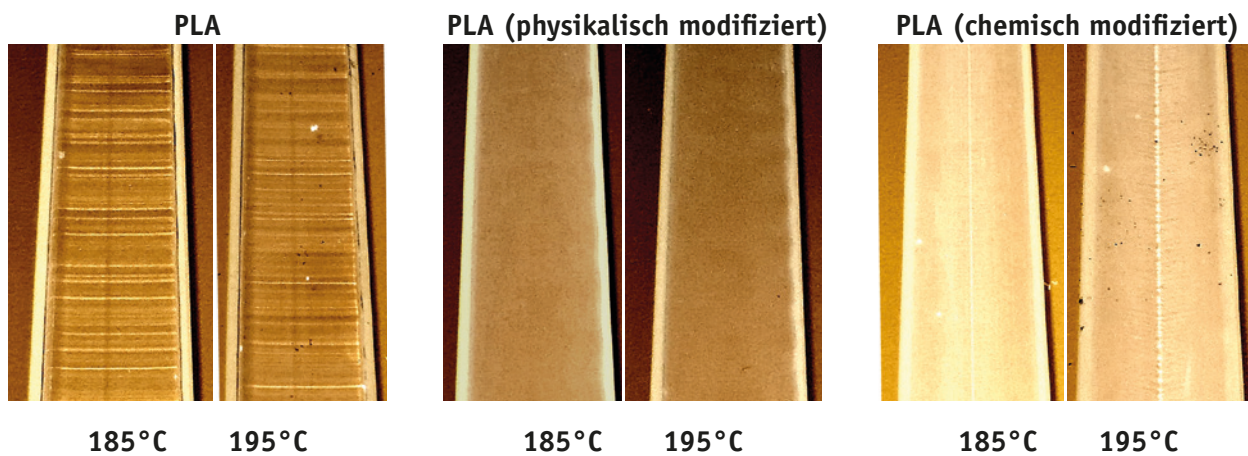


Abbildung 2: Extrudierte Profile von unmodifiziertem und modifiziertem PLA

Mit diesen modifizierten Materialien und einer schonenden Prozessführung konnten schließlich Profile in guter Qualität hergestellt werden.

Neben dem auf diese Weise modifizierten PLA konnten weitere unterschiedliche kommerziell verfügbare Typen wie NatureWorks Ingeo 2003D, 4043D, 7001D extrudiert werden, wobei die Schmelzestabilität nicht gegeben war und es zu minderer Rohrqualität kam. Vielversprechender war die Modifikation mit dem Bindemittel Vinnex, welches in einer unterschiedlichen prozentuellen Zugabe gute Resultate lieferte.

Neben dem am weitesten verbreiteten Werkstoff PLA konnten auch weitere kommerziell auf dem Markt vorhandene Biokunststoffen getestet werden. Dabei wurden PBS (Bionolle 1001MD), PBSA (Bionolle 3001MD) und zwei Typen Green PE (SHC 7260, SGD 4960) geprüft, mit denen Rohre in geeigneter Qualität hergestellt werden.

### Materialtests

Die Qualität der Materialien konnte mit den gängigsten Analysemethoden bestätigt werden. Dabei wurden die Rohre mittels DSC, Platte-Platte-Rheometer und MFI analysiert.

Im Bereich der mechanischen Prüfungen wurden die Rohre Zug- und Biegebeanspruchungen unterzogen als auch die Schlagzähigkeit HDT (A/B) ermittelt. Die Ergebnisse der Testreihen können in der Datenbank eingesehen werden.

### Coextrusion

Die Schnellebigkeit und die hohen Ansprüche der Rohrbranche machten es zusätzlich nötig, nicht nur die Materialien im Bereich der Monoextrusion zu testen. Intelligente Rohrsysteme sind Schichtverbunde, bei denen nicht nur ein Werkstofftyp zum Einsatz kommt. Vor diesem Hintergrund wurde ein 3-Schicht-Rohrkopf gefertigt, mit welchem die Coextrusion von drei Schichten möglich ist. Das Werkzeug wurde fließtechnisch modifiziert, um eine schonende Schmelzuführung zu gewährleisten.

### Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes konnten die Potentiale von Biokunststoffen im Bereich der Extrusion aufgezeigt werden. Mit Hilfe von optimierten Kunststoffen und Prozessen ist es möglich, Biokunststoffe in diesem Marktsegment zu etablieren. Zwar ist die Anzahl kommerziell verfügbarer Extrusionstypen gering, eine Optimierung und Einstellung der notwendigen Eigenschaften ist analog zu konventionellen Kunststoffen aber möglich.

Weiterführende und detaillierte Ergebnisse finden Sie in der Online-Datenbank dieses Verbundprojektes unter:  
[www.biokunststoffe-verarbeiten.de](http://www.biokunststoffe-verarbeiten.de)

## Spritzblasen und Spritzstreckblasen

– wird unter dem Überbegriff „Spritzblasformen“ für die wirtschaftliche Herstellung von Hohlkörpern und Weithalsbehältern mit passgenauem Mündungs-/Dichtungsbereich und einem Volumen von 2 ml bis 1 l eingesetzt. Oft vorzufindende Anwendungen sind Behältnisse im Kosmetik- und Hygienebereich (Shampooflaschen, Cremedosen) sowie kleine Fläschchen für flüssige oder rieselfähige Arzneimittel.

Das Spritzblasen ist ein effizienter Verarbeitungsprozess, bei dem zunächst ein Preform spritzgegossen und anschließend unter Nutzung der Restwärme zum Endprodukt umgeformt wird. Eine klassische Spritzblasmaschine besteht aus drei Stationen (siehe Abbildung 1). In der ersten Station wird der Preform hergestellt und bis in den thermoelastischen Bereich des jeweiligen Kunststoffes abgekühlt. Nach dem Öffnen der Kavität verbleibt der Spritzling auf dem sog. Transport- bzw. Blasdorn und wird in die zweite Station, die Blasform transferiert. In der Blasform findet mithilfe von Pressluft das eigentliche Umformen zum Fertigteil statt. Der dritten Station kann nach dem Erreichen der Entformungstemperatur das fertige Blasformbauteil entnommen werden.

Aktuell werden in der Spritzblastechnik neben den Standardkunststoffen (PE, PP etc.) auch technische Kunststoffe (COC, PC oder COP) verarbeitet, deren Verarbeitbarkeit allerdings aufgrund unzureichender Viskosität beim Extrusionsblasen begrenzt ist. Erfahrungsgemäß sind die Extrusions- bzw. Thermofortypen, die in der Verpackungsindustrie eingesetzt werden, für das Spritzblasen besonders gut geeignet. Diese Materialien weisen in der Regel ein gutes dehrheologisches Verhalten während des Umformvorganges auf, was für das Erreichen einer konstanten Wanddickenverteilung ausschlaggebend ist. Aufgrund einer derzeit noch geringen Verfügbarkeit von spritzblasfähigen Biokunststofftypen, wird auf entsprechende Extrusions- oder Extrusionsblasformtypen zurückgegriffen. Eine Übersicht der für das Spritzblasen geeigneten Biokunststoffe ist in Tabelle 1 angegeben.

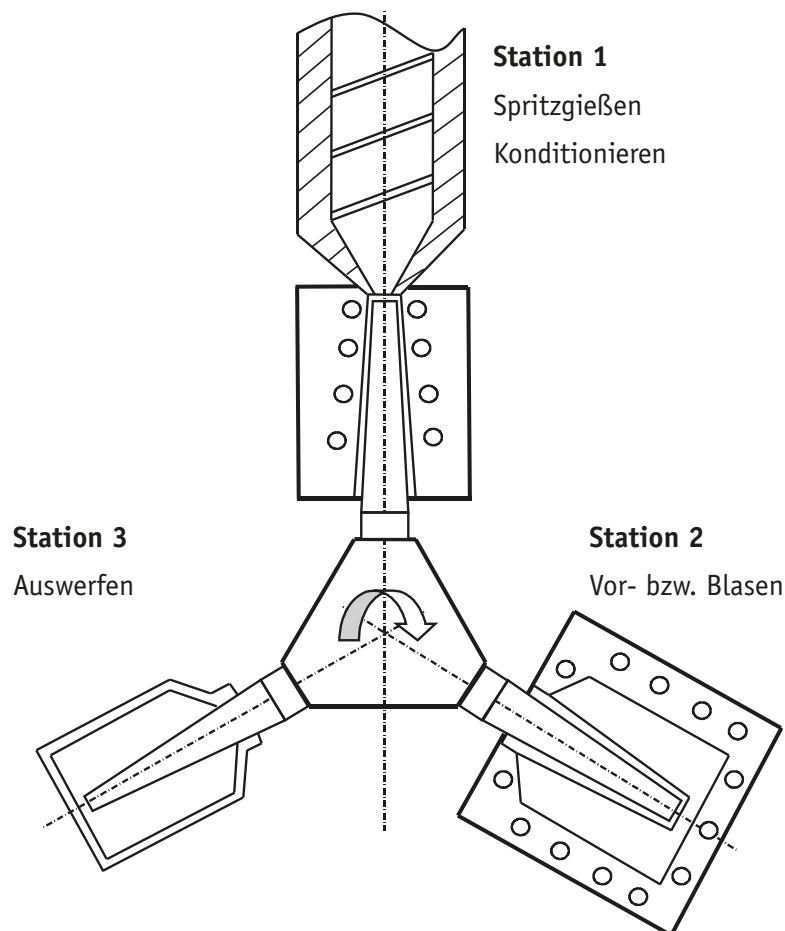


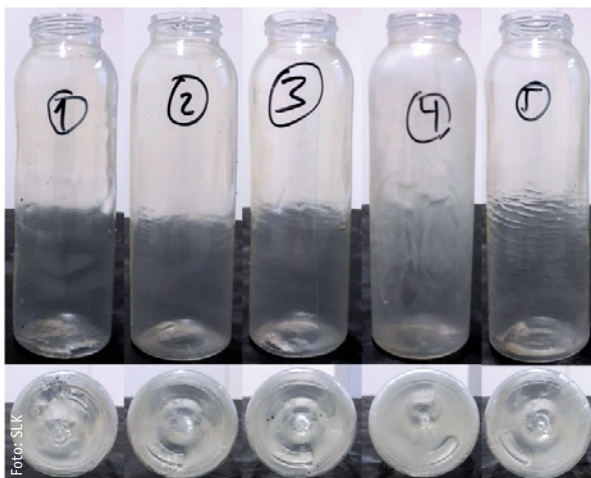
Abbildung 1: Spritzblasformen



**Tabelle 1: Untersuchte und für das Spritzblasen geeignete Biokunststoffe**

Polymer	Hersteller	Typ	P [g/cm <sup>3</sup> ]	MFI [g/10 min]
HDPE	Braskem	SGF 4960	0,961	0,6 (210 °C, 2,16 kg)
PLA	NatureWorks	Ingeo 7001D	1,23	14,7 (210 °C, 2,16 kg)
PBS	Showa Denko	Bionolle 1001MD	1,26	1,3 (190 °C, 2,16 kg)
PBSA	Showa Denko	Bionolle 3001MD	1,26	3 (190 °C, 2,16 kg)
PLA+PBAT	BASF	Ecovio T2308	1,26	7,8 (190 °C, 2,16 kg)

Die durchgeführten Untersuchungen an zahlreichen Biokunststoffen zeigen, dass nahezu alle für Folien- bzw. Blasfolienextrusion entwickelten Typen im Spritzblasprozess einsetzbar sind. Für ein optimales Ausformen des Preforms zum Hohlkörper sowie eine konstante Wanddickenverteilung im fertigen Erzeugnis sind jedoch optimale Temperaturverhältnisse in der Spritzgießkavität notwendig. Diese können nur durch eine reaktionsschnelle Zonen-Temperierung gewährleistet werden. Dabei sollen die Temperaturen der oberen und der unteren Formhälfte unabhängig voneinander zonenweise einstellbar sein. Bei nicht symmetrischen Hohlkörpern muss entlang des Umfangs gezielt ein Temperaturprofil aufgeprägt werden, um konstante Wanddickenverteilung über den Umfang erreichen zu können.



**Abbildung 2: Spritzgeblasene Nuckelflaschen aus Biokunststoff (v. l. n. r.: Bio-PE, PLA, PBS)**

Zusätzliche Schwierigkeiten beim Spritzblasen von Biokunststoffen bereitet die vergleichsweise hohe spezifische Wärmekapazität und die niedrige Wärmeleitung von Biokunststoffen, insbesondere der biobasierten Polyester. Der passiv temperierte Transportdorn nimmt im Spritzgießprozess kontinuierlich Wärme auf, gibt jedoch nur einen Teil dieser Wärme im zweiten und dritten Prozessschritt an die hindurchströmenden kalte Blasluft ab. Die verbleibende Wärmedifferenz ermöglicht eine annähernd konstante Dorntemperatur, die jedoch weit höher ist als die Temperatur der Werkzeugaußenwand. Dieser Umstand erschwert die Prozessführung erheblich und spiegelt sich im schwankenden Temperaturprofil des Preforms, einer inhomogenen Wanddickenverteilung sowie langen Prozesszeiten wider.

## Zusammenfassung

Zahlreiche hochviskose und extrusionsfähige Biokunststoffe können im Spritzblasprozess zu Hohlkörpern in guter Qualität verarbeitet werden. Aufgrund der relativ hohen Permeabilitätswerte für Gase (CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>), Aromen und Feuchtigkeit sowie der Unbeständigkeit gegenüber vielen organischen Lösungsmitteln (Ethanol, Di- oder Trichlormethan) ist der Einsatzbereich für biobasierte Polyester und deren Compounds jedoch stark eingeschränkt. Aktuelle Entwicklungen beim Spritzblasen von Biokunststoffen gehen deswegen in Richtung mehrschichtiger Kunststoffbehälter. Mit einer dünnen Barrierezwischen- oder -innenschicht aus beispielsweise biobasiertem Polyamid 11 und Deckschichten aus weich- bzw. schlagzähmodifiziertem PLA kann ohne haftvermittelnden Schichten ein nahezu vollständig biobasiertes und transparentes Behältnis umgesetzt werden, welches das Potenzial zur Substitution von Flaschen aus PC oder COC besitzen könnte. Der Flascheninhalt kann dadurch vor UV-Strahlung, Wasserdampf, O<sub>2</sub> oder CO<sub>2</sub> sicher geschützt und die Leistungsfähigkeit zusätzlich verbessert werden. Desweiteren kann die neue Mehrschichttechnik für Biokunststoffe perspektivisch den Zugang zu den pharmazeutischen und kosmetischen Anwendungen eröffnen, bei denen chemische Beständigkeit sowie Sterilisierbarkeit mit heißem Dampf, energiereicher Strahlung oder Ethylenoxid unabdingbar sind.

# Kunststoff-Fließpressen

– dient der Herstellung langfaserverstärkter Thermoplasten.

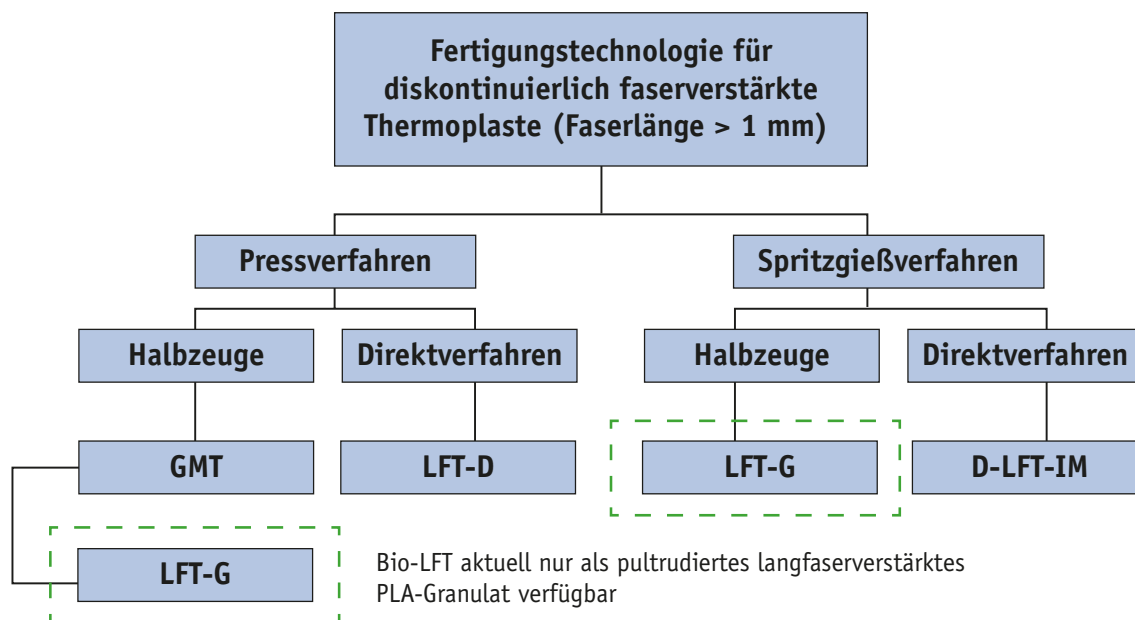


Abbildung 1: Gliederung der Fertigungstechnologien für langfaserverstärkte Thermoplaste

Faserverstärkte Thermoplaste sind in vielen industriellen Bereichen und Anwendungen zu finden und gewinnen im Zusammenhang mit der Forderung nach Leichtbau und beanspruchungsgerechter Bauteilgestaltung zunehmend an Bedeutung. Besondere Bedeutung kommt hierbei den langfaserverstärkten Thermoplasten zu, da diese, wie kaum eine andere Werkstoffklasse, einstellbare Materialeigenschaften sowie Gestaltungsfreiheit ermöglichen. Sie nehmen heute schon als Leichtbauwerkstoff für semistrukturale Bauteile einen festen Platz in der Automobilindustrie ein. So werden aktuell im Kraftfahrzeugbau großflächige Bauteile wie Instrumententafelträger (Mercedes Benz E-Klasse), Front-End-Träger (Fiat Stilo, Škoda Fabia), Unterbodenelemente (Mercedes Benz A-Klasse) oder Reserveradabdeckungen (VW Touran) aus langglasfaserverstärktem Polypropylen, Polyamid oder ABS hergestellt. PP verdrängt aufgrund des niedrigen Materialpreises, der günstigen Materialeigenschaften sowie den Vorteilen beim Recycling sogar technische Kunststoffe.

Langglasfaserverstärkte thermoplastische Bauteilen können indirekt aus Halbzeugen oder im Direktverfahren hergestellt werden. Zu den halbzeugbasierten thermoplastischen Pressmassen gehören die glasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT) und das vorkonfektionierte Stäbchengranulat (LFT-G). Von besonderem industriellen Interesse sind jedoch die Direktverfahren (LFT-D), wie XRETM-Prozess (Faurecia) oder LFT-D-ILC (Dieffenbacher). Aufgrund des Wegfalls eines zusätzlichen Verarbeitungsschrittes der Halbzeugherstellung sind LFT-D-Prozesse ökonomisch vorteilhafter.

Trotz der Entwicklung der Prozesstechnik hat das LFT-Pressen im Vergleich zum LFT-Spritzgießen zahlreiche Vor- auch Nachteile. Die fließgepressten Bauteile müssen durch einen zusätzlichen Nachbearbeitungsschritt fertiggestellt werden. Durchgangsöffnungen können in der Regel nur durch nachträgliches Ausstanzen realisiert werden. Dabei fallen Produktionsabfälle an, die zusätzliche Materialkosten sowie höheren Recyclingaufwand verursachen. Beim Fließpressen, besonders beim GMT- oder LFT-Direktprozess, können allerdings signifikant höhere Faserlängen realisiert werden. Dies hat neben verbesserter Festigkeit und Schlagzähigkeit positive Auswirkungen auf die Verzugseigenschaften und Dimensionsstabilität sowie verbessertes Kriech- und Ermüdungsverhalten der Bauteile unter Temperaturbeanspruchung. Außerdem fällt das Verhältnis der Bauteilgröße zur Werkzeuginvestition zu Gunsten des Fließpressprozesses aus.

Tabelle 1: Vergleich der Materialeigenschaften der LGF-Thermoplaste

	POLYFORT® FPP LGF 30	BIO-FED PLA LGF 30	Prüfnorm
E-Modul [GPa]	7,5	11,4	ISO 524-1/-2
Zugfestigkeit [MPa]	110	91,7	ISO 524-1/-2
Bruchdehnung [%]	2,6	1,06	ISO 524-1/-2
Charpy-Schlagzähigkeit [kJ/mm <sup>2</sup> ]	60	22,3	ISO 179 / 1 e U
Charpy-Kerbschlagzähigkeit [kJ/mm <sup>2</sup> ]	18	18,7	ISO 179 / 1 e A
HDT/A [°C]	149	60	ISO 75

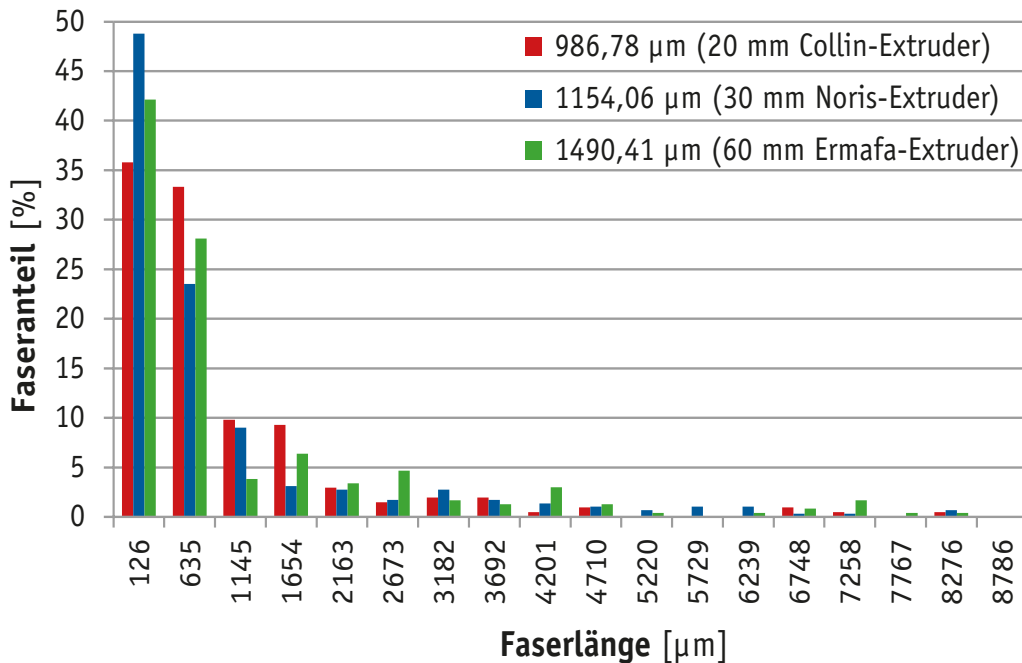


Abbildung 2: Faserlängenverteilung und durchschnittliche Faserlänge in Abhängigkeit des Schneckendurchmessers

Die Entwicklung von Bio-LFT steht aufgrund der nicht vorhandenen Nachfrage, bedingt durch hohe Materialpreise und häufig unzureichende Materialperformance, allerdings noch am Anfang und erfordert im Vergleich zu konventionellen LFTs noch eine Reihe von werkstofflichen und verfahrenstechnischen Entwicklungen. Eines der wenigen verfügbaren biobasierten Produkte ist aktuell das Polylactid (PLA) LGF 30, welches von der Firma BIO-FED GmbH als ummanteltes Stäbchengranulat in 10 mm Länge auf Anfrage angeboten wird. Bei diesem Bio-LFT-G handelt es sich um ein mit 30 Gew.-% LGF verstärktes spritz- und fließpressfähiges PLA. Das optimale Verarbeitungsverfahren für dieses Material ist das Plastifizierpressen. Dabei wird das Granulat in einem Extruder aufgeschmolzen, homogenisiert, anschließend in Form eines Stranges ausgetragen und verpresst. Da bei dieser Art von Granulat das Auflösen von Faserbündeln und das Benetzen von Einzelfasern beim Aufschmelzprozess im Einschneckenextruder stattfindet, sind zur Minimierung von Faserschädigungsmechanismen Extruder mit größeren Schneckendurchmessern ( $D > 60$  mm) zu verwenden. Am stärksten werden die Fasern geschädigt, während die Schmelze das Werkzeug füllt. Durch geeignete Auslegung des Fließpresswerkzeuges lässt sich die Faserkürzung deutlich reduzieren.

### Zusammenfassung

Das Potenzial der biobasierten Kunststoffe ist mit diesem bereits realisierten und exemplarischen Beispiel noch lange nicht ausgeschöpft. Eine Anwendbarkeit von PLA als biobasierter Matrixwerkstoff für konkurrenzfähige fließgepresste LFT-Anwendungen erfordert weitere Tätigkeiten in Forschung und Entwicklung. Untersuchungen zeigen beispielsweise, dass durch eine Zugabe von weiteren kompatiblen Biokunststoffen, insbesondere von Polybutylensuccinat (PBS), die Schlagzähigkeit und die Wärmeformbeständigkeit des Verbundes signifikant gesteigert werden kann, ohne dass das Material maßgeblich an Steifigkeit und Festigkeit verliert. Eine große Rolle in fließgepressten semistrukturellen Anwendungen werden zukünftig jedoch die nicht abbaubaren, biobasierten Polyamide und Bio-PP spielen, da diese ein deutlich breiteres und optimierungsfähigeres Eigenschaftsspektrum besitzen.



**IfBB**

Institut für Biokunststoffe  
und Bioverbundwerkstoffe

**IfBB – Institut für Biokunststoffe  
und Bioverbundwerkstoffe**

Hochschule Hannover  
Heisterbergallee 12  
30453 Hannover

Übergeordnete Projektkoordinierung:  
Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres

Projektleitung: Marco Neudecker  
E-Mail: marco.neudecker@hs-hannover.de  
Tel.: 0511 9296-2232

Technologietransfer und ÖA: Nuse Lack-Ersöz  
E-Mail: nuse.lack@hs-hannover.de  
Tel.: 0511 9296-2278

[www.ifbb-hannover.de](http://www.ifbb-hannover.de)



Das **Kunststoff-Zentrum**

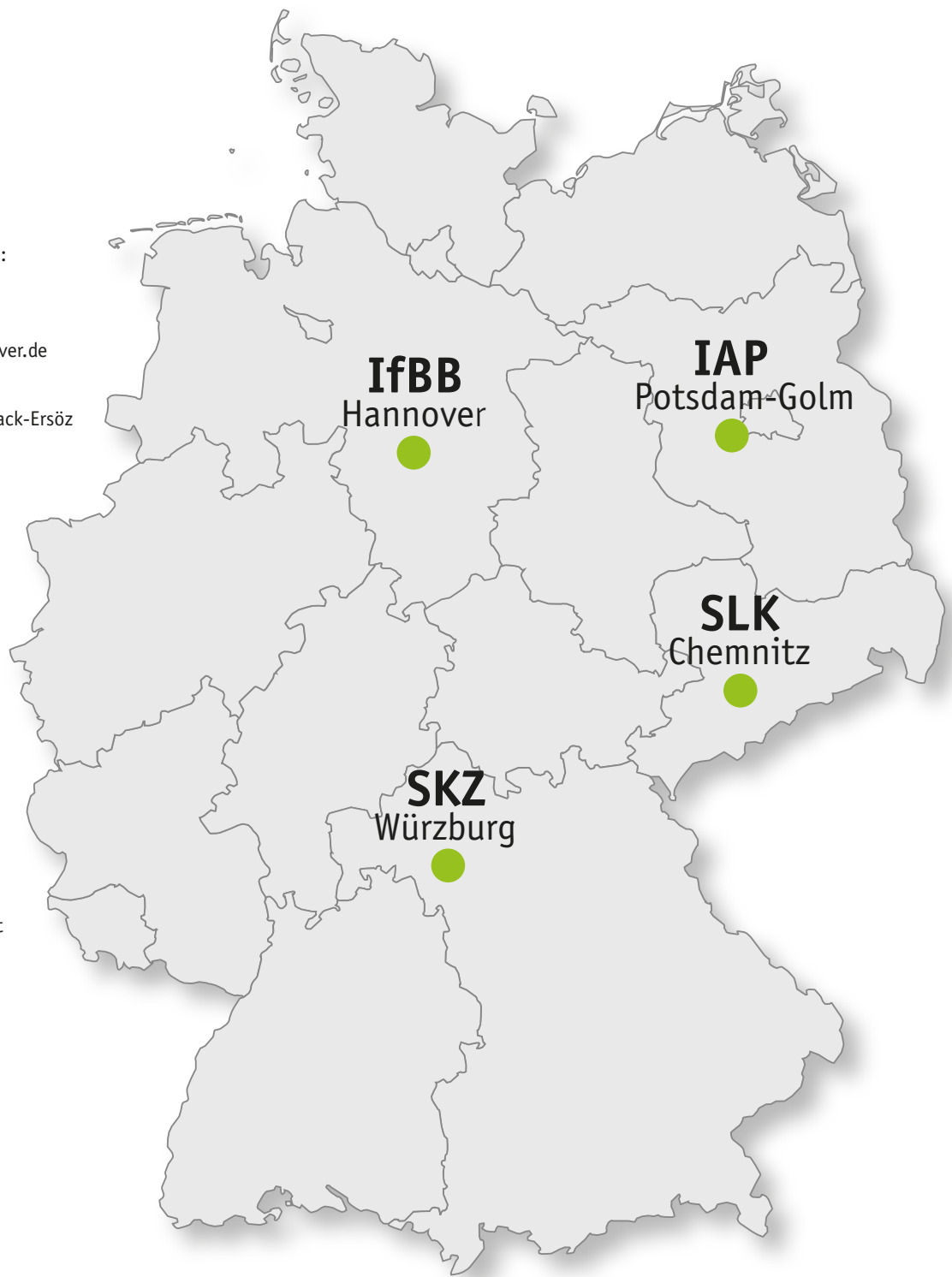
**SKZ – Das Kunststoff-Zentrum**

Friedrich-Bergius-Ring 22  
97076 Würzburg

Projektleitung: Dr. Benjamin Baudrit  
E-Mail: b.baudrit@skz.de  
Tel.: 0931 4104-180

Markus Hoffmann  
E-Mail: m.hoffmann@skz.de  
Tel.: 0931 4104-425

[www.skz.de](http://www.skz.de)



**Fraunhofer**

IAP

**IAP – Fraunhofer-Institut  
für Angewandte Polymerforschung**

Geiselbergstraße 69  
14476 Potsdam-Golm

Projektleitung: Dr. André Lehmann  
E-Mail: andre.lehmann@iap.fraunhofer.de  
Tel.: 03310568-1510

[www.iap.fraunhofer.de](http://www.iap.fraunhofer.de)



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

**SLK – Professur für Strukturleichtbau  
und Kunststoffverarbeitung, TU Chemnitz**

Technische Universität Chemnitz  
Fakultät für Maschinenbau  
09107 Chemnitz

Projektleitung: Dr. Roman Rinberg  
E-Mail: roman.rinberg@mb.tu-chemnitz.de  
Tel.: 0371 531-32359

[www.leichtbau.tu-chemnitz.de](http://www.leichtbau.tu-chemnitz.de)