

## » Kombinierte Prozesse für effiziente Produktion «

# Chemische Materialmodifikation im Doppelschneckenextruder

*Als eines der Zukunftsthemen der Kunststofftechnologie werden im Kompetenzbereich „Polymer Engineering“ am Fraunhofer ICT in Pfinztal Möglichkeiten der Prozessintensivierung in der Kunststoffverarbeitung gesucht. Forscherinnen und Forscher nutzen kommerzielle Doppelschneckenextruder als Hochviskosreaktoren und zeigen Verarbeitern ökonomische Vorteile für verschiedene Anwendungen und Produkte auf.*

**R**eaktivextrusion, also die Veränderung der chemischen Komposition eines Materials im Verarbeitungsprozess mit Doppelschneckenextrudern, kann vieles umfassen: Vom Ausbilden eines optimierten Faser-Matrix-Interfaces mittels kommerzieller Haftvermittler bis hin zu Polymerisationen und komplexen kombinierten Prozessen. Daher werden chemische Reaktionen im Doppelschneckenextruder von Marktakteuren und Forschern wahlweise als gelebte Selbstverständlichkeit oder unkalkulierbares Risiko aufgefasst. Doch auch und vor allem für kleine und mittelständische Unternehmen bietet die Materialmodifikation im eigenen Hause die große Chance, Unabhängigkeit von Zulieferern und Alleinstellungsmerkmale für die eigene Produktpalette zu generieren.

Im folgenden Beitrag werden die aktuellen Forschungstrends am Fraunhofer ICT zusammengefasst und die Möglichkeiten zur Prozessintensivierung dargestellt.

Dabei werden vier Aspekte beleuchtet:

- ein gewünschter Materialabbau für Recyclinganwendungen,
- eine Materialaufbereitung eines kostengünstigen Biopolymers,
- die Darstellung eines Polyesters im Doppelschneckenextruder sowie
- die Prozessintensivierung in Kaskaden aufbauen und unter Einbringung zusätzlicher Ultraschallenergie.

### Reaktivextrusion für Recycling

Der Erhalt des Molekulargewichts ist vor allem in Recyclinganwendungen ein kritisches Qualitätsmerkmal und wird unter anderem durch schonende Prozessführung, gewissenhaftes Vortrocknen und nachträgliche Stabilisierung sichergestellt.

#### ■ Herausforderungen in der Aufbereitung von PET

Insbesondere während des Recyclings von Polyethylenterephthalat (PET) und der Verarbeitung dieses hydrolyseanfälligen Polyesters ist zunächst gewissenhaftes Trocknen des Materials notwendig, um eine hydrolytische Kettenspaltung im nachfolgenden Verarbeitungsprozess zu verhindern und damit die Viskosität konstant hochzuhalten. Lässt sich ein gewisser Kettenabbau durch den Verarbeitungsprozess oder die vorangegangene Nutzung nicht verhindern, können im Anschluss an die oftmals genutzten Extrusionsverfahren nachgeschaltete Festphasenpolymerisationen durchgeführt werden, um das Molekulargewicht, die Viskosität und die resultierenden Materialeigenschaften wieder zu erhöhen.

Nichtsdestotrotz kann es von Interesse sein, ein geringeres Molekulargewicht des Materials für den Recyclingprozess zu nutzen beziehungsweise absichtlich herbeizuführen. Als großtechnisch genutztes Beispiel ist hier die Filtrierung unter Zugabe von Ethylenglykol zu

nennen. Im großtechnischen Maßstab werden die anfallenden PET-Ströme im geschmolzenen Zustand filtriert. Das heißt, die Materialien werden im Maßstab von mitunter mehreren Tonnen pro Stunde in Extrudern aufgeschmolzen und von diesen durch einen Schmelzefilter gedrückt. Die Filter bestehen dabei aus feinen Gittersieben mit Maschenweiten von zum Teil kleiner als 50 µm.

Da steigende Viskosität eine Filtrierung solcher Feinheit erschwert, wird von den Verarbeitern vor der Filtrierung oftmals Ethylenglykol zugegeben mit dem Ziel, die Materialviskosität durch Zugabe dieses niedermolekularen „Weichmachers“ zu verringern. Im weiteren Verlauf des Aufreinigungsprozesses wird das Material dann „entgast“, das heißt, flüchtige Substanzen werden mittels Unterdruck aus der Schmelze entfernt, wodurch auch das zugegebene Ethylenglykol wieder abgetrennt wird. Im chemischen Sinne tritt mit Zugabe des Ethylenglykols jedoch nicht nur eine bloße Verdünnungswirkung beziehungsweise weichmachende Wirkung ein, vielmehr ist das Ethylenglykol vergleichsweise effektiv in der Lage, durch Transesterifizierungsreaktionen Polyesterketten zu spalten. Dadurch werden zwei Kettenbruchstücke kürzerer Länge generiert, wobei beide resultierenden Ketten Hydroxyl-terminiert sind (also eine -OH Gruppe an deren Ende tragen). Im nachfolgenden Aufreinigungsschritt wird nicht nur das niedermolekulare Ethylenglykol wieder

entfernt, durch eine Verschiebung des chemischen Gleichgewichts, nach den Gesetzmäßigkeiten von Le Chatelier wird vielmehr die Rückreaktion begünstigt, die vormals gespaltenen Ketten rekombinieren sich, „polymerisieren“ wieder unter Erhöhung des Molekulargewichts.

Viele Verarbeiter nutzen also schon heute die „Reaktivextrusion“ im Tonnenmaßstab zum Recycling des PET.

Eben diese Reaktion, die Glykolyse des PET mit Hilfe von Ethylenglykol, wurde genauer untersucht im Rahmen eines europäisch geförderten Verbundprojektes (gefördert im Rahmen des 7. Rahmenprogramms der Europäischen Union unter dem Förderkennzeichen 285889). Darin wurden die prozessseitigen Einflussfaktoren auf die Reaktion und die entstehenden Produkte sowie die nachfolgende Repolymerisation mit beachtet.

■ **Depolymerisation bis zum Monomer?**

Auch die Möglichkeit, das Polymer mittels dieses chemischen Ansatzes bis in die kleinsten erreichbaren Teile, also das Monomer Bis(hydroxyethyl)terephthalat (BHET) aufzuspalten, war eine der zu untersuchenden Forschungsfragen.

Da die Herstellung von BHET einen 100%igen Umsatz des Polymers benötigt, welcher auf Grund der zur Verfügung stehenden Verweilzeit im Doppelschneckenextruder nur schwerlich möglich ist, wurde dieses Ziel mit den Methoden der Reaktivextrusion nicht erreicht.

Hierzu zeigten sich die parallel betrachteten Chargenreaktionen in Druckreaktoren als besser geeignet. Mit einem vielfachen Überschuss an Ethylenglykol, hier auch als Lösungsmittel genutzt, konnte dort in mehrstündigen Reaktionen reines BHET erzeugt werden.

Mittels der Reaktivextrusion konnte jedoch in wenigen Minuten im reproduzierbaren, kontinuierlichen Prozess durch den Einsatz von einem geringen Prozentsatz an Ethylenglykol das Molekulargewicht des Ausgangsmaterials auf circa 1% des Ausgangswertes reduziert werden.

■ **Vergleich verschiedener Extrudertypen**

Ein Vergleich verschiedener Extrudertypen, also die Betrachtung der Prozesseigenarten in einem gleichläufigen Doppelschneckenextruder gegenüber dem Verhalten in einem Mehrwellenextruder zeigte dabei für die Forscher interessante Unterschiede: So konnten mittels des Doppelschneckenextruders die geringsten Molmassen generiert werden, mittels des Mehrwellenextruders konnte die Reaktion jedoch mit Variation der Prozessparameter in größerem Maße beeinflusst werden. Beides ist gezeigt in *Abbildung 1*, welche die erhaltenen Molekulargewichte nach der Glykolyse in Doppelschneckenextruder (DSE) und im Mehrwellenextruder (MWE) bei verschiedenen maschinenseitigen Prozesseinstellungen zeigt. Während die erhaltenen Molekulargewichte nach Glykolyse im Doppelschneckenextruder bei Einstellung

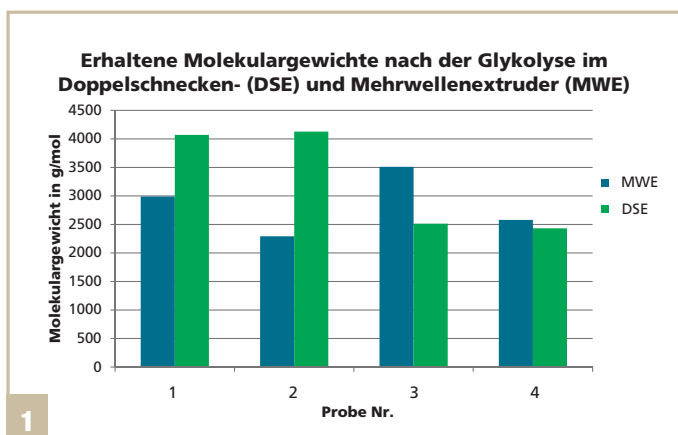


Abb. 1: Auftragung erhaltener Molekulargewichte nach Glykolyse in Doppelschneckenextruder (DSE) und Mehrwellenextruder (MWE) bei verschiedenen maschinenseitigen Prozesseinstellungen.

1 und 2 nahezu konstant sind, resultieren durch die Glykolyse im Mehrwellenextruder hier unterschiedliche Molekulargewichte. Das gleiche Bild zeigt sich zwischen den betrachteten Prozesseinstellungen 3 und 4.

In der nachfolgenden Repolymerisation, durchgeführt mit den selbst hergestellten Materialien ohne weitere Vorbehandlung,

konnten dagegen auch im Doppelschneckenextruder verschiedene Molekulargewichte unter Variation der Prozessparameter hergestellt werden.

Zusammenfassend belegt dieses Beispiel das große Potenzial der Prozessintensivierung mit Blick auf Zeit, Materialeinsatz und Prozesssicherheit durch den Übertrag einer Chargenreaktion in eine kontinuierliche reaktive Extrusion.

■ **Biopolymer – Stärke: Plastifizierung und Optimierung der Werkstoffeigenschaften**

Stärke ist das in der Natur am häufigsten vorkommende Makromolekül, welches unter anderem aus Abfallströmen gewonnen werden kann. Damit ist Stärke nicht nur in ökonomischer Hinsicht ein interessantes Ausgangsmaterial, auch im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung und einer Umkehr zu nachwachsenden Rohstoffen bietet Stärke große Potenziale.

Allerdings ist Stärke in ihrem natürlichen Zustand nicht thermoplastisch, das heißt, das Polymer schmilzt nicht auf und ist in Reinform daher nicht verarbeitbar mit klassischen Extrusionsverfahren.

■ **Weichmacher sind unerlässlich**

Mit Einarbeitung von niedermolekularen Weichmachern in das Material kann diese thermoplastische Eigenschaft jedoch erzeugt werden und ist eine der Strategien, welche schon heute im großtechnischen Maßstab genutzt werden, um „thermoplastische Stärke“ herzustellen.

Für die Einarbeitung der Weichmacher eignen sich wiederum Doppelschneckenextruder, welche dazu nach heutigem Stand auch genutzt werden.

Auch die Werkstoffkennwerte, insbesondere der Young-Modul sowie die Reißdehnung von thermoplastischer Stärke, sind allerdings für viele Anwendungen nicht ausreichend. Auch dieser Herausforderung kann heute schon begegnet werden und wird meist durch Zugabe anderer Polymere, also dem sogenannten Blenden, gelöst. Auch diese Materialoptimierung wird auf Doppelschneckenextrudern durchgeführt.

Durch geschickte Auswahl des Blendpartners lassen sich so die Materialkennwerte über einen weiten Bereich variieren, wobei neben den Werkstoffkennwerten des Blendpartners vor allem die Kompatibilität der genutzten Polymere ausschlaggebend für die resultierenden Materialeigenschaften ist. Da Stärke aufgrund ihrer vielen freien Hydroxygruppen ein sehr hydrophiles Polymer ist, was für die meisten Blendpartner mit den gewünschten Materialeigenschaften nicht der Fall ist, ist die Frage der Kompatibilisierung von besonderer Bedeutung für Stärke-basierte Materialien. Dem wird heute vor allem begegnet, indem die freien Hydroxygruppen der Stärke chemisch modifiziert werden, was die Hydrophilie der Stärke verringert und die Kompatibilität gegenüber hydrophoberen Polymeren erhöht. Da dies aktuell in Chargenverfahren in Lösungsmitteln durchgeführt wird, macht dies das Verfahren entsprechend aufwendig und die hergestellten Materialien damit teuer.

Die am Fraunhofer ICT genutzte Strategie zielt nicht auf die Modifizierung der Stärke ab, sondern auf die Modifizierung des Blendpartners. Im Rahmen eines Forschungsprojektes, gefördert durch die „Fachagentur nachwachsende Rohstoffe“ unter dem Förderkennzeichen 22017015, wurde das folgende Verfahren entwickelt und optimiert.

Durch das Einbringen von reaktiven, kompatibilisierenden Gruppen am Blendpartner können diese wiederum mit den freien Hydroxygruppen der Stärke reagieren und so einen homogenen, kovalent verbundenen Polymerblend erzeugen.

Die Herstellung solch modifizierter Blendpartner wird dabei auch heute schon mittels der Reaktivextrusion durchgeführt. Mit eingeschränkter Auswahl der Polymermatrix und

nicht auf Stärke Blends ausgelegten Materialcharakteristika sind solche modifizierten Polymere am Markt als Faser-Matrix-Koppler erhältlich.

■ **Aus Zwei mach Eins**

Zunächst haben die Forscher am Fraunhofer ICT mittels zwei nacheinander durchgeführten Extrusionen einen thermoplastischen, Stärke-basierten Werkstoff mit optimierten Werkstoffeigenschaften hergestellt. In der ersten Extrusion wurde der Blendpartner chemisch modifiziert. In einem nachfolgenden Extrusionsschritt wurde die Stärke plastifiziert und gleichzeitig mit dem zuvor modifizierten Polymer geblendet.

In der ersten Iterationsstufe waren also zwei Extrusionen mit zwei Abkühl- und Aufschmelzvorgängen und einer zwischengeschalteten Materialtrocknung erforderlich.

Unter Zuhilfenahme der am Fraunhofer ICT befindlichen sehr variablen Anlagenausstattung wurden diese zwei Extrusionsschritte in nur einem Verarbeitungsschritt kombiniert, welcher in *Abbildung 2* schematisch gezeigt ist. In diesem wird zunächst das Blendmaterial modifiziert und im gleichen Verarbeitungsschritt die Stärke und die benötigten Weichmacher zugeführt. So kann „in einer Wärme“ der optimierte Blendwerkstoff gebildet und Energieäquivalente von einem Trocknungs- und einem Aufschmelzprozess eingespart werden. Gleichzeitig wird in dem kombinierten Verfahren weniger Scherenergie in das Material eingetragen, was sich positiv auf die resultierenden Materialkennwerte auswirkt.

Das Biopolymer Polylactid (PLA) zeigt sich hierbei als geeigneter Blendpartner, welcher nach der Modifikation eine sehr gute Kompatibilität mit der Stärke aufweist. Die resultierenden Materialkennwerte lassen sich hierbei nicht nur durch die Modifikation des PLA, sondern auch durch den Weichmachergehalt in der Stärke beeinflussen, wie *Abbildung 3* verdeutlicht.

Neben dem Übertrag von Chargenprozessen auf lösungsmittelfreie, kontinuierliche Prozesse konnte somit gezeigt werden, dass auch mehrere Prozessschritte und Operationen in einer effizienten Kaskadenreaktion zusammengeführt werden können. Neben monetären Vorteilen durch Energieeinsparung wirkt sich eine solche Reduktion von Prozessschritten auch positiv auf die erhaltene Materialqualität aus.

**Reaktivextrusion: Polymerisation**

Neben der Polymermodifikation auf Basis kommerzieller Werkstoffe kann auch die Polymerisation von Polymeren, also die Herstellung hochmolekularer Polymerketten ausgehend von Monomereinheiten, im Interesse von Verarbeitern liegen. Durch die Herstellung des Polymerwerkstoffs wird der Verarbeiter in die Lage versetzt, maßgeblich die eigenschaftsbestimmende molekulare Beschaffenheit selbst flexibel zu gestalten. Durch Optimierung des Molekulargewichts, der

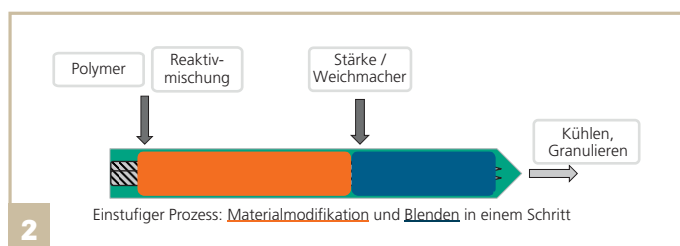


Abb. 2: Prozessschema von kombiniertem Prozess zu Materialmodifikation und Stärkeplastifizierung

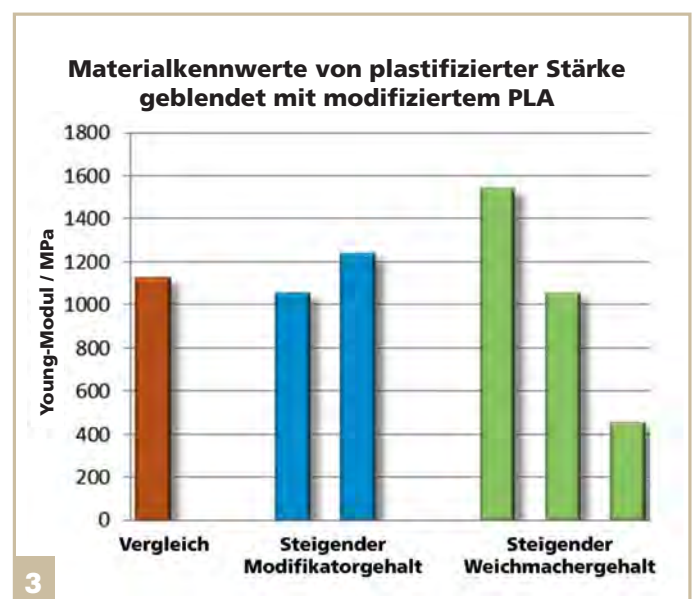


Abb. 3: Resultierende Materialkennwerte von optimiertem stärkebasiertem System

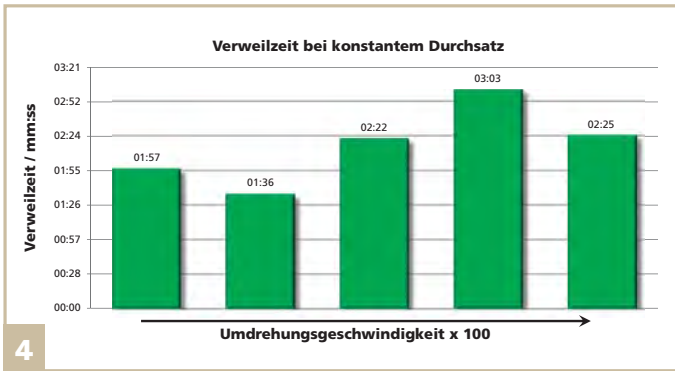


Abb. 4: Verweilzeitverhalten von Reaktivsystem bei konstantem Durchsatz

Molekulargewichtsverteilung, einem eventuellen Vernetzungs- oder Verzweigungsgrad kann somit vom Verarbeiter selbst ein für seinen Einsatzzweck optimal gestaltetes Polymer bei bekannter Rezeptur mit gleichbleibender Qualität und Zusammensetzung kreiert werden.

Ferner erlaubt dies den Verarbeitern aus vor allem einem in Großmenge bestelltem Monomer unterschiedlich angepasste Polymersysteme selbst herzustellen, was die Lagerhaltung und Preisgestaltung der Eingangsware günstig beeinflusst.

Eine solche Polymerisation im Doppelschneckenextruder wurde umfangreich in einem am Fraunhofer ICT koordinierten, europäisch geförderten Verbundprojekt untersucht (gefördert im Rahmen des 7. Rahmenprogramms der Europäischen Union unter dem Förderkennzeichen 309802). Im Rahmen dieses Projektes wurde das Biopolymer Polylactid (PLA) mittels Reaktivextrusion aus dem zyklischen Milchsäuredimer Lactid produziert.

**Verweilzeit widerspricht den Erwartungen**

Als eine zusätzliche Herausforderung bei Polymerisationen im Doppelschneckenextruder trat hierbei die sehr niedrige Viskosität des Monomers im geschmolzenen Zustand auf. Während klassische Schneckenkonzepte in der Doppelschneckenextrusion auf das Schmelzen und Bearbeiten von hochviskosen Medien ausgelegt sind, erfordert das Handling von geschmolzenem Monomer eine besondere Schneckenkonfiguration und Prozessführung.

Auch die starken Änderungen im Materialverhalten, also von einem newtonschem Fluid hin zu strukturviskoser Polymer-schmelze, machen sich in zusätzlich zu beachtenden Phänomenen im Laufe der Extrusion bemerkbar. So gelten beispielsweise weitere zu beachtende Zusammenhänge für das Zustandekommen der Verweilzeit(verteilung) des Extruders: Da nun die Viskosität über mehrere Potenzen als Funktion von Druck, Temperatur und eingebrachter Scherenergie abhängt, kann durch Variation speziell von Durchsatz, Schneckendrehzahl und Temperatur hierauf starken Einfluss genommen werden. Dies schlägt sich wiederum in Änderungen in der Verweilzeit nieder, welche so bisher nicht in klassischen Lehrbüchern zu finden sind. So konnte von Forschern des Fraunhofer ICT zum Beispiel gezeigt werden, dass im betrachteten Materialsystem mit Erhöhung der Drehzahl, entgegen den erwarteten Gesetzmäßigkeiten, die Verweilzeit in nicht zu verachtender Größenordnung ansteigen kann, wie in Abbildung 4 gezeigt ist.

In diesem Forschungsprojekt konnte ebenfalls gezeigt werden, dass es nicht nur möglich ist, Materialien mit vergleichbaren Eigenschaften kommerziell erhältlicher Materialien herzustellen, sondern dass es auch möglich ist, mit vergleichsweise geringen Änderungen

große Unterschiede im resultierenden Polymer zu erhalten. So wurden mit geringfügigen Formulierungsanpassungen Materialien mit sehr unterschiedlicher Molekulargewichtsverteilung hergestellt, welche aber ein nahezu identisches thermisches Verhalten aufweisen. Dies ist in Abbildung 5 verdeutlicht, in welcher jeweils eine Molekulargewichtsanalyse mittels GPC (oben) und das thermische Verhalten mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (differential scanning calorimetry, DSC, unten) zweier hergestellter PLA Materialien (Material A links, Material B rechts) gezeigt ist.

**Aus Eins mach Zwei**

Um die Effizienz des beschriebenen Verfahrens weiter zu erhöhen, wurde im genannten Forschungsprojekt auch ein Tandemaufbau realisiert. Dazu werden zwei Schneckenmaschinen, zum Beispiel Doppelschneckenextruder, hintereinandergeschaltet, wobei der zweite Extruder vom ersten Extruder mit einer heißen Schmelze beschickt wird, also keinen Aufschmelzvorgang bzw. keine Aufschmelzenergie mehr in das Material einbringen muss.

Anstelle von Doppelschneckenextrudern können selbstverständlich auch andere Extruderbauarten verwendet werden. Im Falle des oben genannten durchgeführten europäisch geförderten Verbundprojektes wurde das Mehrwellenextrudersystem MRS des Projektpartners Gneuss genutzt. Dieses zeichnet sich durch eine hohe Entgasungsleistung aus und wird heute vor allem in der Aufreinigung des feuchtigkeitsempfindlichen Polyethylenterephthalat genutzt.

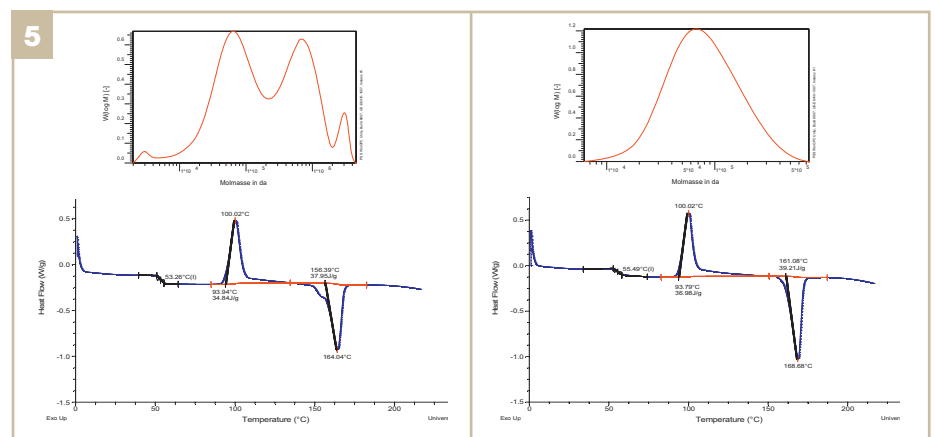


Abb. 5: Molekulargewichtsanalyse (GPC, oben) und thermisches Verhalten (DSC, unten) zweier hergestellter PLA Materialien (Material A links, Material B rechts)

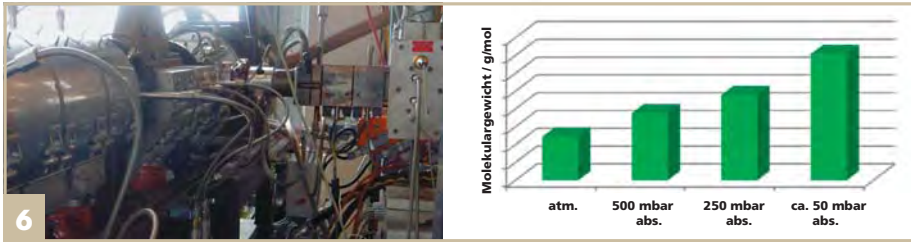


Abb. 6: Links: MRS Extruder im Tandemaufbau. Rechts: Resultierendes Molekulargewicht in Abhängigkeit zum im Mehrwellenextruder angelegten Unterdruck

Dabei wurde der MRS Extruder mit partiell reagiertem Schmelzesystem aus dem Doppelschneckenextruder beschickt. Durch den zusätzlichen Mehrwellenextruder wurde die Verweilzeit erhöht und die eingesetzte Polymerisation konnte weiter ablaufen. Ferner wurde durch den Aufbau des MRS Systems eine sehr große Schmelzoberfläche geschaffen, an welcher Unterdruck angelegt wurde. Dadurch wurde im genutzten Materialsystem in der Schmelze befindliches Restmonomer entfernt.

Mit dieser Anlagenkonfiguration war es am Ende des Projektes möglich, ein hochmolekulares Produkt mit einer Molmasse von > 230.000 g/mol bei einem realisierten Durchsatz von > 7 kg/h, beginnend mit einem Doppelschneckenextruder mit einem Schneckendurchmesser von 18 mm, prozesssicher herzustellen.

Auch hier zeigte sich wieder, dass mit der Änderung von Prozessparametern Einfluss auf die resultierenden Materialparameter genommen werden kann. So steht zum Beispiel das resul-

tierende Molekulargewicht in direktem Zusammenhang mit der Höhe des im Mehrwellenextruder angelegten Unterdrucks. Eine Aufnahme des MRS Extruders im Tandemaufbau an einem Doppelschneckenextruder sowie die erhaltenen Molekulargewichte in Abhängigkeit zum im Mehrwellenextruder angelegten Unterdruck ist in *Abbildung 6* zu sehen.

Die Herstellung hochmolekularer PLAs mit flexibler Anpassung der molekularen Beschaffenheit, durchgeführt mittels kontinuierlicher Reaktivextrusion in marktverfügbaren Standardgeräten, konnte so von den Forschern des Fraunhofer ICT und den Projektpartnern erfolgreich gezeigt und evaluiert werden.

#### Ausblick: Nutzung zusätzlicher Energien im Extruder

Im Themenfeld „innovativer Produktionsmethoden“ beschäftigt sich das Fraunhofer ICT schon lange mit der Einbringung von Ultraschallenergie in den Extrusionsprozess. Hier konnte gezeigt werden, dass durch Nutzung von Ultraschallenergie im Laufe des

oben genannten Polymerisationsprozesses das resultierende Molekulargewicht positiv beeinflusst werden kann. Überraschend für die Forscher war zudem der Einfluss des Ultraschalls auf den resultierenden Restmonomergehalt im hergestellten Polymer. So konnte durch Einbringen von Ultraschallenergie bei ansonsten identischen Prozesseinstellungen

der Gehalt an Restmonomer stets im starken Maß reduziert werden, wie in *Abbildung 7* zu sehen ist. Unabhängig davon, ob von einem hohen Restmonomergehalt oder von einer schon weit fortgeschrittenen Polymerisation ausgegangen wurde, konnte der verbleibende Lactidgehalt um bis zu 60 % vermindert werden. Im Rahmen der Prozessauslegung bedeutet dies, dass bei gleichbleibender Qualität entweder eine starke Erhöhung des Durchsatzes realisiert werden kann oder dass die Qualität des Produkts bei gleichbleibendem Durchsatz nennenswert erhöht werden kann. In weiteren Forschungsarbeiten wird gezeigt werden, ob sich dieses beobachtete Phänomen auch auf andere (reaktive) Extrusionsvorgänge und Polymerisationen übertragen lassen wird.

#### Zusammenfassung

Materialabbau von PET für Recyclinganwendungen, Materialaufbereitung von Stärke, die Darstellung von PLA oder die Prozessintensivierung mittels Kaskadenaufbauten und der Einbringung von Ultraschallenergie: Eine Vielzahl von Prozessen, Materialien und Optimierungspotenzialen erschließt sich durch die Reaktionsführung im Doppelschneckenextruder.

Auch die Option, auf Lösungsmittel verzichten zu können, die Kombination von chemischer Modifikation mit dem gleichzeitigen Einbringen von Füll- und Verstärkungsstoffen und die Vorzüge eines kontinuierlichen Produktionsprozesses sind nur einige Beispiele, warum die Nutzung der Reaktivextrusion im Produktionsalltag ökonomisch vorteilhaft sein kann. Die Möglichkeit, ein optimiertes Produktportfolio als Alleinstellungsmerkmal zu entwickeln, bietet weitere vertriebstechnisch interessante Chancen, welche sich mittels der Reaktivextrusion erschließen lassen.

Autoren: Björn Bergmann, Aleksandra Buczko, Peter Elsner

#### KONTAKT

##### Fraunhofer ICT

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie  
 Prof. Dr.-Ing. Peter Elsner, Institutsleitung  
 Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7  
 D-76327 Pfinztal  
 Tel.: +49 (0)721 4640-401  
 Fax: +49 (0)721 4640-442  
 www.ict.fraunhofer.de

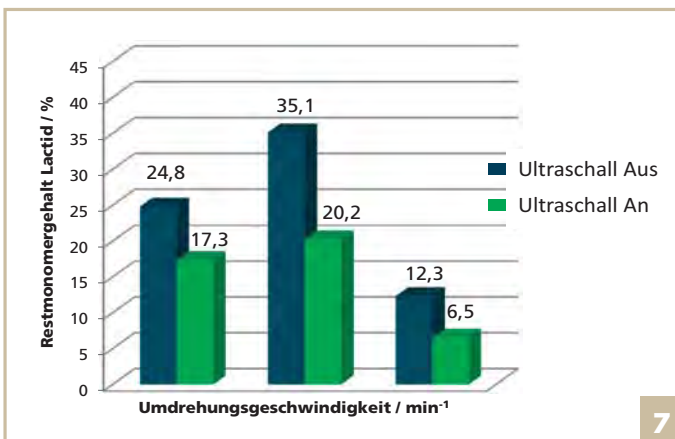


Abb. 7: Einfluss von Ultraschall auf den Restmonomergehalt Lactid in PLA bei verschiedenen Umdrehungsgeschwindigkeiten