



PET in Rotation

Extrusion. Die MRS-Technologie (Multi-Rotation-System) als Alternative zum herkömmlichen Recycling von PET-Flaschenmahlgut eröffnet neue Möglichkeiten in Bezug auf Flexibilität, Qualität oder Energieverbrauch. So wird auch die direkte Verarbeitung von ungetrocknetem Material möglich.

AXEL HANNEMANN

Das Recycling von Post-Consumer-Flaschenmahlgut aus Polyethylenterephthalat (PET) zu Flaschengranulat ist heutzutage eine gängige Praxis, wobei die Anforderungen an die Qualität stetig steigen. Wird die entsprechende Technologie eingesetzt, ist es inzwischen ohne Weiteres möglich, das Flaschenmaterial immer wieder zu verwenden und so einen tatsächlichen Kreislauf zu realisieren.

Problematisch bei der Verarbeitung von PET ist das hygroskopische Verhalten des Polymers. Durch die Lagerung an der Umgebungsluft und durch vorgeschaltete Waschkette diffundieren Wassermoleküle in das Material ein, die dann bei der Verarbeitung im Extruder die Moleküle des Polyesters zersetzen und hierdurch die mechanischen- und die Weiterverarbeitungseigenschaften deutlich reduzieren.

Prozesskette im Überblick

Nach dem Sammeln der Flaschen (**Titelbild**) werden üblicherweise Störstoffe grob getrennt und Fehlwürfe aussortiert. Anschließend werden die Flaschen zer-

mahlen und in einer Waschanlage von Schmutz bzw. beim Heißwaschen auch von Klebstoffrückständen der Etiketten befreit. Bei einer Schwimm-Sink-Trennung erfolgt dann die Trennung anderer Polymere, hier im Wesentlichen die

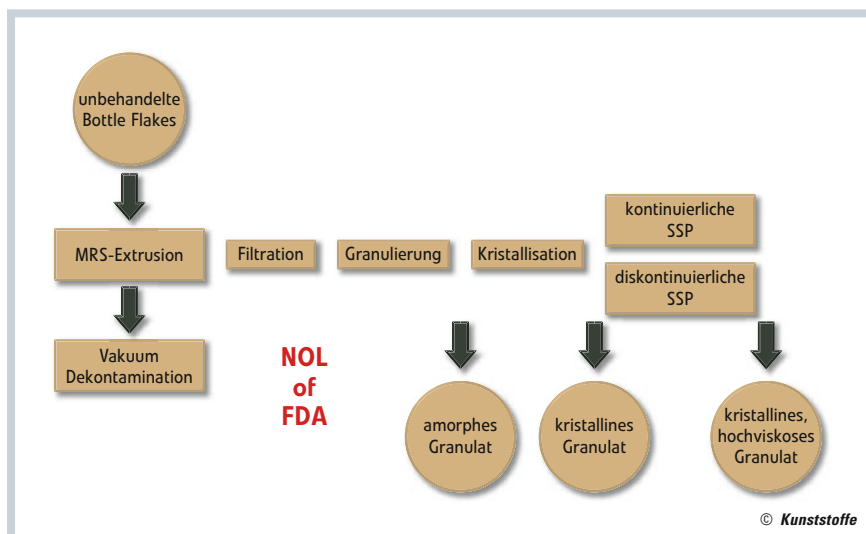


Bild 1. Übersicht möglicher Prozessschritte zur PET-Aufbereitung (NOL of FDA = Unbedenklichkeitsbescheinigung der FDA) (Bilder und Quellen: Gneuß)

ARTIKEL ALS PDF unter www.kunststoffe.de
Dokumenten-Nummer KU110853

Deckel aus Polypropylen (PP). Ein anschließender Zentrifugalrockner trennt das Oberflächenwasser vom Mahlgut. Selbstverständlich werden auch Metalle abgeschieden. Anschließend kann eine Farbsortierung und/oder eine PVC-Abtrennung erfolgen.

Nach dem Extrudieren wird die Schmelze filtriert. Vom Filtriersystem wird gefordert, dass der Austausch eines schmutzigen durch ein sauberes Sieb keine Unterbrechung oder Reduzierung des Schmelzestroms und damit des Produktionsprozesses verursacht. Zur Homogenisierung des Strömungsprofils und zur Sicherstellung der Schmelzeinheit wird häufig ein Schmelzemischer eingesetzt. Durch entsprechendes Design ist sichergestellt, dass die Schmelze anschließend aus dem Werkzeug störungsfrei und gleichmäßig ausgetragen wird.

Das so hergestellte Granulat wird getrocknet, kristallisiert und anschließend in einer SSP (Solid State Polycondensation – Festphasenkondensation) auf den gewünschten Viskositätswert gebracht. Dieser letzte Prozessschritt kann entweder kontinuierlich bei größeren Stoffströmen oder diskontinuierlich und daher flexibler bei kleineren Stoffströmen durchgeführt werden (Bild 1).

Durch die schonende Behandlung mit dem Multi-Rotation-System (MRS) und den sehr kurzen Zeiten der Vor- und Nachbehandlung (keine Kristallisation, keine Vortrocknung, bei Bedarf kurze SSP-Zeit) lassen sich Produkte mit einer sehr geringen Gelbfärbung und ausgezeichneter Transparenz herstellen.

Aufgrund dieser großen Flexibilität des MRS-Konzepts bietet es sich sowohl für große Stoffströme als auch für kleinere und unterschiedliche Chargen (Farbe, Herkunft) an. Die SSP kann sowohl im Batch- als auch im kontinuierlichen Verfahren erfolgen.

Die auf diese Weise hergestellten Granulate können in verschiedensten Anwendungen eingesetzt werden: Für die Herstellung von Fasern über Thermofolien bis hin zur Flasche lassen sich alle erforderlichen Viskositäten einstellen. Zudem ist es möglich, Granulate, die aus bis zu 100 % Post-Consumer-Bottle-Flakes hergestellt wurden, auch zu Produkten weiterzuverarbeiten, die in direktem Kontakt mit Lebensmitteln treten. Das MRS hat sowohl mit als auch ohne eine anschließende Behandlung (SSP) eine Unbedenklichkeitsbescheinigung (Letter of Non-Objection) der amerikanischen Lebensmittelbehörde (FDA) erhalten.

Die Bedeutung der Entfeuchtung

Bei der Verarbeitung im Extruder führt Feuchtigkeit zur Verkürzung der Molekülketten, was zur Folge hat, dass die Viskosität abnimmt und sich die mechanischen Eigenschaften des Endprodukts verschlechtern.

Um das zu vermeiden, wird das Granulat herkömmlich mit getrockneter Luft bei Temperaturen von bis zu 180°C und Verweilzeiten von bis zu 8 h getrocknet. Auf diese Weise wird die Feuchtigkeit im Vorfeld der Extrusion entfernt, damit die Hydrolyse nicht stattfinden kann.

Diese chemische Reaktion ist jedoch reversibel und der Gleichgewichtspunkt kann sowohl in die eine als auch in die andere Richtung verschoben werden, indem der Wassergehalt erhöht oder reduziert wird. Dieses Verhalten kann man sich während der Extrusion zu Nutze machen, indem man eine Möglichkeit vorzieht, Wassermoleküle während der Verarbeitung zu entfernen und somit die geschädigten PET-Moleküle wieder zu regenerieren.



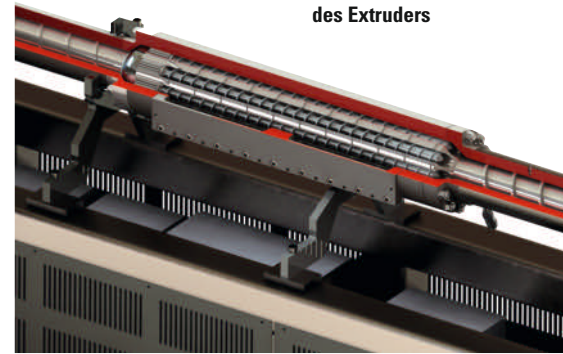
Bild 3. MRS-Extruder mit gezielt kontrollierter Temperaturführung der Schmelze

Die physikalischen Voraussetzungen für die Entfernung der Wassermoleküle werden durch den Diffusionsprozess beschrieben, dieser kann mithilfe des 1. Fick'schen Gesetzes formuliert werden:

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = - D \cdot F \frac{dc}{dx}$$

Das Gesetz sagt aus, dass die abgeführte Menge an Wasser (Δn) größer wird, je länger die Verweilzeit (Δt), je größer die Schmelzeoberfläche (F) und das treibende Konzentrationsgefälle (dc) und je dünner die Polymerschicht (dx) ist. Mit anderen Worten, je besser das Polymer durchmischt und die Oberfläche aufgerissen wird, desto mehr verlagert sich das chemische Gleichgewicht in Richtung langkettiger Moleküle mit hohen mechanischen Eigenschaften.

Bild 2. Multirotationsbereich des Extruders



Entgasung mit dem MRS-Extrusionskonzept

Mit dem MRS-Extruder lässt sich unkristallisiertes Polyestergranulat ohne Vortrocknung direkt verarbeiten. Dabei wird die Polymeroberfläche während der Extrusion um ein Vielfaches vergrößert und schnell ausgetauscht. So wird immer neue Oberfläche zur Abgabe von Flüchtigen zur Verfügung gestellt, um dem Fick'schen Gesetz Rechnung zu tragen.

Hierzu ist im Folgenden die Funktionsweise des MRS beschrieben:

Der MRS-Extruder ist grundsätzlich ein Einschneckenextruder mit einer speziellen Entgasungszone. Der polymere Schmelzestrom wird auf eine sich drehende große Einschnecken trommel geleitet (Bild 2). In der Trommel befinden sich längs der Drehachse acht lange Zylinderbohrungen mit eingelassenen Förderschnecken.

Diese Schnecken werden über einen Zahnkranz angetrieben. Sie drehen sich auf ihrer rotierenden Kreisbahn entgegengesetzt zur Extrudertrommel. Dadurch verstärkt sich der Effekt des Oberflächenaustauschs der Schmelze überproportional.

Die Zylinder in der Trommel des MRS sind im äußeren Bereich etwa 30 % geöffnet, sodass der Zugang zur Schmelze optimal gewährleistet ist und eine Entgasung ungehindert erfolgen kann. Darüber hinaus ist eine gezielt kontrollierte Temperaturführung der Schmelze möglich, da sämtliche schmelzeberührende Flächen gut temperiert werden können (Bild 3).

Dank des patentierten Multiwellenteils stellt die Extrusionstrommel eine sehr große Polymeroberfläche zur Verfügung und ermöglicht eine hohe Entgasungsleistung schon bei einem moderaten Vakuum von 20–40 mbar. So ist beispielsweise die mittels MRS-Technik erzeugte Schmelze austauschfläche gegenüber einer gleichlaufenden Doppelschnecke ca. →

25-mal größer (Bild 4). Ermöglicht wird hierdurch die Beschickung von ungetrockneten Flakes oder Granulat mit bis zu 1 % Feuchtigkeit.

Durch seinen Aufbau umgeht der MRS-Extruder die Probleme alternativer Mehrwellenkonzepte, die aufgrund enger, tangierender Spalten im Wellenbereich erheblich sensibler sind. Nicht zuletzt im Bereich des PET-Bottle-Flake-Recyclings mit seinen oft groben Verunreinigungen spielt dies eine entscheidende Rolle.

Im Vergleich zu anderen Mehrwellentechnologien zeichnet sich der MRS u. a. durch seinen kompakten und robusten Aufbau aus. Die rotierenden Schnecken sind einzeln gelagert und gleichen somit einer Trommel mit einer Vielzahl von Einschnecken.

Die Entgasungstechnologie ist modular aufgebaut und kann den jeweiligen Anforderungen entsprechend angepasst werden. So besteht die Möglichkeit, die verschiedenen Module des MRS in ihrer Länge und Ausführung zu variieren.

Vorteile der MRS-Technologie

Durch den Einsatz des MRS-Extrusionssystems beim Bottle2Bottle-Recycling lässt sich sowohl amorphes als auch kristallines Material mit verschiedenen Viskositäten herstellen – je nach Kundenanforderung. Das Material kann direkt nach dem Granulator ausgeschleust werden, somit wird amorphes Granulat mit durch Entgasung in weitem Rahmen einstellbarer Viskosität hergestellt. Ebenso möglich ist das Nachschalten eines Kristallisators oder einer SSP, um auch sehr hohe Viskositäten zu erzielen.

Messen und Steuern der Verfahrensparameter

Das Erfassen, Aufzeichnen und die Analyse von Prozessparametern ist heute wesentlicher Bestandteil der Kunststoffverarbeitung, um beispielsweise eine später erfolgte Reklamation nachvollziehen zu können, aber auch, um möglichst schnell auf Veränderungen dieser Parameter reagieren zu können. Durch diese Kontrolle kann eine durchgehend hohe Qualität des erzeugten Produkts gewährleistet werden. Wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des Endprodukts während der Herstellung haben die Schmelztemperatur, die Viskosität und die in der Maschine auftretenden Schmelzgedrücke. Mithilfe dieser Parameter können Ausfälle von Heizzonen oder Kühlgebläsen, Rohstoffschwankungen und Verschleiß in der An-

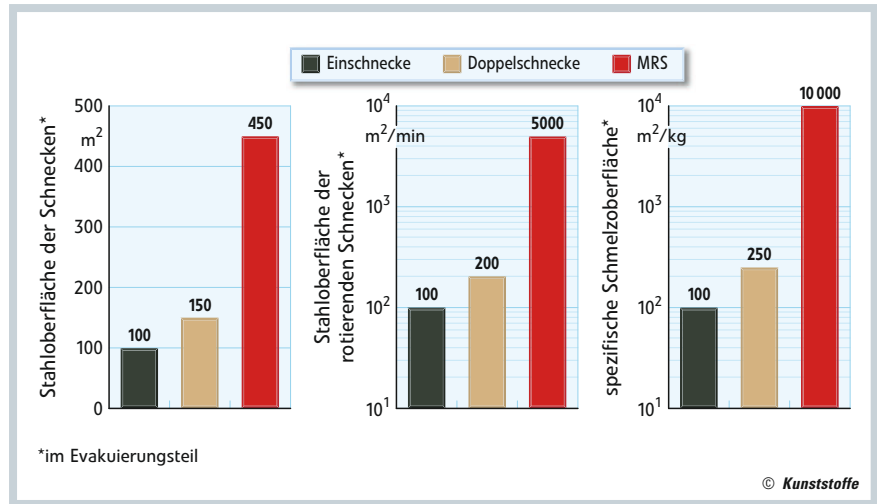


Bild 4. Gegenüberstellung der Effektivität verschiedener Extrusionskonzepte

lage kontrolliert werden. Außerdem dient diese Aufnahme zur Vermeidung von Gefahren, beispielsweise durch Abschalten von Anlagenkomponenten durch einen plötzlich auftretenden und nicht zulässigen Druckanstieg.

Durch geschicktes Zusammenschalten von Schmelzdruck- und Temperaturenhnehmern lässt sich bei bekanntem Durchfluss und bekannter Geometrie zusätzlich der Fließwiderstand einer Flüssigkeit und hieraus die dynamische Viskosität des Materials bestimmen. Diese ist ein Maß für das mittlere Molekulargewicht des Polymers und kennzeichnet daher mechanische Eigenschaften wie Elastizität und Dehnung.

Prozesssteuerung mit dem Online-Viskosimeter

Mit einer hochpräzisen, fördersteifen Zahnradpumpe wird ein kleiner Teilstrom der Polymerschmelze aus dem Hauptschmelzkanal abgezweigt und durch eine Schlitzkapillare gedrückt. Erfasst wer-

den sowohl die Schmelztemperatur als auch der Schmelzdruck (Messung an zwei Orten). Basierend auf internen Berechnungen erfasst das Online-Viskosimeter (VIS) einen Wert für die repräsentative Schergeschwindigkeit und die entsprechende repräsentative Viskosität.

Der Schmelzkanal kann gemäß der Kundenspezifikation zwischen 0,5 und 2 mm ausgeführt sein. Die Einheit wird komplett mit Pumpenantrieb, Pumpe, Druckaufnehmer, Temperatursensoren und Steuerung ausgeliefert. Die Einstellung der Prozessparameter, die Auswertung und die Anzeige werden auf einem leicht zu bedienendem Touchscreen-Panel vorgenommen, können aber auch in eine vorhandene Steuerung integriert werden.

Mithilfe des VIS ist es nun möglich, beim Verarbeiten von Polyester bei schwankenden Eingangsbedingungen (Feuchte) die Schmelzequalität in einem sehr engen Toleranzband zu halten. Nach Erfassen der Viskosität mithilfe von Druck- und Temperatursensoren wird

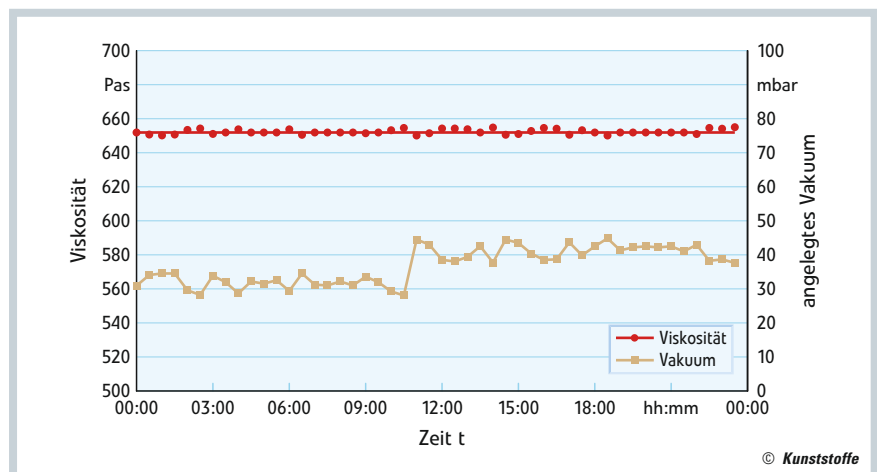


Bild 5. Konstanz der Viskosität bei schwankender Feuchte

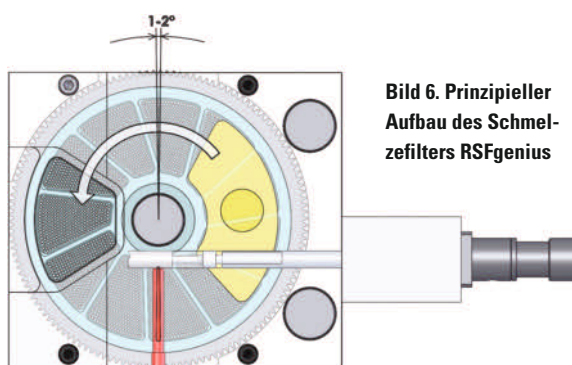


Bild 6. Prinzipieller Aufbau des Schmelzefilters RSFgenius

das anliegende Vakuum an der Evakuierungszone so geregelt, dass die Eigenschaften des Endproduktes (Viskosität, Molekulargewicht und dadurch die mechanische Eigenschaften) gehalten werden können (Bild 5).

Dargestellt ist der Verlauf des Vakuums (beige) und die Viskosität der Schmelze (rot) über der Zeit. Deutlich zu erkennen ist der Wechsel der Materialaufgabe um 11:00 Uhr. Es wurde der Aufgabesilo gewechselt, und zuvor die unteren Bereiche des Silos verarbeitet, die einen relativ höheren Feuchtigkeitsgehalt aufweisen. Direkt nach der Umstellung ist die Feuchtigkeit der Flakes deutlich geringer. Durch Anheben des absoluten Drucks in der Evakuierungs-

zone kann die Viskosität der Schmelze und damit das Molekulargewicht und die mechanischen Eigenschaften, also die Qualität, konstant gehalten werden.

Konstante Schmelzefiltration mit Rückspülung

Die Schmelze muss vor dem Granulieren von Schmutzpartikeln jeglicher Art befreit werden, damit höchste mechanische und optische Anforderungen sowie der Schutz der Nachfolgeeinrichtungen gewährleistet sind. Hierzu eignen sich die Rotary-Filtrationssysteme, da sie kontinuierlich und druckkonstant arbeiten.

Der RSFgenius besteht im Wesentlichen aus drei Teilen: einem Einlauf-, einem Auslaufblock und einer dazwischen rotierenden Siebscheibe. Die Dichtung ist eine Metall-auf-Metall-Dichtung mit sehr harten sowie absolut ebenen Oberflächen. Sämtliche schmelzeberührende Bauteile sind vollständig von Umwelteinflüssen wie zum Beispiel Sauerstoff abgekapselt.

Auf der Siebscheibe sind ringförmig Siebelemente angeordnet, die sich durch den Schmelzekanal bewegen. Beim Durchströmen der Siebfläche mit Kunststoffschmelze lagern sich darauf die Verschmutzungspartikel ab; der Differenzdruck steigt leicht an. Die Steuerung reagiert auf diesen Druckanstieg und lässt die Siebscheibe bei Bedarf um etwa 1° weiterdrehen (Bild 6). Dadurch wird kontinuierlich verschmutzte Siebfläche aus dem Schmelzekanal heraus und frische Siebfläche in den Kanal hinein bewegt, ohne dass sich die aktive Siebfläche ändert. Durch diese Betriebsweise arbeitet das Filtersystem prozess- und druckkonstant. Die Variation der Druckdifferenz über dem Filter (Δp) beträgt max. 2 bar.

Die Reinigung der verschmutzten Siebe erfolgt kurz vor dem Wiedereintritt in den Schmelzekanal. Dabei wird der →

i Kontakt

Gneuß Kunststofftechnik GmbH
Mönchhusen 42
D-32549 Bad Oeynhausen
TEL +49 5731 5307-0
 → www.gneuss.com

Schmutzkuchen durch eine Hochdruck-Segmentrückspülung entfernt. Hierzu wird bereits filtrierte Schmelze langsam aus dem Auslaufkanal des Filtersystems in einen hydraulisch angetriebenen Schusstopf „geladen“ und danach unter hohem Druck von hinten durch das Sieb in den Einlaufblock mit ca. 30–80 bar geschossen, von wo sie definiert abgeführt wird. Es wird jeweils nur ein kleines Segment (ca. 1 % der Siebfläche) freigeschossen, sodass jedes Mal ein definiert hoher Impuls zur Reinigung zur Verfügung steht.

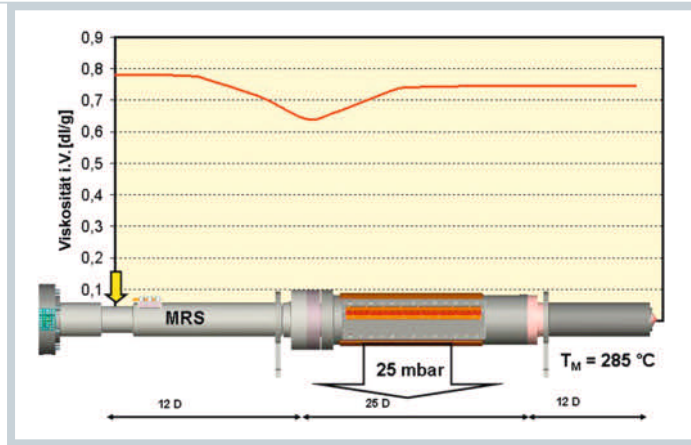


Bild 7. Viskositätsverlauf bei der Verarbeitung von PET-Bottle-Flakes

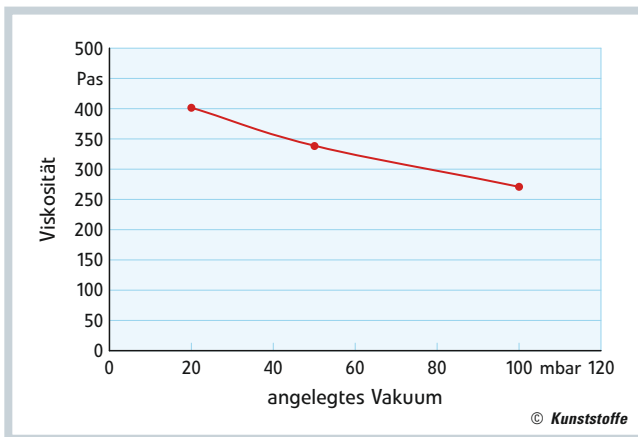


Bild 8. Abhängigkeit der Viskosität vom angelegten Vakuum

Bei dieser Arbeitsweise werden die Siebe vollständig gereinigt und können je nach Filterfeinheit bis zu 400-mal wieder verwendet werden, was einer vollautomatischen Filtration ohne jeglichen Personaleinsatz von bis zu einem Monat entspricht. Durch Verwendung des RSFgenius können auch stark verschmutzte PET-Bottle-Flakes zu hochwertigem Granulat verarbeitet werden.

Fallbeispiel eins: Bändchenproduktion

In einem konkreten Anwendungsfall bei der Herstellung von Bändchen auf Basis von 100 % ungetrockneten Bottle-Flakes beträgt der Feuchtigkeitsgehalt bis zu 12000 ppm. In dieser Anlage wurde das Polymer analysiert, um den Viskositätsverlauf während des Prozesses herauszufinden. Der IV-Wert der ungetrockneten PET-Bottle-Flakes wurde ebenso analysiert wie das Polymer vor der Entgasungszone, direkt dahinter und im Endprodukt (Bild 7).

Es ist ersichtlich, dass die Viskosität des Polymers in der ersten Zone des Extruders (Aufschmelzzone) reduziert wird, da der Wassergehalt in die Molekülketten des Polyesters durch Hydrolyse eingebunden wird. Je höher die Feuchtigkeit des Ausgangsmaterials ist, desto größer ist die Reduktion. In der Entgasungszone werden diese Wassermoleküle durch das Vakuum extrahiert (Diffusionsprozess), hier findet die Umkehr der Reaktion statt. Daher ist der MRS fähig, in der Entgasungszone die Molekülkettenlänge, das Molekulargewicht, die Viskosität und die mechanischen Eigenschaften des Polymers wieder zu erhöhen (Bild 8).

Die Viskositätszunahme in der Evakuierungszone kann durch unterschiedliche Vakuen beeinflusst und kontrolliert werden; der Einfluss des absoluten Drucks auf die erreichte Viskosität ist erheblich.

Deutlich zu erkennen ist die Zunahme der Viskosität der austretenden Schmelze vor der Formgebung mit sinkendem absolutem Druck.

Fallbeispiel zwei: Granulatproduktion

Ein Hersteller von Flakes hat seine Produktionstiefe durch eine Extrusionslinie mit anschließender SSP vergrößert und somit die Wertschöpfung stark gesteigert. Mithilfe des Extrusionskonzepts MRS ist es gelungen, den Verfahrensschritt des kostspieligen und aufwendigen Kristallisierens und Trocknens vor der Extrusion einzusparen.

Es wird Polyester bis zu einem Durchsatz von insgesamt 2000 kg/h verarbeitet und aus dem Flaschenmahlgut hochwertiges Flaschengranulat hergestellt. Der MRS erlaubt durch ein Vakuum von etwa 25–30 mbar eine relativ kurze Verweilzeit in der anschließenden SSP. Das eingesetzte Filtersystem vom Typ RSFgenius filtert das Material zwischen 75 und 30 µm. Das Online-Viskosimeter misst die Viskosität des Polyesters vor der Düse und steuert die Vakuumanlage, die durch Variation des absoluten Drucks diese Viskosität möglichst konstant hält. Hierdurch wird auch die Qualität auf konstant hohem Niveau gehalten.

Verglichen mit einer konventionellen Schneckenverarbeitung, die mit Kristallisation und Vortrocknung den Wassergehalt auf weniger als 50 ppm senkt, ist der spezifische Energieverbrauch wesentlich geringer. Dies liegt an den hohen Energiekosten für das Trocknen des Granulats mit getrockneter Heißluft während der Vorbereitung für die Extrusion.

Verglichen mit einer Doppelschneckenverarbeitung der Flakes ist der Energieverbrauch auch geringer, da bei der Verarbeitung mittels Doppelschnecke ein

	MRS [Wh/kg]	Doppelschnecke [Wh/kg]	Einschnecke [Wh/kg]
Kristallisation	–	–	90 *
Trocknung < 50 ppm	–	–	120 *
Vortrocknung bis 1000 ppm	–	60 *	–
Extruderantrieb und Heizung	295	230 *	240 *
Vakuum	45	90 *	–
Schmelzepumpe	–	30 *	–
Gesamt	350	410 *	450

Tabelle 1. Energieverbrauch verschiedener Extrusionskonzepte im Vergleich (* Werte basieren auf Kundenangaben)

hohes Vakuum von < 5 mbar benötigt wird und außerdem die Flakes leicht vortrocknet werden müssen.

Der spezifische Energieverbrauch mit der MRS-Technik ist somit 15 bis 25 % geringer als konventionelle Technologien (Tabelle 1), wobei die höhere Flexibilität und geringere Wartung von Trocknern und Hochvakuumssystemen zusätzlich zum Tragen kommen.

Fazit

Das MRS-Extrusionssystem ermöglicht aufgrund der hohen Oberflächenerneuerungsrate des Polymers eine effiziente

Entgasung der Kunststoffschmelze. Der Diffusionsprozess wird durch Einsatz der Multirotationsschnecken stark erhöht, ebenso die Platzwechselmechanismen an der Schmelzeoberfläche. In der Konsequenz ist es problemlos möglich, aus ungetrockneten PET-Bottle-Flakes Verpackungsbänder, Tiefziehfolien, Fasern oder Flaschengranulat mit ausgezeichneten Qualitäten herzustellen, auch in Bezug auf den Gelbwert.

Das MRS-Extrusionssystem basiert auch im Multirotationsteil auf einer robusten Einschneckenbauweise und eignet sich daher für die Verarbeitung von stark verschmutzten Kunststoffen.

Aufgrund der FDA-Zulassung können mit dem MRS-Extruder inklusive Entgasungsvorrichtung und Rotary-Schmelzefilter bis zu 100 % nicht vorgewaschene PET-Recyclingware zu lebensmitteltauglichen Produkten wie Behälter, Folien und Schalen verarbeitet werden. Da beim MRS-Extrusionssystem weder Vortrocknung noch Kristallisation zur Polyester-Verarbeitung erforderlich sind, stellt es nicht zuletzt auch eine ökonomisch interessante Alternative zu den etablierten Technologien der PET-Verarbeitung dar, weil viel Platz und Energie eingespart werden. ■

DER AUTOR

DR. AXEL HANNEMANN, geb. 1970, ist Manager Technical Sales bei der Gneuß Kunststofftechnik GmbH, Bad Oeynhausen.

SUMMARY

PET IN ROTATION

EXTRUSION. MRS (multi-rotation system) technology, as an alternative to conventional recycling of PET bottle regrind, is opening up new possibilities in terms of flexibility, quality and energy consumption. It also enables undried material to be processed directly.

Read the complete article in our magazine *Kunststoffe international* and on www.kunststoffe-international.com