

### Energieeffizienz.

PET und PA 6 unterliegen bei der Verarbeitung unterschiedlichen Abbaumechanismen. Wesentlich ist der hydrolytische Abbau, weshalb die Rohstofffeuchte konventionell vor der Verarbeitung durch Trocknung beseitigt wird. Eine energie- und zeitsparende Alternative ist die Entfernung der Feuchtigkeit aus der Polymerschmelze mithilfe der sogenannten Schmelzentgasung auf einem Einschneckenextruder.

# Sparen mit einer Schnecke

WALTER MICHAELI  
HENNING SEIDEL

Die Werkstoffe Polyethylterephthalat (PET) und Polyamid 6 (PA6) gehören zu den wichtigsten Vertretern der Gruppe der Polykondensate. Aufgrund ihrer günstigen Eigenschaftsprofile sowie der für PET in den vergangenen Jahren stabilen Rohstoffpreise wächst ihr Verbrauch stetig.

Allerdings besitzen Polykondensate bei der Verarbeitung einen großen Nachteil: Um eine ausreichende Produktqualität zu erzielen, muss der Wassergehalt des hygroskopischen Rohstoffs bei der Zuführung zur kunststoffverarbeitenden Maschine in engen Grenzen gehalten werden, damit das Gleichgewicht der Polykondensationsreaktion gewährleistet ist (Bild 1). Bereits bei Anwesenheit kleinster Wassermengen während der Verarbeitung verschiebt sich das Gleichgewicht auf die Seite der Edukte und die Polymerketten spalten sich. Der Vorgang der Hydrolyse läuft

deutlich schneller ab als die übrigen Abbaureaktionen, wie z. B. der mechanische, thermische oder auch thermo-oxidative Abbau. Eine Verringerung des Molekulargewichts geht stets mit einer Verschlechterung der Produkteigenschaften einher.

Bei der Verarbeitung von Polykondensaten muss daher eine möglichst geringe Rohstofffeuchte sichergestellt werden. Konventionell wird PET hierfür vor der Verarbeitung einem aufwendigen Trocknungsprozess unterzogen. PA6 wird in der Regel trocken angeliefert. Bei einer Schädigung der Schutzverpackung, Verarbeitung eines geöffneten Gebindes oder Rezyklats sowie bei besonders hohen Qualitätsansprüchen muss es ebenfalls getrocknet werden. Da PA6 nur bei einer Temperatur von 80 bis 110°C getrocknet werden darf, verlängern sich die Trocknungszeiten auf bis zu 24 h [1].

### Wasseraufnahmeverhalten

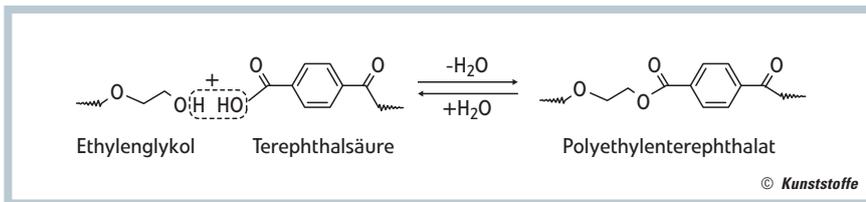
Um den nötigen Trocknungsaufwand sowie das Kosteneinsparpotenzial durch eine Verbesserung der Lagerbedingungen im Vorfeld abschätzen zu können, wurde am

Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Aachen ein Befeuchtungssystem entwickelt. Hiermit ist es möglich, unterschiedliche Lagerungsbedingungen nachzustellen, das Wasseraufnahmeverhalten der Polykondensate zeitabhängig zu erfassen sowie eine homogene Materialcharge für Extrusionsversuche bereitzustellen. Die Feuchtigkeitszunahme ist von der relativen Luftfeuchtigkeit der umgebenden Lagerungsluft abhängig. Besonders zu beachten ist die zügige Feuchtigkeitsaufnahme zu Beginn der Lagerung. Nach einer ausreichend langen Lagerzeit, je nach Feuchtgradient ca. 1 bis 3 Wochen, stellt sich die in Bild 2 dargestellte Rohstofffeuchte ein. Der erste Ansatz zur Reduzierung der Energiekosten ist demnach bereits eine möglichst kontrollierte Materialbehandlung bei Förderung und Lagerung, um eine übermäßige Feuchtigkeitsaufnahme zu verhindern und den Aufwand für den Wasserezug zu begrenzen.

### Konventionelle Vortrocknung

Der konventionelle Trocknungsprozess ist langwierig und energieintensiv. Am

ARTIKEL ALS PDF unter [www.kunststoffe.de](http://www.kunststoffe.de)  
Dokumenten-Nummer KU110279



**Bild 1. Polykondensationsreaktion von PET**

weitesten verbreitet ist die Lufttrocknung, die für die folgenden Untersuchungen genutzt wurde. **Bild 3** zeigt den zeitlichen Verlauf der Feuchteabnahme sowie den Energieverbrauch eines Trockners für PET. Zu Beginn der Trocknung kann eine schnelle Feuchtereduktion erreicht werden. Für die vom Rohstoffhersteller geforderte maximale Restfeuchte bei PET von 50 bzw. bei PA 6 von 1000 ppm werden jedoch sehr lange Trocknungszeiten benötigt, weil das Wasser vor allem über Diffusion aus dem Granulat transportiert werden muss. Da die Diffusionsgeschwindigkeit u. a. vom Konzentrationsgradienten der flüchtigen Komponente zwischen Granulat und Umgebung abhängt, sinkt die Geschwindigkeit der Feuchteabnahme mit sinkendem Wassergehalt des Trockenguts. Sollen sehr geringe Restfeuchten erzielt werden, steigt die Trocknungsdauer überproportional an. Der Energiebedarf fällt jedoch auch nach erfolgter Aufwärmung des Materials nicht signifikant ab, sodass durch den langwierigen Trocknungsprozess sehr viel Energie verbraucht wird. So werden bei der Trocknung von PET insgesamt 216 W/(kg/h), bei PA 6 mit einem hohen Feuchtegehalt von 16500 ppm aufgrund der sehr langen Trocknungszeit von bis zu 48 h 655 W/(kg/h) benötigt. Intensive Aktivitäten der Industrie führen bereits zu energieeffizienteren Trocknungskonzepten [2–7]. Unabhängig von der Trocknungstechnik kann durch eine Vortrocknung, die real an die im Produktionsprozess vorliegende Rohstofffeuch-

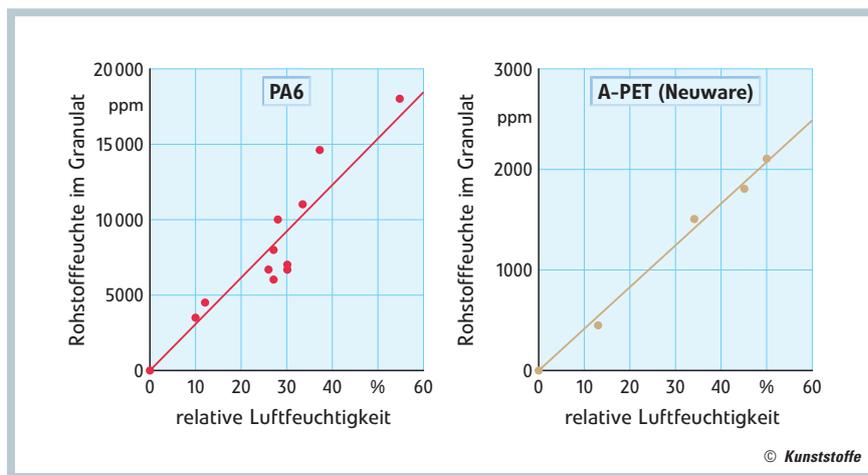
te angepasst wurde, bereits eine erhebliche Energieeinsparung erzielt werden.

### Verfahren der Schmelzeentgasung

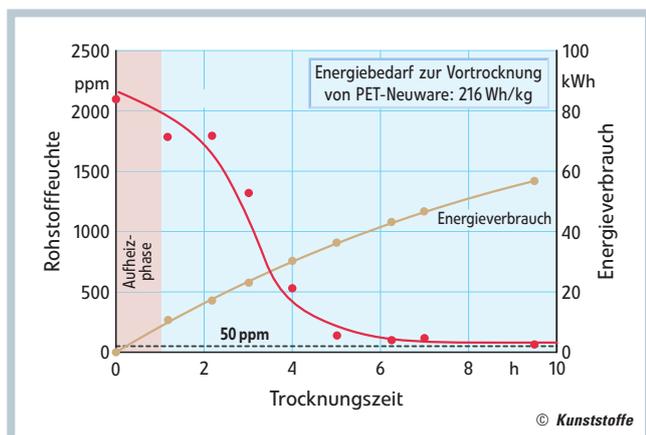
Nicht erst seit den drastisch steigenden Energiekosten sind Kunststoffverarbeiter bemüht, ihre Energieeffizienz zu erhöhen. Eine Möglichkeit ist hierbei, über die Schmelzeentgasung bei der Vortrocknung zu sparen. Die Schmelzeentgasung von PET mithilfe eines Doppelschneckenextruders ist Stand der Technik. Dieser ist jedoch im Vergleich zum Einschneckenextruder hinsichtlich der Investitionskosten teurer und bei Kunststoffverarbeitern weniger verbreitet. Einen Überblick über die verschiedenen Entgasungsapparate sowie

deren spezifische Vor- und Nachteile bietet u. a. [8]. Auch die Verarbeitung von Polykondensaten mittels Schmelzeentgasung auf einem Einschneckenextruder findet immer stärkere Verbreitung. Die genauen Auswirkungen der unterschiedlichen Prozess-, Material- und Geometrieparameter auf die resultierende Produktqualität sind sehr komplex und bisher im Detail nicht bekannt. Am IKV wurde der Prozess der Schmelzeentgasung auf einem 60 mm Einschneckenextruder (Hersteller: Reifenhäuser Extrusion GmbH & Co. KG, Troisdorf; Vakuumpumpenstand, Hersteller: Dr.-Ing. K. Busch GmbH, Maulburg) analysiert und technologisch sowie energetisch mit dem Verfahren Vortrocknung verglichen.

Im Einschneckenentgasungsextruder wird das ungetrocknete Granulat zunächst in einer Plastifizierzone aufgeschmolzen (**Bild 4 oben**). Das Wasser ist aufgrund des hohen Schmelzedrucks in der Polymerschmelze gelöst, kann jedoch aufgrund der Verarbeitungstemperaturen bereits einen erheblichen hydrolytischen Molekulargewichtsabbau verursachen. Am Ende der Plastifizierzone befindet



**Bild 2. Rohstofffeuchte nach Lagerung (ca. 1 bis 3 Wochen) in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit**



**Bild 3. Energieverbrauch und Zeitbedarf des Trocknungsprozesses (PET; 160 °C; Taupunkt -40 °C; Volumen 200 l)**

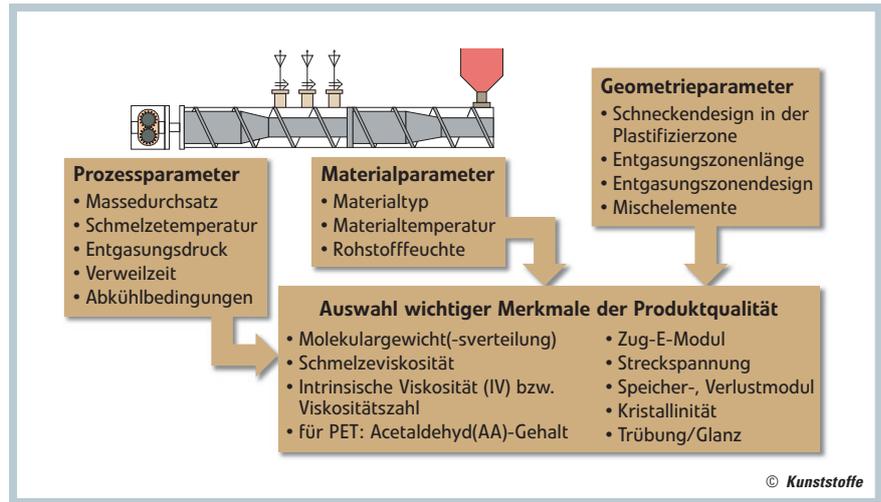
sich ein Stauring, der als Druckverbraucher ausgelegt ist. Dieser bewirkt, dass das Material beim Eintritt in die tiefer geschnittene, von Polymerschmelze teilgefüllte Entgasungszone aufgrund der Flash-Verdampfung des Wassers aufschäumt. Durch die Rotation der Schnecke werden die in der Entgasungszone entstehenden Dampfblasen zerstört und die austretenden Dämpfe über einen Vakuumpumpenstand abgeführt. Im Anschluss an die Entgasungszone wird die Polymerschmelze erneut komprimiert und zu den Nachfolgeaggregaten weitergeleitet.

### Beurteilung der Produktqualität

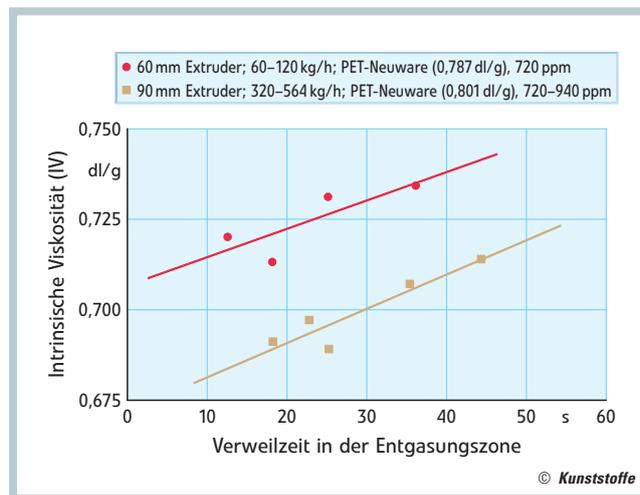
Bei der Verarbeitung unterliegen Polykondensate stetigen Abbau- sowie Aufbaureaktionen. Die resultierenden Produkteigenschaften werden neben einer optimalen optischen Erscheinung über die Länge der Molekülketten definiert. Diese werden in aufwendigen chemischen Analysen über die Gelpermeationschromatographie (GPC) ermittelt oder mittels Lösungsviskosimetrie (bei PET: Intrinsische Viskosität IV) abgeschätzt, siehe u. a. [9, 10]. Beide Verfahren finden jedoch offline, d. h. mehrere Stunden im Anschluss an die Extrusion statt. Um bereits online eine Aussage über die Produktqualität zu erhalten und bei einer Abweichung direkt in den Prozess eingreifen zu können, kann das Molekulargewicht auch mithilfe der Schmelzerheometrie abgeschätzt werden, da ein geringeres Molekulargewicht zu einer erhöhten Fließfähigkeit der Schmelze führt [11]. Am IKV wird dafür ein Bypass-Rheometer (Typ: MBR 71.05 CAN, Hersteller: Göttfert Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH, Buchen) eingesetzt, das durch eine separate Spinnpumpe die Ermittlung vollständiger Viskositätskurven ohne Änderung im Extrusionsprozess ermöglicht.

### Auswirkung der Verarbeitungsparameter

Mithilfe der Schmelzeentgasung auf einem Einschneckenextruder ist es möglich, hinsichtlich der Produktqualität mit Vortrocknung vergleichbare Extrudate herzustellen. Hierbei müssen jedoch die vielfältigen Einflussparameter vom Material über die Anlagenkonfiguration bis zu den Extrusionsparametern Berücksichtigung



**Bild 4. Auswirkung unterschiedlicher Verarbeitungsparameter der Schmelzeentgasung auf die Produktqualität**

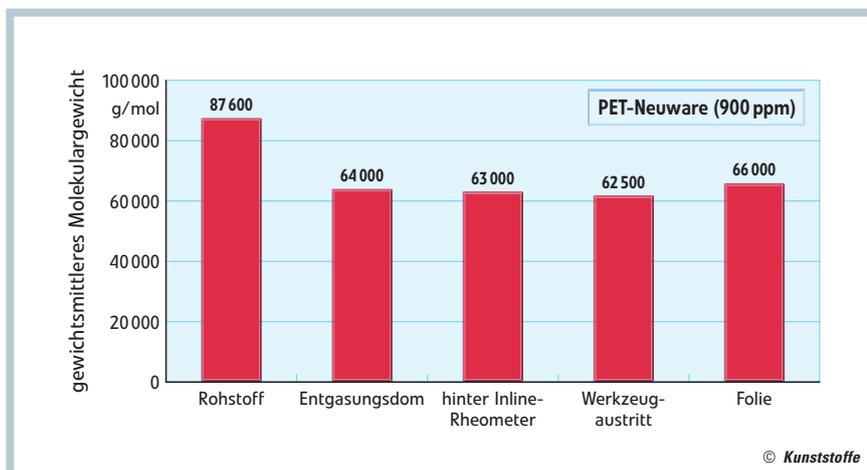


**Bild 5. Einfluss der Verweilzeit in der Entgasungszone auf die Intrinsische Viskosität (IV) für PET**

finden (Bild 4). Die wichtigsten Parameter werden im Folgenden kurz betrachtet.

Die Extruderschnecke sollte so ausgelegt sein, dass das Polymer in der Plastifizierungszone möglichst schnell aufgeschmolzen und in die Entgasungszone übergeben werden kann. Nur so lässt sich

die Hydrolyse in diesem Bereich unterbinden. Die Länge der Entgasungszone bestimmt neben dem Massedurchsatz sowie der Gangtiefe die Verweilzeit der Schmelze und somit die Entgasungsleistung. Wie beispielsweise bei den Extrusionsversuchen auf der Technikumsanlage am IKV mit 60 mm Schnecke sowie auf der Produktionsanlage mit einem 90 mm Einschneckenextruder der Kuhne GmbH, Sankt Augustin, beobachtet wurde, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Verweilzeit in der Entgasungszone und der IV im Produkt (Bild 5). Demnach sollte insbesondere bei der Verarbeitung hoher Rohstofffeuchten die Verweilzeit in der Entgasungszone möglichst hoch gewählt werden. Andererseits verlängert eine zu lange Entgasungszone die Verweilzeit der Schmelze in der Anlage. Im Extruder sowie in der Nachfolge findet dabei thermischer sowie bei einer nicht vollständigen Wasserentfernung hydrolytischer Abbau statt. In Bild 6 ist der Verlauf des mittleren Molekulargewichts



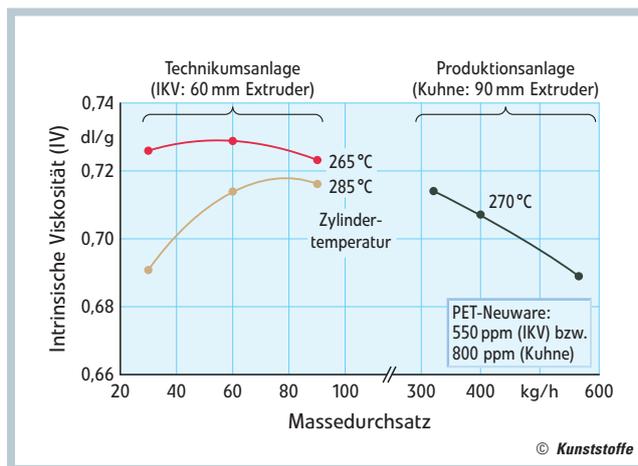
**Bild 6. PET-Molekulargewicht an verschiedenen Stellen der Extrusionsanlage**

von PET über der Länge der Extrusionsanlage aufgetragen. Hierfür wurden im laufenden Prozess Schmelzproben entnommen und unter Stickstoffatmosphäre abgekühlt. Man sieht deutlich, dass der wesentliche Abbau vor der Entgasungszone stattfindet, da hier in der Schmelze noch Wasser enthalten ist.

Der Massedurchsatz bestimmt neben den geometrischen Abmessungen der Anlage die Verweilzeit der Schmelze in den einzelnen Anlagenbereichen. Ein geringer Massedurchsatz führt zu einer längeren Verweilzeit in der Gesamtanlage, erhöht auf diesem Weg den Molekulargewichtsabbau und führt zu geringeren IV-Werten bei der Verarbeitung (Bild 7). Bei hohen Massedurchsätzen verringert sich jedoch die Verweilzeit in der Schmelzentgasungszone und die höhere Schneckendrehzahl führt zu einer verstärkten dissipativen Erwärmung der Schmelze. Durch die geringere Verweilzeit in der Entgasungszone kann die Feuchtigkeit nicht mehr vollständig entzogen werden und die höhere Schmelztemperatur führt zu allgemein steigenden Reaktionsgeschwindigkeiten der Abbaumechanismen. Aus diesen Gründen sinkt die IV bei hohen Massedurchsätzen wieder. Auf der Produktionsanlage konnten aus ungetrocknetem PET mit ca. 800 ppm jedoch noch bei 400 kg/h sehr gute IV-Werte von 0,71 dl/g (Ausgangs-IV: 0,801 dl/g) erreicht werden. Der Massedurchsatz sollte, so lange die dissipative Schererwärmung kontrolliert wird, möglichst hoch gewählt werden.

Die Höhe des Entgasungsdrucks beeinflusst sowohl über den Aufschäumgrad die Flash-Verdampfung als auch über den Konzentrationsgradienten die diffusionskontrollierte Wasserentfernung. Die Entgasungsleistung hängt daher direkt mit der Höhe des Entgasungsdrucks zusammen und beeinflusst die Produktqualität. Daher sollte der Druck möglichst niedrig gewählt werden. Hierbei sind jedoch die über die Vakuumpumpen abzuführenden Volumenströme zu berücksichtigen. Diese steigen bei minimalen Absolutdrücken deutlich an und erhöhen somit die Investitionskosten der Anlage.

Die Rohstoffeingangsfeuchte bestimmt im Wesentlichen den hydrolytischen Molekulargewichtsabbau. Mit der Schmelzentgasung kann dieser nicht vollständig unterbunden werden, da vor allem bei der Plastifizierung noch Wasser vorhanden ist. Deshalb sinkt mit zunehmender Rohstofffeuchte die Produktqualität. Die tolerierbare Rohstofffeuchte hängt von den



**Bild 7. Einfluss des Massedurchsatzes sowie der Zylinder-temperatur auf die IV bei der PET-Verarbeitung**

jeweiligen speziellen Produkthanforderungen ab.

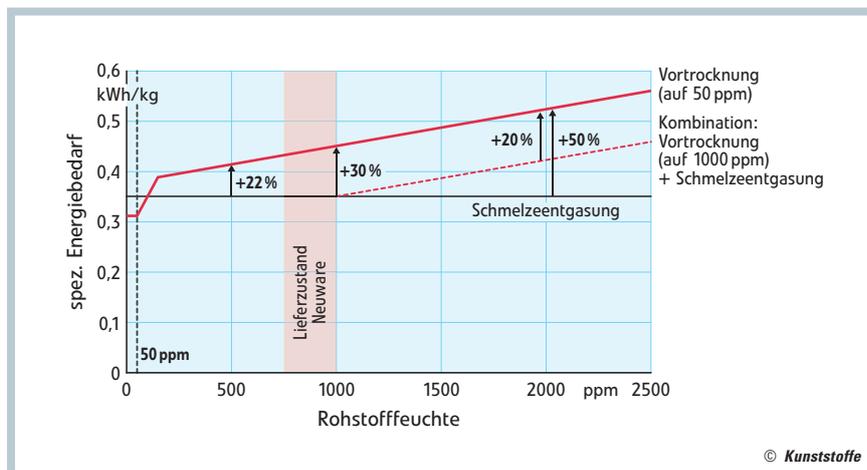
### Energetische Bilanzierung

Es stellt sich die Frage, wieviel Energie im Endeffekt gegenüber der Vortrocknung gespart werden kann? Bei der Verarbeitung mit Vortrocknung wird neben dem Extruderantrieb, der Beheizung bzw. Kühlung zusätzlich der Energiebedarf durch die Vortrocknung berücksichtigt. Diese entfällt bei der Bilanzierung des Verfahrens mit Schmelzentgasung. Stattdessen wird der Vakuumpumpenstand in die Bilanzhülle integriert.

Der Energiebedarf des Extruderantriebs ist nach IKV-Untersuchungen aufgrund des hohen Wirkungsgrads der dissipativen Schererwärmung um lediglich 5 % geringer, wenn das Granulat vorgewärmt in den Prozess gegeben wird. Bei der Verarbeitung von ungetrocknetem Material unterliegt die Schmelze v.a. in der Plastifizierungszone des Extruders einem hydrolytischen Abbau. Demnach sollte ein höherer Feuchtegehalt eine verringerte

Schmelzeviskosität mit sich führen und damit eine verringerte Leistungsaufnahme des Antriebs verursachen. Dies konnte jedoch durch die Untersuchungen nicht nachgewiesen werden. Die Leistungsaufnahme des Extruders hängt nicht wesentlich von der Rohstofffeuchte ab. Auch der Energiebedarf des Vakuumpumpenstands weist keine Abhängigkeit von der Höhe der Rohstofffeuchte auf. Der Energieverbrauch eines bestehenden Vakuumpumpenstands hängt demnach ebenfalls nicht wesentlich von der Menge des abzuführenden Volumenstroms ab.

In Bild 8 ist der spezifische Energiebedarf bei der PET-Verarbeitung unterschiedlicher Rohstofffeuchten mit Schmelzentgasung bzw. mit vollständiger Vortrocknung auf 50 ppm dargestellt. Der Anteil der Extrusion (Antrieb, Beheizung, Kühlung) beim Verfahren der Vortrocknung ist unabhängig von der Rohstofffeuchte. Der Aufwand für die Vortrocknung steigt jedoch mit zunehmender Rohstofffeuchte an. Beim Verfahren der Schmelzentgasung ist unab-

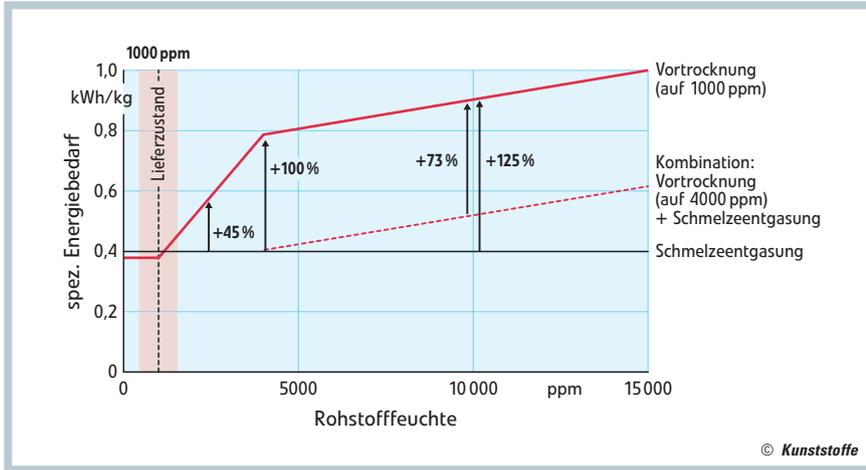


**Bild 8. Energetische Bilanzierung der A-PET-Verarbeitung (Vortrocknung, Schmelzentgasung, Kombination)**

hängig vom Feuchtegehalt ein konstanter Gesamtenergiebedarf feststellbar. Gemäß der Untersuchungen weist bei der PET-Verarbeitung die Schmelzeentgasung bereits ab einer Ausgangsfeuchte von ca. 100 ppm einen geringeren Energiebedarf als die Vortrocknung auf. Im Feuchtebereich des Lieferzustands benötigt das Verfahren Vortrocknung ca.

**Fazit**

Die Polykondensate PET und PA6 unterliegen bei der Verarbeitung vielfältigen Abbaumechanismen, wobei der hydrolytische Abbau als besonders kritisch zu erachten ist. Mithilfe der Schmelzeentgasung auf einem Einschneckenextruder lassen sich Produkteigenschaften erzeugen,



**Bild 9. Energetische Bilanzierung der PA6-Verarbeitung (Vortrocknung, Schmelzeentgasung, Kombination)**

30 % mehr Energie. Bei hohen Rohstofffeuchten, wie sie beispielsweise bei der Zugabe von Rezyklaten vorkommen, steigt der Mehraufwand durch die Vortrocknung auf über 50 % an. Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass das Molekulargewicht bzw. die IV die Werte aus der Vortrocknung nicht ganz erreicht. Je nach Produkthanforderungen wäre es ggf. sinnvoll, eine verkürzte Vortrocknung auf 1000 ppm vorzunehmen und anschließend das Material mit der Schmelzeentgasung zu verarbeiten. Auf diesem Weg ließen sich gegenüber der vollständigen Vortrocknung bei vergleichbarer Produktqualität erhebliche Energieeinsparungen erreichen.

Bei der PA6-Verarbeitung kann der Energiebedarf durch die Schmelzeentgasung sogar noch deutlicher gesenkt werden (Bild 9). Wird ein geringfügig feuchtes Material verarbeitet, so benötigt das Verfahren mit Vortrocknung aufgrund der langen Trocknungszeiten bereits 45 % mehr Energie als das Verfahren mit Schmelzeentgasung. Bei einer Feuchte von 4000 ppm wird bereits allein für den Vortrocknungsprozess genauso viel Energie verbraucht wie für die Extrusion. Um Prozess- oder Qualitätsprobleme bei hohen Feuchtegehalten zu verhindern, ist es wie beim PET sinnvoll, eine verkürzte Vortrocknung durchzuführen.

die vergleichbar mit vorgetrockneten Materialien sind. Durch den vollständigen Verzicht auf die Vortrocknung können dabei bis zu 50 % des Gesamtenergiebedarfs eingespart werden. Die Verfahrenskombination – kurze Vortrocknung zur Entfernung der hohen Rohstofffeuchte sowie zusätzliche Schmelzeentgasung – bietet eine interessante Alternative, wenn Polykondensate mit besonders hohen Anforderungen an die Produktqualität verarbeitet werden sollen. ■

**DANK**

Das Forschungsvorhaben 14629N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung wurde im Programm zur Förderung der „Industriellen Gemeinschaftsforschung“ (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AiF finanziert. Beiden Institutionen gilt unser ausdrücklicher Dank.

Weiterhin danken wir den Firmen BASF SE, Ludwigshafen, und Equipolymers GmbH, Schkopau, für die Bereitstellung von Versuchsmaterialien sowie der Kuhne GmbH, Sankt Augustin, für die Bereitstellung einer Produktionsanlage inkl. Versuchsmaterial.

**LITERATUR**

- 1 N. N.: Ultramid / Capron – Polyamid (PA). Produktinformation der BASF SE, Ludwigshafen, 2005
- 2 Schroer, T.; Wortberg, J.; Siekmann, E.A.: A concept for applied dryer control by prediction of the moisture content of dried material. In: Tagungsumdruck zu 59th Annual Technical Conference (SPE-ANTEC), Dallas/Texas, USA 2001

- 3 Wortberg, J.; Schroer, T.: Mehr Effizienz beim Trocknen. *Kunststoffe* 93 (2003) 10, S. 149–154
- 4 Vogt, M.; Binternagel, W.: Infrarot-Drehrohre (IRD) in der Kunststoffindustrie. In: Tagungsumdruck zur 4. Fachtagung Kunststoffverarbeitung, Kreyenborg GmbH, Münster, 2006
- 5 Wortberg, J.; Grossmann, M.: Materialhandling als Basis der Produktqualität. *Kunststoffe* 96 (2006) 10, S. 128–132
- 6 Haynie, M.; Crittenden, C.: Die Wahl der Systeme – Vergleich von Granulat Trocknern im Zeitalter hoher Energiekosten. *Plastverarbeiter* 59 (2008) 5, S. 36–40
- 7 Winkelmann, T.; Schroer, T.: Verarbeitung von getrocknetem und ungetrocknetem Material. Prozess-technische Betrachtungen am Beispiel PET. In: Tagungsumdruck zur Fachtagung „Extrusionstechnik 2008, Innovationen – Energieeffizienz – Prozesssicherheit“ VDI-Verlag, Bd. 4294, Düsseldorf 2008, S. 37–52
- 8 Schmitz, T.: Verarbeitung von Polyethylenterephthalat auf einem Einschneckenextruder mit Trichter- und Schmelzeentgasung. RWTH Aachen, Dissertation, 2005
- 9 Menges, G.; Haberstroh, E.; Michaeli, W.; Schmachtenberg, E.: *Werkstoffkunde Kunststoffe*. Carl Hanser Verlag, München 2002
- 10 Oberbach, K.; Baur, E.; Schmachtenberg, E.: *Saechtling*. Carl Hanser Verlag, München 2004
- 11 Reilly, J.F.; Limbach, A.P.: Korrelationsmethode für die Schmelzerheology und Grenzviskosität bei PET. *Rheology* 92 (1992) 9, S. 174–181

**DIE AUTOREN**

PROF. DR.-ING. DR.-ING. E.H. WALTER MICHAELI, geb. 1946, ist Inhaber des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen und Leiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV).

DIPL.-ING. HENNING SEIDEL, geb. 1979, ist seit 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter des IKV und leitet die Arbeitsgruppe Flachfolien- und Plattenextrusion in der Abteilung Extrusion; seidel@ikv.rwth-aachen.de

**SUMMARY**

**SAVINGS WITH A SINGLE SCREW**

ENERGY EFFICIENCY. PET and PA 6 undergo different types of degradation during processing. As hydrolysis is the primary culprit, the raw materials have traditionally been dried prior to processing. One alternative that saves both time and energy consists in degassing the polymer melt on a single-screw extruder .

*Read the complete article in our magazine*

**Kunststoffe international** and on [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)