

Verfahrensvarianten und Besonderheiten bei der Regeneratverarbeitung

Dr.-Ing. Robert Michels, ETA Kunststofftechnologie GmbH, Troisdorf

Regenerat fällt bei der Kunststoffverarbeitung in vielfältiger Form an. Man versteht darunter Materialmengen, die aus innerbetrieblichen Produktionsabfällen stammen und nach einer geeigneten Zerkleinerung direkt wieder in den Verarbeitungsprozess zurückgeführt werden können. Es handelt sich somit meistens um 'Mahlgut', diese Bezeichnung wird oft auch als Synonym zum Begriff 'Regenerat' gebraucht.

Ein Beispiel sind die überquetschten Schlauchabschnitte (Butzen), die beim Extrusionsblasformen entstehen und als Mahlgut dem Neumaterial zugemischt und wieder in den Extruder geleitet werden. Weitere Beispiele sind die Weiterverarbeitung der Stanzgitter von Tiefziehfolien oder die Rückführung von Randstreifen bei Flachfolien.

Regenerat kann aber auch aus Produktionsresten oder dem Ausschuss gewonnen werden, der bei allen Kunststoffverarbeitungsprozessen beim Anfahren, bei Produktionsumstellungen oder bei der Weiterbearbeitung der Zwischenprodukte auftritt.

Im Mittelpunkt der Betrachtungen in diesem Beitrag stehen zunächst die besonderen und oftmals problematischen physikalischen Eigenschaften des Regenerats, das sich vor allem aus diesem Grund vom Neuware-Granulat unterscheidet. Weiterhin wird auf die Probleme eingegangen, die generell bei der Mehrfachverarbeitung von Kunststoffen auftreten. Schließlich werden anhand einiger ausgewählter Beispiele Besonderheiten der Maschinen und Verfahren beschrieben, die für die Verarbeitung von Regenerat zum Einsatz kommen.

Nicht näher eingegangen wird hier auf die Verarbeitung von 'Regranulat' und 'Rezyklat', die aus den gleichen Quellen stammen können wie Regenerat, nach der Zerkleinerung aber grundsätzlich ein weiteres Mal aufgeschmolzen und neu granuliert werden. Diese Materialien haben als Schüttgut ähnliche Verarbeitungseigenschaften wie Neuware-Granulat und sind daher zumindest aus dieser Sicht unproblematischer zu verarbeiten.

Außerdem liegt der Schwerpunkt auf der Wiederverarbeitung weitgehend sortenreiner innerbetrieblicher Produktionsabfälle. Die vorgestellten Verfahren sind aber auch auf die Wiederverarbeitung gebrauchter Produkte (z.B. Kunststoffverpackungen) übertragbar, wenn diese sortenrein anfallen, z.B. Mahlgut von PET-Flaschen. In der Regel liegen sonst bei gebrauchten Produkten Mischungen von verschiedenen Polymeren und starke Verunreinigungen mit Fremdstoffen vor, die aus Kosten- oder Qualitätsgründen die Wiederverarbeitung ausschließen können oder zu gänzlich anderen Verfahren zwingen.

Physikalische Eigenschaften von Regenerat

Die physikalischen Eigenschaften von Regenerat oder Mahlgut lassen sich mit verschiedenen Kenngrößen beschreiben [1, 2]. In der Praxis am wichtigsten sind:

- Schüttdichte und Kompressibilität
- Korngröße und Korngrößenverteilung
- Kornform und Rieselfähigkeit
- Feuchtegehalt

Schüttdichte und Kompressibilität

Am häufigsten erfolgt eine Charakterisierung von Regenerat über die Schüttdichte, die definiert ist als die Masse dividiert durch das Volumen, das eine in einer bestimmten Weise geschüttete Materialmenge einnimmt. Die Angabe erfolgt in kg/m^3 oder g/cm^3 .

Die Kompressibilität lässt sich anhand der Größe der Kräfte bewerten, die zur Änderung der effektiven Dichte der Materialschüttung notwendig ist.

Durch Randeffekte und die große Kompressibilität vieler Mahlgutmischungen hat das Messverfahren einen großen Einfluss auf die Schüttdichtemesswerte. Die Schüttdichte hängt stark von Größe und Form des Messgefäßes ab, weil an den Wänden die Packungsdichte des Materials geringer ist (Randeffekt). Weiterhin kann das Schüttgut beim Einfüllen durch ein unbeabsichtigtes Ausüben von Kräften oder durch Bewegung des Messgefäßes erheblich komprimiert werden. Dazu reicht oft schon ein leichtes Schütteln oder Rütteln aus.

Für Kunststoff-Formmassen ist die Schüttdichtemessung in einem zylindrischen Gefäß genormt, in welches das Material aus einem Trichter eingerieselt wird (Bild 1) [3, 5]. Der Einfüllvorgang ist damit gut reproduzierbar, und es wirken keine Kräfte ein, die eine Kompression bewirken könnten. Aufgrund des relativ kleinen Gefäßes ist aber ein erheblicher Randeffekt vorhanden.

Die Schüttdichte hat große Auswirkungen auf die Füllung der Schneckengänge im Einzugsbereich eines Einschneckenextruders. Dadurch bestimmt sie den spezifischen Durchsatz, von dem wiederum z.B. die Temperatur und Homogenität der Schmelze und schließlich die Produkteigenschaften beeinflusst werden. Eine konstante Schüttdichte ist somit eine wichtige Voraussetzung für eine konstante Produktqualität. Schüttdichtemessungen gehören daher bei der Wareneingangsprüfung von Rohstoffen und bei der Beurteilung von betriebsintern anfallendem Regenerat zum Standardumfang von Qualitätssicherungsmaßnahmen.

Zur genaueren Berechnung von Extruderdurchsätzen wurden Mess- und Berechnungsverfahren entwickelt, die den speziellen Randeffekten und zum Teil auch den dynamischen Vorgängen im Einzugsbereich von Einschneckenextrudern Rechnung tragen. Dazu gehören z.B. Ansätze, in die außer der Norm-Schüttdichte die minimalen, mittleren und maximalen Abmessungen der Partikel im Verhältnis zu den Abmessungen des Schneckenkanals eingehen [4], oder flachere Messgefäße, abgestimmt auf die Schneckenkanaltiefe [5]. Eigene Versuche mit

Ringspaltgefäßen, deren Abmessungen denen des Schneckenkanals im Einzugsbereich entsprechen, gehen in die gleiche Richtung [9].

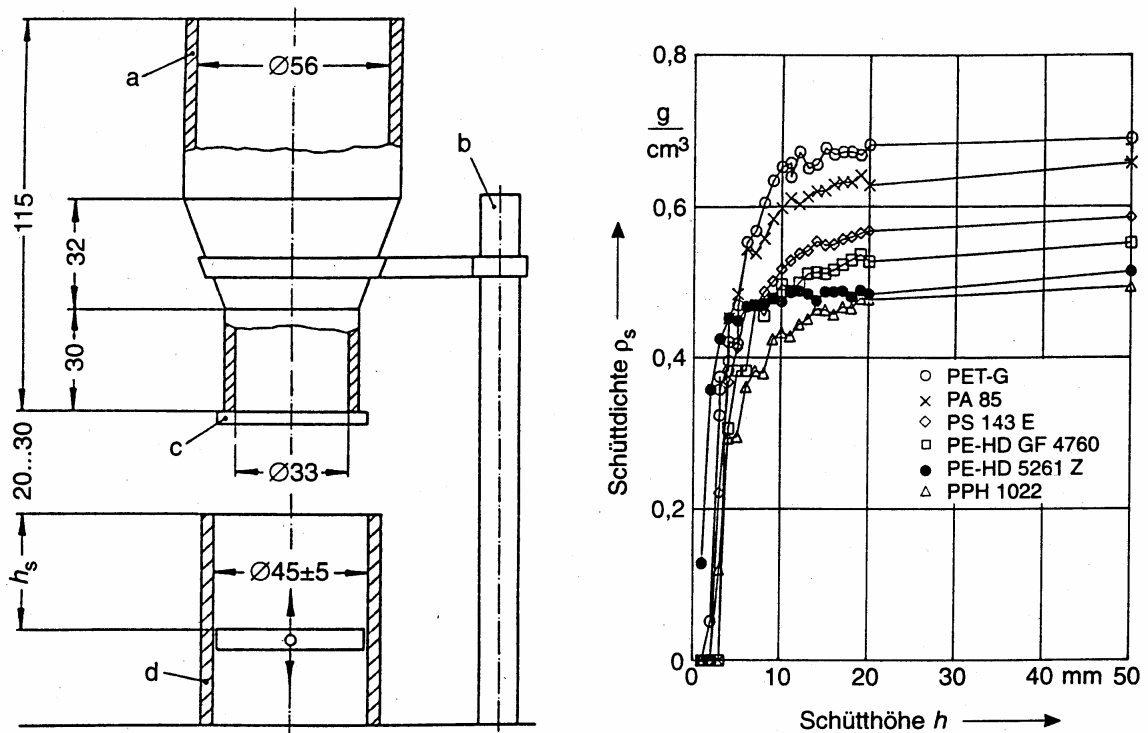


Bild 1: Messgerät zur praxisnahen Bestimmung der Schüttdichte im Einzugsbereich von Extrudern [5] und damit ermittelte Werte, in Anlehnung an DIN-Normen [3]

Man kann auf diese Weise Unterschiede zwischen verschiedenen Regenerattypen genauer bestimmen und Durchsatzberechnungen verfeinern. Es sollte jedoch beachtet werden, dass diese Methoden vor allem für die Durchsatzberechnung bei Neuware-Granulaten entwickelt wurden. Die Anwendung bei reinem Regenerat und Regenerat-/Neuware-Mischungen ist aufgrund der großen Bandbreite, die Form und Abmessung der einzelnen Körner bei diesen Materialien besitzen, schwierig.

Korngröße und Korngrößenverteilung

Korngröße und Korngrößenverteilung sind weitere Kennwerte zur Beschreibung der Eigenschaften von Regenerat. Sie stehen in einem engen Zusammenhang mit der Schüttdichte. Anhand von Siebanalysen mit standardisierten Prüfsieben erhält man die Massenanteile bestimmter Korngrößenfraktionen, die auf unterschiedliche Art und Weise ausgewertet und dargestellt werden können [1, 2].

In der Praxis werden Korngröße und Korngrößenverteilung bei Regenerat selten so wissenschaftlich genau untersucht. Wichtig sind in diesem Zusammenhang drei Merkmale, die an der Regeneratmischung in der Regel mit bloßem Auge erkennbar sind:

- Eine enge Korngrößenverteilung ist vorteilhaft. Damit wird Entmischungen vorgebeugt, die Prozessschwankungen hervorrufen können.

- Körner, die größer sind als die Gangtiefe des Schneckenkanals im Einzugsbereich des Extruders, können Störungen beim Materialeinzug auslösen.
- Am anderen Ende des Korngrößenbereichs kann ein hoher Staubanteil in Verbindung mit einer eventuellen statischen Aufladung Ablagerungen an den Wänden der Materialzuführung bilden. Staubklumpen, die sich aus diesen Bereichen lösen, können im Einzugsbereich des Extruders oder durch ihr verändertes Aufschmelzverhalten zu Problemen führen.

Kornform und Rieselfähigkeit

Eine weiteres Merkmal von Regenerat ist die Kornform. Regenerat bzw. Mahlgut besteht in der Praxis zwangsläufig aus einer Mischung von Körnern sehr unterschiedlicher Form (und Größe). Es lassen sich jedoch in der Regel bestimmte Grundformen klassifizieren, die jeweils bestimmte Eigenschaften haben. Die Kornform hängt im Wesentlichen ab von der Wanddicke der Produkte und dem Zerkleinerungsverfahren. Aus dickwandigen Blasformteilen lassen sich andere Korngeometrien erzeugen als aus dünnen Platten oder Folien.

Die Kornform bestimmt in entscheidendem Maße Schüttdichte, Kompressibilität und Rieselfähigkeit des Regenerats.

Unter der Rieselfähigkeit versteht man in diesem Zusammenhang, wie gut – d.h. wie schnell und ob überhaupt – die Regeneratmischung aus dem Einfülltrichter ausläuft und die Schneckengänge des Extruders füllt. Für die formale Bestimmung der Rieselfähigkeit gibt es genormte Messtrichter und -verfahren, z.B. [6], die jedoch nur bei PVC-Pulvern eine größere Verbreitung gefunden haben.

Die Bandbreite an Kornformen und Effekten ist sehr groß, und die Zusammenhänge sind komplex, deshalb im Folgenden nur ein paar Beispiele:

- Stark zerfranste Körner haben eine geringere Schüttdichte zur Folge. Zu geringen Schüttdichten führen aber auch große Stücke von dünnen Folien oder Fasern, wenn sie sich falten und ineinander verhaken. Durch zerfranste Kornkanten und das Verhaken leidet zugleich die Rieselfähigkeit.
- Im Allgemeinen am einfachsten zu verarbeiten sind Körner mit ‘anisotroper’ Geometrie, d.h. Körner die keine besondere Ausdehnung in einer Richtung oder in der Ebene haben, keine großen ebenen Oberflächen besitzen und keine zerfransten Kanten.
- Im Gegensatz dazu sind ‘isotrope’ Kornformen oft problematisch. Flache, ebene Schnitzel von Tiefziehfolien können sich zum Beispiel so zueinander anordnen, dass sie eine dichte Packung mit hoher Schüttdichte bilden, die selbst bei großen Trichterquerschnitten nicht mehr fließfähig ist. Das Regenerat ‘blockt’.

Feuchtegehalt

Die in Polymerrohstoffen enthaltene Feuchte beeinflusst die Verarbeitung und die Produkteigenschaften. Insbesondere Thermoplaste mit polaren Endgruppen (u.a. PC, PA, PBT, ABS)

nehmen aus der Umgebungsluft große Feuchtigkeitsmengen auf. Bei unsachgemäßer Lagerung von Regenerat, z.B. offener Lagerung im Freien kann auch Oberflächenfeuchtigkeit bis hin zum Durchnässen der Mischung hinzukommen.

Die zulässigen Restfeuchtigkeitsgehalte sind polymerspezifisch und exakt einzuhalten, um nachteilige Auswirkungen auf das Produkt zu vermeiden. Zu große Feuchtigkeitsanteile führen zum Aufschäumen der Schmelze und Blasen im Formteil und können einen Polymerabbau auslösen, der die Eigenschaften des Produkts verändert.

Die zahlreichen Feuchtigkeitsmessverfahren sind in der Literatur beschrieben (z.B. [1]).

Weitere Möglichkeiten zur Charakterisierung von Regenerat

Weitere physikalische Eigenschaften von Regenerat sind z.B. die Reibwerte, die aber schwer messbar sind und daher selten zur Charakterisierung herangezogen werden. Auch die statische Aufladbarkeit ist von Bedeutung, wenn sie – wie oben angesprochen – zu Materialablagerungen und Entmischungen führt.

In der Praxis ist auch auf Verschmutzungen, insbesondere durch harte oder metallische Fremdstoffe oder unverträgliche Polymere, zu achten.

Daneben kann vor allem noch die Temperatur, mit der die Regeneratmischung in den Extruder gegeben wird, einen großen Einfluss auf den Prozess haben.

Und es ist natürlich zu berücksichtigen, dass Regenerat sehr oft zusammen mit Neuware als Mischung weiterverarbeitet werden. Man muß dann auch die physikalischen Eigenschaften der Mischung analysieren, die wesentlich von den Mischungsanteilen abhängen.

In der Praxis werden die physikalischen Kennwerte von Regenerat und Regenerat-/Neuware-Mischungen wegen des damit verbundenen großen Aufwands selten in dem oben beschrieben Umfang unter formaler Anwendung der jeweiligen Messmethoden bestimmt. Es ist zudem sehr schwierig, aus festgestellten Kennwertänderungen abzuleiten, welche Auswirkungen sich für den weiteren Verarbeitungsprozess ergeben.

Es ist praxisüblich, die Verfahren zur Herstellung des Regenerats möglichst konstant zu halten und Messungen nur bei Bedarf durchzuführen.

Die Charakterisierung von Regenerat erfolgt daher oft auch einfach über Nennung von Ausgangsprodukt (z.B. Tiefziehfolie 800 µm) und Herstellungsverfahren (z.B. Mühlentyp und Sieblochgröße). Wobei zu beachten ist, dass auch der Verschleißzustand einer Mühle (Messer und Sieb), der sich fortschreitend ändert, die Regenerateigenschaften beeinflusst.

Änderung von Materialeigenschaften durch Mehrfachverarbeitung

Die Verarbeitung von Regenerat ist eng verknüpft mit den Effekten und Problemen, die bei einer Mehrfachverarbeitung von Polymeren auftreten.

Das Regenerat ist mindestens schon einmal durch den Verarbeitungsprozeß gelaufen und wurde dabei erwärmt, aufgeschmolzen und geschert; es hat bei hoher Temperatur als Schmelze einige Zeit verweilt und ist schließlich zum Produkt ausgeformt und abgekühlt worden. Dadurch können sich die chemischen Eigenschaften und die Molekülstruktur ändern.

Wenn bei einem Verarbeitungsprozess für einen Teil des Materialstroms ein Kreislauf entsteht, also ständig ein Teil des Produkts (z.B. Stanzgitter bei Tiefzehlfolien oder Butzen beim Blasformen) gemahlen, mit Neuware gemischt und in den Extruder zurückgeführt wird, ist zu beachten, dass – abhängig vom zurückgeführten Materialanteil – recht große Materialmengen vielfach den Extruder durchlaufen (Bild 2).

Regeneratanteil am Bruttodurchsatz z.B.	10 %	60 %
1-fach	90,00	40,00
2-fach	9,00	24,00
3-fach	0,90	14,40
4-fach	0,09	8,64
5-fach		5,18
6-fach		3,11
7-fach		1,87

Bild 2: Mehrfach verarbeitete Materialanteile bei ständiger Rückführung von Mahlgut

Polymere sind oft so gut stabilisiert, dass eine Mehrfachverarbeitung ohne wesentliche Änderung ihrer Eigenschaften möglich ist. Bei ungünstigen Bedingungen, z.B. hohen Prozesstemperaturen, langer Verweilzeit in der Schmelze, sehr starker Scherung oder hohem Feuchtigkeitsgehalt, ist jedoch mit einem Abbau der Molekülketten zu rechnen. Im Detail sind diese Abbauvorgänge polymerspezifisch und haben unterschiedliche Folgen, im Allgemeinen resultieren daraus vor allem eine niedrigere Viskosität und schlechtere Produkteigenschaften.

Bei Polyethylenen, insbesondere bei einigen hochmolekularen PE-HD-Typen, können dagegen bei normalen Verarbeitungsbedingungen zunächst Vernetzungsreaktionen auftreten, die die Viskosität erhöhen. Bei hoher thermischer Beanspruchung kommt es jedoch auch hier zu Abbaureaktionen.

Allgemeine Überlegungen und Anforderungen bei der Regeneratverarbeitung

Die wichtigste Motivation zur Verarbeitung von Regenerat ist die Kostenreduzierung durch Rohstoffeinsparung, die die Rückführung von Ausschuss, Butzen, Randstreifen, Stanzgittern oder anderen Materialresten in den Prozess ermöglicht. Dieser Kostenvorteil überwiegt praktisch immer die zusätzlichen Kosten für die Zerkleinerung und Aufbereitung des Materials und die aufwendigere Anlagentechnik. Aus wirtschaftlichen Überlegungen ist daher die möglichst vollständige Rückführung aller in Frage kommenden Materialreste in den Prozess anzustreben. Der maximal mögliche Regeneratanteil kann jedoch begrenzt sein, wenn die Prozesssicherheit oder die Produkteigenschaften gefährdet werden.

Grundsätzlich müssen bei der Planung einer Regeneratverarbeitung folgende Fragen gestellt und beantwortet werden:

- In welchen Mengen treten innerbetriebliche Produktionsabfälle auf, die als Regenerat in den Prozess zurückgeführt werden können, und treten diese kontinuierlich (z.B. Butzen beim Blasformen), zyklisch (z.B. Ausschuss beim regelmäßigen Anfahren nach Wochenenden) oder sporadisch (z.B. anderer Ausschuss) auf?
- Wie hoch darf der Regeneratanteil im Fertigprodukt sein, wenn bestimmte Produkteigenschaften (wie z.B. Festigkeit, Schlagzähigkeit, optische Transparenz usw.) nicht beeinträchtigt werden dürfen?
- Ist bei Regenerat aus coextrudierten Produkten die Rückführung in eine der Hauptschichten möglich oder muss die Rückführung in eine zusätzliche Schicht erfolgen? Ist die Einarbeitung des aus mehreren Polymeren bestehenden Coex-Regenerats überhaupt möglich, wenn bestimmte mechanische oder optische Produkteigenschaften gefordert sind?
- Wieviel Verunreinigung mit welchen Fremdstoffen kann toleriert werden, welche Reinigungsmaßnahmen sind möglich (z.B. vorbeugenden Maßnahmen, Metallabscheidung aus dem Mahlgut, Schmelzefiltrierung, Entgasung) und welche Überwachungsmaßnahmen notwendig?
- Wie wird das Regenerat am besten für den jeweiligen Anwendungsfall aufbereitet (z.B. Auswahl der Mühle für eine optimale Schüttdichte und Kornform, Entstaubung)?
- Welche Änderungen und zusätzlichen Aggregate (z.B. Stopfschnecken, Durchsatzregelungen, usw.) sind an der Verarbeitungsanlage notwendig, um die Regeneratverarbeitung sicher, ohne zu große Prozessschwankungen und ohne Durchsatzeinbußen zu ermöglichen?
- Ist eventuell ein grundsätzlich anderes Anlagenkonzept für die Regeneratverarbeitung besser geeignet als die Ergänzung einer Standardanlage (z.B. Entgasungsextruder statt Vortrocknung vor einem normalen Extruder, zusätzliche Schicht bei coextrudierten Produkten)?
- Lässt sich die Qualität der Fertigprodukte, falls gewünschte Eigenschaften nicht erreicht werden können, durch eine andere Prozessführung oder zusätzliche Nachbehandlungen verbessern?

Die technisch am besten geeigneten Konzepte sind anhand der Kosten zu bewerten.

Aufbereitung von Regenerat und Regeneratmischungen

Bei der Rückführung eines Regenerats in den Extruder werden oft einige Aufbereitungsschritte durchgeführt, die im jeweiligen Anwendungsfall entweder vorteilhaft oder sogar notwendig sind, um Prozessführung oder Produktqualität zu verbessern: Die wichtigsten sind:

- Entstaubung
- Metallabscheidung
- Mischung mit Neuware
- Vortrocknung
- Förderung aus dem Trichter in den Extruder mit oder ohne Vorverdichtung

Für diese Aufbereitungsschritte gibt es im Markt eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren und Geräte. Beispiele zur Unterstützung der Förderung aus dem Trichter in den Extruder zeigen die folgenden Bilder.

Mit einer senkrechten Förderschnecke im Einfülltrichter werden schlecht rieselnde Materialien mit geringer Schüttdichte verdichtet und gleichmäßig in den Einfüllbereich des Extruders gefördert (Bild 3).

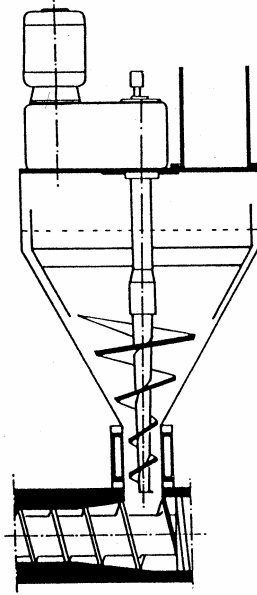


Bild 3: Senkrechte Förderschnecke im Einfülltrichter eines Extruders

Für die Zuführung von sehr leichten Materialien (z.B. dünne Folienschnitzel und Fasern), die stark schwankende Schüttdichten aufweisen können, haben sich seitliche Zufühaggregate bewährt. Eine Alternative zu Schneckenförderern ist hier die Rotary Channel Pump (RCP), bei der das Schüttgut von einer Scheibe mit U-förmigem Querschnitt mitgeschleppt, verdichtet und in den Extruder gefördert wird (Bild 4).

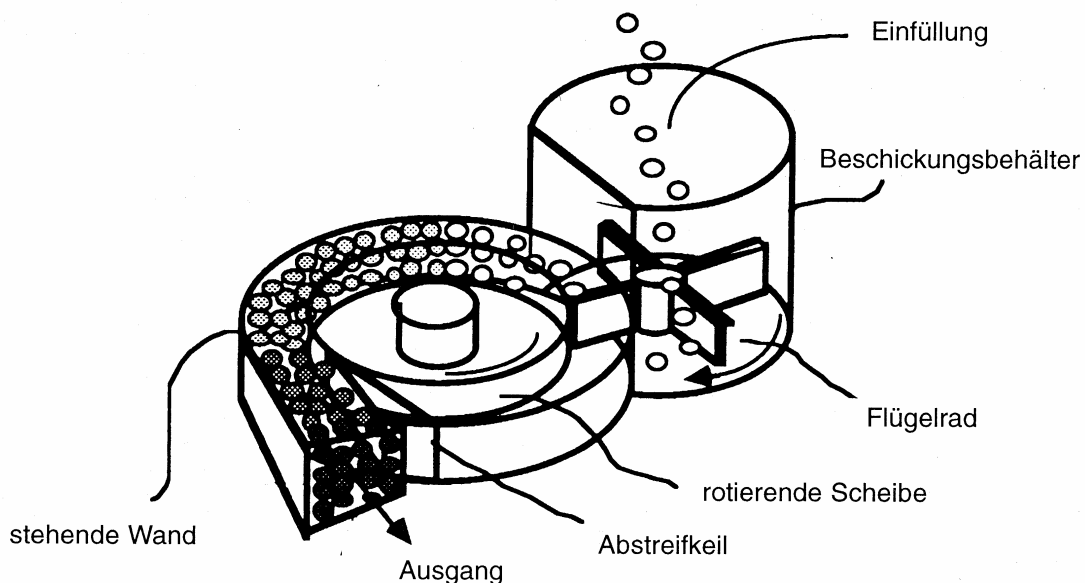


Bild 4: Rotary Channel Pump (RCP) (Funktionsprinzip, RCT srl, Varese/Italien)

Besonderheiten bei verschiedenen Verarbeitungsverfahren

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die Regeneratquellen und den typischen Regeneratanfall bei verschiedenen Verarbeitungsverfahren.

Verarbeitungsverfahren	Regeneratquellen	typischer Regeneratanfall [%]
Extrusionsblasformen	Butzen, Ausschuss	20 - 80
Tiefziehfolien	Stanzgitter, Randstreifen, Ausschuss	30 - 60
Breitschlitzfolien	Randstreifen, Ausschuss	5 - 10
Blasfolien	Ausschuss, Randstreifen und andere Folienreste (bei Nutzenschnitt)	2 - 10
Rohrextrusion	Ausschuss	2 - 5
Faserherstellung	Ausschuss (Wirrfasern)	2 - 3

Tabelle 1: Typischer Regeneratanfall bei verschiedenen Verarbeitungsverfahren

Kontinuierlich und in sehr großen Mengenanteilen fallen innerbetriebliche Produktionsabfälle, die zu Regenerat verarbeitet werden können, nur beim Extrusionsblasformen und bei Tiefziehfolien an. In geringeren Anteilen auch bei Breitschlitzfolien (Randbeschnitt) und Blasfolien, wenn letztere bei der Konfektionierung einen Beschnitt erhalten. Ansonsten kann bei allen Verarbeitungsverfahren der sporadisch und zyklisch (bei regelmäßigen Anfahrprozessen) auftretende Ausschuss als Regenerat in den Prozess zurückgeführt werden.

Neben der kontinuierlichen Rückführung eines Regeneratanteils in der in Tabelle 1 genannten Höhe ist es bei allen Verarbeitungsverfahren auch üblich, bestimmte Produkte zu 100 % aus Regenerat herzustellen. Dann handelt es sich jedoch um gesammeltes Regenerat aus anderen Prozessen.

Die unterschiedlichen Regeneratanteile, die verfahrenstypischen physikalischen Eigenschaften des Regenerats und auch das entweder kontinuierliche, zyklische oder sporadische Auftreten haben bei den verschiedenen Verarbeitungsverfahren zu ganz unterschiedlichen Weiterverarbeitungs Konzepten geführt. Im Folgenden einige Beispiele:

Extrusionsblasformen

Beim Extrusionsblasformen haben die abgequetschten, überstehenden Schlauchabschnitte (Butzen) einen großen Anteil am Bruttogewicht (Schussgewicht) des Formteils. Der Anteil kann zwischen 20 und 80 % betragen. Es ist üblich, die Butzen direkt an der jeweiligen Maschine abzutrennen, einzumahlen und über kleinere Zwischensilos, die zum Ausgleich von Prozessschwankungen dienen, direkt wieder in den Extruder zurückzuführen.

Manchmal werden auch zwei oder drei Blasformanlagen, an denen das gleiche Material verarbeitet wird, einer Mühle und einem Zwischenspeicher zugeordnet.

Diese kleinen Kreisläufe sind vorteilhaft, weil damit die Lagerung großer Materialmengen vermieden und die Gefahr der Verschmutzung oder der Vermischung mit anderen Rohstoffen verringert wird. In der Regel werden die Butzen noch warm zerkleinert und durch den Mahlvorgang weitere Energie eingebracht. Die direkte Rückführung des warmen Regenerats in einem kleinen Kreislauf hat daher auch energetische Vorteile.

Bei Mono-Produkten wird das Regenerat dem Neuware-Granulat in einem möglichst konstanten Anteil zugemischt. Bei coextrudierten Teilen erfolgt entweder die Zumischung in eine der Hauptschichten oder die Verarbeitung als zusätzliche Schicht im Formteil.

Da Butzen und Ausschuss-Blasformteile relativ dickwandig sind, ist das Regenerat beim Extrusionsblasformen im Allgemeinen grobkörnig und gut rieselfähig. Bei verschlissenen Messern oder Mühlensieben sowie bei zu hoher Mahltemperatur können die Körner aber stark zerfransen. Die Schüttdichte lässt sich in einem weiten Bereich über die Maschenweite der Mühlensiebe beeinflussen. Jedoch hat das Regenerat immer eine geringere Schüttdichte als Neuware-Granulate. Bei der Zumischung zu Neuware-Granulat hat auch die Mischung eine geringere Schüttdichte. Die beim Extrusionsblasformen bevorzugte Verarbeitung auf Nutbuchsensextrudern hat dann geringere spezifische Durchsätze und höhere Schmelzetemperaturen zur Folge. In Bild 5 sind diese Zusammenhänge dargestellt. Es besteht praktisch ein linearer Zusammenhang zwischen dem Regeneratanteil, der Schüttdichte und dem spezifischen Durchsatz. Aufgrund von Randeffekten nimmt der spezifische Durchsatz im Vergleich zur Schüttdichte der Mischung sogar überproportional ab [8, 9].

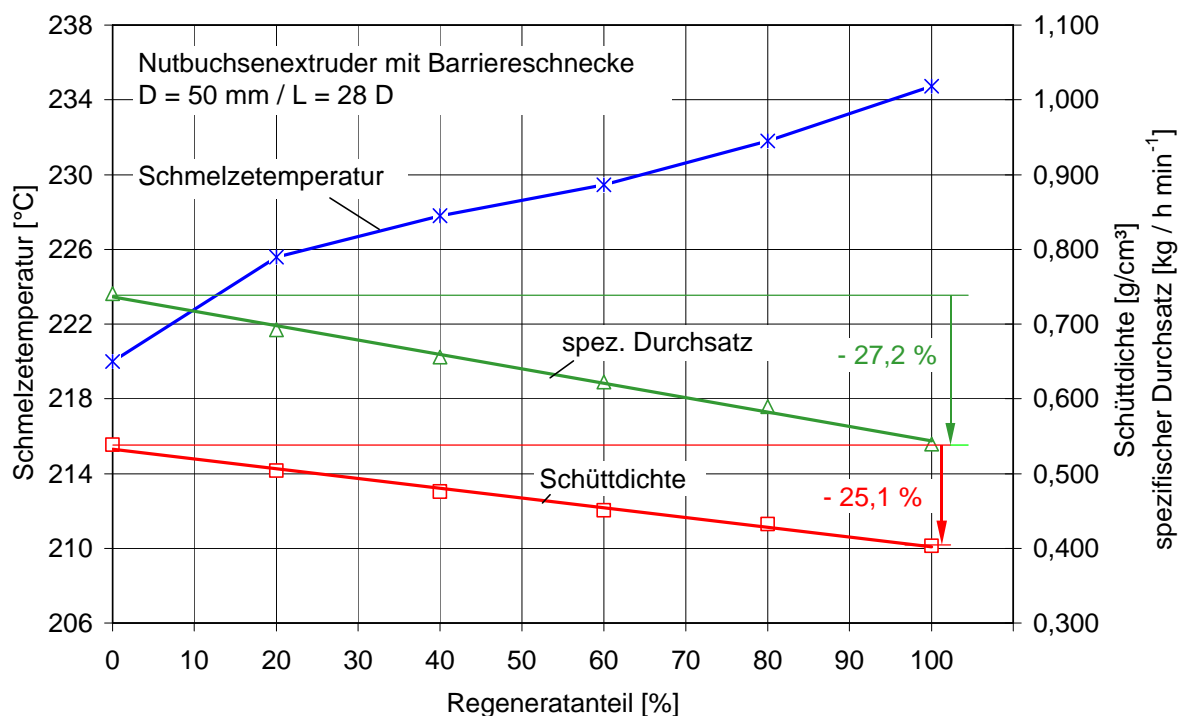


Bild 5: Einfluss des Regeneratanteils auf Schüttdichte, spezifischen Durchsatz und Schmelzetemperatur beim Extrusionsblasformen [8, 9]

Es gibt beim Extrusionsblasformen kaum Möglichkeiten, einen geringeren spezifischen Durchsatz bei der Zumischung von Regenerat zu verhindern. Glattrohretruder würden zwar weniger empfindlich auf die Schüttdichte reagieren, werden aber wegen der erheblich geringeren Durchsätze bei gleicher Baugröße und wegen des verfahrenstypisch zyklisch schwanken-

den Werkzeuggegendrucks durch die Veränderung der Düsenaustrittsspaltweite zur Wanddickenbeeinflussung nicht eingesetzt. Förderschnecken im Einfülltrichter und eine Vorverdichtung sind aufgrund der relativ hohen Schüttdichten und guten Rieselfähigkeit des Blasform-Mahlguts wenig wirksam.

Eigene Versuche haben gezeigt, dass Optimierungsmöglichkeiten im Einzugsbereich des Nutbuchsenextruders bestehen. Über das Gangtiefenprofil der Schnecke und den Verlauf von Nuten und Zylinderdurchmesser kann der Einfluss der Schüttdichte auf den spezifischen Durchsatz gedämpft werden. Bei verschiedenen Schnecken Größen wurden damit erreicht, dass bei der Zumischung von Regenerat der spezifische Durchsatz nur um 14 - 16 % abnimmt, obwohl die Schüttdichte des Regenerats um 26 % geringer ist [9].

Bei kontinuierlichen Blasformprozessen ist es Stand der Technik, zur Verarbeitung von Regenerat eine gravimetrische Durchsatzregelung einzusetzen. Damit können die Auswirkungen schwankender Eigenschaften der Mischung (z.B. Schüttdichte, Kornform, Temperatur) auf das Einzugsverhalten und den Durchsatz des Extruders längerfristig, d.h. im Bereich von Minuten ausgegletet werden [10]. Diskontinuierlich arbeitende Blasformanlagen besitzen eine Schneckendrehzahlregelung, mit der die Füllzeit des Speicherkopfs bei schwankendem Extruderdurchsatz konstant gehalten werden kann.

Eine Besonderheit stellt beim Extrusionsblasformen die Verarbeitung von hochmolekularen PE-HD-Typen dar, die als Neuware in Form von Gries und nicht als Granulat geliefert werden. Bei diesen Rohstoffen wird durch die Zumischung von Regenerat ein höherer Durchsatz auf Nutbuchsenextrudern erreicht als bei Verarbeitung von reiner Neuware. Die kompakten Mahlgutkörner im Gries erhöhen die Schüttdichte der Mischung und stabilisieren das Feststoffbett im Bereich der Nuten. Optimal sind Mahlgutanteile von 30 - 50 %.

Herstellung von Tiefziehfolien

Die Herstellung von thermogeformten Verpackungen erfolgt über das Zwischenprodukt Tiefziehfolie. Das ist eine Breitschlitzfolie, deren Dicke oberhalb von 150 - 200 μm liegt. Überwiegend verarbeitete Rohstoffe sind PS, PP, ABS und PET. Bis auf das PP erfordern diese Rohstoffen eine Vortrocknung oder die Verarbeitung auf einem Entgasungsextruder, um Feuchtigkeit zu entfernen. Entgasungsextruder haben sich häufig in der Praxis durchgesetzt, weil sie energetisch günstiger sind und neben der Entfernung der Feuchtigkeit aus der Schmelze auch die Entgasung von Restmonomeren und Abbauprodukten erlauben.

Geschlossene Extruder sind bei reiner PP-Verarbeitung ausreichend. Bei Anlagen, die im Wechsel PS und PP verarbeiten, wird in der Regel aber auch das PP mit der Entgasungsschnecke verarbeitet. Das zuweilen vorgesehene Verschließen der Entgasungsöffnung und der Einbau einer speziellen PP-Schnecke ermöglicht zwar höhere Durchsätze, erfordert aber auch einen aufwendigen Umbauschritt. Deshalb wird oft auf den Umbau verzichtet und PP ebenfalls mit einer Entgasungsschnecke verarbeitet. Die Entgasung von Oberflächenfeuchtigkeit, Restmonomeren und Abbauprodukten ist auch beim PP vorteilhaft für die Produktqualität.

Folienrandstreifen, An- und Abfahrrollen, Stanzgitter und Ausschuss-Thermoformteile fallen bei der Herstellung von Tiefziehfolien und Thermoformteilen in großen Mengen an und können als Regenerat in den Extruder zurückgeführt werden. Die Rückführung erfolgt in Form

von Mahlgut, Agglomerat oder Regranulat. Auf diese drei Möglichkeiten wird im Folgenden näher eingegangen.

Das Zerkleinern der Folienreste zu Mahlgut ist ein zunächst einfacher und wenig energieintensiver Vorgang. Die Schüttdichte hängt im Wesentlichen von der Folienstärke und in geringerem Maße auch vom Sieblochdurchmesser der Mühle ab. Nachteilig sind der große Staubanteil und die sehr schlechte Rieselfähigkeit der flachen, scharfkantigen und relativ steifen Schnitzel. In der Regel ist eine Entstaubung sinnvoll.

Die direkte Rückführung in den Extruder als Zumischung zur Neuware ist nur zu einem geringen Anteil möglich, wenn ein 'Blocken' im Einfülltrichter oder Probleme beim Materialeinzug sicher vermieden werden sollen.

Senkrechte Förder- oder Rührschnecken im Trichter können den Einfüllvorgang verbessern. Glattrohrextruder haben im Einzugsbereich tiefer geschnittene Schnecken und ihr Durchsatz wird nicht nur durch die Materialförderung im Einzugsbereich bestimmt, sie reagieren daher 'gutmütiger' auf Schwankungen von Schnitzelgröße und Schüttdichte als Nutbuchsenextruder und erlauben die Zumischung größerer Regeneratanteile.

Beim Agglomerieren werden die Folienschnitzel mit einer Förderschnecke verdichtet und zwischen eine feststehende und eine rotierende Scheibe gefördert. Die Scheiben sind mit Knetleisten versehen und auf einen definierten Spalt einzustellen. Das Material wird durch Friktion bis an den Erweichungspunkt erwärmt und tritt in einige Zentimeter langen Abschnitten zwischen den Scheiben aus. Über entsprechende Gebläse, Rohrleitungen und Zyklone werden die ausgeschleuderten Stücke beim Transport abgekühlt, bevor sie einer Mühle zugeführt werden.

Das gemahlene Agglomerat hat eine wesentlich höhere und gleichmäßigere Schüttdichte als die Folienschnitzel und ist gut rieselfähig. Es kann daher zu höheren Anteilen wieder in den Extruder zurückgeführt werden. Weitere Vorteile dieses Aufbereitungsverfahrens sind der relativ geringe Energieeinsatz und die geringe thermische Belastung des Materials. Es wird nur bis an den Erweichungspunkt gebracht und nicht völlig aufgeschmolzen. Deshalb ist der thermische Abbau gering. Insbesondere bei PET ist das von Vorteil.

Die Regranulierung der Folienschnitzel ist schließlich das energetisch und technisch aufwendigste Aufbereitungsverfahren. Vorteilhaft ist aber, dass das Material in eine Granulatform, staubfrei und mit sehr gleichmäßiger Schüttdichte überführt wird und sich im Extruder praktisch wie Neuware, ohne Durchsatzeinbußen und mit großer Durchsatzstabilität verarbeiten lässt. Bei der Regranulierung kann zusätzlich eine Entgasung und Filtrierung der Schmelze erfolgen. Allerdings ist die thermische Belastung des Rohstoffs höher als beim Agglomerieren. Bei einer Unterwassergranulierung oder Abkühlung der Stränge im Wasserbad kann im Weiteren auf eine zusätzliche Trocknung oder die Verarbeitung auf einem Entgasungsextruder nicht verzichtet werden. Im Vergleich zur direkten Rückführung der Folienschnitzel oder der Agglomeration sind die Investitions- und Betriebskosten für die Regranulierung hoch.

Bei der Herstellung von Tiefziehfolien gehören Schmelzefilter zum Stand der Technik. Ebenso Zahnradpumpen zur Gewährleistung sehr konstanter Durchsätze und zur notwendigen Entlastung der Entgasungsextruder vom Druckaufbau. Schwankende Extruderdurchsätze werden durch die Regelung des Pumpeneinlaufdrucks über die Schneckendrehzahl ausgeglichen.

Eine Besonderheit stellen geschäumte Tiefziehfolien dar. Die direkte Rückführung von Schaumfolienschnitzeln in den Extruder ist wegen ihrer extrem geringen Dichte sehr problematisch. Mit einer mechanischen Kompaktierung oder der Agglomerierung werden günstigere Bedingungen geschaffen. Die Regranulierung führt auch hier zu den besten Voraussetzungen für die Weiterverarbeitung, zumal sie ein Ausreagieren von Treibmittelresten ermöglicht und damit auch in dieser Hinsicht für konstante Regranulateigenschaften sorgt.

Unabhängig von der Art der Aufbereitung der Folienreste stellt sich auch bei der Tiefziehfolienherstellung die Frage, in welchem Anteil die Rückführung von Material zulässig ist, wenn bestimmte mechanische und optische Folieneigenschaften gefordert sind. Bei coextrudierten Folien ist zusätzlich zu überlegen, in welche Schicht das Regenerat eingebracht wird.

Herstellung von Tiefziehfolien mit einem CoAx-Entgasungs-Extruder

Die eingangs erläuterten Auswirkungen von Regeneratqualität und Regeneratanteil auf den spezifischen Durchsatz von Einschneckenextrudern führen bei der Herstellung von Tiefziehfolien mit Entgasungsextrudern zu einer besonderen Problematik.

Bei Entgasungsextrudern muss die zweite Schneckenstufe nach der Entgasungsöffnung immer eine größere Förderleistung haben als die erste Schneckenstufe, da sonst Schmelze aus der Entgasungsöffnung austritt. Bei einer konstanten Rohstoffqualität ist diese Aufgabe gut lösbar.

Wenn jedoch eine große Bandbreite an Rohstoffen und zusätzlich auch noch unterschiedliche Mahlgutanteile mit schwankender Qualität verarbeitet werden sollen, muss die erste Schneckenstufe auf die Materialmischung mit der höchsten Förderrate ausgelegt werden. Mit allen anderen Materialmischungen wird dann eine geringere Förderrate erreicht und ein Fluten der Entgasungsöffnung sicher vermieden. Allerdings hat das die nachteilige Folge, dass bei vielen Materialmischungen die Plastifizier- und Entgasungsleistung des Extruders bei weitem nicht ausgeschöpft werden kann.

Dieser Nachteil lässt sich durch Systeme vermeiden, bei denen die Förderrate der ersten Schneckenstufe weniger stark von den Eigenschaften der Materialmischung beeinflusst wird, oder durch Systeme, die eine direkte Beeinflussung der Förderrate erlauben.

Eine gute Lösung dieser Problematik bietet der CoAx-Entgasungs-Extruder, der von der ETA Kunststofftechnologie GmbH zusammen mit dem Institut für Produkt Engineering ipe der Universität Duisburg-Essen entwickelt wurde. Auf die Funktionsweise dieser Extruderbauart und ihre vielfältigen Einsatzmöglichkeiten wird in einem weiteren Beitrag dieses Seminars ausführlich eingegangen [10]. Hier sollen nur die Vorteile bei der Entgasungsextrusion von Tiefziehfolien beschrieben werden.

Der CoAx-Entgasungs-Extruder besitzt im Einzugsbereich eine zusätzliche, koaxial um die Hauptschnecke angeordnete Einzugsschnecke, die unabhängig von der Hauptschnecke angetrieben wird (Bild 6).

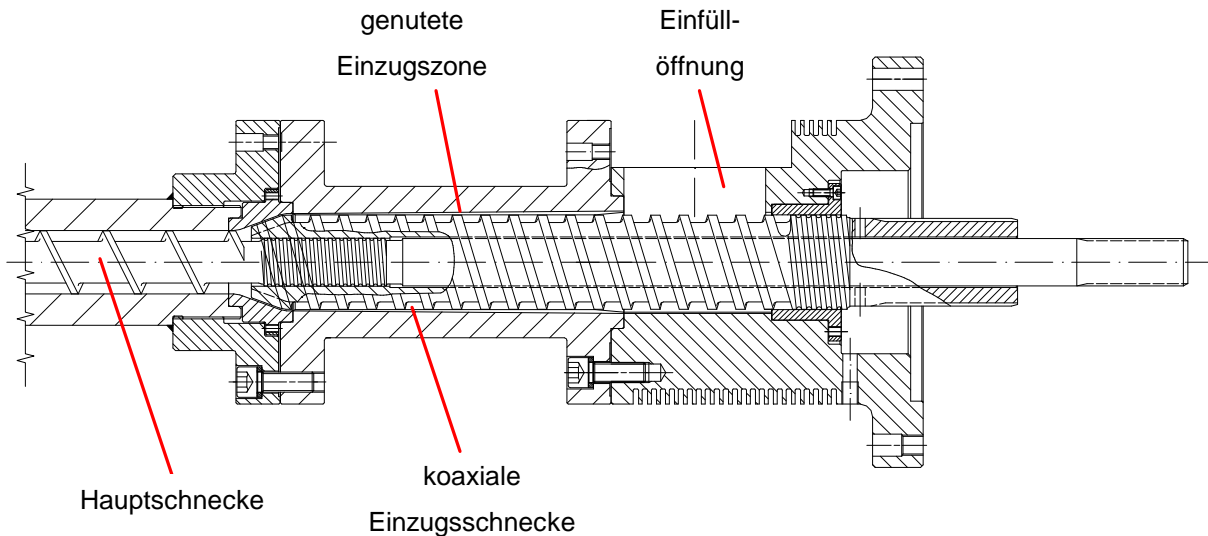


Bild 6: Einzugsbereich eines CoAx-Entgasungs-Extruders

Über die unabhängig von der Hauptschnecke einstellbare Drehzahl der Einzugschnecke besteht ein zusätzlich nutzbarer Freiheitsgrad, aus dem sich elementare Vorteile ableiten:

- Bei Materialien mit hohen Reibwerten und bei Materialmischungen mit einer geringen Schüttdichte kann die Förderrate angehoben werden, indem die Einzugschnecke wie eine Stopfmaschine betrieben wird. Dadurch kann bei diesen Materialtypen die Aufschmelzleistung der Hauptschnecke besser ausgenutzt werden, ohne einen Schneckenwechsel durchzuführen.
- Durch die Veränderung der Hauptschneckendrehzahl bei einem konstanten Durchsatz bzw. bei einer konstanten Einzugschneckendrehzahl besteht die Möglichkeit, die Mischqualität und die Schmelzetemperatur zu beeinflussen. Über die Hauptschneckendrehzahl kann bei einem konstanten Durchsatz außerdem das Druckaufbauvermögen der zweiten Stufe der Entgasungsschnecke verändert werden.
- Bei Materialmischungen, die zu Förderschwankungen neigen, können diese über die Einzugschneckendrehzahl ausgeregelt werden, während das Aufschmelzen und Mischen in der Hauptschnecke davon abgekoppelt bei einer konstanten Drehzahl erfolgt.
- Bei der Kombination des koaxialen Einzugsystems mit einer Entgasungs-Plastifiziereinheit kann die Förderrate auch bei sehr unterschiedlichen Rohstoffen bis zum Erreichen der maximalen Entgasungskapazität angehoben und zugleich ein Schmelzeaustritt aus der Entgasungsöffnung sicher vermieden werden.

In Bild 7 sind exemplarisch die Ergebnisse von Extrusionsversuchen mit einem glasklaren Polystyrol (PS) dargestellt.

Die Verhältnisse bei einem herkömmlichen Entgasungsextruder mit 1-teiliger Schnecke lassen sich mit dem CoAx-Extruder nachstellen, wenn Hauptschnecke HS und Einzugschnecke EZS mit einem festen Drehzahlverhältnis betrieben werden. Bei einem Drehzahlverhältnis von genau 2:1 tritt bei der Verarbeitung von 100 % Polystyrol-Granulat und einer Hauptschneckendrehzahl von 50 1/min gerade ein Fluten der Entgasungsöffnung ein. Das wäre daher z.B. der Eckpunkt, auf den man eine herkömmliche 1-teilige Entgasungsschnecke auslegen würde.

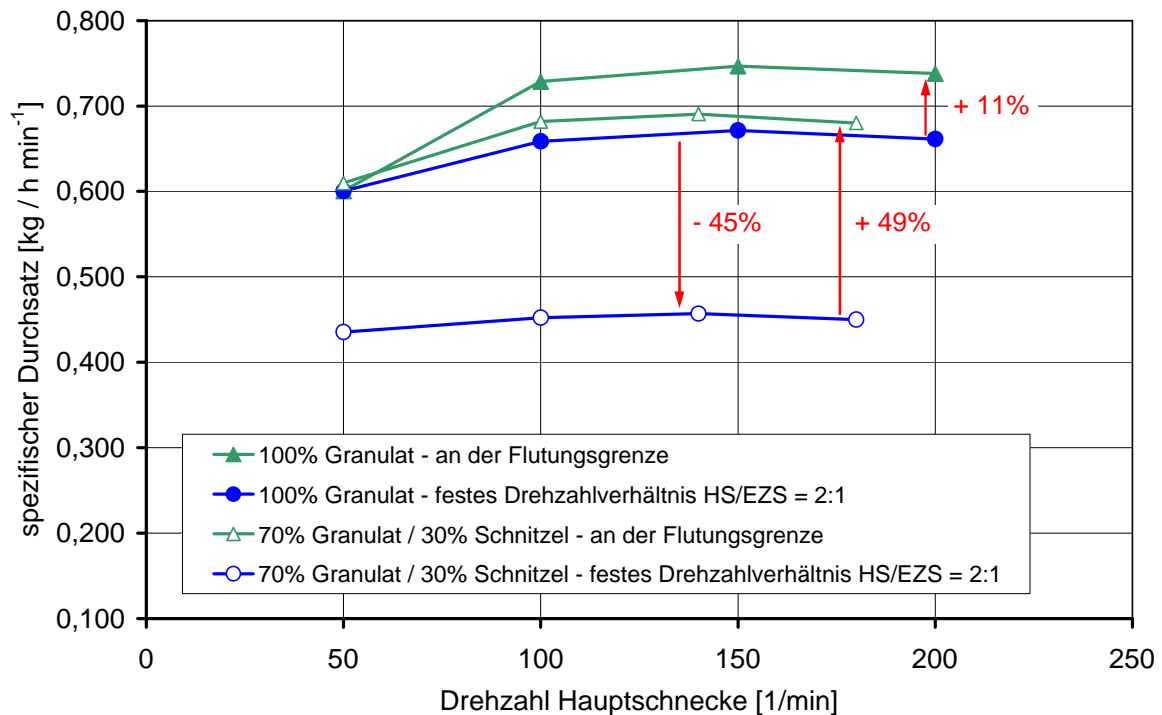


Bild 7: Spezifische Durchsätze eines CoAx-Entgasungs-Extruders 50/31D-V bei der Verarbeitung von glasklarem Polystyrol
Gegendruck in allen Betriebspunkten = 50 bar
Schüttdichte 100 % Granulat = 0,616 g/cm³
Schüttdichte Mischung 70 % / 30 % = 0,467 c/cm³
HS = Hauptschnecke, EZS = Einzugsschnecke

Wird bei dem gleichen Drehzahlverhältnis von 2:1 eine Polystyrol-Mischung bestehend aus 70 % Granulat und 30 % Schnitzel-Mahlgut verarbeitet, liegt der spezifische Durchsatz etwa 45 % niedriger als bei der Verarbeitung von 100 % Granulat (siehe Bild 7). Bei einer herkömmlichen, 1-teiligen Entgasungsschnecke würde sich ein ähnliches Ergebnis einstellen.

Neben der schon erwähnten Tatsache, dass mit diesem geringen spezifischen Durchsatz das Aufschmelz- und Entgasungsvermögen des Extruders bei weitem nicht genutzt wird, sind die weiteren nachteiligen Folgen eine höhere Schmelztemperatur und eine längere Verweilzeit der Schmelze im Extruder, wodurch eine Materialschädigung hervorgerufen werden kann.

Der über die koaxiale Einzugsschnecke veränderbare spezifische Durchsatz des CoAx-Extruders erlaubt einen Ausgleich des schlechteren Förderverhaltens der Granulat/Schnitzel-Mischung durch Anheben der Einzugsschneckendrehzahl. Auf diese Weise lassen sich bis zur Grenze, die durch das Fluten der Entgasungsöffnung gegeben ist, im Mittel um 49 % höhere spezifische Durchsätze erreichen, die sogar noch leicht über den Werten bei der Verarbeitung von 100 % Granulat mit festem Drehzahlverhältnis liegen (siehe Bild 7).

Selbst bei der Verarbeitung von 100 % Granulat lassen sich bei höheren Drehzahlen mit Hilfe der koaxialen Einzugsschnecke bis zur Flutungsgrenze noch Durchsatzsteigerungen von im Mittel 11 % erzielen.

Diese Versuchsergebnisse zeigen eindrucksvoll die große Flexibilität und die Leistungssteig-

rungen, die das Konzept des CoAx-Entgasungs-Extruders bei der Verarbeitung von Mahlgutmischungen bietet.

Herstellung von Breitschlitzfolien

Bei dünnen Mono- und Coex-Breitschlitzfolien, die mit Dicken von etwa 12 - 240 µm auf Chill-Roll-Anlagen hergestellt werden, ist der Randbereich verfahrensbedingt in aller Regel unbrauchbar. Zusammen mit einem eventuell vorhandenen Ausschnitt beim Nutzenschnitt kommen Materialanteile von 5 - 10 % zusammen. Für deren Weiterverarbeitung haben sich in der Praxis sechs Verfahren etabliert (Tabelle 2, in Anlehnung an [12, 13]).

Verfahren	Betriebsweise	Beschreibung
Trichtersysteme Mischtrichter, Stopfschnecke	Schnitzel, inline o. offline	Randstreifen und andere Folienreste werden gemahlen, mit dem Granulat gemischt und über den Trichter zugeführt, Unterstützung der Mischung und Einspeisung durch eine Förderschnecke im Trichter möglich
Kompaktiergeräte	Randstreifen, offline	Verdichtung der Streifen und anderer Folienreste, Kompaktierung und Rückspeisung in den Einfülltrichter
Agglomerator	Schnitzel, inline o. offline	Zerkleinerung der Streifen und anderer Folienreste, Agglomerierung und Rückgabe über den Einfülltrichter
Stopfextruder	Schnitzel, inline	Zerkleinerung der Streifen und andere Folienreste, Kompaktierung und Einspeisung mit einem Seitenextruder in den Feststoffbereich des Extruders
Bypassextruder	Randstreifen, inline	Einziehen und Aufschmelzen der Streifen in einem Seitenextruder und Einspeisung in den Schmelzebereich des Hauptextruders
Regranulierung	Randstreifen, inline o. offline	Einziehen und Aufschmelzen der Streifen und anderer Folienreste in einem zusätzlichen Extruder, Regranulierung und Rückführung über den Einfülltrichter

Tabelle 2: Verfahren und Systeme zur Randstreifenrückführung [12, 13]

Man unterscheidet zwischen inline arbeitenden Verfahren, bei denen die Randstreifen und eventuelle andere Folienreste kontinuierlich aufbereitet und in den Extruder zurückgeführt werden, sowie Systeme, die offline Schnitzel, kompaktierte, agglomerierte oder regranulierte Teilchen herstellen, welche fallweise ebenfalls direkt in den Extrusionsprozess zurückgeführt, zwischengelagert oder einer anderen Verwertung zugeführt werden können.

Die Auswahl des am besten geeigneten Verfahrens hängt auch von der Extruderbauform ab. Die Rückführung von Schnitzeln oder kompaktierten Folienstreifen über den Einzug scheidet bei Hochleistungsextrudern mit genutetem Einzug aufgrund der damit verbundenen Durchsatzminderung praktisch aus. Die Rückführung von Agglomerat oder Regranulat ist jedoch gut möglich. Glattrohrextruder erlauben dagegen auch die Zumischung von kompaktierten Folienresten und großen Anteilen an Schnitzeln im Einfülltrichter, allerdings auf einem generell geringeren Durchsatzniveau und mit geringeren Druckaufbauvermögen.

Blasfolienextrusion

Die Rückführung von eventuell bei der Herstellung von Blasfolien anfallenden Folienresten in den Verarbeitungsprozess ist im Wesentlichen wie bei dünnen Breitschlitzfolien zu sehen. Die Foliendicken liegen in einem ähnlichen Bereich und das Regenerat hat ähnliche Eigenschaften.

Bei Blasfolienanlagen fordern die Extrusionswerkzeuge dem Extruder einen höheren Druckaufbau ab als bei der Herstellung von Breitschlitzfolien. Hochleistungsanlagen sind daher heute praktisch ausschließlich mit Nutbuchsenextrudern ausgestattet. Daher werden sehr selten Verfahren angewendet, bei denen das Folienregenerat über den Einfülltrichter zurückgeführt wird. Man würde damit Durchsatzleistung und Druckaufbauvermögen der Extruder zu stark beeinträchtigen.

Rohrextrusion

Bei der Rohrextrusion wird das Regenerat wie beim Blasformen aus relativ dickwandigen Produkten gewonnen. Es gelten daher die gleichen Zusammenhänge wie oben für das Extrusionsblasformen erläutert. Da bei der Rohrextrusion in der Regel nur wenig Regenerat anfällt, sind die Anteile, die der Neuware zugemischt werden müssen vergleichsweise gering. Das macht vieles einfacher.

Bei einigen Rohrtypen (z.B. Gasrohren) darf aus Gründen der Produktsicherheit nur 100 % Neuware eingesetzt werden. Dagegen ist es bei Kabelschutzrohren üblich, aus Kostengründen sehr hohe Regeneratanteile zu verwenden, manchmal bestehen diese Rohre zu 100 % aus Regenerat, das bei anderen Prozessen angefallen ist und gesammelt wurde.

Bei den zur Rohrextrusion bevorzugt eingesetzten Nutbuchsenextrudern ist die Zugabe von Regenerat zur Neuware über den Einfülltrichter in der Regel problemlos möglich. Der Einsatz einer gravimetrischen Durchsatzregelung ist auch hier Stand der Technik.

Faserherstellung

Für die Rückführung von Materialien in den Prozess der Faserherstellung existiert eine Vielzahl an Verfahren. Kennzeichnend für die Faserherstellung ist, dass zwar nur geringe Materialanteile zu verwerten sind, durch die sehr hohen Durchsatzleistungen der Anlagen aber trotzdem sehr große Materialmengen entstehen. Dadurch können auch spezielle, aufwendigere Verfahren wirtschaftlich eingesetzt werden.

In der Regel sind die Anforderungen an die Reinheit der Schmelze sehr hoch. Ein Materialabbau ist ebenfalls zu vermeiden. Daher wird oft auf eine direkte Zurückführung von Faserresten in den Prozess verzichtet. Bei den häufig zu Fasern verarbeiteten Polyamiden und beim PET ist oftmals auch eine chemische Rückgewinnung zu Ausgangs-, Zwischen- oder Endrohstoffen wirtschaftlich [14].

Literaturverzeichnis

- [1] Schmiedel, H.: Handbuch der Kunststoffprüfung. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1992.
- [2] Pahl, M.H.: Lagern, Fördern und Dosieren von Schüttgütern. Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1989.
- [3] DIN EN ISO 60: Bestimmung der scheinbaren Dichte von Formmassen (Schüttdichte), Ausgabe 2000-01, früher: DIN 53466 und DIN 53468.
- [4] Schöppner, V.: Simulation der Plastifiziereinheit von Einschneckenextrudern, Dissertation, Universität-GH Paderborn, 1995.
- [5] Grünschloß, E.: Schüttdichte und Massedurchsatz in Nutbuchsenextrudern, Kunststoffe 83 (1993) 4, S. 309-311.
- [6] DIN EN ISO 6186: Bestimmung der Rieselfähigkeit, Ausgabe 1998-08.
- [7] N.N.: Hohlkörperprodukte, Blasformprodukte, Lupolen, Hostalen – Verarbeitung und Anwendungen. Mainz: Basell Polyolefine GmbH, 2002.
- [8] Wortberg, J., Michels, R.: Innovative Entwicklungen in der Einschneckenextrusion – Möglichkeiten und Grenzen der Hochleistungsextrusion, in: Der Einschneckenextruder – Grundlagen und Systemoptimierung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997.
- [9] Michels, R.: Verbesserung der Verarbeitungsbandbreite und der Leistungsfähigkeit von Einschneckenextrudern, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Shaker-Verlag, Aachen, 2005.
- [10] Bolder, G.: Gravimetrische Durchsatzmessung – Chancen zur Prozeßoptimierung und Qualitätssicherung, in: Blasformen `97 – Innovationen und Perspektiven. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997.
- [11] Rahal, H.: Neuentwicklungen in der Extrudertechnologie, in: Der Einschneckenextruder - Grundlagen und Praxis, Seminar, VDI-Wissensforum, 27.-28.04.06, Bad Dürkheim, 2006.
- [12] Fischer, P.: Einarbeitung von Produktionsabfällen und Rezyklat, Plastics Special, (1999) 9, S. 26-28
- [13] Herschbach, C.: Neuentwicklungen bei Anlagen zur Herstellung coextrudierter Breit-schlitzfolien, in: Coextrusion von Folien, VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996.
- [14] Fourné, F.: Synthetische Fasern. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1995.