

Klemens Kohlgrüber, Michael Bierdel

■ 1.1 Kunststoffe und ihre Bedeutung

Zu den fünf Grundbedürfnissen des Menschen [1] zählen:

- Nahrung
- Gesundheit
- Kleidung
- Wohnung
- Kommunikation

Dazu leisten die Kunststoffe in der heutigen Zeit erhebliche und wertvolle Beiträge. Dies ist offenkundig und wird im Rahmen dieses Handbuchs nicht weiter beschrieben.

Der Werkstoff Kunststoff ist im Vergleich zu den anderen Werkstoffgruppen (Metall, Glas, Keramik, Holz, Papier) sehr jung. Durch Staudinger wurde ab Mitte der 20er Jahre eine Basis für das Verständnis der Polymere (Makromoleküle) gelegt. Insbesondere in der IG-Farben-Industrie folgte eine Entwicklung von verschiedenen Polymeren, beispielsweise 1937 Polyurethan durch O. Bayer. Durch Ziegler Natta und gleichnamige Katalysatoren wurde die wirtschaftliche Herstellung von Polymeren beschleunigt. Bei Bayer wurde 1953 Polycarbonat erfunden.

Anfangs wurden die Kunststoffe diskontinuierlich hergestellt, der wirtschaftliche Erfolg der Kunststoffe ist aber mit dem Erfolg der kontinuierlichen Herstellungsweise und insbesondere bei Thermoplasten mit dem Erfolg der Extruder verbunden. Die Basisgeometrie von gleichläufigen Doppelschneckenextrudern wurde 1944 angemeldet und 1953 für die Bundesrepublik Deutschland erteilt.

■ 1.2 Aufbereitung und Compoundierung

In der Vergangenheit entstanden neue Kunststoffe durch neue Basispolymere. Heutzutage entsteht ein (neuer) gebrauchsfertiger Kunststoffwerkstoff erst durch die **Aufbereitung** eines Basispolymers während und nach der Polymerreaktion (Synthese) und durch die **Compoundierung**, also die anschließende Einarbeitung von Zusatzstoffen, wie Additiven, Füllstoffen, Fasern und Farben. Bild 1.1 zeigt beispielsweise, welche Einflüsse Füllstoffe bei PTFE-Kunststoffen haben [2]. Bild 1.2 zeigt eine qualitative Schätzung der Entwicklung zur Bedeutung der „Polymer-Aufarbeitung und Kunststoff-Compoundierung“, unserem Buchtitel. Die blaue Kurve beschreibt die Anzahl neu entwickelter Basispolymere und die grüne Kurve gibt die Menge produzierter Kunststoffe wieder.

Eigenschaft	Füllstoff						
	Glas (bis 40 %)	Kohle (bis 35 %)	Hartkohle (bis 35 %)	Graphit (bis 15 %)	MoS ₂ (bis 5 %)	Bronze (bis 60 %)	Stahl (bis 60 %)
Verschleiß	→	→	→	→	→	→	→
Abrieb (Gegenlaufpartner)	→	→	→	→	→	→	→
Chemische Beständigkeit	→	→	→	→	→	→	→
Wärmeleitfähigkeit	→	→	→	→	→	→	→
Gleiteigenschaften	→	→	→	→	→	→	→
Reibungskoeffizient	→	→	→	→	→	→	→
Härte	→	→	→	→	→	→	→
Steifigkeit	→	→	→	→	→	→	→
Trockenlaufeigenschaften	→	→	→	→	→	→	→

Trends: blau = neutral, grün = positiv, rot = negativ

Bild 1.1 Einfluss von Füllstoffen auf das Eigenschaftsprofil von PTFE-Kunststoffen [2]. Mit freundlicher Genehmigung von pro-K Industrieverband Halbezeuge und Konsumprodukte aus Kunststoff e. V.

Der Begriff Compoundieren ist bis dato im Duden nicht enthalten. Er bedeutet im weitesten Sinne Mischen, ein Verfahrensschritt, der bei der Polymeraufbereitung vielfach vorkommt und der eine der Hauptoperationen ist. Dabei wird unterschieden zwischen:

- Mischen von Feststoffen und
- Mischen in der Schmelzphase des Polymers (Schmelzecomoundieren).

Das sogenannte „Kaltmischen“ erfolgt bei Raumtemperatur, beim „Heißmischen“ werden die Komponenten erwärmt; wobei Polymergranulat oder Polymerpulver fest bleibt, während Additive sich verflüssigen können.

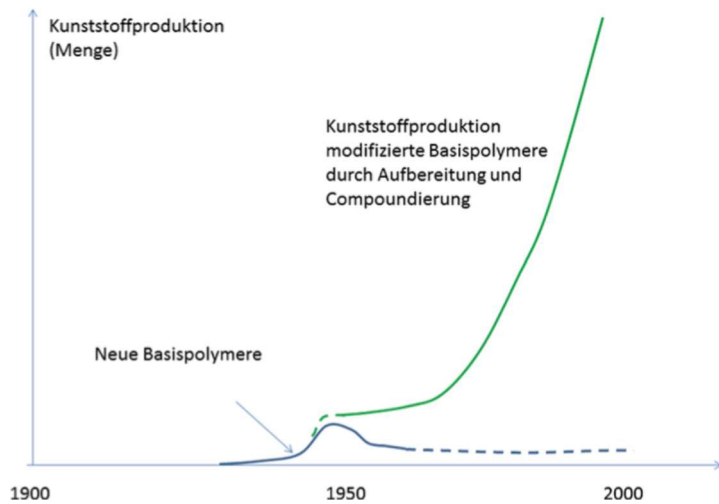


Bild 1.2 Bedeutung der Aufbereitung und Compoundierung für Kunststoffe (Schätzung)

Zu Beginn der Kunststoffentwicklung und der Kunststoffherstellung wurden „Batch-Verfahren“ verwendet. Eine Übersicht der entsprechenden Batch-Apparate und Maschinen beschreiben [3] und [4]. Heute werden insbesondere für die wirtschaftliche Herstellung der am meisten verwendeten Kunststoffe, die Thermoplaste, kontinuierliche Herstellverfahren angewendet, die in dem vorliegenden Buch mit den entsprechenden Apparaten und Maschinen beschrieben werden. Die Schmelzecomoundierung erfolgt normalerweise in Extrudern und wird in diesem Buch ausführlich beschrieben.

■ 1.3 Wiederverwertung von Kunststoffen

Kunststoffe sind unentbehrliche Werkstoffe. Wegen der insbesondere in manchen Ländern mangelhaften Entsorgung und der langen Haltbarkeit, sammeln sich immer mehr Kunststoffe in der Umwelt an und Kunststoffe geraten zunehmend in Kritik. In Deutschland haben wir eine gute Ordnungspolitik, was die Abfallentsorgung betrifft. Bild 1.3 zeigt die Verwertung von Kunststoff-„Abfällen“ in Deutschland nach ihrem Gebrauch:

- 53 % der Abfälle werden zur Energiegewinnung genutzt;
- 46 % werden werkstofflich wiederverwertet, wobei sich daraus häufig Kunststoffe schlechterer Qualität ergeben;

- lediglich 1 % der Abfälle wird wieder in Rohstoffe umgewandelt, die erneut zur Herstellung von Kunststoffen genutzt werden können;
- ebenfalls bei lediglich 1 % liegt der Anteil der Kunststoffe, die letztlich auf einer Deponie gelagert werden.

Rohstoffliches und werkstoffliches Recycling werden in Zukunft wichtiger werden. Im vorliegenden Buch werden das **lösungsmittelbasierte Recycling** und das **mechanische Recycling, die Recompoundierung**, kurz angeschnitten. Auch die EU-Politik beschäftigt sich mit dem Thema Kunststoff-Recycling und fordert: „Wir brauchen weniger und bessere Kunststoffe“ [7]. Es wird eine Produktionsumstellung verlangt, „da Kunststoffe zur größten Umweltgefahr werden“.

Auch in den Medien wird zurzeit über den Werkstoff „Kunststoffe“ meist kritisch berichtet. Die Vorteile dieses Werkstoffes gegenüber anderen Werkstoffen dürfen dabei nicht übersehen werden. Vorteile werden z. B. in den kürzlich ausgestrahlten TV-Sendungen [8] und [9] dargestellt. Im Idealfall ist natürlich ein unendlich oft recycelfähiger und somit wiederverwendbarer Kunststoff anzustreben. Eine energetische Verwertung der Kunststoffe, die schon als „Wertstoff“, z. B. einem Handygehäuse verwendet wurden, ist jedoch besser als eine direkte „Verbrennung“ des Erdöls, Bild 1.3.

Die Entwickler von Verfahren zur Polymer-Aufbereitung und von Maschinen und Apparaten zur Kunststoff-Compounding werden sich diesen Herausforderungen stellen müssen. Durchsetzen werden sich nur solche Verfahren und Maschinen, die ökologisch und wirtschaftlich am vielversprechendsten sind.

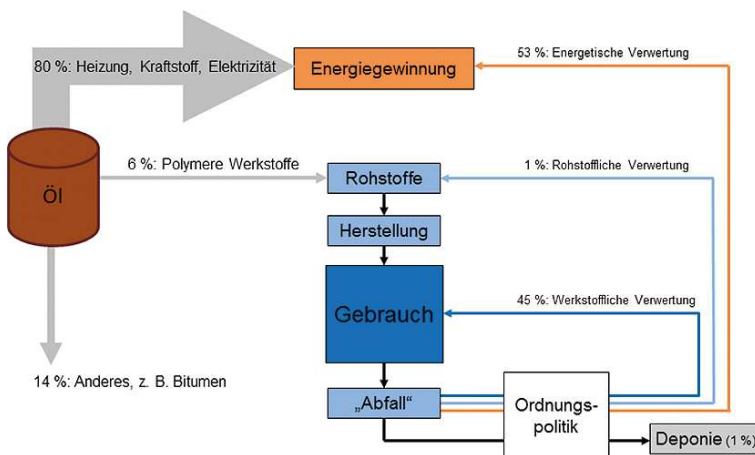


Bild 1.3 Öl als Basis von Kunststoffen einschließlich der Wiederverwertung von Kunststoffprodukten (nach [5], Zahlenwerte zur Verwertung nach [6])

■ 1.4 Erläuterungen zu den einzelnen Kapiteln des vorliegenden Buches

Das vorliegende Buch ist in vier Buchteile gegliedert:

Buchteil „A“ beschreibt, was unter der Aufbereitung von Polymeren zu verstehen ist. Sehr ausführlich wird die Compoundierung beschrieben, der Weg vom Polymer zum gebrauchsfertigen Kunststoff.

Buchteil „B“, die Aufbereitung bei der Primärproduktion von Polymeren, beschreibt als Schwerpunkt die „Entgasung“ von Polymeren mit den zugehörigen Apparaten und Maschinen.

Buchteil „C“ behandelt das umfangreiche Thema Compoundieren. Mit welchen Additiven und anderen Zusatzstoffen werden die Basispolymere modifiziert und gebrauchsfertig haltbar gemacht? Die Haupt-Einmischung erfolgt bei der „Schmelze-compoundierung“ in Extrudern. Welche Extruderbauarten gibt es? Welche Extruder sind für die Compoundierung besonders gut geeignet und welches sind die Vor- und Nachteile? Diese Fragen werden behandelt.

Buchteil „D“ beschäftigt sich mit weiteren wichtigen Anlagenkomponenten einer Aufbereitungsanlage. Dazu gehören die Themen wie Schmelzefiltration, die Granulation als Übergang von Schmelze zum Feststoff und die Feststoffverfahren. Auch die Dosier- und Messtechnik sind wichtige Bestandteile heutiger Verfahren.

Die Herausgeber haben Experten zu den Buchteilen A bis D als Autoren gewinnen können und die Beiträge mit den Autoren abgestimmt. Trotzdem spiegeln die Beiträge die Meinungen und die Erfahrungen der Autoren wider. In einigen Punkten kann dies auch abweichend von der Erfahrung der Herausgeber sein. Als Summe sind alle Beiträge eine wertvolle Bereicherung für das Buch und es sei nochmals an dieser Stelle allen Autoren gedankt!

Literatur zu Kapitel 1

- [1] Wolfgang Kaiser: Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese bis zur Anwendung, Hanser-Verlag, 4. Auflage 2015
- [2] pro-K Industrieverband Halbzeuge und Konsumprodukte aus Kunststoff e.V.: <https://www.pro-kunststoff.de/assets/Merkbl%C3%A4tter%20und%20Co/FP%20TM-02-Einf%C3%BChrung-in-die-Verarbeitung-von-PTFE-Kunststoffen-M%C3%A4rz-2019.pdf>, abgerufen am 9.5.2019
- [3] White, Coran, Moet: Polymer Mixing, Hanser Verlag, 2001
- [4] White, Bumm: Encyclopedia of Polymer Blends: Volume 2: Processing, Abschnitt 1.2 „Methods of Compounding“, First Edition. Edited by Avraam I. Isayev. Wiley-VCH Verlag, 2011
- [5] PlasticsEurope, Der Verband der Kunststoffherzeuger
- [6] Consultic: Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015 – Kurzfassung, 2016

- [7] <https://eu-recycling.com/Archive/21436>: „Wir brauchen weniger und bessere Kunststoffe“, abgerufen am 23.03.2019
- [8] NTV: Revolution Kunststoff – Ein Material erobert die Welt, ausgestrahlt am 13.11.2018
- [9] SWR: Plastik ist toll – Zeitreise der Kunststoffproduktion. <https://www.swr.de/odysso/zeitreise-der-kunststoffproduktion/-/id=1046894/did=20400660/nid=1046894/fv9ekk/index.html>, ausgestrahlt am 16.11.2017

Wärmekapazität bei konstantem Druck. Der Unterschied wird bei sehr hohen Drücken und Temperaturen größer.

- ρ_A Dichte des Austrittsmassenstroms bei der Temperatur \bar{T}_A .
- p_A Austrittsdruck des Produktes an der Systemgrenze. Das kann der Druck vor der Düse sein, aber auch der Druck nach der Düse, je nachdem, wo die Systemgrenze gesetzt wird. Die Austrittstemperatur ändert sich in Abhängigkeit von der Systemgrenze. Ein Beispiel dazu in [8] Seite 364.
- $\dot{Q}_{\text{Gehäuse}}$ ist der über das innere Schneckengehäuse abgegebener oder aufgenommener Wärmestrom. Die Größe ist eine Prozessgröße und das Vorzeichen wurde so gewählt, dass ein abgegebener Wärmestrom (Kühlung) positiv ist. Formal kann der Wärmestrom wie folgt ausgedrückt werden, [8] Seite 358:

$$\dot{Q}_{\text{Gehäuse}} = U_G \cdot \int_{l_1}^{l_2} \alpha(t) \cdot (\bar{T}(t) - \bar{T}_{\text{Gehäusewand}}(t)) dt \quad 2.28$$

Dabei ist U_G der innere Gehäuseumfang. Da der Verlauf der Größen in der Gleichung in der Regel nicht bekannt ist, kann der Wärmestrom durch Mittelwertbildung überschlägig bestimmt werden:

$$\dot{Q}_{\text{Gehäuse}} = U_G \cdot (l_2 - l_1) \cdot \alpha_m \cdot (\bar{T}_m - \bar{T}_{\text{Gehäusewand},m}) \quad 2.29$$

Der Index m beschreibt eine Mittelung längs des Extruders bzw. der Länge l_2 bis l_1 . Bei einer Flüssigkeitskühlung oder -Heizung ist der Wärmestrom auch messtechnisch bestimmbar.

- P_{Heizung} : Im Fall einer elektrischen Beheizung innerhalb einer bestimmten Extruderlänge werden nicht Formel 2.28 oder Formel 2.29 angewendet, sondern zweckmäßig die elektrische Heizleistung eingesetzt.
- P_W : Die eingebrachte Leistung in die Schneckenwelle bzw. Schneckenwellen bei mehreren Wellen.
- $\dot{H}_{\text{Entgasung}}$ abgegebener Enthalpiestrom durch Entgasen der Schmelze.
- $\sum_{i=1}^n \left(c_{Ei} \cdot \bar{T}_{Ei} + \frac{p_{Ei}}{\rho_{Ei}} \right) \dot{M}_{Ei}$ zugeführte Enthalpieströme durch Polymere und Zusatzstoffe, insgesamt n (sinngemäße Bedeutung der Formelzeichen).

Chemische Reaktionen, also zum Beispiel eine Reaktivextrusion, werden hier nicht betrachtet. Diese können durch weitere Terme berücksichtigt werden.

Für Vergleiche ist es zweckmäßig, die Energieströme in Formel 2.27 auf den Durchsatz des Ausstoßes zu beziehen:

$$c_A(\bar{T}_A) \cdot \bar{T}_A + \frac{p_A}{\rho_A(\bar{T}_A)} = \sum_{i=1}^n \left(c_{Ei} \cdot \bar{T}_{Ei} + \frac{p_{Ei}}{\rho_{Ei}} \right) \cdot m_{Ei} + e_W - e_{\text{Gehäuse}} - e_{\text{Entgasung}} \quad 2.30$$

Ist der Druck am Austritt bekannt, dann kann die energetisch mittlere Produkt-austrittstemperatur mit Formel 2.30 berechnet werden. Wie numerische Beispiele zeigen, ist der durch Druck benötigte Leistungsanteil sehr gering. Der Austrittsdruck muss folglich nicht genau bekannt sein oder wird vernachlässigt.

Wegen der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte in der Gleichung ist T_A nicht direkt aufgelöst in der Form $T_A = \dots$ auszudrücken, sondern kann iterativ bestimmt werden.

In Formel 2.30 wurden folgende Abkürzungen bzw. Definitionen eingeführt:

Spezifischer Leistungseintrag über die Extruderwelle(n):

$$e_W = \frac{P_W}{\dot{M}_A} \quad 2.31$$

Spezifischer Energieanteil, der über das Gehäuse zu oder abgeführt wird (positiv bei Abführung):

$$e_{\text{Gehäuse}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Gehäuse}} - P_{\text{Heizung}}}{\dot{M}_A} \quad 2.32$$

Enthalpieanteil, der durch eine Entgasung abgeführt wird:

$$e_{\text{Entgasung}} = \frac{\dot{H}_{\text{Entgasung}}}{\dot{M}_A} \quad 2.33$$

Definition der Massenanteile der einzelnen zugeführten Stoffe:

$$m_{Ei} = \frac{\dot{M}_{Ei}}{\dot{M}_A} \quad 2.34$$

Es gilt die Massenerhaltung:

$$\dot{M}_A = \sum_{i=1}^n \dot{M}_{Ei} \quad \text{also} \quad \sum_{i=1}^n m_{Ei} = 1 \quad 2.35$$

Damit sind alle Größen in Formel 2.30 beschrieben.

Diese enthält die Informationen, welche Farbmittel in welchen Kunststoffen eingesetzt werden können und ab welcher Konzentration negative Einflüsse auf insbesondere die mechanischen Eigenschaften zu erwarten sind. Am Anfang einer Farbentwicklung steht die Festlegung des Farbziels. Das kann sowohl ein vom Kunden bereitgestelltes Muster, eine Farbe aus einem Farbkatalog (RAL, Pantone etc.) oder auch eine schon in der Vergangenheit ausgearbeitete Rezeptur sein. Je länger ein Unternehmen Kunststoffe einfärbt, desto größer ist der Katalog an bestehenden Farben. Für den Compoundeur und dessen Kunden ergeben sich daraus sowohl finanzielle als auch zeitliche Vorteile. Entwicklungskosten entfallen und das gewünschte Produkt ist sofort lieferbar. Bild 4.10 zeigt exemplarisch eine Auswahl an transparenten Einfärbungen.



Bild 4.10 Auswahl transparenter Einfärbungen

Findet sich keine passende Farbe, so ist dann bei der Neuentwicklung die erste Aufgabe die Festlegung einer Startrezeptur. Ziel ist es, mit dieser Startrezeptur so nah wie möglich an das gewünschte Farbziel heranzukommen. In weiteren Korrekturschritten kann dann die Feinjustierung erfolgen. Bei der Entwicklung dieser Farbformel ist sehr viel Erfahrung notwendig. Die Farben werden grundsätzlich visuell vom menschlichen Auge am besten beurteilt. Modernste Technik ist heute aber auch in der Lage, Farben messtechnisch zu erfassen. Kombiniert man nun die Messtechnik mit bekannten Pigmentrezepturen und den zugehörigen Farborten mit aktueller Computertechnik, so erhält man ein System, das Farbformeln vorausberechnen kann. Ein Computersystem ist, wie bekannt, aber immer nur so gut wie die eingegebene Datenbasis. Aus diesem Grund produziert man sogenannte Eichreihen. Diese Eichreihen werden dann im System eingemessen und bilden die Grundlage für die Berechnung.

Die beiden Bilder 4.11 und 4.12 zeigen exemplarisch die Eichreihen zweier Pigmente. Bei den Eichreihen werden neben den unterschiedlichen Pigmentkonzentrationen (mittlere Reihe) auch unterschiedliche Mengen an Weißpigmenten (obere Reihe) zugesetzt. Zum Schluss gibt es dann noch die Kombination mit einem Schwarzpigment (untere Reihe). Je mehr Pigmentrezepturen und die jeweils zugehörige Farbe darüber hinaus entwickelt und ebenfalls im System hinterlegt werden, desto größer wird die Datenbasis. Damit können dann vom Kunden bereitgestellte Farbmuster eingemessen werden und im Idealfall liefert das System dann eine passende Startrezeptur, die allenfalls noch mit wenigen Korrekturschritten auf dem Entwicklungsextruder nachjustiert werden muss.

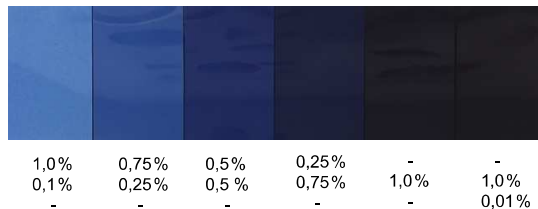


Bild 4.11 Eichreihe eines Blaupigmentes

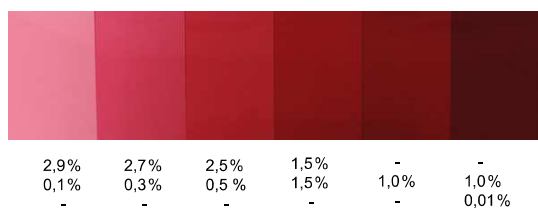


Bild 4.12 Eichreihe eines Rotpigmentes

4.2.5 Innovation

Bei Entwicklungen geht es immer auch um Innovationen. Je innovativer ein neues Produkt wird, desto größer ist das Alleinstellungsmerkmal im Markt und damit der mögliche Gewinn. Betrachtet man unter diesem Aspekt nun noch einmal die drei Bausteine der Produktentwicklung, so ergeben sich unterschiedliche Potentiale.

Rezeptur: Alle Bestandteile der Rezeptur werden in der Regel von den Compoundeuren zugekauft. Demzufolge sind diese Stoffe für jeden frei im Handel verfügbar und bieten kaum Möglichkeiten, sich vom Mitbewerber abzugrenzen. Wichtig sind

lierungen benötigt, so hilft häufig nur eine komplett ummantelte Schnecken-geometrie, um wirtschaftlich arbeiten zu können.

Zu 3.: PVC ist ein empfindliches Material, bei dessen Verarbeitung jede Art von Toträumen vermieden werden sollten. Toträume entstehen durch willkürliches Herausstrennen von Schneckenstegen, um z.B. Temperaturspitzen in der Kompression zu vermeiden, und durch Freistiche in den Schneckengängen. Diese Veränderungen führen zu einer deutlichen Verschlechterung der Kammerförderwirkung der gegenläufigen Doppelschnecke. Auch eine zu frühzeitige Kompression oder eine zu hohe Volumenkompression verursachen große Spreizkräfte und dementsprechend hohen Verschleiß.

Problematisch sind weiterhin falsch ausgelegte Zonen, die neben einer zu hohen Temperatur auch zu hohe Spreizkräfte hervorrufen. Der Verschleiß wird zusätzlich erhöht, wenn die Stegbreite in diesen Bereichen zu gering ist.

Auch hinsichtlich der Temperierung von Schnecke und Zylinder hat sich das Bild in der letzten Zeit gewandelt: bis zum Jahr 2000 waren die meisten renommierten Extruderhersteller der Meinung, dass eine externe Öltemperierung für eine möglichst hohe Flexibilität notwendig wäre und dass eine Öltemperierung des Zylinders für eine möglichst gleichmäßige Zylindertemperatur ratsam sei. Unsere Erfahrungen zeigen jedoch, dass die wartungsarme, geschlossene Wassertemperierung in den Schnecken wesentlich besser und gleichmäßiger in ihrer Wirkung ist, und dass die Zylindertemperierung mit drehzahleregelten Ventilatoren jeder Öltemperierung um ein Vielfaches überlegen ist.

Extrusion

Hauptinflussgröße auf den maximalen Durchsatz eines Extruders ist das vom Motor bzw. Getriebe zur Verfügung gestellte Drehmoment. Durch verbesserte Getriebekonstruktionen konnte das Drehmoment in den letzten Jahren erheblich gesteigert werden. Um Drehmomente von Gleich- und Gegenläufern vergleichen zu können, wird der Drehmomentfaktor $fM_d = M_d/A^3$ verwendet. Der Drehmomentfaktor zeigt auf, welches Drehmoment bei gegebenem Achsabstand erreicht wird. Die von den Schnecken übertragene Leistung ist zu dem Drehmoment direkt und der spez. Antriebsenergie „e“ umgekehrt proportional. Die spez. Antriebsenergie gibt an, wie viel mechanische Energie dem PVC zugeführt werden muss, um eine bestimmte Masstemperatur und einen bestimmten Massedruck zu erreichen. Die spez. Antriebsenergie beträgt für:

- Rohre 70–90 Wh/kg
- Profile 85–105 Wh/kg
- Platten 95–120 Wh/kg

Je höher die benötigte spez. Antriebsenergie ist, desto niedriger kann der Ausstoß des Extruders werden. Die oben genannten Werte sind als Richtwerte zu betrachten.

Problem	Ursache(n)
Reißverschlüsse in Rohren und Profilen	zu hohe Temperaturen an der Schneckenspitze durch ungeeignete Temperierung oder Konstruktionsfehler der Spitze, mindestens ein zu enger Spalt am Umfang
Risse bei geschweißter Mo-Schicht	Spannungsrisse vom Schweißen
Risse in der Stellitschicht	Spannungsrisse vom Schweißen
Schlagzähigkeit zu niedrig	falsche Schneckenauslegung bzw. fehlerhafte Gelierung des PVC, s. dort
Schneckenberührung	falscher Einbau oder falsche Auslegung
Schneckenbruch, an der Spitze	Ermüdungsbruch durch Verschleiß, zu kalt angefahren
Schneckenbruch, in der Kompressionszone	zu kalt angefahren, Kompression zu hoch, Verschleiß durch Auswaschungen am Kern, Materialfehler, bei konischen Schnecken Absatz in der Kühlbohrung
Stege, gebrochen in der Kompressionszone	zu kalt angefahren, Stege zu dünn, Stegrand ausgewaschen, Metalldurchgang
Stege, gebrochen in der Vorwärmzone	Metalldurchgang, Verschleiß durch zu hohe Kompression
Streifen, grau unten am Profil	Abrieb zwischen Schnecken und Zylindern, Brenner
„Tannenbaumstrukturen“ unten am Extrudat	Abzeichnung der Schneckenkammern; zu enge Spalte in der Meteringzone
Temperaturkontrolle, schlechte der Einheit	Schwankungen im Einzug, falsche Auslegung der Temperierung
Verarbeitungsbandbreite nicht groß genug	Auslegungsfehler
Verschleiß an der Schneckenspitze	zu hoher Massedruck, Auslegungsfehler
Verschleiß, abnormal, an Schnecke und Zylinder	Ungünstige Schneckenauslegung, fehlender Verschleißschutz, Abrieb durch Metallkontakt und Füllstoffe, chemischer Verschleiß durch ätzende Stoffe.
Verschleiß im Einzug	ggf. Pulvergeometrie, falsche Spaltmaße
Zwickel, Ausbrüche	Materialfehler im Zylinder, Metalldurchgang

■ 6.5 Planetwalzenextruder

Harald Rust, Thomas Birr, Holger Lange

6.5.1 Einleitung

In den Anfängen wurden Kunststoffe ausschließlich diskontinuierlich aufbereitet. Dies geschah beispielsweise mittels Heiz- und Kühl-Mischerkombinationen und Walzwerken. Aufgrund der diskontinuierlichen Aufbereitung unterlag das Material jedoch häufig Qualitätsschwankungen, bedingt durch Rezepturabweichungen, unkontrollierte Verweilzeiten und unerwünschte Umwelteinflüsse während oder zwischen den Verfahrensabschnitten. Aus diesen Unzulänglichkeiten heraus ent-

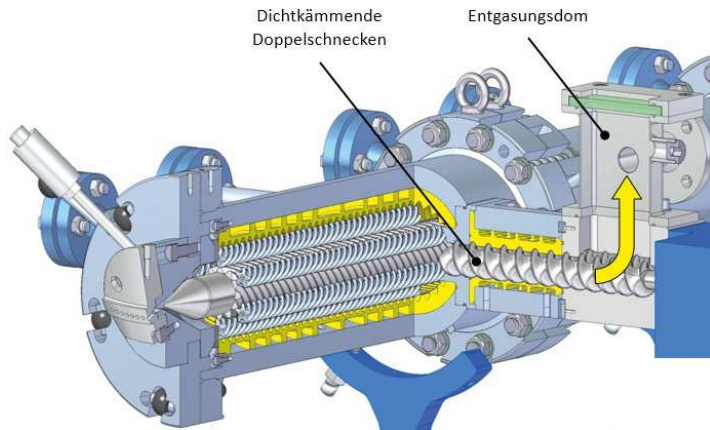


Bild 6.61 Vakuum-Entgasung über Seitenbeschickung [6.5.1]

Entgasungs- und Reaktions-Modul (ERMO)

Das Entgasungs- und Reaktionsmodul wurde entwickelt, um die bereits genannten Vorteile des Planetwalzenextruders für diese Anwendungen weiter auszubauen.

Es handelt sich hierbei um einen vergrößert ausgeführten Walzenzylinder, der durch den Einsatz ebenfalls vergrößerter Planetenspindeln zu einer unveränderten Zentralspindel kompatibel ist. Wie in jedem anderen Walzenzylinder können auch hier verschiedene Planetenspindelkonfigurationen eingesetzt werden.

Durch diese konstruktive Maßnahme ergibt sich ein Walzenzylinder mit deutlich vergrößertem Querschnitt, Volumen und inneren Oberflächen, ergänzt durch eine reduzierte Umlaufgeschwindigkeit der Planeten aufgrund der veränderten Proportionen.

Trotz aller Veränderungen ist ein ERMO zu allen anderen Walzenzylindern der zugehörigen Baugröße kompatibel und kann damit an jeder Position eingefügt werden; auch die Installation mehrerer dieser Einheiten aneinander ist möglich.

Aufgrund der konstruktiven Ausrichtung auf Entgasungsanwendungen kann diese Walzenzylindervariante mit einer Anschlussöffnung für eine besonders große Seitenbeschickung ausgestattet werden, um größtmögliche Öffnungs- und Strömungsquerschnitte bieten zu können. Diese Bauform ist ebenso für die Zuführung von Feststoffen mit besonders niedriger Schüttdichte, wie beispielsweise Holzmehl oder pyrogenem Siliziumdioxid, von Vorteil. Der Einsatz einer Seitenbeschickung ist jedoch nicht zwingend erforderlich, eine Verwendung als geschlossener Walzenzylinder, beispielsweise im Zusammenhang mit druckbeaufschlagten Reaktivprozessen, ist ebenso vorgesehen.

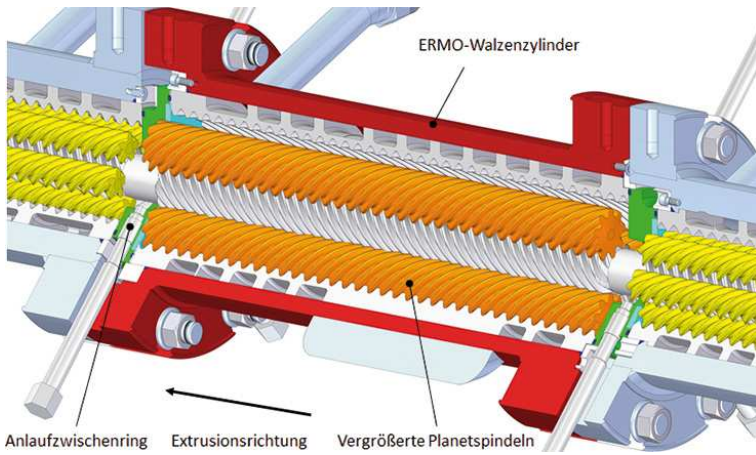


Bild 6.62 Schnittdarstellung eines ERMO zwischen zwei konventionellen Walzenzylindern [6.5.1]

Die verfahrenstechnische Besonderheit des ERMO besteht in der vergrößerten Prozesskammer und der damit einhergehenden verlangsamteten Umlaufgeschwindigkeit der Planetenspindeln. Dadurch können bei Reaktivprozessen mittels Erzeugung eines hohen Füllgrades noch längere und breitere Verweilzeitspektren erzielt werden.

Für Entgasungsanwendungen stehen die vergrößerten inneren Oberflächen im Vordergrund. Diese ermöglichen ein längeres Verweilen des Extrudats in Form dünner Schichten, wodurch die Diffusion flüchtiger Bestandteile in die umgebende Atmosphäre begünstigt wird.

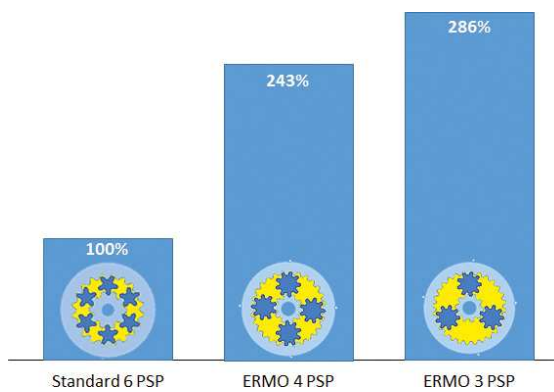


Bild 6.63 Vergleich des Prozesskammervolumens eines konventionellen Walzenzylinders mit dem ERMO in unterschiedlichen Konfigurationen [6.5.1]

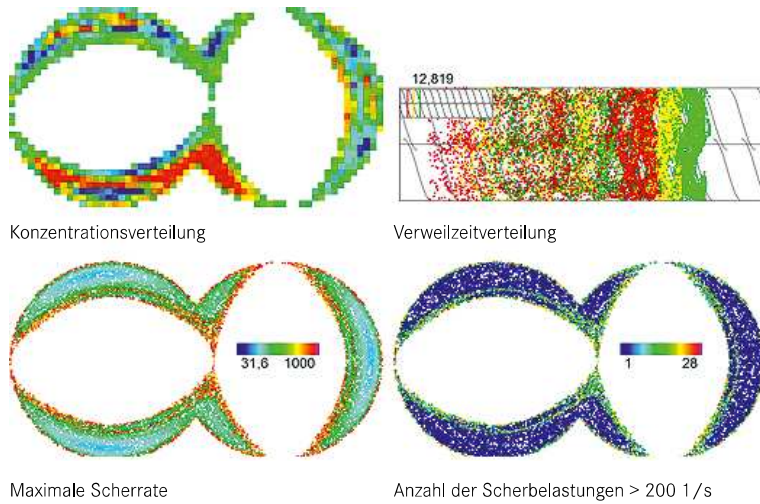


Bild 7.81 Misch-, Dispergier- und Verweilzeitverhalten eines zweigängigen Förderelements

In Bild 7.82 ist ferner eine Abbildung dargestellt, die einen Überblick über das Verweilzeitverhalten des zweigängigen Gewindeelements nach der dreifachen mittleren Verweilzeit (entsprechend 12,8 Umdrehungen) gibt. In dem kleinen Piktogramm ist die Anfangsverteilung von drei Ebenen mit Tracerpartikeln zu Beginn der 20 Umdrehungen gezeigt. Die Partikel einer Ebene sind durch die Farben rot, gelb und grün gekennzeichnet. Man erkennt, dass sich ein Großteil der drei Ebenen auch nach der dreifachen mittleren Verweilzeit gerade einmal über eine halbe Steigung aufweitet. Diese Bereiche entsprechen im Wesentlichen den unvermischten Bereichen. Die besser vermischten Bereiche liegen alle in der Nähe der Gehäusewandung und der Schneckenoberflächen. Diese Bereiche besitzen aufgrund ihrer Wandnähe eine größere Verweilzeit und sind deshalb noch nicht so weit nach vorne transportiert worden.

Darüber hinaus können durch das Particle Tracking auch Aussagen zum Dispergierverhalten getroffen werden. Hierzu finden sich in Bild 7.81 zwei Abbildungen. In der einen Abbildung wird die maximale Scherbelastung gezeigt, die ein Partikel erfahren hat. Um den weiten Scherbereich gut abdecken zu können, wird die Farbskala logarithmisch skaliert. Eine blaue Farbe entspricht einer Scherrate von 31,6 1/s und eine rote Farbe einer Scherrate von 1000 1/s. Eine dunkelblaue Farbe bedeutet, dass die maximale Scherrate kleiner als 31,6 1/s ist, eine pinke Farbe, dass die maximale Scherrate größer 1000 1/s ist. Wenig überraschend erkennt man, dass an den Wandungen die höchsten Scherraten auftreten. Ferner fällt auf,

dass in den schlecht durchmischten Bereichen auch nur sehr niedrige Scherraten auftreten. Zusätzlich ist an den Schneckenoberflächen im Kanalbereich eine zweite Schicht mit hoher Scherrate zu beobachten.

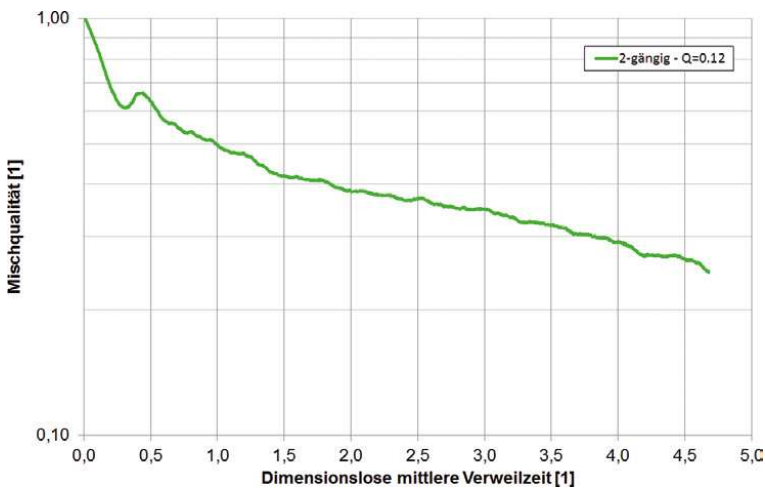


Bild 7.82 Entwicklung der Mischqualität

In der anderen Abbildung wird die Anzahl der Scherbelastungen dargestellt, und zwar für Scherraten größer 200 1/s. Eine blaue Farbe kennzeichnet 1 Belastung, eine rote Farbe 28 Belastungen. Eine dunkelblaue Farbe bedeutet, dass die Belastung kein einziges Mal erreicht wird, eine pinke Farbe, dass mehr als 28 Belastungen auftreten. Grundsätzlich sieht die Anzahlverteilung der Scherbelastungen sehr ähnlich wie die Abbildung mit der maximalen Scherrate aus: an den Wandungen wird die festgelegte Scherbelastung sehr häufig erreicht, in den Kanalbereichen dagegen kein einziges Mal.

In Bild 7.83 wird die Summenhäufigkeitsverteilung der maximalen Scherbelastung nach 10 Umdrehungen dargestellt. Die maximale Scherbelastung wird mit einer logarithmischen Skala wiedergegeben. In der Kurve spiegeln sich die Ergebnisse, die bereits in Bild 7.83 ersichtlich sind: Etwa 50% der Partikel erfahren eine maximale Scherbelastung von größer 100 1/s und lediglich 22% der Partikel eine von größer 316 1/s.