

VDI

K

KUNSTSTOFFTECHNIK

42. Deutsche Compoundier- tagung 2016

Vom Rohstoff zum Extruder

KUNSTSTOFFTECHNIK

42. Deutsche Compoundiertagung 2016

Vom Rohstoff zum Extruder

Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH
VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie
(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugweisen Nachdruckes, der auszugweisen oder vollständigen photomechanischen Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie) und das der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany

ISBN 978-3-18-234345-5

Inhalt

Anwendungsgebiete für die Compoundiertechnik <i>Dipl.-Ing. F. Lechner, Coperion GmbH, Stuttgart</i>	1
Modellierung der Diffusion in festen oder porösen Partikeln <i>Dr.-Ing. J. Weber, Dow Stade Anlagengesellschaft mbH, Stade</i>	21
Sicherer Umgang mit Gefahrstoffen	
Das bisschen Staub? Aber bitte ohne Explosion! <i>Dipl.-Ing. G. Gosda, Covestro Deutschland AG, Leverkusen</i>	29
Explosionsschutz – Regelungen und Verantwortung <i>Dr. B. Dyrba, Dyrba Explosionsschutz, Bad Schönborn</i>	33
Einsatz von Gefahrstoffen in der Compoundierung <i>Dr.-Ing. E. Richter, Albis Plastic GmbH, Hamburg</i>	41
Fördern und Dosieren	
Dosierung von Flüssigkeiten und Pumpensysteme <i>Dipl.-Ing. J. Sommer, Dipl.-Ing. R. Schwab, LEWA GmbH, Leonberg</i>	53
Lagern und Austragen von schwerfließenden Schüttgütern <i>Dipl.-Ing. H. Heinrici, Schwedes + Schulze Schüttguttechnik GmbH, Wolfenbüttel</i>	65
Optimierung des Einzugs von Polymerpulvern und pulverförmigen Füllstoffen auf gleichsinnig drehenden Zweischnellenextrudern <i>Dipl.-Geol. S. Mohr, Dipl.-Ing. (FH) L. Darnedde, KraussMaffei Berstorff GmbH, Hannover</i>	71
Recycling und Zerkleinern	
Fibre, film, powder, regrind, etc. – Recycling and Compounding in a single step with COREMA® <i>Ing. Mag. R. Obermayr, EREMA Engineering Recycling Maschinen und Anlagen Ges.m.b.H, Ansfelden, Österreich</i>	77
Zerkleinerung von Kunststoffen <i>B. Sc. K. Braesch, Dipl.-Ing. (FH) C. Elo, Fraunhofer-Institut UMSICHT, Oberhausen</i>	81

Fördern und Mischen

Einsatz von Matrizenpressen zur Verbesserung von Schüttguteigenschaften Prof. Dr.-Ing. W. Sitzmann, Amandus Kahl GmbH & Co. KG, Reinbek	91
Anforderung und Herausforderung beim Fördern in der chemischen Industrie Dipl.-Ing. D. Silbernagel, Dipl.-Ing. H. Wolf, BASF SE, Ludwigshafen	101
Mischen und Homogenisieren in der Compoundierung – Gleichmäßige Eigenschaften der Ausgangsstoffe und Compounds sorgen für hohe Produktqualität Dr.-Ing. H. Wilms, Dipl.-Ing. H. Schneider, Zeppelin Systems GmbH, Friedrichshafen	107
Simulation von Partikelströmungen mittels DEM anhand von Anwendungsbeispielen aus der industriellen Praxis Dr.-Ing. R. Weiler, BASF SE, Ludwigshafen am Rhein	119
Trends in der Compoundierung	
Reaktivextrusion von Biokunststoffen Prof. Dr.-Ing. C. Bonten, M. Sc. L. Goebel, Institut für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart	123
Auf dem Weg zur energetischen Prozessoptimierung Dipl.-Ing. C. Kugler, Dr. rer. nat. J. Werner, Dr.-Ing. P. Heidemeyer, SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg	131
Modern multiscale simulation methods for solids processes and particle systems Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. S. Heinrich, Prof. Dr.-Ing. M. Dosta, Institute of Solids Process Engineering and Particle Technology, Hamburg University of Technology	135
Materialaufbereitung für die Additive Fertigung – Verfahren – Anforderungen an die Compoundierung - Beispiele Prof. D. Schwendemann, Hochschule für Technik Rapperswil, IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung, Rapperswil, Schweiz	145

KUNSTSTOFFTECHNIK

42. Deutsche Compoundiertagung 2016

Vom Rohstoff zum Extruder

Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH
VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie
(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugweisen Nachdruckes, der auszugweisen oder vollständigen photomechanischen Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie) und das der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany

ISBN 978-3-18-234345-5

Inhalt

Anwendungsgebiete für die Compoundiertechnik <i>Dipl.-Ing. F. Lechner, Coperion GmbH, Stuttgart</i>	1
Modellierung der Diffusion in festen oder porösen Partikeln <i>Dr.-Ing. J. Weber, Dow Stade Anlagengesellschaft mbH, Stade</i>	21
Sicherer Umgang mit Gefahrstoffen	
Das bisschen Staub? Aber bitte ohne Explosion! <i>Dipl.-Ing. G. Gosda, Covestro Deutschland AG, Leverkusen</i>	29
Explosionsschutz – Regelungen und Verantwortung <i>Dr. B. Dyrba, Dyrba Explosionsschutz, Bad Schönborn</i>	33
Einsatz von Gefahrstoffen in der Compoundierung <i>Dr.-Ing. E. Richter, Albis Plastic GmbH, Hamburg</i>	41
Fördern und Dosieren	
Dosierung von Flüssigkeiten und Pumpensysteme <i>Dipl.-Ing. J. Sommer, Dipl.-Ing. R. Schwab, LEWA GmbH, Leonberg</i>	53
Lagern und Austragen von schwerfließenden Schüttgütern <i>Dipl.-Ing. H. Heinrici, Schwedes + Schulze Schüttguttechnik GmbH, Wolfenbüttel</i>	65
Optimierung des Einzugs von Polymerpulvern und pulverförmigen Füllstoffen auf gleichsinnig drehenden Zweischnellenextrudern <i>Dipl.-Geol. S. Mohr, Dipl.-Ing. (FH) L. Darnedde, KraussMaffei Berstorff GmbH, Hannover</i>	71
Recycling und Zerkleinern	
Fibre, film, powder, regrind, etc. – Recycling and Compounding in a single step with COREMA® <i>Ing. Mag. R. Obermayr, EREMA Engineering Recycling Maschinen und Anlagen Ges.m.b.H, Ansfelden, Österreich</i>	77
Zerkleinerung von Kunststoffen <i>B. Sc. K. Braesch, Dipl.-Ing. (FH) C. Elo, Fraunhofer-Institut UMSICHT, Oberhausen</i>	81

Fördern und Mischen

Einsatz von Matrizenpressen zur Verbesserung von Schüttguteigenschaften Prof. Dr.-Ing. W. Sitzmann, Amandus Kahl GmbH & Co. KG, Reinbek	91
Anforderung und Herausforderung beim Fördern in der chemischen Industrie Dipl.-Ing. D. Silbernagel, Dipl.-Ing. H. Wolf, BASF SE, Ludwigshafen	101
Mischen und Homogenisieren in der Compoundierung – Gleichmäßige Eigenschaften der Ausgangsstoffe und Compounds sorgen für hohe Produktqualität Dr.-Ing. H. Wilms, Dipl.-Ing. H. Schneider, Zeppelin Systems GmbH, Friedrichshafen	107
Simulation von Partikelströmungen mittels DEM anhand von Anwendungsbeispielen aus der industriellen Praxis Dr.-Ing. R. Weiler, BASF SE, Ludwigshafen am Rhein	119
Trends in der Compoundierung	
Reaktivextrusion von Biokunststoffen Prof. Dr.-Ing. C. Bonten, M. Sc. L. Goebel, Institut für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart	123
Auf dem Weg zur energetischen Prozessoptimierung Dipl.-Ing. C. Kugler, Dr. rer. nat. J. Werner, Dr.-Ing. P. Heidemeyer, SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg	131
Modern multiscale simulation methods for solids processes and particle systems Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. S. Heinrich, Prof. Dr.-Ing. M. Dosta, Institute of Solids Process Engineering and Particle Technology, Hamburg University of Technology	135
Materialaufbereitung für die Additive Fertigung – Verfahren – Anforderungen an die Compoundierung - Beispiele Prof. D. Schwendemann, Hochschule für Technik Rapperswil, IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung, Rapperswil, Schweiz	145

Anwendungsgebiete für die Compoundiertechnik

Dipl.-Ing. **F. Lechner**, Coperion GmbH, Stuttgart

Kurzfassung

Der gleichsinnig drehende, dicht kämmende Doppelschneckenextruder ist die bevorzugte Aufbereitungsmaschine in der Kunststoffindustrie. Die von Beginn an große Anwendungsbreite von reaktiven Prozessen bis zum Kneten von Schokolade hat sich über die Jahrzehnte noch wesentlich erweitert. Neben der Dominanz der klassischen Kunststoffaufbereitung treten die Themen bioabbaubare, nachwachsende Rohstoffe und Ersatz von Chargenprozessen in der Chemie-, Lebensmittel- und Pharmaindustrie stärker in den Vordergrund.

1. Geschichte des Zweischneckenextruders

Die erste Schneckenmaschine erfand Archimedes etwa 250 v. Chr. zur Wasserförderung entgegen der Schwerkraft. Im 19. Jahrhundert wurden unterschiedliche Prinzipien für Ein- und Mehrwellenextruder für zähe Massen gebaut, zum Ausformen von keramischen Massen für Ziegel (Randal & Sauder, 1854 [1]), zum Plastifizieren und Erzeugen von Kautschukprofilen, zum Abpressen von Ölsaaten oder als Fleischwolf. 1881, also zwei Jahre nach der Gründung der Firma Werner & Pfleiderer erfand Paul Pfleiderer den ersten kontinuierlichen Kneter zum Mischen und Kneten von Brotteig und viskosen chemischen Massen [3]. Dieser war analog zum chargenweise arbeitenden Universal-Kneter tangierend gegenläufig mit Mischschaufeln konzipiert. Es dürfte sich um das älteste Dokument über einen echten Schneckenkneter handeln. Bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts blieb es aber trotzdem beim diskontinuierlichen Kneten. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde an verschiedenen Stellen über gleichsinnig drehende, ineinander greifende Schnecken nachgedacht, teilweise zum Transport oder zum Trocknen von Feststoffen [4], aber auch zum Hoch fördern zäher Flüssigkeiten [5] und letztlich zum Plastifizieren von Polymeren [6]. Ziel dieser Systeme ist, dass sich die Schnecken selbst reinigen und den Aufbau dicker Schichten klebriger Substanzen vermeiden. Die Maschine bleibt damit bei allen Konsistenzen und Reibegenschaften funktionstüchtig. Den Durchbruch gelang R. Erdmenger ab 1943 im Team mit W. Meskat bei der IG Farben in Wolfen und ab 1945 in der Verfahrenstechnik-Gruppe „Hochviskosteknik“ der Bayer AG in Leverkusen. Der Basiserfindung von 1944 folgten viele weitere,

was schließlich 1953 zur exklusiven Lizenzvergabe an Werner & Pfleiderer in Stuttgart führte.

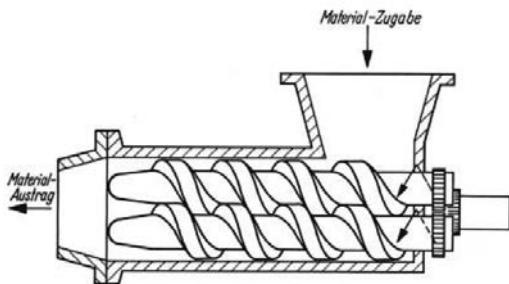


Bild 1: ZSK-Basispatent, angemeldet von Meskat und Erdmenger im Jahr 1944

Die verfahrenstechnischen Grundprozesse waren Stoffvereinigung, Stofftrennung, Reaktion und Phasenumwandlung. Beispiele sind das Mischen und Kneten von Kunststoffen, das Entwässern von Kautschuk, die Restentgasung von Klebstoffen, die Polymerisation thermoplastischer Polyurethane, das Kristallisieren von Pflanzenschutzmitteln und das Ausformen und Granulieren von Kunststoffen. Die Bauweise des ersten 1957 gelieferten ZSK83/700 mit 83 mm Schneekendurchmesser und 700 mm fester Verfahrensteillänge zeigt Bild 2.



Bild 2: Ablösung des 1879 erfundenen Chargenkneters durch den ersten produzierenden ZSK83 im Jahr 1957 [2]

Die ersten Maschinen gingen überwiegend in die Kunststoffindustrie (PVC, Polyamide, Polyethylen, Polypropylen, Zellulose-Acetat), aber vereinzelt auch in die Schokoladenindustrie. Anfang der 60er Jahre wurde die 100. Maschine ausgeliefert.

2. Auslegungskriterien für Drehmoment und Volumen

Seit dem Erwerb der Lizenz zur Nutzung der Erdmenger-Patente für gleichsinnig drehende, dicht kämmende Mehrschneckenmaschinen von der Bayer AG im Jahr 1953, wurden diese stetig weiterentwickelt hinsichtlich Drehmoment und Volumen.

Diese technische Weiterentwicklung wurde möglich durch

- bessere Welle/Naben-Verbindungen
- Übergang von drei- auf zweigängige Schneckenprofile
- An Verfahren und Produkte angepasste Schneckengeometrien
- bessere Werkstoffe und moderne Fertigungsverfahren
- Optimierungen des Antriebsstrangs und der Austragsorgane.

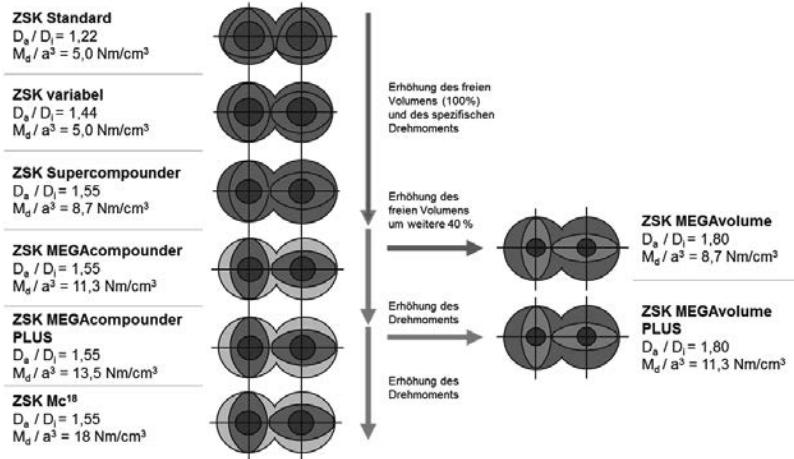


Bild 3: Entwicklung der wichtigsten ZSK-Auslegungsparameter Durchmesserverhältnis und spezifisches Drehmoment

So entstanden bisher folgende acht ZSK-Generationen (Bild 3):

1. Generation (ab 1956): 3-gängiges Profil, feste Verfahrensteillänge, übereinander liegende Wellen, Komplettverkleidung
2. Generation (ab 1962): variabler Gehäuse- und Schneckenaufbau, nebeneinander liegende Wellen
3. Generation (ab 1970): 2-gängiges ZSK-System, großvolumige Continua
4. Generation (ab 1978): verstärktes Getriebe und 6-Keilwellen
5. Generation (ab 1983): Supercompounder: Evolventenverzahnung
6. Generation (ab 1995): ZSK MEGAcoumpounder, MEGAcompact, großvolumiger ZSK MEGAvolume, zweistufiger ZSK NT
7. Generation (ab 2004): ZSK MEGAcoumpounder PLUS
8. Generation (ab 2010): ZSK Mc¹⁸

Die ZSK MEGAcompounder Serien sind für solche Aufbereitungs- und Compoundieraufgaben ausgelegt, die hohen Bedarf an spezifischer Energieeinleitung und/oder spezifischem Drehmoment haben, also typischerweise für Polyolefine und Technische Kunststoffe. Die Drehzahlen sind bei Großextrudern für Polyolefine auf 300 bis 500 UpM gestiegen, bei Maschinen bis 133 mm Schneckendurchmesser auf 800 bis 1200 UpM, je nach Anwendung. Bild 4 zeigt einen ZSK 82Mc¹⁸ für die Verarbeitung von technischen Kunststoffen.

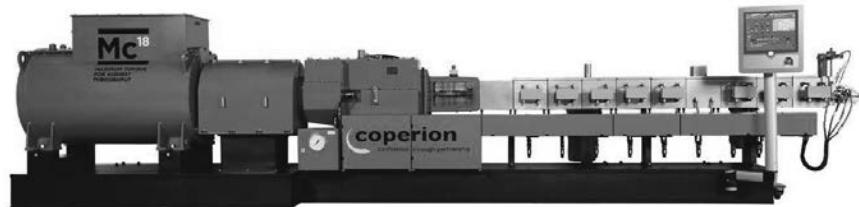


Bild 4:ZSK 82 Mc¹⁸

Der großvolumige ZSK MEGAvolume besitzt noch tiefer geschnittene Schnecken und ist für sehr hohe Drehzahlen bis 1800 UpM ausgelegt. Sein Anwendungsgebiet ist eine zweite Produktgruppe, die beim Aufbereiten einen großvolumigen Prozessraum benötigt, um z.B. Luft aus fluidisierenden Pulvern besser zurückströmen zu lassen, um Verweilzeit für Reaktionen zu schaffen oder weil lange vor der Drehmomentgrenze eine Temperatur- oder Produktqualitäts-Begrenzung auftritt. Solche Anwendungen findet man vor allem im Chemie/Food/Pharma-Bereich, aber auch bei Masterbatch-Anwendungen oder in der PVC-Aufbereitung.

Bild 5 zeigt anschaulich vergleichend den Stirnschnitte des ZSK MEGAcompounder und des ZSK MEGAvolume.

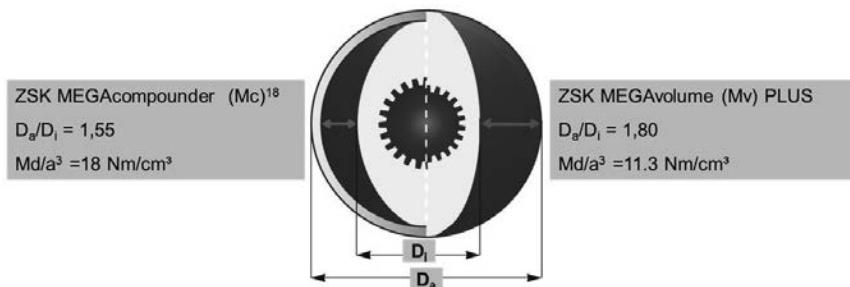


Bild 5: Vergleich Stirnschnitt ZSKMc und ZSKMv

Die Entwicklung zu immer größeren Gangtiefen des Schneckenkanals erniedrigt die Schergeschwindigkeit in der Schmelze, wenn dies nicht durch höhere Drehzahlen kompensiert wird. Höhere Drehzahlen und Durchsätze führen aber bei unveränderter Baulänge auch zu kürzeren Verweilzeiten. Dieser Effekt lässt eine weit überproportionale Steigerung der Drehzahl mit der Gangtiefe zu, ohne dass die gesamte Scherung und die gesamte Temperatur-Zeit-Belastung des Produkts zunehmen. Dies erklärt, dass auch nach einer nun 8- bis 12-fachen Drehzahlerhöhung seit dem ersten ZSK die funktionalen Eigenschaften der aufbereiteten Produkte immer besser werden.

In Tabelle 1 sind alle aktuellen ZSK Baureihen und Baugrößen von 18 bis 420 mm Schneckendurchmesser als Überblick zusammengefasst. Die Baureihe wurde entsprechend den Marktanforderungen nach oben hin bzgl. des Aussendurchmessers erweitert. Zudem wurde das spezifische Drehmoment von 11.3 Nm/cm^3 auf 12.5 Nm/cm^3 erhöht. Der ZSK MEGAcompounder größer mit einem volumenspezifischen Drehmoment $Md/a^3 = 12.5 \text{ Nm/cm}^3$, einem Durchmesserverhältnis D_a/D_s von 1,55 und Drehzahlen um 300 UpM ist der klassische Polyolefinextruder, der einer Polymerisationsanlage nachgeschaltet ist, um das austretende mehr oder weniger feine Pulver (HDPE, LLDPE, PP) oder die austretende Schmelze (LDPE) zu homogenisieren, zu stabilisieren, zu entgasen oder auf die gewünschte Viskosität abzubauen. Am Austrag wird die Schmelze gefiltert und zu gut handhabbaren Granulaten unterwassergranuliert. Der Druckaufbau erfolgt über die Schnecke oder bei kritischen Temperaturgrenzen über eine nachgeschaltete Zahnrädpumpe. Typische Durchsätze für monomoda-

Ie Polyethylene und Polypropylene liegen heute bei 50 bis 100 t/h, im Planung sind Anlagen bis 120 t/h.

Tabelle 1: ZSK Baureihen

Schnecken-durch-messer [mm]	ZSK MEGA-compounder	ZSK Mc ¹⁸	ZSK MEGAvolumePlus
18	ZSK 18 MEGA lab		
26/27	ZSK 26 Mc ¹⁸	ZSK 27 MvPlus	
32/34	ZSK 32 Mc ¹⁸	ZSK 34 MvPlus	
43		ZSK 43 MvPlus	
45	ZSK 45 Mc ¹⁸		
54		ZSK 54 MvPlus	
58/62	ZSK 58 Mc ¹⁸	ZSK 62 MvPlus	
70/76	ZSK 70 Mc ¹⁸	ZSK 76 MvPlus	
82	ZSK 82 Mc ¹⁸		
92/98	ZSK 92 Mc ¹⁸	ZSK 98 MvPlus	
119/125	ZSK 119 Mc ¹⁸	ZSK 125 MvPlus	
133	ZSK133 Mc PLUS		
177	ZSK 177 Mc		
250	ZSK 250 Mc		
320	ZSK 320 Mc		
350	ZSK 350 Mc		
380	ZSK 380 Mc		
420	ZSK 420 Mc		

Im Vergleich zur vorherigen Baureihe ZSK MEGAc compounder PLUS wurde das spezifischen Drehmoment von 13,6 Nm/cm³ auf 18 Nm/cm³ erweitert. Das Verhältnis von Aussen – zu Innendurchmesser von 1.55 stellt das bis heute bewährte Optimum bezüglich übertragbarem Drehmoment und freiem Volumen dar und wurde daher konstant gehalten. Ein kleineres Durchmesserverhältnis senkt das freie Volumen in den Schneckengängen ab, verringert also den Durchsatz. Ein größeres Durchmesserverhältnis reduziert generell die mechanische Stabilität der Schneckenwellen. Zudem sind die resultierenden dünneren Schneckenkämme deutlich verschleißanfälliger. Schließlich kann nur ein reduziertes Drehmoment übertragen

werden, sodass insbesondere Produkte mit hohem Energiebedarf selbst bei verringertem Durchsatz unzureichend aufbereitet werden.

Auch für Anlagenbetreiber bietet das unveränderte Durchmesserverhältnis große Vorteile, denn es macht sowohl ein Scale-up als auch eine Modernisierung des bisherigen ZSK MEGAcoupler PLUS auf den neuen ZSK Mc18 möglich. Erfahrungen aus Versuchen und Produktionsanlagen können somit einfach übertragen werden.

Die analoge großvolumige Baureihe ZSK MEGAvolumePlus mit 11.3 Nm/cm³, einem Durchmesserverhältnis von 1,8 und Schneckendrehzahlen bis zu 1800 UpM wird für Compounds mit geringeren Energiebedarf sowie Volumenbegrenzungen eingesetzt, wie sie häufig im Chemie/Food/Pharma-Bereich zu finden sind. Die höchsten Drehzahlen bis 1800 UpM werden vor allem bei niederviskosen Produkten wie Haftkleber und Silikondichtungsmassen eingesetzt, da damit eine bessere Elastomer- und Füllstoffdispersion erreicht werden kann. Andere Prozesse benötigen oft nur das große Volumen und arbeiten wegen der Productschonung oder wegen der Direktextrusion zu Folien, Platten oder Profilen bei sehr moderaten Drehzahlen von 100 bis 600 UpM.

Eine seit Jahrzehnten bewährte zweistufige ZSK zum Gelieren und nachfolgender etwa 3 mal so großer Einwelle zum Druckaufbauen läuft als Kombiplast KP in der PVC- und Kabelindustrie. Hier wurde der ZSK MEGAcoupler weitestgehend durch den MEGAvolume-Plus aufgrund des nun erhöhten Drehmomentes ersetzt.

Typische Anwendungsbereiche sind die Herstellung von Weich- und Hart-PVC, Spezialcompounds wie halogenfreie, selbstverlöschende Rezepturen für Kabel (HFFR) oder Compounds für Nieder-, Mittel- und Hochspannungskabel auf Elastomerbasis.

3. Anwendungsbeispiele für die Kunststoffindustrie

Neben den klassischen Anwendungsbeispielen tritt der gleichsinnig drehende, dicht kämmende Doppelschneckenextruder in der Chemie-, Lebensmittel- und Pharmaindustrie immer stärker in den Vordergrund. Diskontinuierliche Chargenprozesse werden überwiegend aus wirtschaftlichen Gründen in einen kontinuierlichen Prozess übertragen. Dabei muss die Qualität der Produkte beibehalten bzw. idealerweise erhöht werden. Ein weiterer wesentlicher Vorteil sind geringe Rüstzeiten der Verfahrensanlage aufgrund der selbstreinigenden Arbeitsweise dieser Schneckenmaschine. Im Folgenden sollen einige Beispiele aus dem Chemie/Food/Pharma-Bereich näher erläutert werden. Diese Produkte wurden früher häufig mit dem Universalkneter UK chargenweise oder mit der großvolumigen Continua kontinuierlich aufbereitet, was jetzt mit dem größeren Drehmoment und Volumen des ZSK MEGAvolume-Plus noch wirtschaftlicher möglich ist. Es werden aber auch Anwendungen beschrieben, die Vorteilhafterweise das hohe Drehmoment des ZSK Mc18 nutzen oder auch Sonderkonstruktionen als Supercompounder mit gekühlten Wellen für extrem temperaturempfindliche Produkte.

Im Folgenden sollen einige Beispiele aus dem Chemie/Food/Pharma-Bereich näher erläutert werden. Diese Produkte wurden früher häufig mit dem Universalkneter UK chargenweise oder mit der großvolumigen Continua kontinuierlich aufbereitet, was jetzt mit dem größeren Drehmoment und Volumen des ZSK MEGAvolume noch wirtschaftlicher möglich ist. Es werden aber auch Anwendungen beschrieben, die Vorteilhafterweise das hohe Drehmoment des ZSK Mc PLUS nutzen oder auch Sonderkonstruktionen als Supercompounder mit gekühlten Wellen für extrem temperaturempfindliche Produkte.

3.1 Silikondichtungsmassen

Dichtungsmassen basieren häufig auf Butylkautschuk, Polyisopropylen, Polyurethan oder Silikonkautschuk. Reaktive Dichtungsmassen können bei Raumtemperatur vernetzen (RTV) oder bei höheren Temperaturen (HTV). Silikondichtungsmassen sind chemisch härtende Einkomponentensysteme, bei denen die Vernetzung des Substrats durch Feuchtigkeit aus der Luft initiiert wird. Dabei werden die Reaktionsprodukte abgespalten. Nach schneller Hautbildung an der Oberfläche setzt sich die Vernetzung im Inneren der Masse bis zur völligen Durchhärtung fort.

Silikondichtungsmassen, wie man sie z. B. im Hausbau zur Abdichtung von sanitären Einrichtungen einsetzt, werden zunehmend in Doppelschneckenextrudern hergestellt. Die Komponenten Silikonpolymer (30-50 %), Silikonöl (35-40 %), Vernetzer und Katalysator werden flüssig über Einsprühdüsen in den Extruder dosiert. Dabei wird der Katalysator, der die Mischung reaktiv aktiviert, erst zum Schluss eingearbeitet. Einzugsprobleme schaffen in der Regel Füllstoffe wie Kieselsäure (5-10 %), die mit ihrer sehr geringen Schüttdichte von ca. 50 g/l sehr leicht fluidisiert und viel Luft in den Extruder einträgt, die auch wieder abgeführt werden muss. Die tief geschnittenen Gänge eines ZSK Mv ermöglichen einen wesentlich besseren Pulvereinzug und damit auch eine Durchsatzsteigerung von über 35 % gegenüber einem ZSK Mc mit gleichem Achsabstand. Der Austrag erfolgt bei der Abfüllung in Kartuschen mittels einer Zahnradpumpe mit nachgeschaltetem Wärmetauscher und Puffer direkt in die Kartuschenabfüllstation. Zusätzlich können die Massen noch gestraint werden.

Typische Durchsätze liegen für einen ZSK 98 Mv bei 2,6 t/h. Ein Anlagenbeispiel mit dem für diese Anwendung typischen hohen Dosieraufwand zeigt Bild 6.

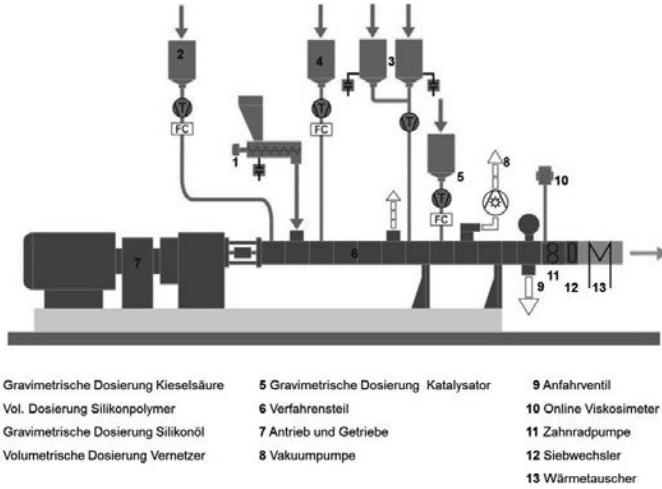


Bild 6: Anlagenbeispiel zur Herstellung von Silikondichtungsmassen

3.2 Haftkleber

Im Gegensatz zu Schmelzklebern, die nach der Aufbereitung unterwassergranuliert und bei Gebrauch wieder aufgeschmolzen werden, wird der Haftkleber am Extruderaustrag häufig direkt zu einer Beschichtungsanlage gepumpt und flächig aufgetragen. Haftklebstoffe zeichnen sich dadurch aus, dass sie lediglich durch Andrücken der zu verklebenden Fügeteile eine Benetzung herbeiführen, da sie bei Raumtemperatur eine dauerhafte und permanente Klebwirkung aufweisen. Sie werden z.B. für Klebebänder eingesetzt und mehr und mehr auf Doppelschneckenextrudern hergestellt. Im Vergleich zum bisher verbreiteten Chargenketten schließt die Produktion im ZSK MEGAvolume Chargenschwankungen aus und garantiert somit eine gleichmäßige und hochwertige Qualität.

Durch die verschiedenen Dosierstellen entlang des Verfahrensteils ist eine Anpassung auf neue Rezepturen leicht möglich. Nach dem Mastizieren des gravimetrisch dosierten Elastomers (30-50 %) werden stromab über eine zweiwellige Seitenbeschickung (ZS-B) Füllstoffe (0-10 %) wie Kalkstein, Quarzmehl oder Kieselsäure und Additive ebenfalls gravimetrisch zugegeben. Das Harz (20-40 %) kann als Feststoff oder alternativ auch geschmolzen über eine Pumpe dosiert werden. Flüssigharze und Weichmacher (10-40 %) werden bei großen Mengen in Teilströmen über mehrere Knet- und Homogenisierstufen stippenfrei eingearbeitet. Entscheidend für die Verteilung der Weichmacherzugabe ist, dass das Elastomer vorher mastiziert sein muss, da ansonsten durch die Ölzugabe die Feststoffpartikel durch die Schnecke gleiten und die Scherkräfte nicht mehr greifen. Zum anderen muss die Viskosität hinter der Feststoffzugabe so hoch eingestellt werden, dass eine optimale Dispergierung in der Schmelze erzielt wird. Vor dem Austrag wird die Masse unter Vakuum ent gast, um mitgeschleppte Luft und die Feuchtigkeit der Füllstoffe zu entfernen und so ein transparentes Produkt zu erzielen. Anschließend wird das Produkt über Filter zur Auftragswalze gepumpt.

Ein typischer Durchsatz für einen ZSK 76 Mv beträgt 1,4 t/h. Ein Anlagenbeispiel zeigt Bild 7.

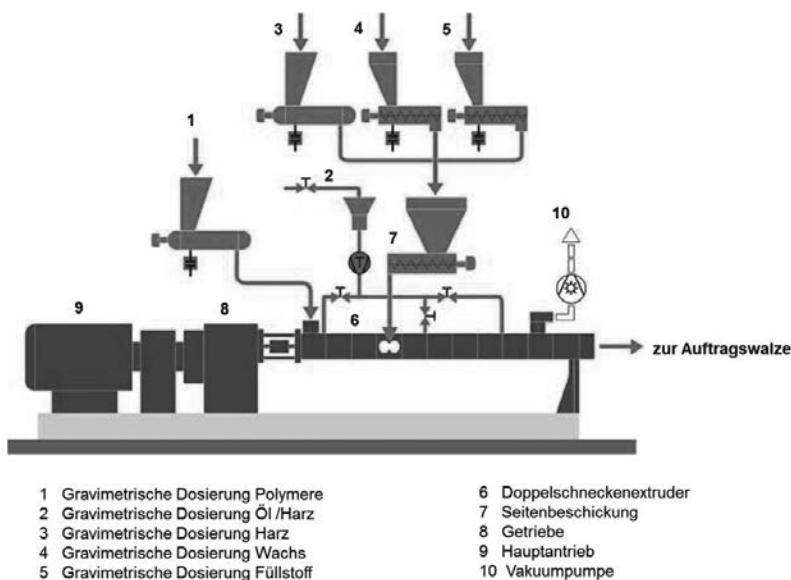


Bild 7: Anlagenbeispiel zur Herstellung von Haftklebern

3.3 Keramische Katalysatorträger

Die zum Ablauf von chemischen Reaktionen erforderlichen Katalysatoren werden häufig auf keramischen Trägern in den Reaktionsraum eingebracht, da sie eine große innere Oberfläche und definierte Porenstruktur, sowie eine hohe thermische und chemische Beständigkeit besitzen. Während diese Katalysatorträger für eine Vielzahl chemischer Prozesse als Schüttgut eingesetzt werden, finden z. B. für die Reinigung von Autoabgasen extrudierte Wabenkörper Verwendung (s. Bild 8). Die im Anschluss an die Extrusion getrockneten und konfektionierten Katalysatorträger werden anschließend vom noch vorhandenen Binder befreit, gesintert und abschließend in einem Bad mit dem eigentlichen Katalysator imprägniert.

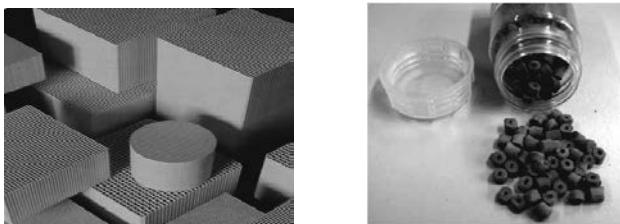


Bild 8: Katalysatorträger als Schüttgut für Kraftwerke und in Honigwabenstruktur für Autoabgaskatalysatoren

Für die Extrusion werden vermehrt Doppelschneckenextruder eingesetzt, die es in einem einstufigen Verfahren erlauben die separat oder als Vormischung eingesetzten Rohstoffe zu plastifizieren. Dabei wird der Binder in die Keramik eingearbeitet, und es entsteht eine fließfähige homogene Masse mit definierter Porenstruktur. Nach einer Vakumentgasung zur Entfernung von eingebrachter Luft wird das Produkt an einer Düse ausgeformt. Eine spezielle Ausführung besteht aus einer ZSK-Kaskade, wobei ein Siebwechsler zwischen den beiden ZSK Agglomerate herausfiltert. Ein Siebwechsel an dieser Stelle stört den empfindlichen Düsenfluss in der Wabendüse nicht, da der zweite ZSK als Puffer zur Verfügung steht.

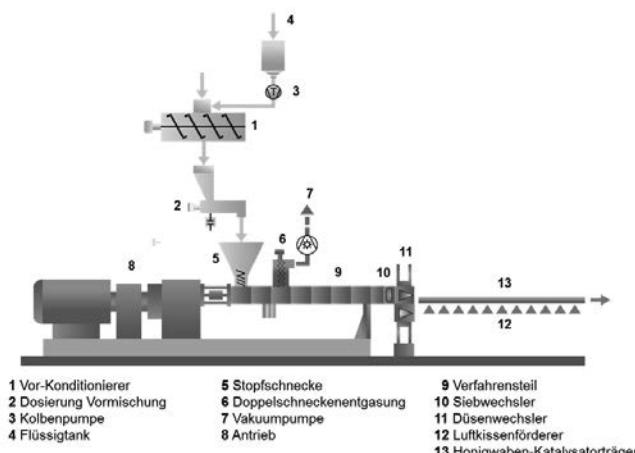


Bild 9: Anlagenbeispiel zur Herstellung von Autoabgaskatalysatoren

Ein typischer Aufbau, wie er zur Herstellung von Autoabgaskatalysatoren eingesetzt wird, ist in Bild 9 dargestellt. Das eingesetzte Keramikpulver (mindestens 80 %) wird in einem Pflugscharmischer mit dem Binder - in der Regel Carboxylmethylzellulose (CMC) - und etwas Wasser vorgemischt. Die Mischzeit wird möglichst kurz gehalten, da die Mischung sonst zu plastifizieren beginnt und schwierig zu dosieren ist. Die Vormischung wird in einem Vorlagebehälter zwischengelagert und von dort mit einer gravimetrischen Bandwaage dem Extruder zugeführt. Der Dosiertrichter des Extruders ist mit einer konischen Stopfschnecke ausgestattet, wie dies in Bild 10 schematisch und an einem Ausführungsbeispiel gezeigt ist. So können selbst bei der sehr geringen Drehzahl der Extruderschnecken und einem relativ hohen Füllgrad Einzugsprobleme unterbunden werden. Eine Erhöhung der Drehzahl zur Verbesserung des Einzugsverhaltens ist für diesen Prozess nicht möglich, da das Bindemittel CMC sehr temperaturempfindlich ist. Bereits ab 34 °C verändert es seine Struktur, so dass die Düsenplatte blockiert und der Prozess zusammenbricht. Zur notwendigen Temperaturkontrolle werden nicht nur wie üblich die Gehäuse sondern auch die Schneckenwellen gekühlt.

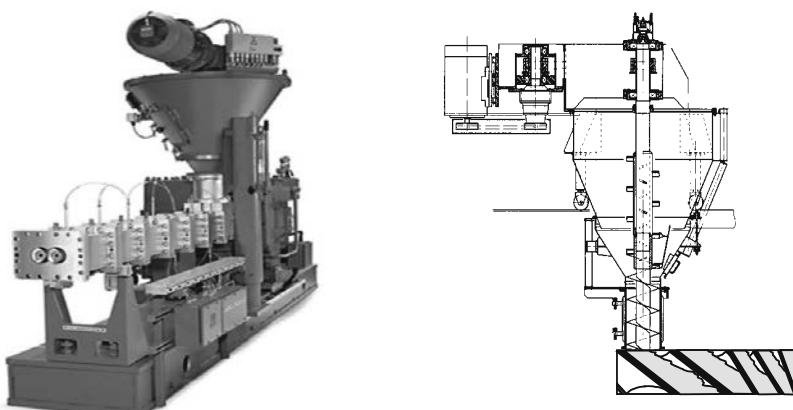


Bild 10: Stopfschnecke als Einzugshilfe

Im Extruder wird die Mischung in einer kurzen Knetzone plastifiziert und homogenisiert und anschließend in einer Vakuumzone von mit eingezogener Luft befreit. Um zu verhindern, dass das Produkt bei der Entgasung aus dem Entgasungsdom gedrückt wird, wird dabei eine Doppelschneckenentgasung (DSE) eingesetzt, die das Produkt im Extruder hält und Gas durch die offenen Schneckenkanäle entweichen lässt. Die verbleibende Verfahrenslänge wird genutzt, um bei kleinen Drehzahlen schonend den Druck aufzubauen, der zum Über-

fahren des Siebs und der Düsenplatte erforderlich ist. Je nach Geometrie der Düse kann der erforderliche Druck über 300 bar liegen. Typische Wanddicken liegen bei 70 µm mit bis zu 1200 Zellen/in². Für einen Katalysator dieser Feinheit werden auf einem ZSK 133 SC Durchsätze von ca. 600 kg/h erreicht. Vor der weiteren Verarbeitung wird der austretende Strang in einem Luftbett gekühlt.

3.4 Pharmazeutische Massen

Neben der Herstellung von Kunststoffgranulaten für die Medizintechnik, lassen sich verschiedene Produkte der pharmazeutischen Industrie auf einem Doppelschneckenextruder herstellen. Zu nennen wären z. B. Wirkstoffpflaster wie Nikotinpflaster. Ihr Herstellungsprozess ähnelt stark dem bereits beschriebenen Herstellungsverfahren für Haftkleber, es wird lediglich der Wirkstoff noch zusätzlich eingemischt. Die Einarbeitung erfolgt unmittelbar vor der Düse, da die Wirkstoffe in der Regel nur sehr kurze Zeit einer hohen Temperatur ausgesetzt werden dürfen. Ein weiteres Beispiel ist die Extrusion von Tabletten, bei der in der Regel eine Vormischung, die alle Komponenten enthält, gravimetrisch in den Extruder dosiert, plastifiziert, homogenisiert und gegebenenfalls entgast wird. Das ausgetragene Produkt kann entweder über einen Prägekalander abgeformt (Bild 20 links und unten rechts) oder mit einer Kopfgranulierung an der Düse geschnitten werden.

Häufig wird eine retardierende Wirkung von Wirkstoffen erzielt, indem das Medikament von einer Kapsel aus Gelatine oder Thermoplastischer Stärke umhüllt wird. Das Medikament selbst liegt wie in Bild 11 Mitte dargestellt in Form von Minigranulaten vor mit Korndurchmessern kleiner 1 mm. Sie bestehen hauptsächlich aus einem Trägermaterial wie mikrokristalliner Zellulose, in die der Wirkstoff, meist in Wasser oder Alkohol gelöst, im Doppelschneckenextruder eingemischt wird. Über eine Vakumentgasung wird mit der Matrix eingetragede Luft wieder entfernt. Die fertige Mischung wird z. B. über eine Radialdüse wie in Bild 11 oben zu sehen ausgetragen. Da das Produkt mit dieser Düse nicht in einer definierten Körnung granuliert werden kann, wird es auf einem Kühlband mit Strangbrecherwalzen vorzerkleinert und anschließend in einem Rundungsautomaten zu fertigen Granulaten geformt. Abschließend können die Granulate in Dragiertrommeln mit einer Retardschicht überzogen werden, bevor sie in Kapseln abgefüllt und verpackt werden.

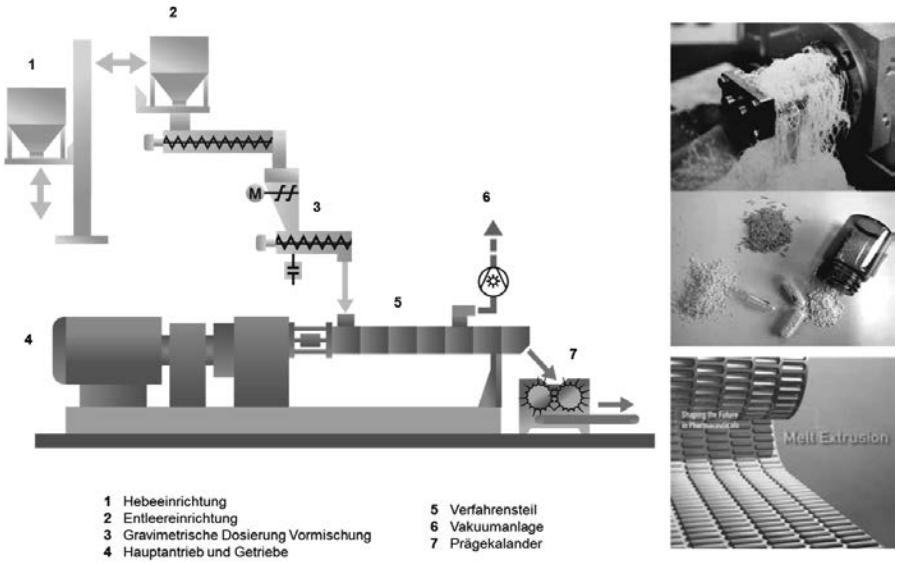


Bild 11: Anlage zur Herstellung von pharmazeutischen Produkten

3.5 Kochextrusion von Getreide für Lebensmittel und Tierfutter

Für direktexpandierte Frühstückszerealien und Snacks wird eine Getreidemischung im ZSK MEGAvolume unter der Zugabe von nur 5-15 % Wasser nach dem sogenannten HTST-Verfahren (High-Temperature-Short-Time) plastifiziert und gekocht, bei etwa 170 °C durch Düsen geformt und an Luft mit umlaufenden Messern an der Düsenplatte geschnitten. Als Rohstoff können feine Mehle, Gries oder ganze Körner eingesetzt werden. Eine Vorbehandlung der Rohstoffe wie Vorkochen oder Befeuchten etc. ist nicht notwendig. Die Zugabe des Prozesswassers erfolgt direkt in den Extruder. Die Extrudate werden anschließend getrocknet. Danach werden die Produkte zur geschmacklichen Verbesserung aromatisiert, vitaminiert, gepudert oder mit Öl / Würzmittel oder Schokolade / Zucker überzogen. Es ist auch möglich, coextrudierte Frühstückszerealien mit cremigen Füllungen zu erzeugen. Ein typischer Durchsatz für direktexpandierte Frühstückszerealien mit einem ZSK 62 Mv liegt bei 1200 kg/h.

Gekochte, unexpandierte „kaltgeformte“ Pellets, wie sie bei TPS beschrieben wurden, werden durch Walzen und Rösten zu Flocken oder geschredderten Produkten weiterverarbeitet

(Bild 12). Im Gegensatz zum konventionellen Kocher sind bei diesem Prozess auch Mehrkornflocken herstellbar.

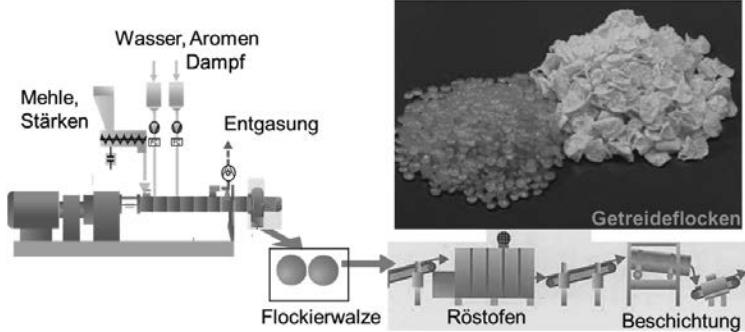


Bild 12: Anlagenbeispiel für die Kochextrusion von Getreideflocken

Für trockenes Tierfutter (Hund, Katze, Zierfisch, Fischfarm) wird heute überwiegend ein Kochextrusionsprozess eingesetzt. Ohne Vorbehandlung werden die Feststoffe einzeln oder als Vormischung in das Einlaufgehäuse dosiert. Wasser, Dampf, ggf. Frischfleisch (bis zu 50 %) und Zuschlagstoffe werden stromabwärts zugegeben. In der Plastifizierzone erfolgt das Kochen und Pasteurisieren unter konstanten, schonenden Bedingungen bei niedrigen Drücken. Die eingeleitete Energie und der dadurch erzielte Verkleisterungsgrad in dieser Zone bestimmen schon weitestgehend die Textur des Produktes, das am Austrag bei etwa 100 bis 150 °C durch eine Lochplatte oder Düse extrudiert wird und gezielt expandiert, z. B. um eine bestimmte Sinkgeschwindigkeit bei Fischfutter einzustellen. Granulierte Produkte werden anschließend getrocknet und können optional mit Fett / Öl / Aromen überzogen werden. Belohnungsstreifen und -stränge werden nach dem Austritt aus der Düse nachgetrocknet, abgekühlt und auf Länge geschnitten.

Typische Durchsätze für einen ZSK 125 Mv liegen bei 5-15 t/h. Das Schema in Bild 13 zeigt getrennte Dosierungen für Mehl, Zuschlagstoffe, Wasser, Dampf und Fleisch, sowie eine

Doppelschneckenentgasung, eine Aroma-Hochdruckpumpe, ein Drossel-Anfahrventil und eine zentrische Food-Granulierung.

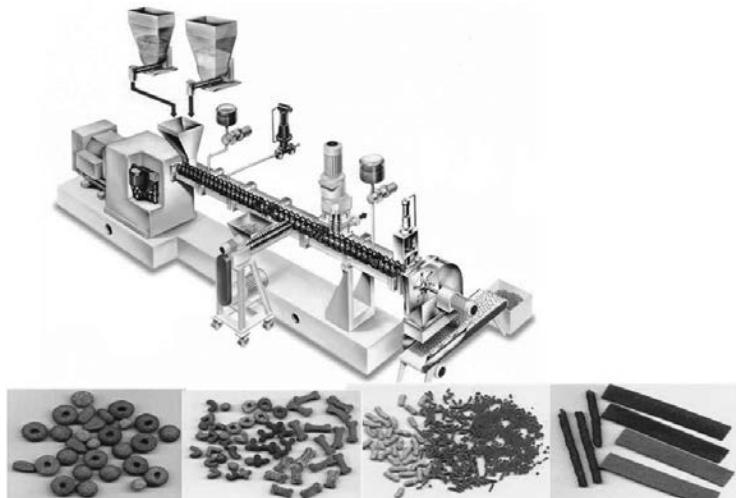
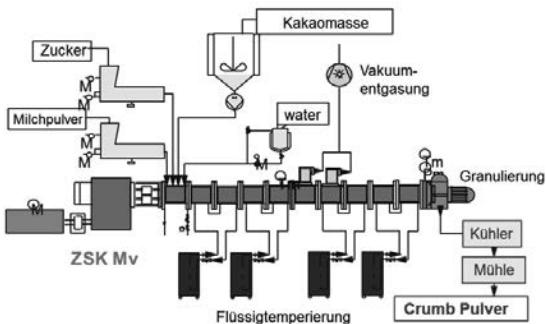


Bild 13 : Anlagenbeispiel für die Kochextrusion von trockenem Heimtier- und Fischfutter

3.6 Anwendungen im Süßwarenbereich

Typische Anwendungen, bei denen Chargenprozesse durch kontinuierliches Kneten, Kochen und Reagieren ersetzt werden, findet man in den Bereichen Kaugummi (Gumbase, Fertigmischung), Candy- und Toffeemassen, Lakritz- und Fruchtgummistränge, expandierte Crispies für Riegel, Schokolade und Yoghurt, gefüllte Extrudate, sowie im Schokoladebereich.

1. Stufe: Maillard-Reaktionen



2. Stufe: Kneten und Verflüssigen

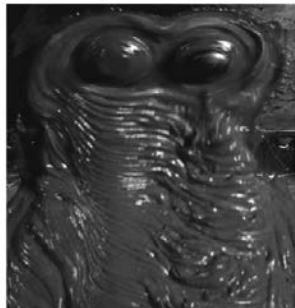


Bild 14: Anlagenbeispiel für die reaktive Extrusion von Crumb-Pulver und die anschließende Verflüssigung zu Schokolade

Für Schokolade sind mehrere kontinuierliche ZSK-Prozesse interessant und mit Anlagen von 1-3 t/h in Produktion:

- die Entkeimung von Kakao
- die Desagglomeration von Kakaokernbruch
- das Entgasen von unerwünschten sauren Aromen aus rohem Kakaokernbruch bei 150 °C unter Vakuum
- das Vermischen Zucker, Milchpulver und gerösteter Kakaomasse vor dem Kalander, wobei durch die Temperaturführung bis 80 °C leichte Karamellaromen erzeugt werden können
- Eine spezielle Geschmacksbildung für Crumb-Schokolade ergibt sich mit dem in Bild 28 links gezeigten Anlagenschema. Hier finden bei 130 °C in 1-2 Minuten sogenannte Maillard-Reaktionen zwischen Aminosäuren und reduzierenden Zuckern statt, die diese klassische Geschmacksrichtung ergeben, wie sie beispielsweise in Großbritannien, Skandinavien oder Japan üblich sind. Der Prozess benötigt einige Prozent Feuchte, die getrennt zudosiert und nach der Reaktion im Vakuum wieder abgezogen wird. Der ZSK-Prozess spart aufwendige Vakuumtrockner mit einigen Stunden Verweilzeit ein.
- Die Verflüssigung des Walzgutes mit mehr Kakaobutter und Lecithin bei 60 °C (Bild 28 rechts). Dies funktioniert vor allem mit vorbehandelten Rohstoffen, wie dies bei Crumb-Pulver der Fall ist, da hier die Geschmacksbildung schon erreicht ist. Auch

der Feuchtegehalt ist bereits unter 1 % gesenkt worden, was eine gut fließfähige Masse zum Vergießen ergibt. In diesem Fall spart man sich einige Tage des chargenweisen Conchierens [8].

- [1] Schaller; Der wohl unterrichtete Ziegler. 7.Ausgabe 1874 (1.Ausgabe 1828)
- [2] Wirtschaftsarchiv Baden-Württemberg, Stuttgart (Anzeige 1957)
- [3] Deutsches Patent Nr. 18797 (Pfleiderer, 1881)
- [4] Deutsches Patent Nr. 131392 (Wünsche, 1902)
- [5] US-Patent Nr. 1463379 (Easton, 1923)
- [6] Italienisches Patent Nr. 370578 (Colombo, 1939)
- [7] Deutsches patent Nr 862668 (Meskat, Erdmenger, 1944)
- [8] Kohlgrüber : Der gleichläufige Doppelschneckenextruder, Hanser Verlag 2007.

Modellierung der Diffusion in festen oder porösen Partikeln

Dr.-Ing. J. Weber, Dow Stade Anlagengesellschaft mbH, Stade

Kurzfassung:

Ein wichtiger Verfahrensschritt bei der Herstellung von Kunststoffen ist das Herauswaschen von Verunreinigungen aus den Kunststoffpartikeln und die anschließende Trocknung. So sind Polycarbonat, PET und Polyamid nicht nur hygroskopisch, sondern es sind durch den Herstellungsprozess auch erhebliche Mengen an Wasser gelöst. In Bisphenol kann der Wassergehalt bis zu 0,3 % betragen. Bei der Herstellung von chloriertem Polyethylen (CPE) fällt als Nebenprodukt Salzsäure an, die durch Wäsche, z.B. mit Wasser, aus dem Produkt entfernt werden muß. Das Produkt muß anschließend getrocknet werden.

Salzsäure führt in dem nachfolgenden Verarbeitungsschritten zu Korrosion, und auch Feuchtigkeit führt schon während der Lagerung bei Taupunktsunterschreitung zur Kondensation und durch Wasserbrückenbildung zwischen den Partikeln zu erheblichen Schwierigkeiten beim Schüttgutfluß aus Silos. Mit der vorliegenden Arbeit soll die Diffusion von Verunreinigungen aus den Partikeln in eine Waschflüssigkeit sowie das Trocknungsverhalten untersucht und modelliert werden.

Abstract:

The removal of impurities by a wash step and drying are important process steps of the production process of plastics. Polycarbonate, Polyamide and PET are pretty hygroscopic, but also due to the production process a considerable amount of water can be dissolved. In bisphenol the water content can reach 0,3 % and more. HCl is a byproduct at the production of chlorinated polyethylene (CPE) and dissolved within the particles. This has to be removed by a wash process step with water. The CPE, thereafter, has to be dried.

HCL leads to corrosion in the further production and conversion processes. Also humidity, when condensation occurs during the storage of the bulk products, is not very helpful to enable a smooth bulk flow behavior.

With the present work the diffusion of impurities from the particles into a wash liquor, and the drying process of such particles is investigated and modeled.

Grundlagen der Stoffübertragung durch Diffusion:

Beim Stofftransport einer Komponente, also beim Transport einer Verunreinigung in das die Partikeln umgebende Waschflüssigkeit oder beim Transport von wasserstoffmolekülen in die Trockenluft wird die Molenstromdichte J durch das erste Fick'sche Gesetz beschrieben [2]:

$$J = -D_{1,2} \cdot \frac{dc_1}{dz} = -D_{1,2} \cdot c_{ges} \frac{dx_1}{dz} \quad [\text{mol / m}^2\text{s}]$$

Das erste Fick'sche Gesetz ist dabei analog zum Fourier'schen Wärmeleitansatz aufgebaut. D_{1,2} ist hierbei der Diffusionskoeffizient des Stoffes 1, welche durch den Stoff 2 hindurch diffundiert. Somit sind es mindestens zwei Stoffe, die infolge eines Konzentrationsgefälles dc/dz diffundieren.

Der Diffusionskoeffizient lässt sich empirisch unter anderem nach der Stokes–Einstein–Gleichung sowie nach Sutherland berechnen. Die Gleichung von Stokes–Einstein gilt aber nur für Stoffe, deren Molekülgröße mindestens fünf Mal größer ist als die des Lösungsmittels, sowie für stark verdünnte Lösungen. Eine exakte Bestimmung ist nur experimentell möglich.

$$D = \frac{k_B \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R_0} \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

mit T=Temperatur [K], kB=Boltzmannkonstante [J/K], Ro=Molekülradius [m], η=dynamische Viskosität des Lösungsmittels [Pas].

Der Molekülradius lässt sich dabei aus der Molmasse ableiten. Insgesamt lässt sich sagen, daß der molare Stofftransport umso größer ist, je höher die Temperatur, je kleiner die Molmasse der Verunreinigung, und je kleiner die Viskosität des Partikels ist, aus dem das Wasser oder die Verunreinigung herausdiffundieren soll.

Die diffundierenden Komponenten müssen nun noch wegtransportiert werden, da es sonst zu einem Konzentrationsausgleich kommen würde und der Stofftransport, der ja nach dem ersten Fick'schen gesetz einen Konzentrationsunterschied benötigt, zum Erliegen kommen würde. Dieser Stofftransport geschieht, analog zur Wärmeübertragung, bei der Stoffübertragung durch Konvektion. Bei Waschprozessen

geschieht dies durch die Bewegung der Waschflüssigkeit, bei der Trocknung durch die Bewegung und Geschwindigkeit der Trocknungsluft. Die Kennzahl für die Höhe der Konvektion, also der Fähigkeit des umgebenden Mediums, diffundierende Partikeln wegzutransportieren ist bei der Stoffübertragung die Sherwoodzahl, analog zu der Nusselt-Zahl bei der Wärmeübertragung. [3]

Eigene Versuche haben nun ergeben, daß der Stofftransport einer Verunreinigung, oder die Entfeuchtung glatter Partikeln fast ausschließlich durch die interne Diffusion in der Feststoffmatrix bestimmt wird. Bei Partikeln mit glatter Oberfläche hat der Stofftransport durch Konvektion, also der Abtransport der diffundierenden Komponente, bei Sherwoodzahlen $>> 100$ fast keinen Einfluß auf die Wasch- oder Trocknungsgeschwindigkeit.

Etwas anders sieht es bei porösen Partikeln aus. Bei langen, dünnen Kapillaren in den Partikeln diffundieren Verunreinigungen auch in die in den Kapillaren enthaltene Waschflüssigkeit. Hier ist jedoch die Konvektion, also der Abtransport der Verunreinigungen, stark behindert. Die Sherwoodzahl ist hier typischerweise $Sh = 2$.

Sehr ähnlich verhält es sich bei der Trocknung von porösen Partikeln. Zunächst wird die Feuchtigkeit von der Oberfläche entfernt, da hier der Abtransport der Wassermoleküle wegen der hohen Sherwoodzahlen am leichtesten ist. Die Entfernung der Flüssigkeit aus den Poren ist bei einer Sherwoodzahl von 2 schon langwieriger. Dann erst diffundiert die in den Partikeln gelöste Flüssigkeit zur Oberfläche und gelangt auch dann erst in die Trocknungsluft und wird von dieser abtransportiert.

Man kann also bei der Trocknung poröser Partikeln, die gelöstes Wasser enthalten, von 3 Trocknungsabschnitten sprechen. Beim ersten Trocknungsabschnitt diffundieren Wassermoleküle von der Oberfläche der Partikeln in die Trocknungsluft und werden von ihr abtransportiert. Dieser Abschnitt ist oft in einem Zeitraum von weniger als einer Minute beendet. Beim zweiten Trocknungsabschnitt diffundieren dann Wassermoleküle in den Luftstrom. Durch die geringe Konvektion bei Sherwoodzahlen um 2 kann dieser Abschnitt bis zu einer halben Stunde dauern. Beim dritten und letzten Trocknungsabschnitt diffundieren nun die Wassermoleküle durch die Feststoffmatrix langsam zur Oberfläche- auch zur Porenoberfläche- der Feststoffpartikeln und werden dann von der Trocknungsluft abtransportiert. Dieser Trocknungsabschnitt kann Stunden dauern.

Bei der Wäsche zur Entfernung von Verunreinigungen sind die physikalischen Gesetzmäßigkeiten analog, mit dem Unterschied, daß die Waschflüssigkeit eine höhere Viskosität hat als die Trocknungsluft.

Die Abb. 1 zeigt eine Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme von CPE-Partikeln, einem typischen Vertreter poröser Partikeln.

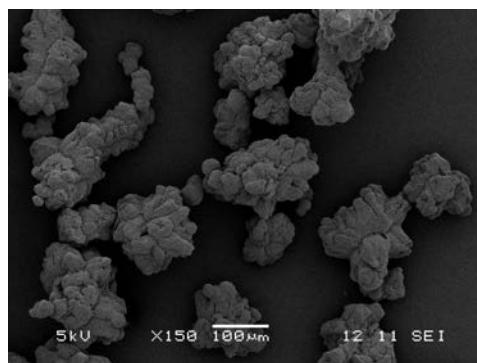


Bild 1: REM-Aufnahmen von CPE-Partikeln

Matrixdiffusion:

Es gibt eine gewisse Anzahl von Theorien zur Diffusion in Polymeren, die auch als Matrixdiffusion beschrieben wird. Eine Matrixdiffusion liegt vor, wenn die Teilchen nicht innerhalb des Porenvolumens, sondern durch das Polymergerüst selbst diffundieren.

Eine dieser Theorien ist die "Theory of free volume", die besagt, dass Molekùlbewegungen der diffundierenden Komponenten immer dann auftritt, wenn auch ein freies Volumen, also eine Mikropore im Polymergerüst auftritt. Durch eine Polymerkettenbewegung (Brown'sche Bewegung) werden die Mikroporen frei. Wenn die Bewegungen groß genug ist, können die diffundierenden Moleküle diese belegen.[4]

Der Diffusionskoeffizient hängt dabei von dem Stoff ab, in dem die Diffusion stattfindet, als auch von dem diffundierenden Stoff, dem Penetrant. Er ist für einige Materialpaarungen gemessen worden. So beträgt z.B. der diffusionskoeffizient von Chlor in einer HDPE Geomembran nach Rowe et al. nur $10^{-14} - 6 \cdot 10^{-15}$ m²/s bei 23°C. Der Diffusionskoeffizient von Toluol in HDPE, ist wesentlich höher und beträgt, nach Britton et al., schon $7,2 \cdot 10^{-12}$ m²/s bei 22 °C. [1]

Die Matrixdiffusion spielt eine große Rolle bei der Beurteilung der Durchlässigkeit von Rohen für verschiedene Flüssigkeiten. Deshalb wurden die Messungen auch vorwiegend bei Umgebungstemperatur vorgenommen.

Es hat sich jedoch, auch bei eigenen Untersuchungen gezeigt, daß die Matrixdiffusion am höchsten kurz vor dem Erweichungspunkt des Stoffes ist, in dem die Diffusion stattfindet. Einige Autoren postulieren, dass die untere Grenze für eine nennenswerte Matrixdiffusion der Glasübergangspunkt ist.

Zaikov et. al. [5] haben festgestellt, daß auch das Verhältnis zwischen kristallinem und amorphem Anteil in einem Kunststoff die Matrixdiffusion beeinflusst. Ein amorpher Bereich ist für die diffundierenden Moleküle verhältnismäßig gut durchlässig, während kristalline Bereiche nahezu undurchlässig sind.

Modellierung:

Für die Modellierung wurde nun postuliert, daß poröse Partikeln aus einer Vielzahl von Einzelpartikeln bestehen, die miteinander verbunden sind und in ihren Zwischenräumen Poren bilden. Die modellhafte Vorstellung ist in Abb. 2 dargestellt.

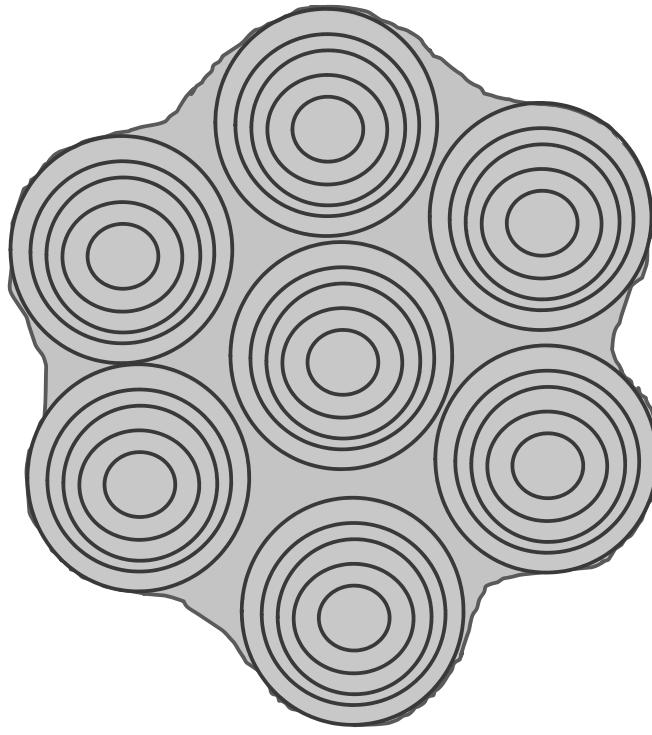


Bild 2 Schalenmodell

In den Poren ist der Stofftransport durch Konvektion verlangsamt, mit einer Sherwoodzahl von 2. An der Außenseite der Einzelpartikel jedoch beträgt die Sherwoodzahl > 100. Die Einzelpartikel selbst sind jedoch nach der Modellvorstellung als Schalen aufgebaut. Die Moleküle- Verunreinigungen oder gelöstes Wasser bei der Trocknung, diffundieren nun mit dem durch die Diffusionspaarung bestimmten Diffusionskoeffizienten der Matrixdiffusion von den

inneren zu den äußeren Schalen und gelangen schließlich, bei Verunreinigungen in die Waschflüssigkeit- und bei der Trocknung in die Trocknungsluft.

Nichtporösen Partikeln bestehen nach dieser Modellvorstellung natürlich nicht aus einer Vielzahl von Einzelpartikeln, sondern aus einem, wiederum in Schalen aufgebautem Einzelpartikel. Die Diffusion wird nach dem ersten Fick'schen Gesetz durch den Konzentrationsgradienten in den Schalen eines Einzelpartikels, der durch den Abtransport der Moleküle in der äußeren Schale auftritt, ermöglicht.

Ergebnis:

Mit diesem Modell konnte der Waschschnitt und die Trocknung von CPE-Partikeln gut beschrieben werden. Besonders der Anteil kristalliner Anteile sowie die Größe der Partikeln auf Wasch- und Trocknungsergebnis konnte mit dieser Modellvorstellung erklärt und berechnet werden. Auch die Trocknung anderer Stoffsysteme, die länger als erwartet dauerte, konnte mit diesem Modell erklärt werden.

Referenzen:

- [1] Baerns et al. 2006 Baerns, M.; Behr, A.; Brehm, A.; Gmehling, J.; Hofmann, J.; Onken, U.; Renken, A.: Technische Chemie, 2006
- [2] Moore, 1983 Moore, W. J.:
Grundlagen der Physikalischen Chemie, 1983
- [3] Reid et al., 1977 Reid, R. C.; Prausnitz, J. M.; Sherwood, T. K.:
The Properties of Gases and Liquids, 1977
- [4] Schuster, 2001 Schuster, J.:
Untersuchung der Diffusion in dünnen Flüssigkeitsfilmen mit
Methoden der Einzelmoleküldetektion, Dissertation,
technische Universität Chemnitz, 2001
- [5] Zaikov et al, 1987 Zaikov, G. E.; Lordanskii, A. L.; Markin, V. S.:
Diffusion of Electrolytes in Polymers, Utrecht, 1987

Das bisschen Staub? Aber bitte ohne Explosion!

Dipl.-Ing. **G. Gosda**, Covestro Deutschland AG, Leverkusen

Kurzfassung

Unfälle verursacht durch Staubexplosionen gingen in der Vergangenheit einher mit Toten, Verletzten und Sach- und Umweltschäden

Beispiele sind die Mehlstaub-Explosion in der Rolandsmühle und die Explosion des Getreidesilos in Blaye und unzählige weitere Vorkommnisse.

Eigentlich ist es eine anspruchsvolle Aufgabe ein bisschen Staub zur Explosion zu bringen:

Der Staub muss

- brennbar und explosionsfähig sein,
- eine Teilchengröße unter ca. 500 µm haben,
- aufgewirbelt werden,
- als Mischung mit der Umgebungsluft oder in einer oxidierenden Umgebung innerhalb der Konzentrationsgrenzen vorliegen,
- als explosionsfähiges Gemisch auf eine wirksame Zündquelle treffen.

Das explosionsfähige Gemisch aus Brennstoff und Oxidator und die wirksame Zündquelle müssen zur selben Zeit und am selben Ort auftreten.

Wenn dies geschieht, ist nicht mehr zu verhindern, dass

- die Explosion in Millisekunden abläuft,
- die Temperaturen in dem Feuerball weit über 1000°C betragen,
- je nach Verdämmung und ohne Vordruck eine Druckwelle mit Drücken bis zu 10 bar auftritt.

Die Auswirkungen sind

- Personenschäden: steht eine Person direkt in der explodierenden Wolke oder daneben, riskiert sie Verbrennungen und Verletzungen,
- Trümmerflug: fliegende Teile verursachen weiteres Unheil,
- Umweltschäden: nie verbrennt bei einer Explosion ein Staub sauber und vollständig.

Im Falle von Sekundärexpllosionen sind die Schäden nochmals weitreichender.

Bereits bei der Beschaffung von Anlagen, Apparaten, Geräten und Schutzsystemen ist eine gründliche sicherheitstechnische Analyse unerlässlich. In der Gefahrstoff-Verordnung ist die Rangfolge vorgegeben, in der jedes Explosionsschutzproblem anzugehen ist:

- Zuerst soll versucht werden explosionsfähige Gemische weitestgehend zu vermeiden oder ihre Bildung zumindest einzuschränken.
- Kann dieses Ziel nicht oder nicht vollständig erreicht werden, müssen die wirksamen Zündquellen vermieden werden.
- Erst wenn trotz dieser Maßnahmen eine Explosion nicht sicher verhindert werden kann, sind Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes in Betracht zu ziehen.

Für ein Zonenkonzept werden Wahrscheinlichkeit und Dauer des Auftretens explosionsfähiger Gemische beurteilt (Zoneneinteilung) und die entsprechende Vermeidung wirksamer Zündquellen vorgenommen.

Ein sicherheitstechnisch günstiges und gleichzeitig wirtschaftlich vertretbares Explosions-schutzkonzept, das den verfahrenstechnischen Anforderungen genügt, hängt wesentlich von den explosionstechnischen Kenndaten des jeweiligen Produktes ab.

Für die Gemischbildung sind dies u.a. die Explosionsfähigkeit und die Explosionsgrenzen. Zur Ausschaltung wirksamer Zündquellen ist die Kenntnis der Zünd-eigenschaften der Staubwolke erforderlich, z.B. die Zündtemperatur des aufgewirbelten Staubes, die Mindest-zündenergie, die Glimmtemperatur.

Für die Auswirkungsbetrachtung und für die Auslegung von auswirkungsbegrenzenden Maßnahmen werden der Explosionsdruck und die Explosions-Druckanstiegsgeschwindigkeit benötigt.

Bei der Beschaffung von Geräten und Schutzsystemen zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen ist die am 20. April 2016 in Kraft getretene Richtlinie 2014/34/EU maßgeblich. Für nicht oder nicht für den jeweiligen Einsatzfall zertifizierte Geräte und Schutzsys-teme akzeptiert der Gesetzgeber ersatzweise eine mit der erforderlichen Fachkenntnis er-stellte Gefährdungsbeurteilung, sofern damit das gleiche Sicherheitsniveau erreicht wird.

Für Betreiber in Europa sind in der Richtlinie 1999/92/EG (in Deutschland umgesetzt in die Gefahrstoff-Verordnung und die Betriebssicherheits-Verordnung) die Mindestvorschriften formuliert. Es ist ein Explosionsschutzdokument zu erstellen, in dem sämtliche Explosions-fährdungen auszuweisen und die getroffenen Maßnahmen darzulegen sind. Die Prüfungs-vorgaben zum Explosionsschutz enthält die Betriebssicherheits-Verordnung.

In Compoundieranlagen bedürfen zahlreiche Anlagenteile einer explosionstechnischen Beurteilung. In vielen Verfahrensschritten, beim Wiegen, Mischen, Extrudieren, Granulieren, Transportieren und Lagern ist die Entstehung von explosionsfähigem Staub z.B. in Form von Abrieb nicht vollständig auszuschließen und muss fachgerecht aus Sicht des Explosions-schutzes beurteilt werden.

Explosionsschutz – Regelungen und Verantwortung

Dr. B. Dyrba, Dyrba Explosionsschutz, Bad Schönenborn

Seit dem 1.7.2003 galt innerhalb der Europäischen Union ausschließlich die Richtlinie 94/9/EG für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (ATEX). Am 29.03.2014 wurde im Amtsblatt der Europäischen Union – L 96/309 – die Richtlinie 2014/34/EU veröffentlicht, die die alte ATEX ablöst.

Grundsätzlich geht es bei der neuen ATEX-Richtlinie 2014/34/EU um eine Anpassung der Richtlinie an die im Wesentlichen eher formalen Anforderungen des Beschlusses Nr. 768/2008/EG, ohne die Richtlinie jedoch gegenüber der alten ATEX-Richtlinie 94/9/EG substantiell zu ändern.

Die EU-Kommission hat im Rahmen des »New Legislative Framework (NLF)«, der Erneuerung des sog. New Approach, neun Binnenmarktrichtlinien an den neuen europäischen Rahmen angepasst, u. a.:

- Niederspannungsrichtlinie
- Richtlinie einfache Druckbehälter
- Druckgeräterichtlinie
- ATEX-Richtlinie
- Aufzugsrichtlinie
- EMV-Richtlinie

Die alte ATEX beruhte auf dem Artikel 100a des ersten Vertrages zur Gründung der EG und trug den Arbeitstitel ATEX 100a, abgeleitet aus »ATmosphères EXplosibles«. Durch eine Neunummerierung der Artikel ist aus dem Artikel 100a der Artikel 95 geworden und entspräche damit der ATEX 95. Heute ist der Inhalt in den Artikel 114 gewandert. Mit der ATEX sind die nationalen Bestimmungen zu Gunsten eines einheitlichen und hohen Sicherheitsstandards aufgegeben worden. Gleicher Recht in allen Mitgliedsstaaten bedeutet, dass Handelshemmnisse aufgehoben und Kennzeichnungen zu Sicherheitsstandards einheitlich einzuführen sind. In der Richtlinie wird das Sicherheitsziel festgelegt. Die Umsetzung und Details dagegen werden nicht mehr beschrieben, sondern in Europanormen behandelt. Die

Normen können erheblich schneller den neuesten technischen Erkenntnissen angepasst werden und sind somit flexibler als Änderungsvorgänge an Richtlinien durch den Gesetzgeber. Hiermit sollten die oben aufgeführten Binnenmarkt-Richtlinien, die bisher ein mehr oder weniger starkes »Eigenleben« geführt haben, vereinheitlicht werden. Die Richtlinie 2014/34/EU wird erläutert durch die ATEX-Leitlinien.

Die ATEX wurde über das Produktsicherheitsgesetz mit der Explosionsschutzprodukteverordnung (11. ProdSV) in nationales Recht überführt. Die neue Explosionsschutzprodukteverordnung – 11. ProdSV - wurde am 15. Januar 2016 im Bundesgesetzblatt I, Nr. 2 bekanntgemacht. Die neue Verordnung trat am 20. April 2016 in Kraft und löste die alte Explosionsschutzverordnung ab.

Neben der Richtlinie 2014/34/EU für die Beschaffenheit von Geräten hat der Anwender auch die Richtlinie 1999/92/EG über die Sicherheit der Arbeitnehmer zu beachten, die durch explosionsfähige Atmosphäre gefährdet werden können. Bekannt geworden ist diese Richtlinie auch unter den Namen ATEX 118a und später ATEX 137. Heute ist der Inhalt in den Artikel 153 gewandert.

Die Richtlinie 1999/92/EG wurde am 2.10.2002 durch die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) in nationales Recht überführt und wird heute auch in der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) abgebildet.

Die Richtlinie 1999/92/EG beinhaltet Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphäre gefährdet werden können. Sie ist die 15. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Abs. 1 der Richtlinie 89/391/EWG vom 16.12.1999. Inhaltliche Schwerpunkte sind:

- Verhindern von und Schutz gegen Explosionen
- Beurteilung der Explosionsrisiken
- Koordinierungspflicht
- Explosionsschutzdokument
- Anhang 1: Einteilung von Bereichen, in denen explosionsfähige Atmosphären vorhanden sein können.
- Anhang 2: Mindestvorschriften zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphäre gefährdet werden können, sowie Kriterien für die Auswahl von Geräten und Schutzsystemen.

- Anhang 3: Warnzeichen zur Kennzeichnung von Bereichen, in denen explosionsfähige Atmosphären auftreten können.



Warnung vor einem Bereich, in dem explosionsfähige Atmosphären auftreten können.

Die Richtlinie 1999/92/EG wird erläutert, durch den nicht verbindlichen Leitfaden.

Die Gefahrstoffverordnung enthält die Anforderungen zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch chemische Arbeitsstoffe bei der Arbeit. Sie erfasst auch Stoffe mit physikalisch-chemischen Gefährdungen, z. B. Stoffe, die im Gemisch mit Luft entzündbar sind.

Mit der Gefahrstoffverordnung in der Fassung vom 06.02.2015 wird unter anderem die Richtlinie 1999/92EG »über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können« umgesetzt. Die Inhalte der Richtlinie 1999/92/EG sind eingearbeitet in § 2 Abs. 10 bis 14 (Begriffsbestimmungen), § 6, Abs. 4, 8, 9 (Gefährdungsbeurteilung), § 11 (Besondere Schutzmaßnahmen gegen physikalisch-chemische Einwirkungen, insbesondere gegen Brand- und Explosionsgefährdungen) und Anhang 1 Nr. 1 (Brand- und Explosionsgefährdungen).

Die Gefahrstoffverordnung nimmt somit für die rechtliche Regelung der Gefährdungsbeurteilung und der Schutzmaßnahmen gegen Brand- und Explosionsgefahren eine zentrale Stellung ein. Der Regelungsbereich erstreckt sich nicht nur auf Gemische von entzündbaren Stoffen mit Luft unter atmosphärischen Bedingungen sondern auch auf folgende Fälle:

- explosionsfähige Gemische unter nicht atmosphärischen Bedingungen
- explosionsfähigen Gemische, in denen das Oxidationsmittel nicht Luft ist
- Explosionen durch die Zersetzung instabiler Gase.

Die Regelungen hinsichtlich des Explosionsschutzes gehen mit der Änderung der GefStoffV weit über den Anwendungsbereich der bisherigen BetrSichV hinaus. In der alten BetrSichV war der Explosionsschutz bei Vorhandensein explosionsfähiger Atmosphäre im Hinblick auf

die Vermeidung von Zündquellen geregelt. Die explosionsfähige Atmosphäre ist ein Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben unter atmosphärischen Bedingungen, in dem sich der Verbrennungsvorgang nach erfolgter Entzündung auf das unverbrannte Gemisch überträgt. Als atmosphärische Bedingungen gelten hier Gesamtdrücke von 0,8 bar bis 1,1 bar und Gemischttemperaturen von – 20 °C bis + 60 °C.

In der GefStoffV werden zusätzlich auch die explosionsfähigen Gemische ausdrücklich geregelt. Ein explosionsfähiges Gemisch im Sinne der GefStoffV ist ein Gemisch aus Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben, in dem sich der Verbrennungsvorgang auf das unverbrannte Gemisch überträgt. Damit ist die explosionsfähige Atmosphäre eine Teilmenge explosionsfähiger Gemische.

Für die einheitliche Gefährdungsbeurteilung nach § 5 Arbeitsschutzgesetz beim Vorhandensein gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre, die sowohl den stofflichen Aspekt als auch die arbeitsmittelbezogenen Regelungen berücksichtigt, sind die Explosionsschutz-Regeln (EX-RL, DGUV Regel 113-001 – bisher BGR 104 –) eine wesentliche Basis.

Die neue BetrSichV gilt ab 01.06.2015 für die Verwendung von Arbeitsmitteln. Ziel dieser Verordnung ist es, die Sicherheit und den Schutz der Gesundheit von Beschäftigten bei der Verwendung von Arbeitsmitteln zu gewährleisten. Dies soll insbesondere erreicht werden durch:

1. die Auswahl geeigneter Arbeitsmitteln und deren sichere Verwendung,
2. die für den vorgesehenen Verwendungszweck geeignete Gestaltung von Arbeits- und Fertigungsverfahren sowie
3. die Qualifikation und Unterweisung der Beschäftigten.

Diese Verordnung regelt hinsichtlich der in Anhang 2 genannten überwachungsbedürftigen Anlagen zugleich Maßnahmen zum Schutz anderer Personen im Gefahrenbereich, soweit diese aufgrund der Verwendung dieser Anlagen durch Arbeitgeber im Sinne des § 2 Absatz 3 gefährdet werden können.

Das Arbeitsschutzgesetz verpflichtet in § 5 jeden Unternehmer, zu beurteilen, welche Gefährdungen bzw. Belastungen für seine Mitarbeiter mit ihrer Arbeit verbunden sind und zu ermitteln, welche Arbeitsschutzmaßnahmen erforderlich sind. Nach § 3 hat er darüber hinaus Maßnahmen des Arbeitsschutzes auf ihre Wirksamkeit zu überprüfen und erforderlichenfalls sich ändernden Gegebenheiten anzupassen. Auf der Basis von §§ 6 und 11 der Gefahrstoffverordnung hat der Arbeitgeber bei der Gefährdungsbeurteilung nach § 5 des Arbeit-

schutzgesetzes unter Berücksichtigung des Anhangs 1 Nr. 1 der GefStoffV und der allgemeinen Grundsätze des § 4 des Arbeitsschutzgesetzes die notwendigen Maßnahmen für die sichere Bereitstellung und Benutzung der Arbeitsmittel zu ermitteln. Dabei hat er insbesondere die Gefährdungen zu berücksichtigen, die mit der Benutzung des Arbeitsmittels selbst verbunden sind und die am Arbeitsplatz durch Wechselwirkungen der Arbeitsmittel untereinander oder mit Arbeitsstoffen oder der Arbeitsumgebung hervorgerufen werden.

Die Gefährdungsbeurteilung ist von der Unternehmensleitung durchzuführen. Sie hat die notwendigen Maßnahmen für die sichere Bereitstellung und Verwendung der Arbeitsmittel zu bewerten.

Kann nach den Bestimmungen des § 11 der GefStoffV die Bildung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre nicht sicher verhindert werden, hat der Arbeitgeber nach § 11 (2) der GefStoffV zu beurteilen:

1. die Wahrscheinlichkeit und die Dauer des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphären,
2. die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins, der Aktivierung und des Wirksamwerdens von Zündquellen einschließlich elektrostatischer Entladungen und
3. das Ausmaß der zu erwartenden Auswirkung von Explosionen.

Der Unternehmer hat nach § 6 Abs. 9 Gefahrstoffverordnung die Gefährdungen durch gefährliche explosionsfähige Gemische im Rahmen eines Explosionsschutzdokumentes besonders auszuweisen.

Aus dem Explosionsschutzdokument muss nach § 6 Abs. 9 der GefStoffV insbesondere hervorgehen:

- dass die Explosionsgefährdungen ermittelt und einer Bewertung unterzogen wurden,
- dass angemessene Vorkehrungen getroffen werden, um die Ziele des Explosionsschutzes zu erreichen (Darlegung des Explosionsschutzkonzeptes),
- ob und welche Bereiche entsprechend Anhang I Nummer 1.7 in Zonen eingeteilt wurden und
- für welche Bereiche Explosionsschutzmaßnahmen nach § 11 „Explosionsgefährdungen“ und Anhang I Nummer 1 getroffen wurden

- wie bei Zusammenarbeit verschiedener Firmen die Vorgaben nach § 15 Gefahrstoffverordnung umgesetzt werden
- welche Prüfungen nach § 7 Abs. 7 Gefahrstoffverordnung und welche Prüfungen zum Explosionsschutz nach Anhang 2 Abschnitt 3 Betriebssicherheitsverordnung durchzuführen sind.

Der Arbeitgeber, der die Verantwortung für die Bereitstellung und Benutzung der Arbeitsmittel trägt, koordiniert die Durchführung aller die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Beschäftigten betreffenden Maßnahmen und macht in seinem Explosionsschutzzdokument genauere Angaben über das Ziel, die Maßnahmen und die Bedingungen der Durchführung dieser Koordination.

Bei der Erstellung des Explosionsschutzzdokumentes kann auf vorhandene Gefährdungsbeurteilungen, Dokumente oder andere gleichwertige Berichte zurückgegriffen werden, die aufgrund von Verpflichtungen nach anderen Rechtsvorschriften erstellt worden sind. Liegen z. B. im Rahmen des Genehmigungsverfahrens Ausarbeitungen zur Verfahrensbeschreibung mit für den Explosionsschutz wesentlichen Verfahrensparametern vor, so kann im Explosionsschutzzdokument auf diese Verfahrensbeschreibung verwiesen werden.

Die Dokumentation zum Explosionsschutz kann Bestandteil einer allgemeinen Sicherheitsdokumentation sein. Sie kann auch in elektronischer Form (z. B. in Datenbanken) geführt werden.

§ 3 Abs. 6 BetrSichV verlangt weiterhin das für Arbeitsmittel, insbesondere Art, Umfang und Fristen der erforderlichen Prüfungen zu ermitteln sind. Ferner hat der Arbeitgeber die notwendigen Voraussetzungen zu ermitteln und festzulegen, welche die Personen erfüllen müssen, die von ihm mit der Prüfung oder Erprobung von Arbeitsmitteln zu beauftragen sind.

Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen sind vor der erstmaligen Inbetriebnahme und nach prüfpflichtigen Änderungen auf Explosionssicherheit zu prüfen. Hierbei sind das im Explosionsschutzzdokument nach § 6 Absatz 9 Nummer 2 der Gefahrstoffverordnung dargelegte Explosionsschutzkonzept und die Zoneneinteilung zu berücksichtigen. Bei der Prüfung ist festzustellen, ob

- a) die für die Prüfung benötigten technischen Unterlagen vollständig vorhanden sind,
- b) die Anlage entsprechend dieser Verordnung dieser Verordnung errichtet und in einem sicheren Zustand ist und

c) die festgelegten technischen und organisatorischen Maßnahmen wirksam sind.

Zusätzlich ist bei Anlagen nach § 18 Satz 1 Absatz 1 Nummer 3 bis 8 zu prüfen, ob die erforderlichen Maßnahmen zum Brandschutz eingehalten sind.

Mit Ausnahme der Anlagen nach § 18 Satz 1 Absatz 1 Nummer 3 bis 8 dürfen die Prüfungen auch von einer zur Prüfung befähigten Person nach Nummer 3.3 durchgeführt werden.

Geräte, Schutzsysteme und Sicherheits-, Kontroll- oder Regelvorrichtungen im Sinne der Richtlinie 2014/34/EU dürfen nach einer Instandsetzung hinsichtlich des Teils, von dem der Explosionsschutz abhängt, erst wieder in Betrieb genommen werden, nachdem eine zur Prüfung befähigte Person nach Nummer 3.2 festgestellt hat, dass das Teil in den für den Explosionsschutz wesentlichen Merkmalen den gestellten Anforderungen entspricht.

Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen sind mindestens alle sechs Jahre auf Explosionsicherheit zu prüfen. Hierbei sind das Explosionsschutzzdokument und die Zoneneinteilung zu berücksichtigen. Bei der Prüfung ist festzustellen, ob

- a) die für die Prüfung benötigten technischen Unterlagen vollständig vorhanden sind und ihr Inhalt plausibel ist,
- b) die Prüfungen nach den Nummern 5.2 und 5.3 vollständig durchgeführt wurden,
- c) sich die Anlage in einem dieser Verordnung entsprechenden Zustand befindet und sicher verwendet werden kann,
- d) die festgelegten technischen und organisatorischen Maßnahmen wirksam sind und
- e) das Instandhaltungskonzept nach Nummer 5.4 wirksam ist.

Bei Anlagen nach § 18 Absatz 1 Satz 1 Nummer 3 bis 8 dürfen die Prüfungen auch von einer zur Prüfung befähigten Person nach Nummer 3.3 durchgeführt werden.

Zusätzlich zur Prüfung nach Nummer 5.1 Satz 1 sind Geräte, Schutzsysteme, Sicherheits-, Kontroll- und Regelvorrichtungen im Sinne der Richtlinie 2014/34/EU mit ihren Verbindungs-einrichtungen als Bestandteil einer Anlage in einem explosionsgefährdeten Bereich und deren Wechselwirkungen mit anderen Anlagenteilen wiederkehrend mindestens alle drei Jahre zu prüfen. Die Prüfung kann von einer zur Prüfung befähigten Person nach Nummer 3.1 durchgeführt werden.

Zusätzlich zu den Prüfungen nach Nummer 5.1 Satz 1 und Nummer 5.2 sind Lüftungsanlagen, Gaswarneinrichtungen und Inertisierungseinrichtungen wiederkehrend jährlich zu prü-

fen. Die Prüfung kann von einer zur Prüfung befähigten Person nach Nummer 3.1 durchgeführt werden.

Auf die wiederkehrende Prüfungen nach den Nummern 5.2 und 5.3 kann verzichtet werden, wenn der Arbeitgeber im Rahmen der Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung ein Instandhaltungskonzept festgelegt hat, das gleichwertig sicherstellt, dass ein sicherer Zustand der Anlagen aufrechterhalten wird und die Explosionssicherheit dauerhaft gewährleistet ist. Die Wirksamkeit des Instandhaltungskonzepts ist im Rahmen der Prüfung nach Nummer 4.1 zu bewerten. Die im Rahmen des Änderungs- und Instandsetzungskonzepts durchgeföhrten Arbeiten und Maßnahmen an der Anlage sind zu dokumentieren und der Behörde auf Verlangen darzulegen.

Einsatz von Gefahrstoffen in der Compoundierung

Dr.-Ing. E. Richter, Albis Plastic GmbH, Hamburg

Kurzfassung

Die Arbeitssicherheit ist ein wichtiges Thema am Arbeitsplatz – auch in der Compoundierung von Kunststoffen hat dieses Thema einen wichtigen Stellenwert. Hierbei spielt nicht nur der Umgang mit Chemikalien eine Rolle, sondern insbesondere die flüchtigen Bestandteile und die thermischen Abbauprodukte. Einige auch in den einschlägigen Regeln verankerte Maßnahmen werden erläutert. Ein mögliches Konzept für das Erfassen von Expositionen und deren Bewertung wird vorgestellt.

Abstract

Operational safety is a very important topic at work – also for the compounding of polymers this topic is relevant. Not only the usage and the handling of chemicals but especially volatile components and the products of thermal degradation has be considered. Several important rules are shown and a potential concept for exposure assessment is presented.

1. Arbeitssicherheit in der Compoundierung

Die Compoundierung von Kunststoffen besteht aus mehreren sehr unterschiedlichen Verfahrensschritten. In der Verantwortung des Unternehmers liegen alle Bereiche von der Warenannahme aller Rohstoffe bis hin zum Versand der fertigen Ware. Bei jedem Schritt sind die unterschiedlichsten Regeln zu beachten, um ein sicheres und störungsfreies Arbeiten zu gewährleisten. Für den Bereich der Arbeitssicherheit können bei jedem der vielen unterschiedlichen Arbeitsschritte unterschiedliche Gefährdungen identifiziert werden, so z.B.:

- Lärm
- Hitze
- Schwere Lasten
- Beengte Räume / Einstieg in Behälter
- Arbeiten in der Höhe
- Gefahrstoffexposition
- Psychische Belastungen

In dem vorliegenden Beitrag soll der sichere Umgang mit den Rohstoffen näher betrachtet werden. In der Compoundierung werden in der Regel Feststoffe und Flüssigkeiten eingesetzt. Viele Komponenten sind absolut ungefährlich, andere sind offensichtlich Gefahrstoffe, jedoch verbergen sich auch hinter den auf den ersten Blick ungefährlichen Substanzen Gefährdungspotentiale, die berücksichtigt werden müssen. Diese verdeckten Gefährdungen resultieren beispielsweise aus dem Umstand, dass die Compoundierung immer bei erhöhten Temperaturen stattfindet. Nahezu jede Substanz unterliegt in der Hitze Schädigungs- und Abbauprozessen, die zur Freisetzung von gefährlichen Substanzen führen.

Tabelle 1: Prozessschritte der Compoundierung

Arbeitsschritte	Besonderheiten (beispielhaft)
Entladen von LKW und interner Transport	Besondere Entladeflächen für wassergefährdende Stoffe
Lagern	Zusammenlagerverbote, Lagerbedingungen
Fördern von Stoffen	Elektrostatische Aufladung
Vorbehandlung (z.B. Trocknen)	Flüchtige Bestandteile
Umfüllen / Verwiegen	Stäube, flüchtige Bestandteile
Mischen	Stäube, flüchtige Bestandteile
Dosieren	Stäube, flüchtige Bestandteile, Elektrostatische Aufladung
Extrudieren	Flüchtige Bestandteile, Abbauprodukte
Konfektionierung	Flüchtige Bestandteile, Abbauprodukte, Stäube
Abfüllen und Palettieren	Sicherheit von robotergestützten/vollautomatischen Abläufen
Verladen und Ladungssicherung	Kennzeichnungspflicht von Fertigprodukten, Gefahrguttransport

2. Gefährdungspotenziale durch Gefahrstoffe

Die Gefährdung der Mitarbeiter durch Gefahrstoffe hängt nicht nur von der Gefährlichkeit der Substanzen ab, sondern wird maßgeblich dadurch bestimmt, ob und wie ein Gefahrstoff mit dem Körper wechselwirken kann. Von Bedeutung sind drei verschiedene Aufnahmемöglichkeiten in den Körper: Einatmen, Verschlucken und Aufnahme durch die Haut. So können Gase, Aerosole und Stäube eingeatmet werden (Inhalation) und Stäube und Flüssigkeiten auch verschluckt werden (Inkorporation). Stäube und Flüssigkeiten können darüber hinaus auch die Haut reizen und sogar die Hautbarriere durchbrechen und in den Körper eindringen (Resorption).

Bei allen Aufnahmewegen sind kurzfristige und langfristige schädigende Wirkungen auf den Körper möglich. Dabei ist es von besonderer Bedeutung, von welcher Höhe und Dauer die Exposition ist, ob sie einmalig, vereinzelt wiederkehrend oder regelmäßig wiederkehrend ist. Häufig wird als erstes Mittel zur Vermeidung einer Exposition die persönliche Schutzausrüstung (PSA) genannt. Dies ist jedoch grundlegend verkehrt! Im Arbeitsschutz gilt das STOP-Prinzip [1 bis 3], dass folgende Reihenfolge eingehalten wird:

1. Die Möglichkeit der Vermeidung von Gefahren / Substitution von Gefahrstoffen
2. Etablieren einer (zumutbaren) technischen Maßnahme
3. Organisatorisch betriebliche Maßnahme
4. Treffen von persönlichen Schutzmaßnahmen (Tragen von PSA)

Vermeidung und Substitution

Zur Minimierung der Gefährdung wird der Arbeitgeber aufgefordert zu prüfen, ob dieser Gefahrstoff wirklich eingesetzt werden muss oder ob es eine ungefährlichere Alternative gibt. Im Bereich der Compoundierung hat jede Substanz eine sehr spezielle Wirkung, jedoch steht durch eine Anpassung der Rezeptur häufig eine Alternative zur Verfügung. So war es ohne Einschränkungen der Produkteigenschaften möglich, den Kandidaten für SVHC-Liste (**S**ubstance of **V**ery **H**igh **C**oncern) 2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-4,6-ditertpentylphenol (z.B. Tinuin® 328) durch leichte Anpassung der Rezepturen durch unterschiedliche alternative UV-Absorber in Abhängigkeit des Polymeren zu ersetzen (beispielsweise in PMMA mit 2-(2H-Benzotriazol-2-yl)-4,6-bis(1-methyl-1-phenylethyl)phenol (z.B. Tinuin® 234)).

Ist solch ein Alternativprodukt nicht zu finden (z.B. bei einzigartigen brillanten, hochtemperaturstabilen Pigmenten), so kann die Gefährdung auch durch eine andere Darreichungsform reduziert werden. War der ursprüngliche Gefahrstoff z.B. ein sehr stark staubendes Pulver, so stellt der Wechsel auf eine Präparation oder ein Masterbatch eine deutliche Reduzierung der inhalativen Gefährdung dar.

Technische Maßnahme

Dieser Bereich ist sehr vielfältig. Im Extremfall kann dies die Anschaffung von neuen, z. B. gekapselten und ferngesteuerten Aggregaten bedeuten. Häufig ist es jedoch ausreichend darauf zu achten, dass geeignete Arbeitsmittel eingesetzt werden oder beispielsweise die Abluftanlage angepasst wird. Weiterhin ist es zu empfehlen, durch regelmäßige und insbesondere vorbeugende Instandhaltung die störungsfreie und sichere Funktionsfähigkeit der Aggregate sicher zu stellen (z. B. Dichtungen auf Schäden überprüfen).

Organisatorische Maßnahmen

Das Festlegen von optimierten Arbeitsabläufen und deren Schulung gehört zu den organisatorischen Maßnahmen. Zu den Schulungen gehören auch ganz allgemein die Unterweisungen von angepassten Betriebsanweisungen gemäß Gefahrstoffverordnung. In diesen Betriebsanweisungen werden alle für eine Tätigkeit wichtigen Informationen gegeben:

- Gefahrstoffbezeichnung
- Gefahren für Mensch und Umwelt
- Schutzmaßnahmen und Verhaltensregeln
- Verhalten im Gefahrenfall
- Erste Hilfe
- Sachgerechte Entsorgung

Werden Substanzen innerbetrieblich umgefüllt (z.B. in kleine Gebinde) sind diese Behältnisse auch ordnungsgemäß mit den Gefahrstoffsymbolen zu kennzeichnen.

Persönliche Schutzausrüstung

Die Auswahl und Nutzung der richtigen PSA ist häufig nicht zu vermeiden, aber sollte die letzte Maßnahme sein. Hierbei ist zu beachten, dass für unterschiedliche Tätigkeiten auch unterschiedliche PSA erforderlich sind. Am offensichtlichsten sind die Unterschiede bei den Handschuhen: So gibt es Handschuhe gegen z.B. Mechanische Einwirkungen, Hitze aber auch gegenüber Chemikalien. Leider gibt es auch den Bereich der Chemikalien keinen All-round-Handschuh. Ein wichtiges Kriterium für die Eignung von Handschuhen gegenüber Chemikalien ist die Durchbruchzeit. Die Sicherheitsdatenblätter der Gefahrstoffe liefern in der Regel hierzu gute Informationen. Die Auswahl des richtigen Handschuhs für unterschiedliche Tätigkeiten wird in der Regel in einem Handschuhkataster festgelegt, ausgehängt und die Mitarbeiter entsprechend geschult.

Eine weitere wichtige Schutzausrüstung ist ein passender Atemschutz. In den meisten Fällen ist es ausreichend mit Partikelfiltermasken (Halbmasken) zu arbeiten. Dies halten jedoch nur Stäube zurück, einige spezielle Typen zusätzlich auch Aerosole. Wenn Dämpfe gefiltert werden müssen, ist die Verwendung von Atemschutzmasken mit Adsorptionsfiltern notwendig.

Bei dem regelmäßigen Einsatz von PSA muss geprüft werden, ob dadurch wiederum eine gesundheitliche Belastung des Mitarbeiters entsteht, die entsprechende Arbeitsmedizinische Untersuchungen nach sich ziehen. Als Beispiel hierfür sind die Untersuchung G 24 (Hauterkrankungen) bei längeren Tragezeiten von flüssigkeitsdichten Handschuhen oder die Untersuchung G 26 (Atemschutzgeräte) bei längeren Tragezeiten ab einem gewissen Atemwider-

stand zu nennen. Für gewisse PSA ist auch eine Eignungsprüfung vor der erstmaligen Nutzung erforderlich (z.B. Pressluftatmer).

Hygienemaßnahmen

Die oben genannten Schutzmaßnahmen können aber nur wirksam sein, wenn Sie von entsprechenden Hygienemaßnahmen beim Umgang mit Gefahrstoffen begleitet werden. Dazu gehört, dass die Arbeitskleidung getrennt von der privaten Straßenkleidung aufbewahrt wird und verschmutzte und kontaminierte Arbeitskleidung regelmäßig gewechselt und getrennt gereinigt wird. Weiterhin dürfen Gefahrstoffe nicht verschleppt werden – sei es z.B. über Türgriffe oder auf Lebensmittel. Lebensmittel (inkl. Tabak) sind außerhalb der Arbeitsbereiche aufzubewahren und vor dem Essen, Trinken und Rauchen müssen die Hände gereinigt werden, um zu verhindern, dass die Schadstoffe aufgenommen werden.

Ein prominentes Beispiel ist die versteckte Gefahr, die durch PTFE ausgeht. PTFE ist ein sehr inertes und stabiles Polymer, dessen Zersetzungprodukte äußerst gefährlich sind. In unserer Branche wird häufig als pulverförmiges Additiv eingesetzt. Reinigt ein Mitarbeiter seine verschmutzten Hände nicht vor dem Rauchen, so verbrennt das PTFE mit und die Verbrennungsprodukte gelangen in die Lunge. Neben einer Reizung der tiefen Atemwege und gripähnlichen Allgemeinsymptome können sich in schweren Fällen sogar tödliche Lungenödeme bilden. Dieses Phänomen ist auch als Polymerfieber bekannt.

3. Relevanten Arbeitsplatzgrenzwerte in der Compoundierung

Schon Paracelsus wusste Anfang des 16. Jahrhunderts: „Alle Dinge sind Gift, und nichts ist ohne Gift; allein die Dosis macht, dass ein Ding kein Gift sei.“ Es ist allgemein bekannt, dass die Wirkung von Alkohol extrem von der Menge abhängig ist, aber eine ungefährliche Substanz wie Kochsalz kann in der entsprechenden Menge schädlich bis sogar giftig sein. Bei vielen Substanzen hat die Natur einen Schutzmechanismus eingebaut, in dem die gefährlichen Substanzen unangenehm riechen und schmecken, in der heutigen Zeit reicht es nicht aus, dass wir uns auf unsere Sinne verlassen. Von den Behörden wurden daher für viele Substanzen Grenzwerte – die Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) – definiert, die es einzuhalten gilt.

Der AGW ist die zeitlich gewichtete durchschnittliche Konzentration eines Stoffes in der Luft am Arbeitsplatz, bei der eine akute oder chronische Schädigung der Gesundheit der Beschäftigten nicht zu erwarten ist. Bei der Festlegung wird von einer in der Regel achtstündigen Exposition an fünf Tagen in der Woche während der Lebensarbeitszeit ausgegangen.

In Deutschland wurde der AGW am 1. Januar 2005 mit der Neufassung der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) eingeführt. Er ersetzt die Maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK) und die Technische Richtkonzentration (TRK).

In Deutschland legt das Bundesministerium für Arbeit und Soziales die Grenzwerte fest. Das Ministerium wird dabei vom Ausschuss für Gefahrstoffe beraten, der nach publizierten Kriterien Arbeitsplatzgrenzwerte ableitet. Der Ausschuss orientiert sich bei der Grenzwertsetzung an den Empfehlungen der MAK-Kommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft und den Arbeitsplatz-Richtgrenzwerten der EU. Die Arbeitsplatzgrenzwerte werden in der Technischen Regel für Gefahrstoffe 900 (TRGS 900 – Arbeitsplatzgrenzwerte) veröffentlicht [4]. Dabei ist zu beachten, dass Grenzwerte immer wieder geändert, in Regel verschärft, werden und dass es sich immer nationale Grenzwerte handelt. In den europäischen Nachbarländern gelten zum Teil niedrigere als auch höhere Grenzwerte für ein und dieselbe Substanz.

Neben der TRGS 900 gibt es noch weitere zu beachtende Regelwerke. Eine besondere Bedeutung hat hier die TRGS 905 „Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe“ (sogen. CMR-Stoffe) [5]. Die Lieferanten sind verpflichtet auf ihren Sicherheitsdatenblättern relevante Grenzwerte oder Einstufungen zu nennen, daher ist es durchaus zu empfehlen, die Sicherheitsdatenblätter gründlich und wiederkehrend zu prüfen. Die erwähnten Angaben sind im Kapitel 8 „Expositionsbegrenzung und persönliche Schutzausrüstung“ zu finden.

Die TRGS 900 enthält ca. 420 verschiedene Arbeitsplatzgrenzwerte, die alle eingehalten müssen werden müssen. Glücklicherweise haben nur wenige in der Compoundierung eingesetzte Substanzen einen Grenzwert, da es sich überwiegend um niedermolekulare Verbindungen, wie z.B. die Monomere oder Lösemittel handelt. Ein wichtiger Grenzwert in der Compoundierung ist der Allgemeine Staubgrenzwert, weil zahlreiche Komponenten als mehr oder weniger feine Pulver eingesetzt werden oder größere Partikel in den unterschiedlichen Verfahrensschritten einem Abrieb ausgesetzt sind.

Zur großen Überraschung erfordern insbesondere die polymeren Rohstoffe, die eigentlichen Kunststoffe selber und die polymeren Additive, eine besondere Aufmerksamkeit. In den Sicherheitsdatenblättern dieser Produkte werden eine Vielzahl von AGW genannt. Dabei handelt es sich um z.B. Monomere, Lösemittel, Nebenprodukte/Verunreinigungen aber auch Abbauprodukte. Bei steigender Beanspruchung der Polymeren durch erhöhte Scherraten und Temperaturen während der Compoundierung – insbesondere bei ungewöhnlich langen Verweilzeiten z.B. im Falle von Störungen – ist der thermische Abbau der Polymeren zu berücksichtigen, da genau in diesen Fällen mit einer erhöhten Exposition zu rechnen ist.

Bei der Beurteilung der thermischen Stabilität sind nicht nur die Polymere zu betrachten, sondern auch die Additive. Hier sind insbesondere die polymeren Modifier auf Acrylat- und Methacrylatbasis zu nennen. Solche Produkte sind Polyamidrezepturen aber auch in Polyphenylensulfid sehr verbreitet. Die in den Sicherheitsdatenblättern (SDB) angegebenen Zersetzungstemperaturen liegen im Bereich der zu erwartenden Schmelztemperatur während der Compoundierung. Leider fehlen häufig Detailangaben zur Bestimmungsmethode der Zersetzungstemperatur, somit die Relevanz dieser Angabe für die Compoundierung nicht abgeschätzt werden kann. Eigene Untersuchungen mittels Thermogravimetrie (TGA) sind in diesem Fall angeraten. Sehr aufschlussreich ist der Vergleich der Messungen unter Stickstoff und Luft. In erster Näherung wird im Extruder die Schmelze unter Luftausschluss belastet. Neben der Bewertung des Abbauprozesses muss auch das Gefährdungspotential der zu erwartenden Abbauprodukte berücksichtigt werden.

4. Entwickeln eines Messkonzeptes

Jeder Compoundeur produziert im Laufe eines Jahres viele verschiedene Produkte und geht somit auch mit vielen unterschiedlichen Substanzen um. Im ersten Schritt muss man sich darüber im Klaren werden, welche AGW in einem Betrieb eine Rolle spielen. Hierzu ist es erforderlich eine geeignete Datenbasis aufzubauen, aus der hervorgeht, bei welchen Substanzen die Sicherheitsdatenblätter einen AGW nennen. Sind diese Substanzen identifiziert müssen einige Fragen gestellt werden:

- In welcher Menge und Häufigkeit wird eine Substanz eingesetzt? – Handelt es sich um einen Exoten, der nur in einer Type eingesetzt wird oder wird eine Substanz fast täglich in großen Mengen gehandhabt?
- Was ist die übliche Dosierung? – Handelt es sich um eine Hauptkomponente wie das Polymere oder nur um einen Zuschlagsstoff (z.B. Modifier) oder gar nur um ein Additiv mit einer Dosage von 0,1 %?
- Warum enthält das SDB überhaupt den AGW? – Handelt es sich z.B. um ein Restmonomer, das in der Synthese nicht vollständig entfernt wurde oder weil die Substanz durch thermische Belastung entsteht?
- Wie hoch ist der AGW? – die unterschiedlichen Level der AGW variieren um einen Faktor von bis zu 5 Zehnerpotenzen
- Auf welcher Produktionslinie wird die Substanz eingesetzt? – Gibt es nennenswerte Unterschiede z.B. in der Abluftsituation?

Es hat sich bewährt diese und ggf. noch weitere Fragen mit einander zu verketten und einen Art Beurteilungsbaum und somit auch einen Entscheidungsbaum daraus aufzubauen. Solch ein System ist bekannt als eine Risikomatrix nach Nohl. Mit Hilfe dieser Systematik ist es möglich nach klaren Regeln den Handlungsbedarf zusammenzufassen und auch zu priorisieren. [6]

Mit dieser Prioritätenliste hat man nun die Möglichkeit nach konkreten Compounds zu suchen. Dabei ist es häufig möglich, auch mehrere Substanzen in einem Compound zu identifizieren oder ein spezielles Compound für AGW-Messungen zu kreieren. Im letzteren Schritt ist es jedoch wichtig, dass man wirklich nur übliche Rohstoffkombinationen zusammenführt und dann unter üblichen Bedingungen verarbeitet.

In der Vorbereitung der Messungen sollte darauf geachtet werden, dass man eine typische Alltagssituation herbeiführt. Das fängt bei der Auswahl der einzubindenden Mitarbeiter an, sie sollten routiniert sein und ihr Fach verstehen, jedoch auch nicht bekannt dafür sein, besonders nachlässig oder überdurchschnittlich penibel zu sein. Bei den Messungen müssen sie auch „Business as usual“ machen, um wirklich einen repräsentativen Zustand bei den Arbeiten an den Anlagen darzustellen.

Üblicherweise erfolgt die Messung der Staubbelastung einerseits in besonders belasteten Bereichen (z.B. der Dosierungen) und andererseits personenbezogen. Im ersten Fall wird ein Messgerät auf einem Stativ in Kopfhöhe (ca. 1, 70 m) positioniert. Im zweiten Fall trägt ein Mitarbeiter solch ein Gerät so am Körper, dass die Ansaugöffnung im Bereich der oberen Brust befestigt ist. Der Mitarbeiter geht dann ganz gewöhnlich seiner Arbeit nach. Eine Messzeit von 2 bis 4 Stunden ist ausreichend, um repräsentativ für einen ganzen Arbeitstag (eine Schicht) zu gelten.

Flüchtige Bestandteile bzw. die Abbauprodukte von Polymeren und anderen Rezepturbestandteilen können als Volatile Organic Component (VOC) zum großen Teil mit Hilfe eines Adsorberröhrchen gesammelt werden. Dabei wird eine definierter Volumenstrom für wenige Minuten durch das Röhrchen gesaugt und die VOC werden an dem Füllmaterial adsorbiert. Nach der Messung wird Röhrchen wieder verschlossen und später mittels Thermodesorptions-Gaschromatographie quantitativ analysiert.

Die Messungen von AGW müssen durch ein akkreditiertes Institut oder die Berufsgenossenschaft (BG) durchgeführt werden, damit sie gegenüber der BG oder dem Amt für Arbeitsschutz bestand haben. [7]

5. Praxisbeispiele

Anhand von zwei Beispielen sollen exemplarisch Ergebnisse von Raumluftmessungen gezeigt werden.

Die Analyse von Daten hat gezeigt, dass im betrachten Bereich insgesamt 52 AGW in Betracht kommen. Dabei werden sehr viele Substanzen, die zu den 52 AGW beitragen, nur äußerst selten (max. 2-3-mal im Jahr) eingesetzt. Die nähere Analyse hat gezeigt, dass man aufgrund dieses Umstandes insgesamt 28 Grenzwerte im ersten Schritt vernachlässigen kann. Die hauptsächlich eingesetzten Polymere sind u. a. Polyamid 6, Polycarbonat und ABS. Die Sichtung von typischen Rezepturen hat gezeigt, dass es bei Polyamid möglich war ein praxisrelevantes Additiv- und Farbmittelpaket zusammenzustellen, so dass insgesamt 6 AGW eine Rolle gespielt haben. Wichtig ist dabei, dass hier keine künstliche Kombination von Additiven gewählt wurde, nur um möglich viele Substanzen mit einem AGW zu berücksichtigen. Auch die eingesetzten Konzentrationen sollten in üblichen Bereichen liegen. Tabelle 2 zeigt die eingesetzte Rezeptur des eingesetzten Polyamids.

Für die Betrachtung von Polycarbonat und ABS wurde ein PC/ABS-Blend gewählt, um hier beide Polymere in einem Messvorgang zu erfassen. Tabelle 3 zeigt die Rezeptur des eingesetzten PC/ABS-Blends.

Mit zwei VOC-Messungen hat man nur schon 12 Substanzen erfasst, in deren Sicherheitsdatenblättern ein Arbeitsplatzgrenzwert vermerkt ist.

Tabelle 2: Polyamid-Modell-Compound

Bestandteil	Menge	CAS-Nr. des AGW
Polyamid	100.000 Tle.	105-60-2
Glasfaser	45.000 Tle.	-
Stabilisatorpaket	850 Tle.	128-37-0 / 110-54-3
Farbmittelpaket	680 Tle.	10043-35-3 / 91-20-3 / 91-20-3

Tabelle 3: PC/ABS-Modell-Compound

Bestandteil	Menge	CAS-Nr. des AGW
ABS	30.000 Tle.	141-32-2 / 100-42-2
Polycarbonat	70.000 Tle.	80-05-7 / 98-54-4 / 108-95-2 / 108-90-7
Additivpaket	500 Tle.	-

Die VOC-Messungen wurden durchgeführt, nachdem der Extruder mit den genannten Materialien schon ca. 15 min lief, so dass sich auch schon einige Dämpfe im Arbeitsbereich gesammelt hatten. Kurz vor Ende der Messungen wurde die Anlage abgefahren und das Material auf einen Klumpen extrudiert. Durch dieses Vorgehen sollte die maximale zu erwartende Belastung mit volatilen Stoffen erreicht werden. In den Tabellen 4 und 5 sind die Ergebnisse der VOC-Messungen dargestellt. Bei der Analyse der Ergebnisse ist festzustellen, dass nicht alle in den Sicherheitsdatenblättern der Rohstoffe genannten Produkte überhaupt gefunden werden. Jedoch werden neben den zu erwartenden Substanzen noch eine Reihe weiterer organischer Substanzen detektiert. Gemäß der Berufsgenossenschaftlichen Regeln BGR 223, Anhang 8 kann davon ausgegangen werden, dass die Arbeitsplatzgrenzwerte eingehalten werden, wenn eine Leitsubstanz (das Hauptabbauprodukt) unterhalb des AGW liegt. Bei den vorliegenden Messungen kann festgestellt werden, dass sowohl die Grenzwerte der Leitsubstanzen als auch alle anderen bekannten AGW sicher eingehalten werden. [8]

Tabelle 4: Detektierte VOC bei der Verarbeitung des Polyamid-Modellcompounds (Auszug)

CAS-No.	Substanz	Konzentration [µg/ m³]	AGW [mg/m³]
67-64-1	Aceton	10	1200
109-99-9	Tetrahydrofuran	48	150
71-36-3	n-Butanol	9	310
108-88-3	Toluol	7	190
100-42-5	Styrol	22	86
111-76-2	Butylglykol	597	49
108-95-2	Phenol	4	8
98-83-9	alpha-Methylstyren	4	250
104-76-7	2-Ethyl-1-hexanol	3	54
105-60-2	Caprolactam	558	5
98-54-4	4-tert-Butylphenol	3	0,5
96-76-4	2,4-Di-tert-butylphenol	218	n.v.
613-46-7	2-Naphthalenebonitrile	7	n.v.
544-76-3	C16 (Hexadecan)	2	n.v.
122-39-4	Diphenylamin	5	n.v.
141-04-8	Adipinsäurediisobutylester	24	n.v.

n.v. = nicht vorhanden

Tabelle 5 Detektierte VOC bei der Verarbeitung des PC/ABS-Modellcompounds (Auszug)

CAS-No.	Substanz	Konzentration [µg/m³]	AGW [mg/m³]
67-64-1	Aceton	11	1200
107-13-1	Acrylnitril	10	2,6
78-85-3	Methacrolein	1	n.v.
109-99-9	Tetrahydrofuran	53	150
71-36-3	n-Butanol	14	310
108-88-3	Toluen	6	190
100-42-5	Styrol	114	86
111-76-2	Butylglykol	150	49
100-52-7	Benzaldehyd	53	n.v.
108-95-2	Phenol	25	8
98-83-9	alpha-Methylstyren	3	250
104-76-7	2-Ethyl-1-hexanol	2	54
105-60-2	Caprolactam	7	5
98-54-4	4-tert-Butylphenol	2	0,5
86-53-3	1 -Naphthalenenecarbonitrile	68	n.v.
141-04-8	Adipinsäurediisobutylester	6	n.v.

6. Schlüsselpunkte zur Überwachung von Expositionen

Der Arbeitgeber muss sicherstellen, dass ein sicherer Umgang und eine sichere Verarbeitung aller Substanzen gewährleistet ist. Dazu ist es erforderlich periodisch wiederkehrend die ursprüngliche Bewertung auf den Prüfstand zu stellen.

- Regelmäßige Neubewertung und Aktualisierung der Sicherheitsdatenblätter.
- Überprüfung der Sicherheitsdatenblätter auf Stimmigkeit, z.B. sind die SDB vergleichbarer Produkte von verschiedener Lieferanten identisch
- Kontrollen der technischen Einrichtung, z.B. regelmäßige Kontrolle / Messung der Abluftsituation
- Anpassung der technischen Maßnahmen im Rahmen von Prozessänderungen oder dem Austausch von Aggregaten.
- Konsequente Nutzung der PSA und Überprüfung der Funktionsfähigkeit
- Systematische Messung und regelmäßige Wiederholung der Messungen

- [1] Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG § 4 Allgemeine Grundsätze
- [2] DGUV Information 211-021 „Der Sicherheitsbeauftragte“, 2006
- [3] Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen – Gefahrstoffverordnung (GefStoffV), 2015,
<http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/Rechtstexte/Gefahrstoffverordnung.html>
- [4] TRGS 900 „Arbeitsplatzgrenzwerte“; 2016,
<http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-900.html>
- [5] TRGS 905 „Verzeichnis krebszeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe“, 2016,
http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-905_content.html
- [6] BGW, Risikomatrix (nach Nohl),
<https://www.bgw-online.de/DE/Arbeitssicherheit-Gesundheitsschutz/Qualitaetsmanagement/quintas-Umsetzung/Handlungshilfen/Methoden/Risikomatrix-Nohl.html>
- [7] Verzeichnis der akkreditierten Messstellen und Prüflaboratorien für Arbeitsplatzmessungen gemäß Gefahrstoffverordnung
<http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/messstellen-gefahrstoffe.pdf>
- [8] BG-Regel: Sicheres Arbeiten in der Kunststoffindustrie (BGR 223)
<http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bgr223.pdf>

Dosierung von Flüssigkeiten und Pumpensysteme

Dipl.-Ing. **J. Sommer**, Dipl.-Ing. **R. Schwab**,
LEWA GmbH, Leonberg

Kurzfassung

Zunächst wird ein Überblick über Variationen beim Pumpenaufbau und beim Pumpenkopf gegeben. Danach werden verschiedene Pumpen-Komponenten betrachtet, die einen entscheidenden Einfluss auf den Einsatz bei der Compoundier- und Extrudertechnik haben. Anschließend wird auf Einsparpotentiale und Optimierungen eingegangen.

Im zweiten Teil wird am Beispiel des LEWA ecofoam Dosiersystems ein komplettes Pumpensystem inkl. Durchflussteuerung vorgestellt und die wichtigsten Vorteile der Pumpentechnik systembezogen und kompakt dargestellt.

1. Pumpenaufbau und Pumpen-Komponenten im Bereich der Compoundiertechnik

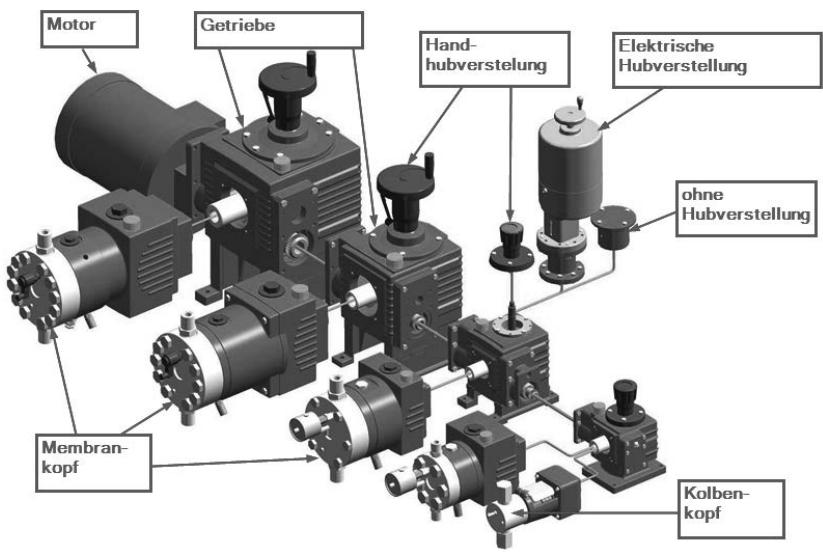
Durch das präzise Zuführen von zum Teil geringsten Flüssigkeitsmengen bei definierten Drücken, Temperaturen und Durchsätzen werden die Eigenschaften vom Compound genau, gleichmäßig und gut reproduzierbar entsprechend der Verwendung eingestellt. Hierzu zählen z.B. Härte, Abrieb, Temperaturbeständigkeit, Elastizität, Gleitfähigkeit, Isoliereigenschaften, elektrische Leitfähigkeit, Flamm- oder Oxidationsschutz und Dichte. Flüssiggase als Treibmittel aber auch aufgeschmolzene Massen werden reproduzierbar dosiert.

Sehr hohe Systemdrücke bis 500 bar und höhere Temperaturen bis 130 °C ergeben sich aus den Prozessanforderungen, wie z.B. hohen Extruderdrücken und temperierten Prozessen. Chemisch aggressive Medien machen besondere Werkstoffe und flüchtige, toxische Medien hermetisch dichte Ausführungen notwendig.

Diese unterschiedlichsten Anforderungen in der Compoundiertechnik lassen sich insbesondere durch Membranpumpen mit unterschiedlichen Leistungsbereichen von 0,1 l/h bis 19 m³/h je Pumpenkopf gut realisieren.

Über ein Baukastensystem können die verschiedenen Pumpenköpfe ausserdem kombiniert werden und platzsparend und effizient mit nur einem Motor z.B. im Master-Slave-Verfahren gekoppelt an den Extruderdurchsatz angetrieben werden. Mehrere Komponenten können so gut und genau reproduzierbar zudosiert werden. Triebwerksausführungen mit Handhubverstellung (HHV) oder automatisiert mit z.B. elektrischer Hubverstellung (EHV) sind möglich. Soll der Leistungsbereich gesteigert werden, können auch Mehrfach- oder Boxerausführungen eingesetzt werden. Über Ausführungen mit unterschiedlichsten Membranköpfen oder auch alternativ mit kostengünstigeren Kolbenköpfen können sehr unterschiedliche Anforderungen erfüllt werden.

Baukastensystem:

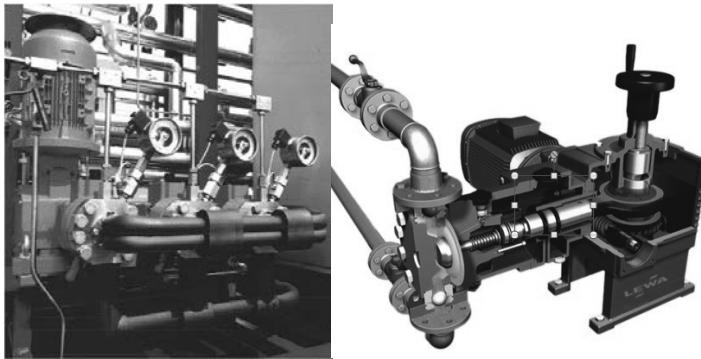


Pumpenkopf:

Durch konstruktive Optimierung des Pumpenkopfes wird das Schadvolumen im Arbeitsraum gering gehalten und dadurch die Effizienz und Genauigkeit des Prozesses gesteigert.

Um die Belastung auf die Membran insbesondere bei Drücken über 10 bar so gering wie möglich zu halten, wird die Membran hydraulisch angetrieben. Die Fluidführung ist so gestaltet, dass Spül- und Trocknungsvorgänge z.B. bei Produktwechsel problemlos durchgeführt werden können.

Beheizbare Pumpenköpfe werden eingesetzt für bei Raumtemperatur wachsartigen Medien, wie ‚TTP‘, Disflamoll Triphenylphosphat (Weichmacher), Wachsester und Gleit- und Antistatikmittel mit Verarbeitungstemperaturen von 90 °C und Viskositäten von rund 700 mPas bei 90 °C. Kühlbare Pumpenköpfe werden für Treibmittel wie flüssiges Kohlendioxid (CO₂) eingesetzt. Kohlendioxid ist ein unbrennbares, nicht-toxisches und kostengünstiges Treibmittel. Man arbeitet meistens im Druckbereich zwischen 100 bis 500 bar.

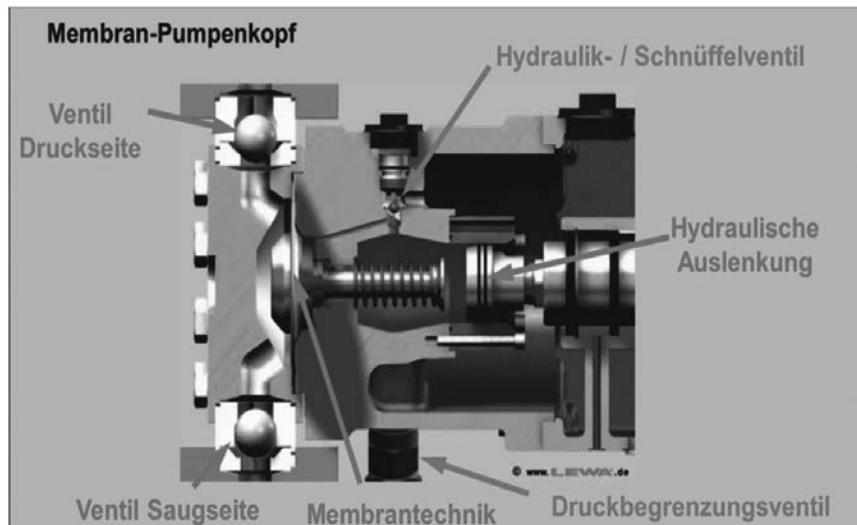


Membranpumpen mit Hydrauliksystem bilden auch bei Treibmitteln wie Propan, Butan, Pentan und halogenierten Kohlenwasserstoffen den Standard für mehr Sicherheit. Dieser Pumpentyp ist notwendig, da die verwendeten Produkte in geschlossenen Systemen gehalten werden sollten, er ist robust, trockenlauf sicher und zuverlässig bei der Förderung. So können auch extrem dünnflüssige, nicht schmierende Fluide wie Flüssiggase als Treibmittel in Kunststoffschmelzen eines Extruderprozesses genau ohne Rückströmverluste und ohne Leckage zudosiert werden. Sie sind konstant in der Förderung selbst bei Druckschwankungen. Optionen für die Aufstellung im explosionsgefährdeten Bereich sind wichtig.

Für jedes Fluid müssen die passenden Werkstoffe ausgesucht werden. Als Standardwerkstoff kommt Edelstahl 1.4571 oder 1.4404 zum Einsatz. Werkstoffoptionen aus verschiedenen Metallen, wie z.B. Hastelloy- oder Titanlegierungen und Kunststoffen sind möglich.

Die Pumpenköpfe zeichnen sich aus durch:

- Einzigartiges Saugvermögen
- Zur Vakuumaustragung geeignet
- Einfaches und sicheres Anfahren, auch unter extremen Bedingungen
- Trockenlaufsicherheit
- Integriertes Druckbegrenzungsventil



Ventiltechnik:

Die wesentlichen Kriterien bei der Auswahl des richtigen Ventils sind: Physikalische und chemische Eigenschaften des Fluids, Temperatur des Fluids, Förderdruck sowie Pumpenhubfrequenz. Bei Additiven, die als Suspensionen vorliegen, sind außerdem die Eigenschaften der Feststoffpartikel zu beachten. Betriebssicherheit und Ausfallrisiko hängen ganz entscheidend von der Qualität der Arbeitsventile ab. Die Ventilausführung wird deshalb dem jeweiligen Anwendungsfall angepasst.

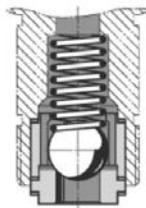
Beispiele:

Kugelventile: Mit Federbelastung zur Erhöhung der Schließkraft bei zähen Fluiden. Für hohe Dictheit und Dosiergenauigkeit, besonders für niedrigviskose Fluide geeignet (z. B. Treibmitteln), Doppelkugelventile für das präzise Fördern bei geringen Fördermengen über Rohrleitungen von z.B. DN 5 und 10. Suspensionsventile für Fluide mit Partikeln.

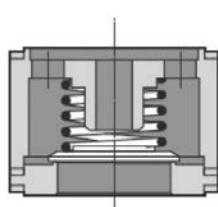
Plattenventile: Für große Volumenströme, geeignet für hohe Viskositäten ggf. mit Einsatzring für Slurries.

Gehärtete Ventile oder Ventile in Hartmetall, Oxidkeramik, Siliciumnitrid für sehr geringen Verschleiß bei geringen Viskositäten.

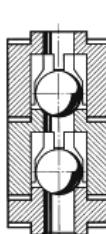
Ventilausführungen und- komponenten:



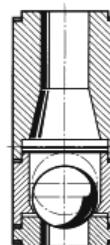
Kugelventil



Plattenventil



Doppelkugelventil



Suspensionsventil

Membranpumpen-Technik:

Durch hermetisch dichte Pumpensysteme in Kombination mit Membranschutzsystemen werden zunehmend strengere Arbeitsschutzrichtlinien, wie Emissionen am Arbeitsplatz, eingehalten.

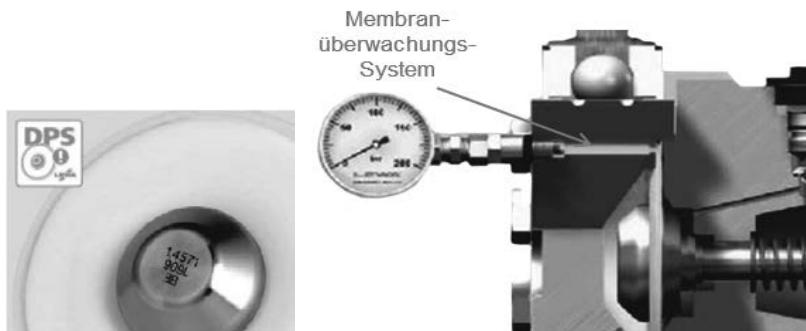
Hermetische Dichtheit zur Schonung der Umwelt und Sicherung der Produktqualität gewinnt außerdem an Bedeutung.

Membranpumpen arbeiten konstruktionsbedingt ohne dynamische Dichtungen. Dadurch entsteht ein hermetisch dichter Arbeitsraum. Der Vorteil: Es gibt keine Emission nach außen – kritische Stoffe können nicht entweichen - und eine Kontamination des Fluids ist ebenso ausgeschlossen. Zudem sind Gleitringdichtungen und Sperrdrucksysteme obsolet.

LEWA Pumpen erfüllen mit ihrer technischen Dichtheit die internationale IVU-Richtlinie 96/61/EG / TA-Luft.

Der Pumpenkopf ist mit einer PTFE-Sandwichmembran und einem patentiertem Membranschutzsystem (DPS-Technologie = Diaphragm Protection System) für die maximale Betriebssicherheit auch bei ungünstigen Randbedingungen versehen. Er verfügt über große Sicherheitsreserven, insbesondere beim Anfahren der Pumpe, durch ein Rückstellsystem.

Zudem wird ein Ansaugvermögen von bis zu 0,1 bara ermöglicht, was für hydraulisch angetriebene Membranpumpen weltweit einzigartig ist. Die Ansaugeigenschaften werden deutlich verbessert, was für viskose Fluide, für Vakuumaustrag und längere Saugrohrleitungen wichtig ist. Die Membranüberwachungs-Systeme werden je nach Anforderung mit Druckschalter, Manometer oder Kontaktmanometer auch in Ex-Ausführung ausgestattet.



Das standardmäßige Membranüberwachungssystem zeigt den Zustand der Membran zuverlässig an. Die Produktion kann in jedem Fall gefahrlos beendet werden. Die Anzeige erfolgt mittels eines Drucksignals.

Druckbegrenzungsventil DBV und Hydraulikventil:

Ein Druckbegrenzungsventil im Hydraulikteil verhindert eventuelle Überlastsituationen der Pumpe. Es ist auf den jeweiligen Druckbereich einstellbar. Ein Hydraulikventil sorgt für stabile, präzise Betriebsbedingungen.

Einsparpotenziale und Optimierungen:

Die Flexibilität der Anlagen ist entscheidend, um auf sich ändernde Markt- und Produktanforderungen mit möglichst wenig Maschinen zu reagieren. Ein sehr weiter Einstellbereich von bis zu 1:100 durch kombinierbare und automatisierbare Hub- und Motorregelung kann mit besonderer Pumpentechnik realisiert werden.

Stellexzenterprinzip zur Dosierstromverstellung:

Die Dosierpumpen bieten eine hohe Dosiergenauigkeit und schonende Förderung, sie sind hubverstellbar und mittels Frequenzumrichter ebenfalls in der Hubfrequenz einstellbar. Eine Reproduzierbarkeit der Einstellungen von besser als $\pm 1\%$ kann erreicht werden. Die Triebwerke sind standardmäßig mit einer manuellen Hublängenverstellung ausgerüstet. Optional können sie mit einem elektrischen oder pneumatischen Stellantrieb zur Hublängenverstellung ausgerüstet werden.



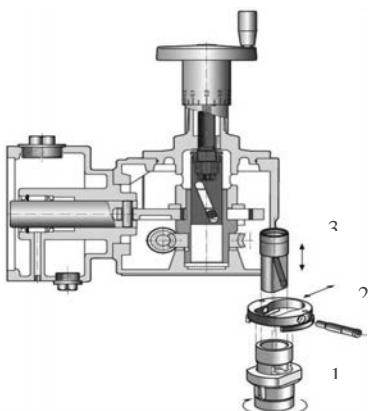
LEWA setzt ein bewährtes Stellexzenterprinzip zur Verstellung des Dosierstroms ein, das eine einfache Bedienung ermöglicht. Die Hublänge wird dabei direkt am Exzenter eingestellt.

Der Verstellexzenter liegt komplett im Pumpeninneren und ist damit witterungs- und korrosionsgeschützt.

Im Stillstand und im Betrieb ist per Handrad in Stufen von 0,05 mm eine lineare Hubverstellung möglich.



Auch im Teilhubbereich bewegt sich der Kolben harmonisch. Dadurch werden zusätzliche störende Pulsationen im Teilhubbereich vermieden.



Durch die solide Dimensionierung und hochwertige Werkstoffe, Ölbadsschmierung, Wittrings- und Schwallwasserschutz wird eine lange Lebensdauer sichergestellt. Wartungsarbeiten sind sehr leicht durchführbar. Der Antrieb erfolgt standardmäßig mit Dreh- und Wechselstrommotoren.

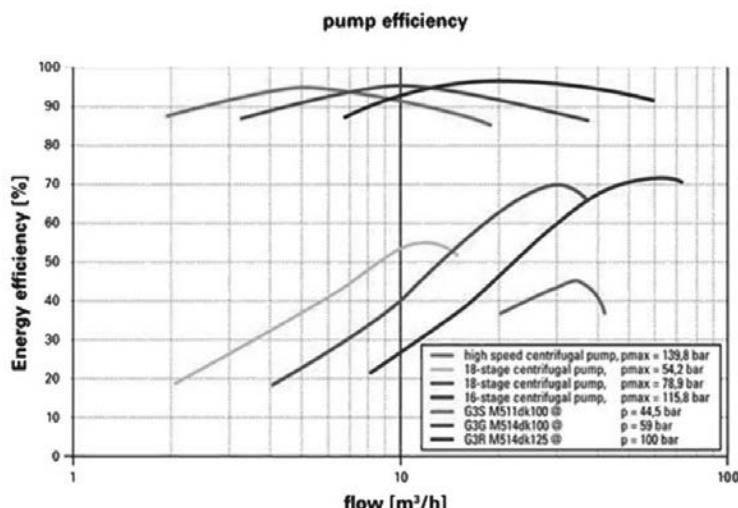
Effizienz und Wirtschaftlichkeit der hydraulisch arbeitenden Membranpumpen:

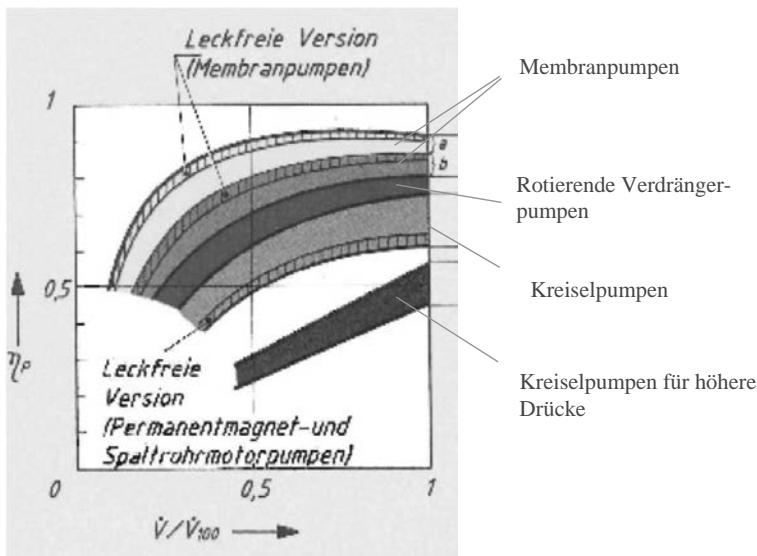
Genaue Pumpensysteme mit drucksteifer, linearer Kennlinie auch bei unterschiedlichsten Viskositäten und kurze Reaktionszeiten durch gespeicherte Pumpenkennlinien sind wichtig bei schwankenden Prozessbedingungen, wie z.B. beim Anfahren, Abfahren, Einstellen von verschiedenen Geschwindigkeiten in Extruderanlagen, um eine qualitativ hochwertige und ausschussarme Produktion zu ermöglichen. Eine hohe Betriebssicherheit und geringer Wartungsaufwand sind außerdem entscheidend für einen wettbewerbsfähigen und optimierten Betrieb. Bei rotierenden Verdrängerpumpen ergeben sich im Gegensatz zu Membranpum-

pen Rückströmungsverluste, die insbesondere bei niedriger Viskosität des Mediums und hohen Drücken stark ansteigen.

Höchster Wirkungsgrad aller Pumpentechnologien:

Der Wirkungsgrad oszillierender Verdrängerpumpen erreicht über den gesamten Regelbereich Werte von über 80 %. Gegenüber rotierenden Pumpen wird der Vorteil im Teillastbetrieb bei hohen Drücken und kleinen Volumenströmen immer größer. Bei Förder- oder Transferaufgaben ist der Einsatz von Prozess-Membranpumpen anstelle von Kreiselpumpen die energieeffizientere und günstigere Lösung. Oszillierende Verdrängerpumpen sind in ihrer Wirkungsweise der Natur des menschlichen Herzens nachempfunden, arbeiten auch deshalb so leistungsoptimiert – „efficient by nature“.





Geringer Wartungsaufwand und lange Wartungsintervalle dieser Membranpumpen:

Erwartete Lebensdauer der Pumpenkomponenten unter normalen Bedingungen

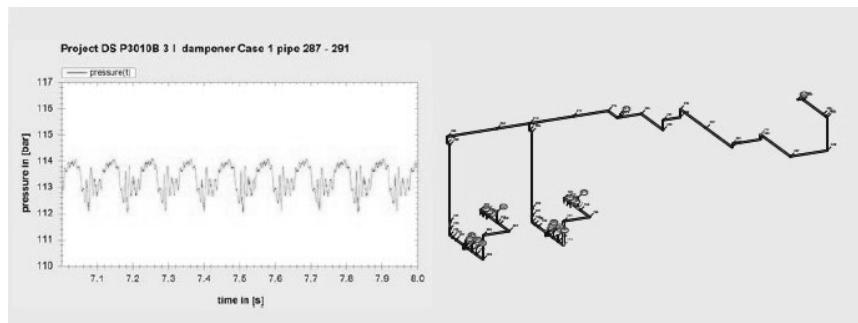
- Membrane 8.000 – 15.000 Stunden
- Pumpenventile 5.000 – 8.000 Stunden
- Hydraulische Ventile, Kolbenführungen 20.000 – 30.000 Stunden
- Lager Pumpengehäuse 70.000 Stunden

Aus diesem Gründen werden Membranpumpen gerne in anspruchsvollen und automatisierten Produktionen, wie z.B. auch im Offshore-Bereich, eingesetzt. Hier müssen die Pumpen besonders wartungsarm und robust laufen.

Bei Kolbenpumpen ergeben sich im Vergleich zu Membranpumpen in der Regel über einen Zeitraum von 3 bis 5 Jahren deutlich höhere Wartungskosten durch häufigeren Dichtungsaustausch und gelegentlichen Kolbenwechsel.

Optimale Pumpen- und Systemauslegung: Energieeffiziente, maßgeschneiderte Lösungen:

LEWA legt großen Wert auf energieeffiziente Systeme. Unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen der Systemkomponenten, der Kinematik und Zylinderzahl der Pumpe sowie dem Hubfrequenzbereich und den Eigenschaften des Fluids überprüfen wir auch die kundenseitige Rohrleitungsinstallation. Die Technologien LEWA intellidrive, LEWA smart control sowie eigene Software für Pulsationssimulation und Pumpenauslegung sind entwickelt worden. So werden nicht nur die Gesamt-Investitionskosten des Kunden reduziert, sondern sorgen auch eine optimale Dimensionierung des Gesamt-Systems, in das die Pumpe eingebaut sichergestellt.



2. Pumpen- und Dosiersysteme

Die Anforderungen an Pumpen- und Dosiersysteme für Flüssigkeiten in der Kunststoffverarbeitung und Compoundierung werden immer größer, da schon kleinste Ungenauigkeiten beim Dosieren von Additiven, Treibmitteln, Vernetzer etc. die Qualität des Endproduktes negativ beeinflussen können. Ein genaues und zuverlässiges Dosieren ist eine wichtige Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit und die Sicherheit von Herstellprozessen.

LEWA hat deshalb das ecofoam Dosiersystem entwickelt, welches kompakt aufgebaut ist und durch die Verwendung von Membrandoispumpen ein absolut dichtes System ist. Dank der eingesetzten Membrantechnologie, die sich durch ihren hohen Wirkungsgrad, und ein integriertes Überwachungssystem auszeichnet, lässt sich das Dosiersystem auch bei schwierigen Betriebsbedingungen genau, sicher und zuverlässig betreiben. Durch ein enthaltenes externes und bauteilgeprüftes Sicherheitsventil wird das System vor möglichem Über-

druck geschützt. Dies trägt zusätzlich zu einer sicheren Anlagenausführung bei. Da der Wartungsaufwand im Vergleich zu Systemen mit Kolbentechnologie wesentlich geringer ist, kann durch lange Wartungsintervalle eine hohe Produktivität erzielt werden.

Durch die Kombination von Drehzahlregelung und manueller Hubverstellung der Pumpe kann ein Förderstrom über einen weitreichenden Stellbereich von 1:100 realisiert werden.

Da das System mit einem hochgenauen Masse-Durchflussmesser sowie der LEWA smart control Regeleinheit ausgestattet ist, wird stets eine schnelle und präzise Regelung erreicht. Die Plausibilität der Vorgaben (Sollwerte) und Rückmeldungen (Istwerte) werden dabei kontinuierlich überwacht. Somit ist jederzeit eine gleichbleibende Qualität des Endprodukts gesichert.

Für die fluidberührten Komponenten des Dosiersystems wird generell hochwertiger V4A-Edelstahl (1.4571 oder qualitativ vergleichbar) und als Membranwerkstoff PTFE beziehungsweise alternativ V4A-Edelstahl (1.4401) verwendet. Somit ist eine Beständigkeit der eingesetzten Werkstoffe für alle gängigen Treibmittel, von halogenierten Kohlenwasserstoffen über Butan, Pentan oder Propan bis hin zu CO₂, gegeben.

Das System kann bei Förderdrücken bis max. 500 bar und bei Förderströmen von 0,5 kg/h bis 250 kg/h eingesetzt werden.

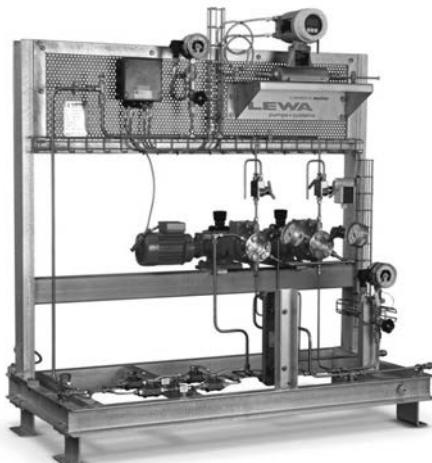


Bild 1: LEWA ecofoam Dosiersystem für Treibmittel etc.

Lagern und Austragen von schwerfließenden Schüttgütern

Dipl.-Ing. H. Heinrici,

Schwedes + Schulze Schüttguttechnik GmbH, Wolfenbüttel

Kurzfassung

Schüttgüter können sich in ihren Fließeigenschaften unterscheiden. Kunststoffgranulate haben oft günstige Fließeigenschaften und sind als frei fließend zu bezeichnen. Viele Roh- und Zwischenmaterialien (wie z.B. Farbpigmente) haben aber ungünstige Fließeigenschaften und sind als sehr kohäsiv bis nicht fließend zu beschreiben. Aber auch diese Materialien müssen zwischengelagert werden. Kommt es beim Austrag zu Störungen, so dass zu wenig ausgetragen wird, sich Anbackungen bilden (Kernfluss) oder der Austrag durch Brückenbildung zum Erliegen kommt, so wird sich das auf die Produktion gravierend auswirken. Eine Auslegung des Vorratsbehälters/Silos für Massenfluss wird diese Probleme vermeiden.

Summary

Bulk solids have different flow properties. Plastic pellets usually have favourable flow properties and can be regarded as free flowing. Many raw materials (like pigments) can have unfavourable flow properties and can be described as very cohesive to even non-flowing. But these bulk solids also have to be stored and discharged without trouble. If discharge problems happen, because the set feed rate is not reached, build-up occurs or discharge is interrupted due to arching, major consequences for production are caused. A silo design for flow to achieve mass flow will avoid these problems.

1. Fließeigenschaften

Zur Messung von Fließeigenschaften von Pulvern und Schüttgütern benutzt man Schergeräte. Die Messungen bezeichnet man daher als Scherversuche. Ein wesentliches Ziel eines Scherversuchs ist die Messung der Druckfestigkeit eines verfestigten Schüttgutes. Die Druckfestigkeit ist anhand eines sogenannten einachsigen Druckversuchs in Bild 1 erläutert. Im ersten Schritt wird das Pulver oder Schüttgut in einen Hohlzylinder mit der Querschnittsfläche A gefüllt und in vertikaler Richtung der Verfestigungsspannung σ_1 unterworfen. Dadurch wird die Probe verdichtet und verfestigt. Anschließend wird die Probe entlastet und die Zylinderwand weggenommen. Die Druckfestigkeit ermittelt man, indem nun erneut in vertikaler Richtung auf die Probe gedrückt wird, bis diese zerstört wird (Bruch, beginnendes

Fließen). Die zum Bruch führende Vertikalspannung ist die Druckfestigkeit σ_c (auch: Schüttgutfestigkeit).

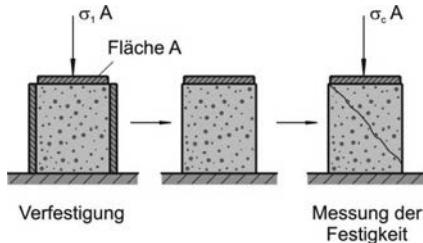


Bild 1: Einachsiger Druckversuch [1]

Umso größer die Verfestigungsspannung σ_1 ist, desto größer ist die Druckfestigkeit σ_c . Das Verhältnis von Verfestigungsspannung σ_1 zu Druckfestigkeit σ_c ist die Fließfähigkeit ff_c :

$$ff_c = \sigma_1 / \sigma_c$$

Umso kleiner die Druckfestigkeit im Verhältnis zur Verfestigungsspannung ist, desto größer und damit besser ist die Fließfähigkeit ff_c . Um die Bedeutung der Zahlenwerte der Fließfähigkeit ff_c zu verstehen, bietet sich folgende Klassifizierung an:

$ff_c < 1$	nicht fließend
$1 < ff_c < 2$	sehr kohäsiv (bis nicht fließend)
$2 < ff_c < 4$	kohäsiv
$4 < ff_c < 10$	leicht fließend
$10 < ff_c$	frei fließend

Der einachsige Druckversuch (Bild 1) hat eine Reihe von Nachteilen bezüglich Reproduzierbarkeit und Unterschätzung der Druckfestigkeit. Außerdem ist die Prozedur dadurch aufwendig, dass die Reibung an der Innenwand des Hohlzylinders durch z.B. Schmierung und Abdichten mit dünner Folie reduziert werden muss. Daher werden in der Pulver- und Schüttgutechnik Schergeräte als Standardmessgeräte eingesetzt. Bild 2 zeigt die Scherzelle eines Ringschergerätes. Die Schüttgutprobe befindet sich im Bodenring und ist vom Scherdeckel bedeckt. Der Scherdeckel ist mit einem Querträger verschraubt. Auf den Querträger wird mit einer vertikalen Kraft F_N gedrückt und so eine Vertikalspannung σ im Schüttgut erzeugt. Zum Messen wird die Scherzelle in Richtung ω gedreht, der Deckel aber mit den Zugstangen am

Drehen gehindert. Da die Unterseite des Deckels mit in das Schüttgut ragenden Mitnehmern versehen ist, kommt es so zur Scherverformung des Schüttgutes. Die im Schüttgut in Umfangsrichtung wirkende Schubspannung τ errechnet sich aus den Kräften F_1 und F_2 in den Zugstangen.

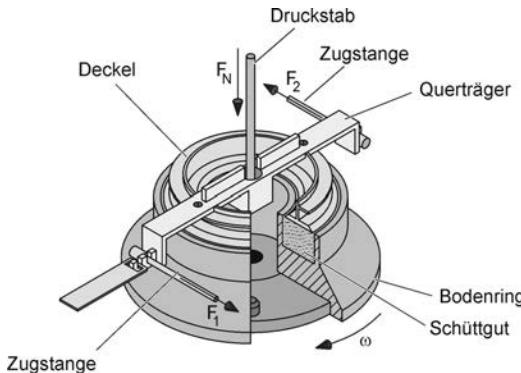


Bild 2: Scherzelle eines Ringschergerätes [1]

2. Fließprofile im Silo

Um Fließprobleme ausschließen zu können, ist eine Kenntnis der Fließvorgänge im Silo hilfreich. Die Reibungsverhältnisse im Schüttgut und an der Silowand sowie die Siloausführung in ihrem unteren Teil sind die wesentlichen Faktoren, die die Art des Fließprofils festlegen. Man unterscheidet zwischen Massenfluss und Kernfluss (Bild 3). Beim Massenfluss ist die gesamte Silofüllung in Bewegung, sobald Schüttgut abgezogen wird. Damit dies eintritt, müssen die Silowände entsprechend glatt und steil sein, der Siloquerschnitt darf keine scharfen Kanten oder abrupten Übergänge haben und die Reibungsverhältnisse an der Silowand dürfen sich nicht plötzlich ändern. Der Massenfluss ist charakterisiert durch gleichmäßige und relativ geringe Geschwindigkeiten, da der Fluss stetig ist und über den gesamten Querschnitt erfolgt. Massenfluss unterstützt einen konstanten Auslaufmassenstrom und trägt das Schüttgut, das zuerst in den Silo gelangt, auch zuerst aus, d.h. bei Massenflusssilos ist die Rückverfolgbarkeit möglich.

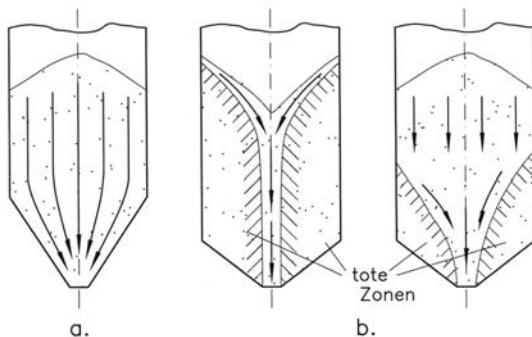


Bild 3: Fließprofile: Massenfluss (a) und Kernfluss (b)

Die Grenzen zwischen Massenfluss und Kernfluss ergeben sich bei der mathematischen Behandlung und Lösung des Spannungsfelds im Silo. Die Berechnungen wurden von Jenike [2, erläutert in 1] durchgeführt. Die Grenzen für Massenfluss sind in Bild 4 für den axialsymmetrischen (a) und den ebenen Fließzustand (b) dargestellt. Aufgetragen ist der Wandreibungswinkel ϕ_w über dem Neigungswinkel Θ des Auslauftrichters gegen die Vertikale. Parameter der Grenzkurven ist der Winkel ϕ_e . Zustände, charakterisiert durch drei Werte von ϕ_w , Θ und ϕ_e , die in diesem Bereich liegen, führen zu Massenfluss. Sind die Werte aber so, dass der Zustand außerhalb der Grenzlinie liegt, wird keine Bewegung längs der Wand erfolgen und Kernfluss herrschen.

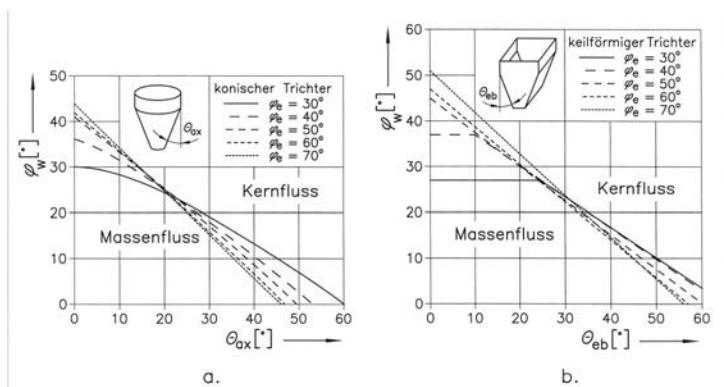


Bild 4: Auslegungsdiagramme: a) axialsymmetrischer Fließzustand;
b) ebener Fließzustand [1]

3. Lagerung schwerfließender Schüttgüter

Schwerfließende Schüttgüter zeichnen sich in der Regel dadurch aus, dass sie eine deutliche Neigung zur Zeitverfestigung haben. Zeitverfestigung bedeutet, dass nach einer Lagerung in Ruhe unter einer Last die Schüttgutfestigkeit ansteigt. Wird ein Silo z.B. so betrieben, dass über das Wochenende kein Schüttgut entnommen wird, so kann es bei solchen Schüttgütern bei der ersten Entnahme am Montag zu Austragstörungen durch Brückenbildung kommen.

Bei Schüttgütern mit Zeitverfestigung muss die Bildung von toten Zonen und die damit einhergehende Verfestigung des Schüttgutes in diesen Bereichen vermieden werden. Dies wird nur mit Massenfluss erreicht, bei dem beim Schüttgutaustrag der gesamte Siloinhalt in Bewegung kommt. Um Massenfluss zu erreichen, muss zum einen der Trichter steil genug ausgeführt werden, zum anderen ist das Austraggerät so auszuwählen, dass das Schüttgut über der gesamten Austragöffnung abgezogen wird.

Bild 5 zeigt beispielhaft den erforderlichen Auslaufdurchmesser d bzw. Auslaufbreite b eines Auslaufschlitzes in Abhängigkeit der Lagerzeit in Ruhe für ein feinkörniges Farbpigment.

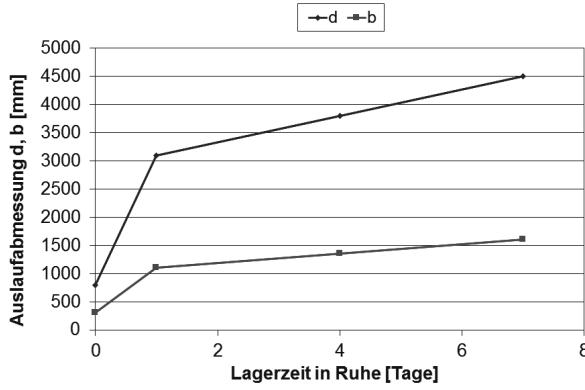


Bild 5: Auslaufabmessungen nach Zeitverfestigung

Es zeigt sich eine oft zu findende degressive Zunahme der benötigten Auslaufabmessung mit längerer Lagerung in Ruhe. Nach einer kurzen Lagerzeit von einem Tag in Ruhe ist eine

deutlich größere Auslaufabmessung nötig als im kontinuierlichen Betrieb. Wird die Lagerzeit in Ruhe verlängert, so nimmt die nötige Auslaufabmessung nur noch wenig zu.

Bild 5 zeigt aber auch, dass schon nach einer Lagerung in Ruhe von einem Tag ein Auslaufdurchmesser d erreicht wird, der in der Größenordnung von typischen Silodurchmessern liegt. Eine Silogestaltung mit einem Trichter ist dann kaum noch möglich. In diesem Fall ist es dann nötig, entweder ein Austraggerät einzusetzen, dass über einen großen Silodurchmesser austragen kann, Austraghilfen zu verwenden oder eine zyklische Entnahme mit vorzugsweise einer Umförderung vorzusehen. Diese Möglichkeiten haben Vor- und Nachteile, so dass für den jeweiligen Einsatzfall die günstigste Lösung auszuwählen ist.

5. Literatur:

- [1] Schulze, D.: Pulver und Schüttgüter, Springer Verlag, 3. Auflage, 2014
- [2] Jenike, A.W.: "Storage and Flow of Bulk Solids" Univ. Utah, Engng. Exper. Station, Bull. 123 (1964)

Optimierung des Einzugs von Polymerpulvern und pulverförmigen Füllstoffen auf gleichsinnig drehenden Zweischnellenextrudern

Optimization of material intake of polymer and filler powders in co-rotating Twinscrew-extruders

Dipl.-Geol. **S. Mohr**, Dipl.-Ing. (FH) **L. Darnedde**,
KraussMaffei Berstorff GmbH, Hannover

1. Einführung

Die Verarbeitung von pulverförmigen Polymeren und Füllstoffen führt immer wieder zu Problemen in den Einzugsbereichen von Extrudern. Hier soll eine Übersicht von Verfahren und Geräten gegeben werden, mit denen die Zuführung dieser Stoffe verbessert werden kann.

Betrachtet werden nur die Komponenten, die direkt am oder im gleichsinnig Zweischnellen-Extruder verwendet werden.

Vorgeschaltete, separate Aggregate, die zu einer Vor-Agglomeration dienen, wie z. B. Kollergang-Pressen, Fallfilmverdampfer oder spezielle Dosiergeräte sollen hier unberücksichtigt bleiben. Es sind beispielsweise Tablettieren, Brikettieren, Granulieren, Pelletieren, Flocking und Sintern Techniken des Agglomerierens.

2. Einfluss der Schüttdichte auf den Materialeinzug

Die Einzugseigenschaften von Pulvern können für einfache Anwendungen durch die Korngröße und Schüttdichte beschrieben werden, wenn von Anhaftungen, Restfeuchte im Material und elektrischer Aufladung abgesehen werden kann. Im Allgemeinen kann festgestellt werden, dass sich einhergehend mit Verringerung der Korngröße die Schüttdichte reduziert, also das Volumen zunimmt. Übliche Schüttdichten bei Polymer- und Mineralfüllstoff-Pulvern reichen von 0,7 kg/dm³ (Bariumsulfat) bis 0,15 kg/dm³ (Silica, Fluorpolymere nach der Synthese).

Generell ist bei der Zuführung von Pulvern zu beachten, dass die Dosierwege so kurz wie möglich gehalten werden. Lange Fallstrecken reduzieren unnötigerweise die Schüttdichte der zu dosierenden Stoffe.

In Grafik 1 ist zu erkennen, wie sich der Einfluss der Schüttdichte auf das zu fördernde Volumen auswirkt. Dargestellt wird ein unterschiedlich stark vermahelter Kalkstein. Die Vermahlung ergibt in diesem Fall Schüttdichten von 0,4 und 0,1 kg/dm³. Es wird deutlich, dass sich das Volumen des Füllstoffes nahezu vervierfacht. Bei einem Füllstoff-Zuschlag von 800 kg/h müssen also gegenüber 2.000 dm³ bei einer Dichte von 0,4 kg/dm³ knapp 8.000 dm³ bei einer Dichte von 0,1 kg/dm³ in den Extruder gefördert werden. Neben dem Luft-Volumen, das durch Entlüftungs-/Entgasungsöffnungen wieder aus dem Extruder hinausgebracht werden muss, ist die Isolationswirkung der eingetragenen Luft nicht zu vernachlässigen. Der Wärmeübergang ist deutlich vermindert durch die Zwischenkornluft. Durch erhöhte äußere Heizleistung muss das Material förderfähig gehalten werden.

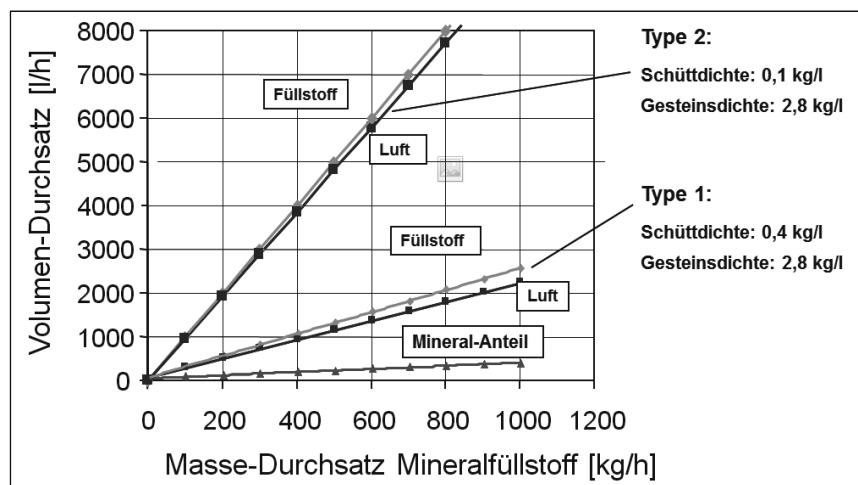


Bild 1: Gegenüberstellung des Masse- zum Volumen-Durchsatz von unterschiedlich vermahelten Mineralfüllstoffen. Dichte Kalkstein ca. 2,6 – 2,9 kg/dm³.

Betrachtet man nun die Polymerpulver ergibt sich durch den vorgenannten Isolationseffekt der Zwischenkornluft die zusätzliche Problematik des schlechteren Aufschmelzverhaltens. Bei Versuchen wurde beobachtet, dass durch die Isolationswirkung bei Fluorpolymerpulvern eine spezifische Aufschmelzenergie von bis zu 0,4 kWh/kg benötigt wurde. Konnte die Luft durch eine speziell gestaltete, axial offene Aufschmelzzone durch die Schnecke gefördert werden, lag man bei einer spezifischen Energie von 0,18 bis 0,2 kWh/kg. Zudem war der Kettenlängenabbau des Polymers deutlich reduziert. Mit einer modifizierten Aufschmelzung

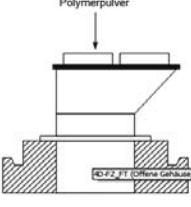
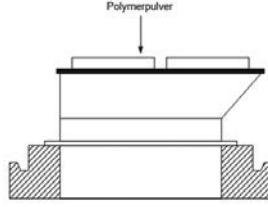
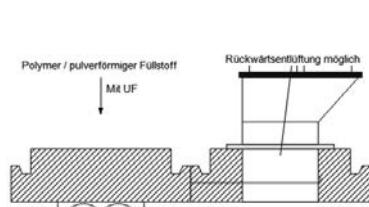
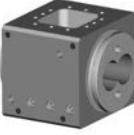
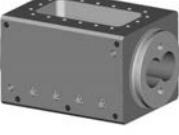
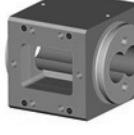
durch fördernde Knetblöcke kann also Energie eingespart und das Produkt geschont werden.

3. Der Materialeinzug in den Fülltrichter

Der Einzug der pulverförmigen Stoffe wird im Fülltrichter von mehreren Faktoren bestimmt. Grundsätzlich ist auf eine ausreichende Erdung des Trichters zu achten, da es sonst zu elektrostatischer Aufladung und damit zu Materialanhäftungen kommen kann.

Durch die Ausführung des Trichters mit möglichst steilen Flächen werden Ablagerungen vermieden. Ist durch eine Vielzahl von Dosierungen der Trichter breit angelegt, sollten die Dosierer der pulverförmigen Stoffe senkrecht über der Extruderöffnung platziert werden, um Anhäufungen auf der flachen Seite zu reduzieren. Ist dies nicht ausreichend, ist der Einsatz von Vibrationsgeräten eine geeignete Maßnahme, um plötzlich nachfließende Pulvermengen im Einlauf zu verhindern.

Tabelle 1: Füllzonen für Zweischnecken-Extruder

4 D Füllzone	6 D Füllzone	Seitenfüttereinrichtung als Füllzone
		
		 

Zur Optimierung vorhandener Trichter können in die Füllzone Luftleitbleche eingesetzt werden. Diese helfen der in der Aufschmelzung abgepressten, rückströmenden Luft aus dem Trichter auszutreten und vermindern somit die zusätzliche Fluidisierung der Pulver. Diese Bleche werden stirnseitig zum nächsten Gehäuse oder je nach Drehsinn des Extruders über

der aufreibenden Schnecke platziert. Ein Abstand von 0,5 bis 1,0 cm zur Gehäusewand ist dabei vollkommen ausreichend.

Eine weitere Reduzierung der Materialablagerung kann durch eine Bearbeitung der Metalloberflächen geschehen. Die Innenseite des Trichters wird dabei poliert, verchromt oder mit Teflon beschichtet oder ausgekleidet. Dies hilft besonders bei leicht klebrigen oder elektrostatisch aufgeladenen Pulvern.

4. Optimierte Schneckenteile und Schneckengeometrien

Wesentlichen Einfluss auf den Materialeinzug hat die Extruderschnecke selbst. Wichtig hinsichtlich der zu verarbeitenden Rezepturen ist die Wahl der richtigen Gangtiefe der Extruderschnecken. Mit Standard-Compoundierschnecken mit einem Da/Di von 1,46 bis 1,55 können bis zu 50 bis 60% Füllstoffe gut verarbeitet werden. Darüber hinaus ist eine tiefergeschnittenne Schnecke mit 1,74 bis 1,8 Da/Di vorzuziehen.

Seltener werden Stufen-Maschinen mit einer tiefergeschnittenen Einzugszone eingesetzt, die zur Drehmomentübertragung aus einem Stück gefertigt ist. Im flacher geschnittenen Bereich wird dann eine modulare Schaft-Version angekoppelt. Diese Ausführung bedingt eine Auszugsmöglichkeit der Schnecken nach hinten.

Auch konische gleichlaufende Zweischnecken-Extruder können den Materialeinzug deutlich vergrößern. Jedoch geht hier durch die aus einem Stück gefertigte Schnecke die Flexibilität des modularen Aufbaus verloren.

Für die Schneckenkonfiguration werden Schneckenelemente (Tabelle 2) mit großem freiem Volumen eingesetzt. Diese haben üblicherweise eine Gangsteigung von 1,25 oder 1,5 D und werden selbstreinigend (Erdmenger-Profil) oder als Schubkantenprofil ausgeführt. Beim Schubkantenprofil ist die treibende Flanke weiter ausgefräst, diese ist dann aber nicht mehr vollständig selbstreinigend.

Tabelle 2: Schneckeenelemente zum Materialeinzug

1,25 D	1,5 D	Profil-Typ	
			Erdmenger
			Schubkante

Selten werden beide Flanken des Steges ausgefräst. Dadurch wird der Schneckensteg aber sehr schmal und verliert deutlich an Festigkeit. Es werden auch komplett Stege entfernt, sodass eingängige Schnecken mit sehr großem freiem Volumen entstehen.

5. Materialzuführung über Seitenaggregate

Der Pulvereintrag über Seitenaggregate hat den Vorteil, dass die Drehzahl der Extruder und der Seitenfüttereinrichtung entkoppelt werden können. Das bedeutet, das Pulver kann mit höherer Drehzahl in den Extruder hineingepresst werden, unabhängig von der Drehzahl der Hauptschnecke. Der Schneckendurchmesser der Seitenfüttereinrichtung ist dabei möglichst groß zu wählen. Auch in der Seitenfüttereinrichtung sind unterschiedliche Schneckentypen einsetzbar (Ein- oder zweigängig; 1D oder 1,5D Gangsteigung; Blattschnecken)

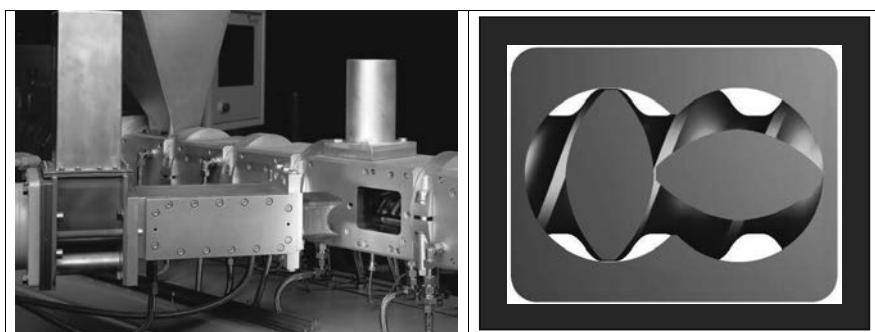


Bild 2: Zweischneckenfüttereinrichtung mit großem Schneckendurchmesser

Wichtig ist auch hier, dass für eine ausreichende Entlüftung durch eine Vorwärts- und eine Rückwärts-Entlüftung gesorgt ist. Dies beinhaltet, dass die Schneckenkonfiguration im Bereich der Einmischung nicht abstuwend gestaltet ist. Es sind nur fördernde Mischelemente einzusetzen.

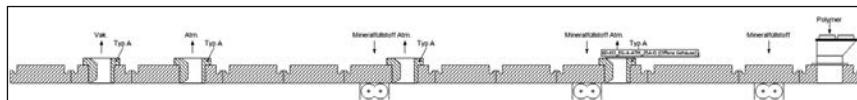


Bild 3: Gehäusekonfiguration für hochgefüllte Rezepturen mit 3 Füttereinrichtungen

Eine Konfiguration für hochgefüllte Rezepturen bis zu 80% Füllstoffanteil ist in Bild 3 beispielhaft dargestellt. Füllstoffanteile bis zu 20% können so schon direkt nach der Füllzone dosiert werden.

Fibre, film, powder, regrind, etc. – Recycling and Compounding in a single step with COREMA®

Ing. Mag. **R. Obermayr**, EREMA Engineering Recycling Maschinen und Anlagen Ges.m.b.H, Ansfelden, Österreich

More and more producers of plastic consumer goods want to show the green benefits by using a certain recyclate content in their products. EREMA the leading manufacturer of plastic recycling systems with some ten years of experience in this technology can provide the right tool for achieving an efficient production of customized raw material based on recyclate.

Preconditioning plays an important role for recycling-extrusion:

First step in the mechanical recycling via an extrusion process is to feed the input material into the extruder in a reliable manner, at a constant rate and with properties that allow a good filling of the extruder screw and a stable melting phase.

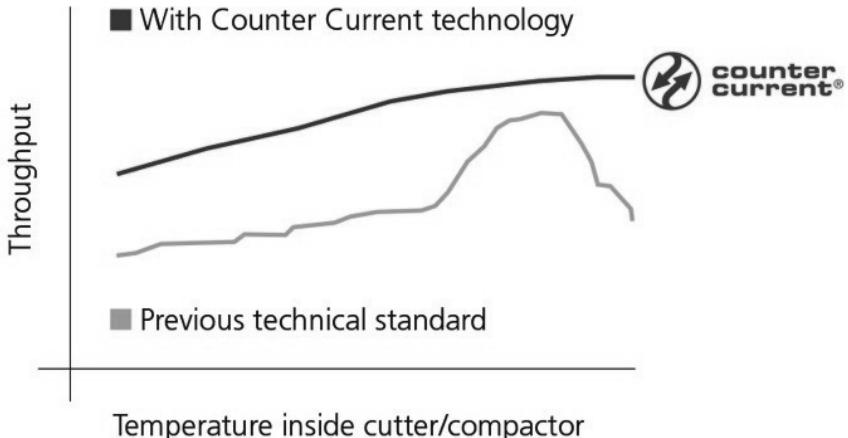
Here becomes important what was the reason for the founding and since then the story of success of EREMA – the combination of a single screw extruder with a preconditioning unit.

The preconditioning unit prepares the various recycling input materials which come with characteristics like:

- Low bulk weight (like fibers, film, etc.)
- Blocky material
- Moistly
- Contaminated
- Unsteady
- Etc.

It prepares it in the sense of cutting, predensifying, heating & drying, homogenization and finally the dosing of this material at a very constant rate into the extruder which is tangentially connected to the preconditioning unit.

With the recently developed “Counter Current Technology” this principle has further improved EREMA's outstanding position as it leads to higher output while at the same time also the stability and by this the operational range has made a big step forward.



Above graph shows higher output at wider temperature range due to Counter Current Technology".

The extruder gets an excellent prepared material at the right temperature and as a result the following melting step works smoothly and stable.

Extrusion and Filtration – Exemplary with Regrind-Inputmaterial:

The above described Preconditioning unit can provide its advantages also for regrind input materials. Regrind material is oftentimes contaminated with soft contaminations like other polymers, wood or silicones.

The preconditioning unit gives the needed dwell time in order to prewarm the thick walled particles thoroughly so that the extruder can melt up very gentle. This results in the fact that the contaminations can be kept as big as possible and helps the filtration to be efficient. As an example WEEE-Regrind often contains PA particles which can be filtered easily due to the exact temperature control in the preconditioning unit and the gentle melting process in the warm fed single screw extruder.

Add on – Compounding with recyclate melt in a single step process:

COREMA® brings together all the benefits of recycling and compounding in a single process step. Difficult input materials can easily be prepared and processed by EREMAS recycling systems. The well prepared and cleaned melt goes via a melt dosing unit directly to a co-rotating, self-cleaning twin-screw extruder. Besides the dosing of a wide variety of additives, fillers and reinforcing agents can be admixed and the result is customized raw materials with a property profile in accordance with the respective end - application.

One control system manages the total system – from the recipe to the feeding system and the temperature profile, it also displays the actual energy consumption at all times – which is, thanks to the singlestep process second to none.

Zerkleinerung von Kunststoffen

B. Sc. **K. Braesch**, Dipl.-Ing. (FH) **C.Eloo**,
Fraunhofer-Institut UMSICHT, Oberhausen

Kurzfassung

Immer mehr Anwendungen benötigen maßgeschneiderte Kunststoffpulver. Die mechanische Zerkleinerung von Kunststoffen erfordert allerdings einen sehr sensiblen Umgang hinsichtlich möglicher Wärmeeintragungen. Temperaturspitzen und zu hohe Verarbeitungstemperaturen können die Kunststoffstruktur schädigen oder den Verarbeitungsprozess behindern. Daher ist die kryogene Zerkleinerung die derzeit beste Alternative, schnell, schonend und effektiv Pulver aus Kunststoffen und recyclingfähigen Materialien herzustellen. Eine anschließende Verarbeitung der Pulver in Anwendungsgebieten wie zum Beispiel Recycling, Pulverbeschichtung und Selektivem Lasersintern wird hierdurch ermöglicht. Der Beitrag gibt einen Überblick über die Prinzipien der kryogenen Zerkleinerung, Optimierungsmöglichkeiten der Pulvereigenschaften sowie Analysemethoden nach dem Stand der Technik.

Abstract

More and more applications require customized plastic powders. However, the mechanical grinding of plastics requires a sensitive handling regarding potential heat input. Temperature peaks and high processing temperatures may damage the polymeric structure or hinder the processing. Therefore, cryogenic grinding is currently the most favorable solution to receive powder out of plastics and recyclable materials in a fast, gentle and effective way. This allows the subsequent processing of those powders in fields of application like recycling, powder coating and selective laser sintering. This article provides an overview of principles of the cryogenic grinding, optimization possibilities of powder properties as well as analytical methods according to the state of technology.

1. Kunststoffpulver in der Anwendung

Hochwertige Kunststoffpulver werden für immer mehr Anwendungen benötigt. Neben einer ausreichenden Fließfähigkeit und einer anwendungsspezifischen Partikelgrößenverteilung müssen die ursprünglichen Eigenschaften des Kunststoffs nach der Zerkleinerung erhalten bleiben.

Neben der klassischen Verwendung von Kunststoffpulvern zur Herstellung von Masterbatches und als Bindemittel oder Füllstoff, werden diese auch direkt in der Oberflächen- und Fertigungstechnik verarbeitet. Die Beschichtung von Materialien wie Metall, Textilien, andere Kunststoffe und Holz, ist eines der bekanntesten Anwendungsgebiete von Kunststoffpulvern. Hier werden Verfahren wie elektrostatisches Pulverbeschichten, Wirbelsintern, aber auch einfaches Aufrakeln oder Sieben mit anschließendem Aufschmelzen beziehungsweise Vernetzen des Kunststoffs durchgeführt.

Auch bei der Herstellung von Formteilen durch Rotationsformen oder bei innovativen Verfahren wie dem Selektiven Lasersintern, werden Kunststoffpulver verwendet. Um präzise die vorgegebenen Strukturen abilden zu können, sind überwiegend sehr feine Pulver erforderlich. Diese neigen allerdings zum Agglomerieren, was zu einer Verschlechterung der Verarbeitbarkeit führt. Ein entsprechendes Pulverdesign hinsichtlich Partikelgrößenverteilung und Fließeigenschaften kann dem entgegenwirken.

Ein weiteres Anwendungsgebiet sind Rezyklate. Die Erzeugung von Kunststoffpulvern aus Kunststoffmüll, Ausschussware u. v. m. bietet die Möglichkeit einer nachhaltigen und ressourcenschonenden Mehrfachverwendung von Materialien.

2. Kryogene Zerkleinerung von Kunststoffen

Da Kunststoffe aufgrund ihrer Sensibilität gegenüber Wärme und ihrer Materialeigenschaften wie Elastizität und Schlagzähigkeit meist nicht für klassische Warmzerkleinerungsverfahren geeignet sind, wird im Folgenden auf Mühlen bzw. Mahlverfahren zur kryogenen Zerkleinerung eingegangen. Durch die Zerkleinerung in extremer Kälte können die Bauteile schonend in Pulver umgewandelt werden. Die Denaturierung durch Wärmeinwirkung wird auf ein Minimum reduziert. Somit können die ursprünglichen Materialeigenschaften weitestgehend erhalten werden. Die Kühlung bei der kryogenen Zerkleinerung erfolgt bis unterhalb der Glasübergangstemperatur des Kunststoffes mittels Trockeneis oder Flüssigstickstoff (LN_2). Flüssigstickstoff hat sich aus Kostengründen und wegen der gezielten Dosierbarkeit sowie

der vollständigen Benetzbareit des Ausgangsmaterials als Prozessmittel etabliert. Für Flüssigstickstoff fallen, abhängig von der Abnahmemenge, Kosten im Bereich von etwa. 10 - 50 ct/L LN₂ (0,805 kg) an [1]. Die Kosten für Trockeneis liegen bei etwa 2 - 5 €/kg [2]. Hinzu kommen in beiden Fällen Kosten für die Lieferung und Lagerung. Die Verwendung von LN₂ hat den zusätzlichen Vorteil, dass die Pulverherstellung unter inertnen Bedingungen erfolgt. Die Pulver sind daher während der Zerkleinerung nicht explosionsfähig.

Die Herstellung von Kunststoffpulvern erfolgt in drei wesentlichen Schritten. Die Materialien werden im ersten Schritt zu Granulat mit einem Durchmesser von ca. 5 mm zerkleinert. Dies erfolgt beispielsweise mittels Schneidmühlen. Je nach Material wird bereits in diesem Arbeitsschritt gekühlt, da insbesondere weiche und elastische Materialien zum Schmieren oder Aufschmelzen neigen, sobald sie mechanischer Beanspruchung und leichtem Wärmeeintrag (Reibungswärme, Abwärme vom Motor) ausgesetzt sind.

Im zweiten Schritt wird das Granulat in einer Feinmühle zerkleinert. Hierfür wird es zunächst z. B. mittels LN₂ bei -196 °C durchgekühlt und so versprödet. Nach der Versprödung erfolgt die kryogene Zerkleinerung in der Mühle bei der gewünschten Verarbeitungstemperatur (vgl. Bild 1).

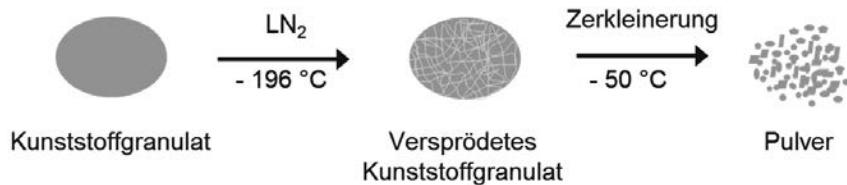


Bild 1: Schema zur Zerkleinerung von Kunststoffen.

Besonders geeignet für die Fein- bis Feinstzerkleinerung von Kunststoffen sind Prallmühlen. Sie eignen sich, Partikel bis zu einer Feinheit von etwa 10 µm zu zerkleinern. Fraunhofer UMSICHT verwendet daher eine gegenläufige Stiftmühle oder alternativ eine Ultra-Turbo-Mühle (Rotor-Stator-System). Die Zerkleinerung der versprödeten Partikel erfolgt durch Prall- und Reibungskräfte, welche auf Korngrenzen und Fehlstellen der Partikel einwirken und hier Brüche erzeugen. Daher lassen sich poröse Materialien mit vielen Fehlstellen sowie Kunststoffe mit geringem Molekulgewicht, also mehr Korngrenzen, mit geringerem Energieaufwand feiner zerkleinern als besonders dichte Materialien oder Materialien mit hohem Molekulgewicht. Auch die mechanische Festigkeit der Materialien und die Verwendung von Füll-

und Hilfsstoffen im Compound haben einen starken Einfluss auf das Mahlergebnis. Verantwortlich für die Übertragung der Kräfte sind zwei Mechanismen: Zum einen treffen die beschleunigten Partikel auf die Mahlstifte bzw. den Stator der Prallmühlen. Zum anderen tritt eine Partikel-Partikel-Interaktion auf, also das gegenseitige Aufeinanderprallen bzw. Aneinanderreiben der Partikel im Luftstrom. Je nach Partikelgröße, Aufprallgeschwindigkeit und Massestrom überwiegt der eine oder der andere Mechanismus. In den meisten Fällen dominieren jedoch Prallkräfte den Zerkleinerungsprozess. [3] Die Bruchwahrscheinlichkeit nimmt mit der Prallgeschwindigkeit zu und mit der Partikelgröße ab. [4] Granulat mit etwa 5 mm Durchmesser lässt sich beispielsweise besser zerkleinern als Mikrogranulat oder Pulver und die Effektivität der Zerkleinerung nimmt mit jedem Mahldurchgang weiter ab. Um den Vorgang der nachlassenden Effektivität der Zerkleinerung bei geringerer Ausgangspartikelgröße zu verdeutlichen, ist in Tabelle 1 ein Beispiel zur kryogenen Zerkleinerung von Polypropylen (PP) aufgeführt. Die Zerkleinerung erfolgte im Versuch nach der Kühlung des Materials bei -196 °C mittels gegenläufiger Stiftmühle, bei einer Drehzahl von 8 800 x 2 [min⁻¹] und einer Verarbeitungstemperatur von -70 °C.

Tabelle 1: Zerkleinerung von PP, Partikelgrößenanalyse mittels Laserbeugung

Mahldurchgang	D10 [µm]	D50 [µm]	D90 [µm]
Ausgangsmaterial	Granulat mit Ø = 5 mm		
1. Zerkleinerung	54	153	355
2. Zerkleinerung	44	112	228
3. Zerkleinerung	36	96	188

Der Einfluss der Ausgangspartikelgröße ist deutlich zu erkennen. Während der erste Zerkleinerungsschritt zu einer Verringerung der mittleren Partikelgröße D50 um 4847 µm geführt hat, waren es nach dem zweiten Zerkleinerungsschritt nur noch 41 µm und nach dem dritten Zerkleinerungsschritt nur noch 16 µm.

Im Anschluss an die kryogene Zerkleinerung wird das erzeugte Pulver im Luftstrom gefördert und durch einen Zyklon abgeschieden. Die gesamte Prozesskette der kryogenen Zerkleinerung ist in Bild 2 schematisch dargestellt.

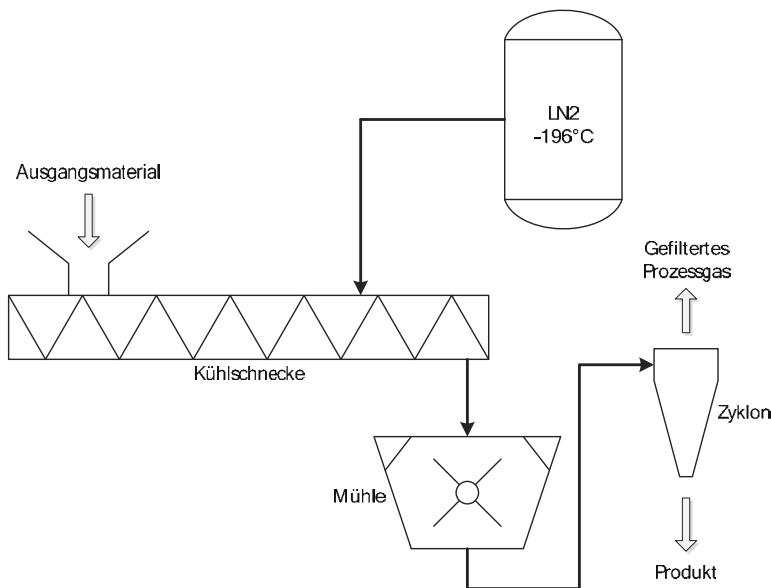


Bild 2: Schematische Darstellung der Prozesskette im Fließbild.

Im dritten und letzten Schritt wird das erzeugte Pulver, falls erforderlich, klassiert. Je nach gewünschter Feinheit können unterschiedliche Siebtypen verwendet werden. Für feine Pulver eignen sich besonders Luftstrahlsiebe oder Sichter. Gröbere Pulver können mit verhältnismäßig geringerem Aufwand beispielsweise in Taumelsiebmaschinen oder oszillierenden Sieben verarbeitet werden. Die Zugabe von Siebhilfsstoffen / Fließhilfsmitteln ermöglicht die Klassierung von anspruchsvollen Materialien, welche zum Agglomerieren neigen, und erhöht die Ausbeute der Wunschfraktion.

3. Pulverdesign

Auf dem Weg zum gewünschten Produkt gibt es verschiedene Möglichkeiten, mithilfe von Parameteränderungen Einfluss auf das erzeugte Pulver zu nehmen. Auch die Wahl des Ausgangsmaterials hat Einfluss auf die erreichbare Feinheit des Produkts. Die Granulate sollten so groß wie möglich, aber so klein wie nötig sein. Im Fall der von Fraunhofer UMSICHT verwendeten Mühlen liegt der optimale Durchmesser des Granulats bei 5 mm. Die Kunststofforte, das Molekulgewicht und die Verwendung von Additiven bzw. Modifikationen bezüglich Glasübergangstemperatur, Schmelzpunkt, Festigkeit, Kältewiderstand, Härte etc. bestimmen

die Zerkleinerbarkeit eines Kunststoffs maßgeblich. Während eines Zerkleinerungsversuchs können drei Parameter variiert werden.

1. Der Temperaturbereich der Kühlung und der Verarbeitung zur Kontrolle der Versprödung des Materials und zur Verhinderung von Faserbildung oder Denaturierung durch lokales Aufschmelzen des Kunststoffs.
2. Der Energieeintrag, kontrolliert über die Drehzahl der Mahlanlage, limitiert durch die maximale Stromaufnahme; mit sinkender Partikelgröße und dadurch steigender Festigkeit des Materials, ist ein höherer Energieeintrag notwendig, um eine weitere Zerkleinerung der Partikel zu ermöglichen.
3. Der Massestrom hat einen direkten Einfluss auf die Stromaufnahme der Mühle. Je höher der Massestrom, desto höher ist die Stromaufnahme. Allerdings gilt: Je feiner die Partikel werden, desto stärker überwiegen Partikel-Partikel-Stöße und desto geringer ist der Kontakt zwischen Partikel und Stator bzw. Mahlstiften. Die Stromaufnahme sinkt dadurch bei gleichbleibendem Massestrom (vgl. Granulat → Pulver). Dies ermöglicht im Umkehrschluss bei der Verarbeitung von Pulvern einen höheren Massestrom, der notwendig ist, um die Partikelinteraktion bei reduzierter Partikel-Mühlen-Wechselwirkung für die Mehrfachzerkleinerung von Pulvern optimal nutzen zu können.

Die Mehrfachzerkleinerung wird eingesetzt, wenn Parameteränderungen nicht mehr zu einer weiteren Zerkleinerung führen. Die Ausbeute an der gewünschten Pulverfraktion kann durch eine zusätzliche Klassierung optimiert werden. Der Feinanteil wird abgesiebt und das Überkorn kann erneut gemahlen werden.

Im Anschluss an die Zerkleinerung kann die Partikelgrößenverteilung mittels Klassierung und Fraktionierung eingestellt werden. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn eine bestimmte Partikelgröße nicht über- oder unterschritten werden soll. Da die Fließfähigkeit eines Pulvers durch die Breite der Partikelgrößenverteilung beeinflusst wird, kann eine Klassierung somit auch die Fließfähigkeit eines Pulvers verbessern. Die Verarbeitbarkeit eines Pulvers hängt jedoch nicht nur von der Feinheit oder der Wahl der richtigen Fraktion ab. Auch der Feuchtegehalt, statische Aufladung, die Neigung zum Agglomerieren und Morphologie der Pulverpartikel sind wichtige Parameter, welche die Eigenschaften eines Pulvers beeinflussen. Un erwünschte Feuchtigkeit im Pulver, die z. B. von hoher Luftfeuchtigkeit aus dem Granulatherstellungsprozess oder von Kondenswasserbildung durch die Abkühlung bei der kryogenen Zerkleinerung stammen kann, führt zur Bildung von Adsorptionsschichten und Flüssigkeitsbrücken, welche die Fließfähigkeit reduzieren. Feuchtigkeit wird durch Trocknen im

Abluftöfen oder in speziellen Pulvertrockengeräten entfernt. Eine andere Alternative ist das Herstellen einer Suspension durch vollständige Sättigung des Pulvers mit Flüssigkeit, wodurch die Fließfähigkeit des Pulvers wieder hergestellt wird. [5] Die Wahl der Maßnahme ist abhängig vom Anwendungsfall. Trockene Pulver werden beispielsweise für das Selektive Lasersintern benötigt. Pulverbeschichtungen können sowohl mittels elektrostatischer Pulverbeschichtungssysteme aufgebracht, als auch als sogenannten Slurries, (in Wasser dispergierte Pulverlacke) verarbeitet werden. [6]

Ist die statische Aufladung von Pulvern unerwünscht, oder aus Gründen der Arbeitssicherheit zu verhindern, können Antistatika hinzugefügt werden. Hierfür eignen sich Materialien wie modifiziertes Aluminiumoxid, ein geringer Prozentsatz Ruß oder geringe Mengen Ethanol. [7]

Neigt das Pulver zum Agglomerieren oder Kleben, können Fließhilfsmittel wie z. B. Kreide, Kalciumstearat oder pyrogenes Siliziumdioxid verwendet werden. Sie verbessern die Fließfähigkeit eines Pulvers und wirken einer Zeitverfestigung entgegen. Diese Fließhilfsmittel werden häufig bei Pulvern < 100 µm verwendet. Sie legen sich an die Oberfläche der Pulverpartikel und wirken als Abstandhalter. Dadurch behindern sie die dort wirkenden van-der-Waals-Kräfte, welche die Haftung zwischen den Pulverpartikeln verursachen. Bei einer Überdosierung der Fließhilfsmittel wird dieser positive Effekt auf die Fließeigenschaften des Pulvers wieder aufgehoben, da in diesem Fall die Fließeigenschaften des Fließhilfsmittels dominieren. Diese sind aufgrund der geringen Partikelgröße der Fließhilfsmittel oft deutlich schlechter als die der Pulver. [5]

Eine weitere Variante zur Anpassung der Pulvereigenschaften ist eine Veränderung der Pulvermorphologie durch das Verrunden der Partikel. Pulverpartikel aus der kryogenen Zerkleinerung haben eine unregelmäßige Oberflächenstruktur (vgl. Bild 3). Für einige Anwendungen sind allerdings sphärische Partikel gewünscht. Aufgrund der wirkenden van-der-Waals-Kräfte sollte insbesondere bei Pulvern < 100 µm [5] beachtet werden, dass durch Verrunden die Abstände der Partikel zueinander verringert werden können. Dadurch wird unter Umständen die Haftkraft verstärkt und die Fließfähigkeit verringert.

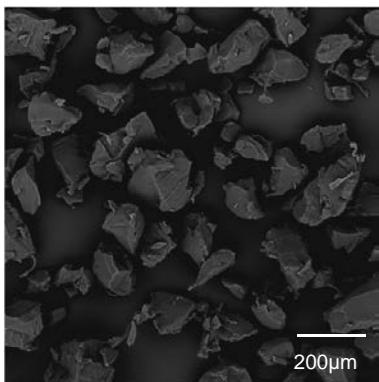


Bild 3: REM-Aufnahme von kryogen zerkleinertem Polypropylen

4. Pulvercharakterisierung

Die Pulvercharakterisierung bildet bei Grundlage für ein effektives Pulverdesign. Durch die verschiedenen Methoden zur Charakterisierung ist es möglich, die Auswirkungen von Parameteränderungen und anderen Maßnahmen direkt zu überprüfen. Die am häufigsten angewandte Methode im Zusammenhang mit der kryogenen Zerkleinerung ist die Messung der Partikelgrößenverteilung mittels Siebanalyse oder Laserbeugung (vgl. Bild 4).

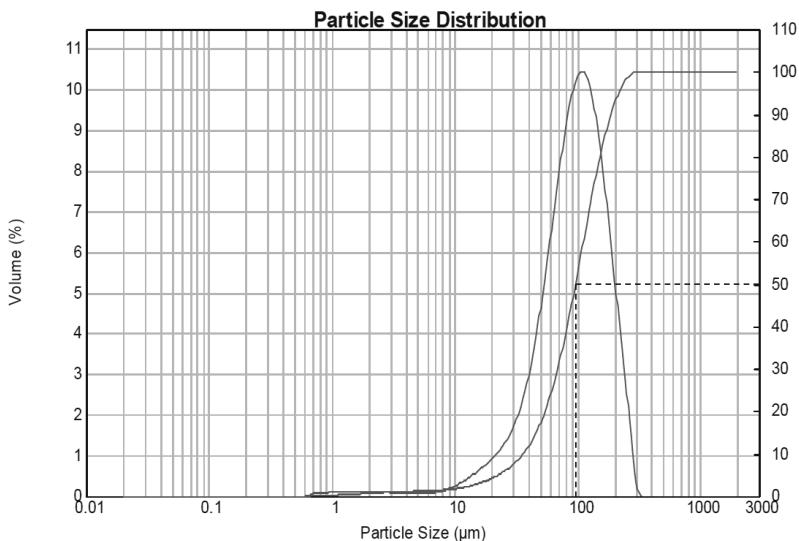


Bild 4: Partikelgrößenverteilung von PP mittels Laserbeugung D50 = 96 μm

Durch beide Messverfahren wird der Anteil an Partikeln kleiner einer definierten Partikelgröße bestimmt. Bei der Siebanalyse bezieht sich die Partikelgrößenverteilung auf die Masse der Partikel [8] und bei der Laserbeugung auf das errechnete Volumen der Partikel.

Die nachfolgenden Charakterisierungsmethoden erlauben Rückschlüsse auf die Fließeigenschaften eines Pulvers. Sie werden relevant bei der Verarbeitung, Förderung und Lagerung. Die Ergebnisse sind abhängig von der Partikelgrößenverteilung, statischer Aufladung, Feuchtegehalt, Partikelmorphologie und den mechanischen Eigenschaften des Materials.

Zur Restfeuchtebestimmung feuchter, schlecht fließender Pulver eignet sich die Thermogravimetrie. Die gängigste Variante ist, die Probe auf eine definierte Temperatur deutlich unterhalb des Schmelzpunktes zu erwärmen bis die Masse über einen vorgegebenen Zeitraum konstant bleibt. Anschließend wird aus dem Quotienten der Massendifferenz und der Ausgangsmasse der Restfeuchtegehalt in Prozent errechnet. [9]

Bei der Rieselfähigkeitsbestimmung wird die Durchflusszeit eines Pulvers durch einen polierten Trichter mit definierter Schräge und Auslauföffnung bestimmt. Die Art des Pulverflusses (gleichförmig, pulsierend oder nicht fließend) wird ebenfalls angegeben. Je schneller und gleichmäßiger der Pulverfluss ist, desto besser sind die Fließeigenschaften. [10]

Um den Schüttwinkel zu bestimmen, wird das aus einem Trichter auslaufende Pulver auf einer ebenen Scheibe mit leicht aufgerauter Oberfläche aufgefangen. Die Höhe des entstandenen Pulverkegels wird vermessen und der Winkel berechnet. Je flacher der Kegel, desto besser die Fließfähigkeit des Pulvers. [11]

Eine besonders für die Lagerung und den Transport wichtige Kenngröße ist die Hausnerzahl. Diese wird gebildet aus dem Quotienten aus Stampf- und Schüttdensität. Je größer die Hausnerzahl wird, desto schlechter ist das Fließverhalten des Pulvers. Die bestmögliche Fließfähigkeit liegt bei einer Hausnerzahl von eins vor. [5] Die Schüttdensität wird ermittelt, indem Pulver gut aufgerührt und in einen unten verschlossenen Trichter gegeben wird. Der Trichter wird anschließend schnell geöffnet, überschüssiges Material abgestreift und der Inhalt des Zylinders gewogen. Die Schüttdensität berechnet sich aus dem ermittelten Gewicht und dem bekannten Volumen. [7]

Die Stampfdichte bzw. das Stampfvolumen wird mittels Stampfvolumeter bestimmt. Nach der Vorbereitung des Pulvers mittels Trocknen und Sieben wird eine definierte Menge des Mate-

rials in einen Messzylinder gegeben und gewogen. Anschließend wird das Pulver im Stampfzylindrometer verdichtet. Das Volumen wird anschließend abgelesen. Dieser Vorgang wird mehrfach wiederholt, bis die Volumenänderung zwischen zwei Schritten geringer als 2 mm ist. Die Stampfdichte ist der Quotient aus Masse und gestampftem Volumen des Pulvers.

[12]

Literaturangaben

- [1] Elert, G.: Price of Liquid Nitrogen. <http://hypertextbook.com/facts/2007/KarenFan.shtml>, abgerufen am: 14.10.2016
- [2] Homepage Trockeneis. <http://shop.trockeneis-direkt.de/>, abgerufen am: 04.10.2016
- [3] Rumpf, H.: Beanspruchungstheorie der Prallzerkleinerung. Chemie Ingenieur Technik - CIT 31 (1959) 5, S. 323–337
- [4] Ruppel, P. u. Brauer, H.: Prallzerkleinerung durch Serienstoss. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990
- [5] Schulze, D.: Pulver und Schüttgüter. Fließeigenschaften und Handhabung. VDI-Buch / Chemische Technik / Verfahrenstechnik. Berlin: Springer Vieweg 2014
- [6] Beschichtung hochwertiger Karosserieoberflächen mit Pulver-Slurry, Weckerle, G., 2003
- [7] DIN EN ISO 60-2000; Januar 2000. *Bestimmung der scheinbaren Dichte von Formmassen, die durch einen genormten Trichter abfließen können (Schüttdichte)*
- [8] DIN 66165-2-2015; Oktober 2015. *Partikelgrößenanalyse- Siebanalyse- Teil 2: Durchführung*
- [9] DIN-EN-ISO 11358-1997; November 1997. *Thermogravimetrie (TG) von Polymeren*
- [10] DIN EN ISO 6186; August 1998. *Bestimmung der Rieselfähigkeit*
- [11] DIN 4324-1983; Dezember 1983. *Pulver und Granulate Bestimmung des Schüttwinkels*
- [12] DIN EN ISO 787-11; Oktober 1995. *Allgemeine Prüfverfahren für Pigmente und Füllstoffe Teil 11: Bestimmung des Stampfvolumens und der Stampfdichte*

Einsatz von Matrizenpressen zur Verbesserung von Schüttguteigenschaften

Prof. Dr.-Ing. **W. Sitzmann**, Amandus Kahl GmbH & Co. KG, Reinbek

Kurzfassung

Im Rahmen von feststoffverarbeitenden Prozessen liegen in den seltensten Fällen physikalisch und chemisch eng definierte Monokomponenten mit stets gleichbleibenden Eigenschaften vor. Dies ist weitaus eher der Fall bei der technischen Verarbeitung von Gasen und Flüssigkeiten. Bei mineralölbasierten, insbesondere aber bei nachwachsenden Rohstoffen müssen die Eingangsstoffe im Hinblick auf den jeweiligen Kernprozess einer Verfahrenskette jeweils optimal konditioniert werden, um sowohl die Eingangsbedingungen für diesen Kernprozess und damit auch dessen Performance als auch die Qualität der Endprodukte, möglichst ohne komplexen Regelungsaufwand, gleichbleibend konstant zu halten.

Der vorliegende Beitrag zeigt, wie durch den Einsatz von Matrizenpressen die Eigenschaften von Schüttgütern generell so verändert werden können, dass nachgeschaltete Verfahrensschritte profitieren. Anhand einiger Beispiele werden Einsatzmöglichkeiten von Flachmatrizenpressen bei der Herstellung von Compounds vorgestellt.

Abstract

Physically and chemically closely defined mono-components with consistently uniform properties are rarely available for the processing of solids. This is far more likely the case when gases and liquids are processed technically. In case of mineral oil-based, but particularly in case of renewable raw materials, the input products must be conditioned optimally with regard to the respective core process of a process chain, in order to keep both the input conditions for this core process and thus its performance and the quality of the final products at the same constant level, if possible without sophisticated control systems.

This paper shows how the properties of bulk materials in general can be altered through the use of die presses so that downstream process steps benefit. On the basis of several examples, the possible applications of flat die presses in the production of compounds are presented.

1. Unerwünschte Schüttguteigenschaften

Probleme bei der Auslegung und bei der Durchführung von Feststoffprozessen, wie beispielsweise einem Extrusionsverfahren als Kernprozess, können dann auftreten, wenn die Zusammensetzung der eingesetzten Feststoffe hinsichtlich Art, Dichte und Partikelgröße recht heterogen bzw. zeitlich stark schwankend ist und/oder wenn die dem Kernprozess zugeführten Produkte stark schwankende Feuchten, sehr geringe Schüttdichten, einen hohen Anteil an Feinststoffen und damit oft verbunden eine hohe Neigung zu Verklebungen und Verklumpungen aufweisen. Insbesondere die letztgenannten Eigenschaften führen zu Problemen beim Dosieren, Mischen, Fördern und Lagern (hier vor allem beim Austrag aus Silos) oder machen diese Prozessschritte unmöglich. Ein hoher Anteil von Feinstpartikeln kleiner 300 µm kann außerdem zu einem erhöhten Explosionsrisiko führen. Produkte mit sehr geringen Dichten erfordern darüber hinaus in der Regel eine platzgreifende Maschinen- und Anlagenausstattung.

2. Granulation als Lösungsansatz

Um die oben angeführten unerwünschten Schüttguteigenschaften zu verbessern, bietet die Feststoffverfahrenstechnik im Wesentlichen drei Möglichkeiten: die Aufbaugranulation, das Brikettieren (Stück-Pressgranulation) oder die Pelletierung unter Druck (Strang-Pressgranulation).

Während die Aufbaugranulation unter Zusatz eines flüssigen Bindemittels und ohne Anwendung von äußeren Druckgradienten für die Verarbeitung pulverförmiger Feststoffe in den Bereichen Pharmazie und Lebensmitteltechnik eingesetzt wird, handelt es sich bei der Pressgranulation um eine Technologie, bei der, unter teils erheblichen Drücken von mehreren hundert bar, Feststoffe und Feststoffmischungen, wie sie insbesondere bei der Herstellung von WPC – Materialen oder auch bei der Verarbeitung von Kunststoff - / Glasfasermixturen vorliegen, erfolgreich verarbeitet werden können. Dabei werden intermolekulare Kräfte aktiviert, die in der Regel die Zugabe eines zusätzlichen Binders überflüssig machen. Die Brikettierung wird vornehmlich zur Herstellung großdimensionierter Presskörper, zum Beispiel Kohlebriketts oder Briketts aus Sägespänen, eingesetzt. Für die Herstellung zylindrischer, extrem bruch- und abriebstabiler Pellets mit Durchmessern von etwa zwei bis 20 Millimetern, haben sich Matrizenpressen, für Produkte mit geringen Schüttdichten, insbesondere Flachmatrizenpressen, bewährt.

Dieser Maschinentyp wird zur Herstellung von Pellets in den Bereichen Mischfutter für Landtiere aller Art, Fischfutter, Lebensmittel, Energieträger aus Holz, Stroh und anderen Seiten-

strömen der Agrarindustrie, Müll, Klärschlamm und mehr als tausend anderen Produkten eingesetzt.

3. Funktionsweise von Flachmatrizenpressen

Aufbau und Wirkungsweise einer Flachmatrizenpresse lassen sich anhand von Bild 1 erklären. Bild 2 zeigt etwas detaillierter die Hauptwerkzeuge der Matrizenpresse, nämlich zum einen den Kollerkopf mit den Kollern, zum anderen die Matrize, in diesem Falle die tellerförmig geformte Flachmatrize.

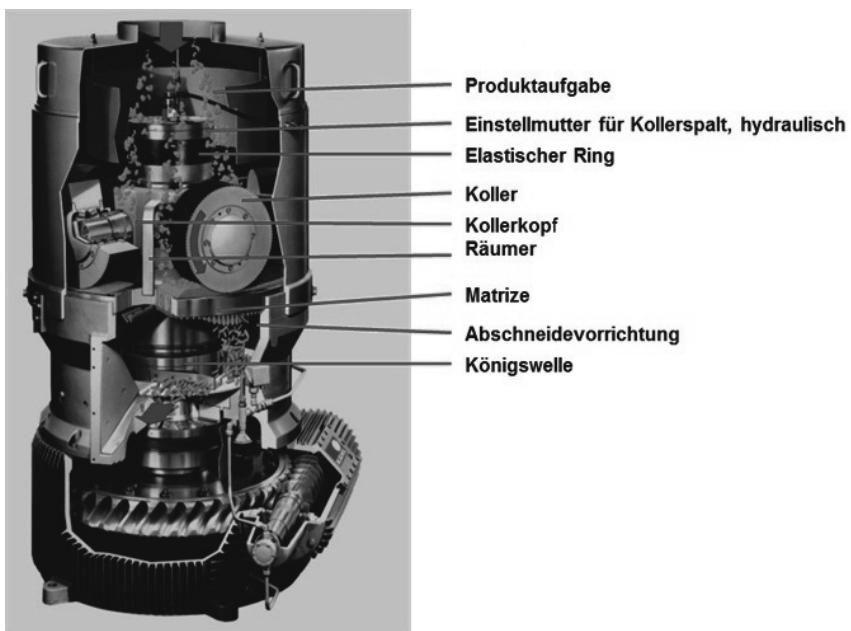


Bild 1: Aufbau und Wirkungsweise einer Flachmatrizenpresse [1]

Mittels der über der Matrize abrollenden Koller werden die für die Pelletierung nötigen Axialkräfte auf das zu verdichtende Material übertragen. Die Verdichtung selbst erfolgt aufgrund von Wandschubspannungen, die auf das Material einwirken, im Inneren der Presskanäle. Die Presskanäle, deren Geometrie an das jeweils zu pelletierende Material angepasst ist, sind wesentlicher Teil der Matrize. Der Überrollvorgang ist systematisch in Bild 3 dargestellt.

Die - im Falle der Verarbeitung von Kunststoffen sowie Mischungen aus Kunststoffen und faserigen Beimischungen – in der Regel fein vermahlenen und vorgemischten Produkte werden von oben in den Pressraum dosiert. Je nach Produkt bildet sich ein Materialteppich aus, der von den Kollern überrollt und vorverdichtet wird (siehe Bild 3).

Produkt, welches anschließend in den Presskanal gelangt, erfährt eine Reibkraft aufgrund der Interaktion mit der Presskanalwand, wird dadurch abgebremst und anschließend - dies ist in Abhängigkeit von den physikalischen Eigenschaften von Produkt und Presskanal unterschiedlich – kompaktiert, vielfache auch angeschmolzen. Da die durch den Koller auf das Produkt übertragene Axialkraft die Reibkraft überkompenziert, wird der Materialpfropfen nach unten aus dem Presskanal als Endlosstrang herausgedrückt. Mittels verstellbarer Abschneider unterhalb der Matrize kann die Länge der Pellets eingestellt werden.



Bild 2: Kollerkopf mit Kollern, Matrize, Räumern einer Flachmatrizenpresse

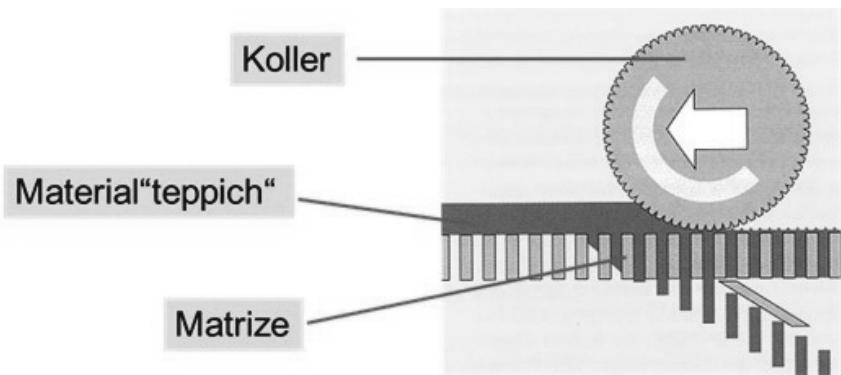


Bild 3: Prinzip der Pelletbildung in einer Flachmatrizenpresse

4. Anwendungsbeispiele aus dem Bereich Kunststoffverarbeitung

Aus dem Bereich der kunststoffverarbeitenden Industrie wurden bislang unter anderem folgende Aufgabenstellungen an die Agglomerationstechnik mittels Matrizenpressen herangezogen: Lösung von Handlingsproblemen durch Materialvereinheitlichung, Reduzierung der Staubanteile, Reduzierung der Lager – und Fördervolumina sowie Verbesserung der Fließ- und Mischeigenschaften. Darüber hinaus werden bei der Herstellung von Wood – Plastic - Composites mittels Pelletierung stabile Mischungen hergestellt, die anschließend in Extrudern weiter verarbeitet werden können.

Auch die Pelletierung von reinen Kunststoffadditiven (2–3 mm Pelletdurchmesser) bei Prozesstemperaturen unterhalb der jeweiligen Schmelzbereiche – möglichst ohne Wasserzugabe – gehört zu den Anwendungen der Agglomerationstechnik mittels Matrizenpressen. Kunststoffkomponenten, wie PP, PE, PVC oder Mischungen derselben, vermengt mit Glasfaseranteilen, Walnusssschalen, Papierabfällen, Holzfasern, Kautschuk, Gleitmitteln, Haftvermittlern, Farbstoffen, Harzen oder auch Zucker und vielen anderen Zusatzstoffen lassen sich erfolgreich mittels Matrizenpressen zu stabilen, frei fließenden und staubarmen Pellets verarbeiten, die dann in der Regel in nachgeschalteten Zweiwellenextrudern beispielsweise in Profilteile umgewandelt werden.

Bild 4 zeigt beispielhaft Pellets, die aus einem Gemisch aus Kunststoffabfällen hergestellt wurden.

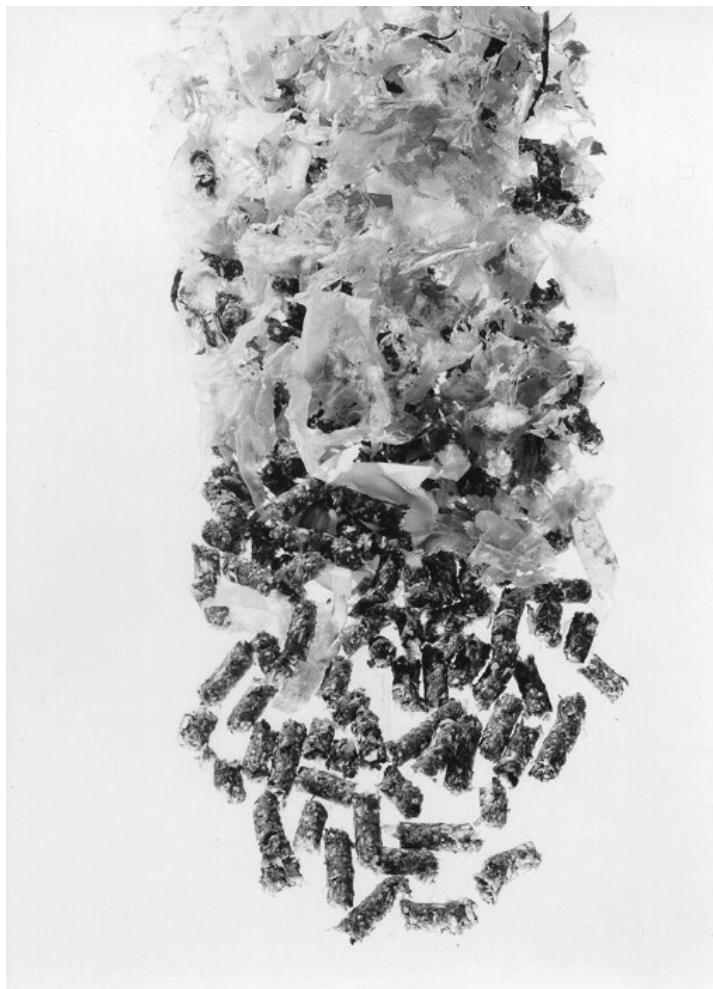


Bild 4: Mischkunststoff - Pellets

Pelletpressen können einem Extruder auch nachgeschaltet sein, wie folgende Einsatzmöglichkeit zeigt: Die in einem Extruder vorbehandelte Materialmischung, bestehend aus Kunststoffen, denen sowohl Glasfasern als auch biogene Komponenten zugegeben werden können, wird am Extruderausgang – beispielsweise durch Luftkühlung - lediglich auf eine Temperatur abgekühlt, bei der das Material zu erhärten beginnt. Anschließend wird das etwas mehr als 100 °C heiße Material einer Pelletpresse zugeführt, wo die eigentliche Formung zu definierten Pellets erfolgt.

Es hat sich gezeigt, dass durch die Anwendung dieses schonenden zweistufigen Verfahrens die Durchsatzleistung der Extruderlinie im Vergleich zu einem konventionellen Verfahren annähernd verdoppelt werden konnte [2].

Bild 5 zeigt eine Pelletierlinie (Pressentyp 38-600) im Aufbau mit einer Durchsatzleistung von etwa 500 kg/h. Verarbeitet werden dort etwa, auf die Einwaage bezogen, 2/3 Schnipsel aus Getränkekartons und 1/3 Randabschnitte von PE – Folien. Voraussetzung für eine erfolgreiche Verarbeitung ist eine Mischfeuchte vor der Pelletierung von weniger als 6 %. Die so hergestellten Pellets mit einem Durchmesser von vier Millimetern werden pneumatisch abtransportiert und dabei gleichzeitig herunter gekühlt. Anschließend werden die Pellets in Spritzgußmaschinen weiter verarbeitet.



Bild 5: Pressenlinie 38–600 zur Herstellung von Pellets aus Kartonage/Kunststoff-Gemischen

Bild 6 zeigt eine Maschine des Typs 38-780 im Einsatz. Hier werden Kunststoffadditive, in diesem Falle pulverförmige Ca – Zn – Stabilisatoren, bei einer Produktionsleistung von etwa 800 kg/h, zu 3 mm – Pellets verarbeitet. Die Pelletierung erfolgt im Hinblick auf die nachfolgende Extrudierung der Pellets trocken.



Bild 6: Pelletherstellung aus pulverförmigen Kunststoffadditiven

- [1] www.kahl.de
- [2] DEP 06 025 831

Anforderung und Herausforderung beim Fördern in der chemischen Industrie

Dipl.-Ing. **D. Silbernagel**, Dipl.-Ing. **H. Wolf**,
BASF SE, Solids Handling, Ludwigshafen

Kurzfassung

Nicht nur in der Compoundierung von Kunststoffen sondern auch in chemischen Prozessen wie der Herstellung von Katalysatoren, Pflanzenschutzmitteln, Pigmenten, Waschmittel-tergenzien oder im Futtermittelbereich spielt die homogene und verlässliche Zuführung der festen Einsatzstoffe zur Erzielung der gewünschten Produktqualität eine bedeutende Rolle. Gerade beim Einsetzen mehrerer Komponenten bzw. schlecht fließenden Systemen, können Phänomene wie Entmischung bzw. Brückenbildung den Produktionsprozess erheblich stören.

Daher spielt die Auswahl eines geeigneten Transport- und Lagersystems zur Vermeidung dieser Phänomene eine bedeutende Rolle. Die jeweiligen Vor- und Nachteile der unterschiedlich einsetzbaren Systeme aus dem Bereich der pneumatischen und mechanischen Förderung werden vorgestellt und mögliche Lösungsansätze vorgestellt.

1. Auswahl eines geeigneten Förder- bzw. Dosiersystems

Bei der Auswahl eines geeigneten Förderverfahrens für ein bestimmtes Schüttgut sind neben den Prozessrandbedingungen wie Förderlänge (horizontal, vertikal), gewünschter Massenstrom und dessen Genauigkeit auch die Produkteigenschaften (Fließfähigkeit, Adhäsion, Härte, Kornform, Schmelztemperatur) und die gewünschten Förderbedingungen (staubfrei / -arm, ohne Bruch / Abrieb, unter Inertbedingungen bzw. feuchtigkeitsfrei, sowie notwendiger Containmentgrad) von zentraler Bedeutung.

Bei längeren Förderstrecken und einer Kombination aus vertikaler und horizontaler Förderung wird in der Regel auf die pneumatische Förderung zurückgegriffen. Durch die dabei auftretenden hohen Geschwindigkeiten ist je nach Produktart allerdings mit Abrieb / Bruch bei den Partikeln sowie Verschleiß bei den Rohleitungen zu rechnen (Abrieb und Bruch ist proportional zur 2-5 Potenz der Fördergeschwindigkeit [1]). Dies kann durch den Übergang von Flug- zur Dichtstromförderung (>12-15 m/s auf 2-10 m/s) deutlich reduziert werden, allerdings sind nicht alle Stoffsysteme für die Dichtstromförderung geeignet. Durch Systeme mit internem oder externem Bypass lässt sich die Anwendungsbreite der Dichtstromförderung deutlich erhöhen. Dies kommt vor allem bei Prozessen zum Einsatz, in denen die Re-

duktion des Abriebs (Produktstaub) von zentraler Bedeutung ist. Die Eignung für diese Art der Förderung ist allerdings immer noch experimentell durch Pilotversuche abzusichern. Ein weiterer Vorteil der pneumatischen Förderung ist die geschlossene Ausführung, welche auch den Transport unter Inertbedingungen bzw. Trockenluft ermöglicht und Produktaustritt während des Betriebs ausschließt. Allerdings sind die Betriebskosten aufgrund des deutlich höheren spezifischen Energieverbrauchs (Faktor 3 bis >20) gegenüber der mechanischen Förderung höher anzusetzen.

Die Schneckenförderung ist aufgrund der Bandbreite der zu fördernden Materialien (von wenigen Mikrometern bis mehreren Zentimetern, von freifließend bis kohäsiv / klebrig), der potentiell geschlossenen Ausführung (Inertisierung, Containment) und der Integrierbarkeit weitere Prozessschritte (Mischung, Entgasung, Wärmetauscherfunktion) die am häufigsten eingesetzte mechanische Förderermethode. In Kombination mit Wägezellen ist sie auch ideal zur genauen Dosierung von Stoffen verwendbar (Differentialdosierwaage). Durch ineinander greifende Schneckenwendeln bei Doppelschnecken, lassen sich auch schwierigste Schüttgüter (Pasten, feuchte Schüttgüter) fördern, da durch die Ausführung eine Selbstreinigung und Zwangsförderung gewährleistet wird. Durch die Wahl der Schneckenwendelgeometrie lässt sich ebenfalls eine große Bandbreite an Schüttgütern verlässlich fördern (Bandwendel mit und ohne Kern für kohäsive klebrige Materialien, Paddelschnecke für zusätzliche Mischwirkung, Vollblatt für gutfließfähige bis schießende Materialien). Nachteilig sind lediglich die relativ kurzen Förderstrecken, die nicht vollständige Restentleerung und die mechanische Beanspruchung der Partikel durch Scherung zwischen Schneckenwendel und Gehäuse, welches die Verwendbarkeit für sehr abriebs- und bruchempfindliche Produkte ausschließt.

Daher kommen für sehr abriebs- und bruchempfindliche Produkte schonendere Förderungen wie die Vibrationsförderung (primär horizontal) oder Becherwerke (vertikal) in Frage, welche die Partikelbelastung minimieren. Gleichermaßen gilt auch für das Förderband. Bei den letztgenannten Technologien muss hinsichtlich des erreichbaren Containmentgrads und der geschlossen Ausführung allerdings Abstriche gemacht werden.

2. Dosieren von Pasten und feuchten Schüttgütern

Bei der Dosierung von Pasten und feuchten Schüttgütern kommt es aufgrund der höheren Kohäsion und Adhäsion und somit sehr schlechten Fließeigenschaften deutlich häufiger zu Problemen bei der Lagerung und Förderung dieser innerhalb des Produktionsprozesses. So sind Brückenbildung durch die schlechte Fließfähigkeit, aber auch tote Zonen in Silos und Pufferbehältern (Zonen ohne Produktbewegung) sowie Zeitverfestigung des Produktes ein

häufig auftretendes Problem. Durch eine lokale Abtrocknung – ggf. noch kombiniert mit der Kristallisation und somit Feststoffbrückenbildung zwischen Partikeln durch gelöste Substanzen - kann das Material Verbacken und somit den Förderquerschnitt bis zur Verstopfung verjüngen. Des Weiteren können sich lösende größere Agglomerate bzw. Klumpen für Probleme im Prozess sorgen. Je nach Anwendungsfall muss eine individuelle, an den Prozess angepasste Lösung erarbeitet werden (Kapazität, Puffervolumina, Verweilzeiten,...). In der Regel muss das feuchte Produkt in Behältern mit einer Austragshilfe, die den kompletten Querschnitt aktiviert, gelagert / gepuffert werden, um den Austrag des Materials gewährleisten zu können. Je nach Produkteigenschaften ist ein Schwing- oder Vibrationsboden ausreichend. Für die schlechter fließenden und stärker zur Verbackung neigenden Materialien muss auf einen Bunker mit Vollaustrag durch Rührwerk, Schneckenboden oder ähnlichem zurückgegriffen werden. Förderleitungen und Zuführschächte können durch flexible Bauweise (Kunststoff, Elastomer) mit effizienten Walk- oder Vibrationseinrichtungen ausgestattet werden, welche massive Anbackungen im Inneren reduzieren bzw. vermeiden und verfestigtes / verbackenes Material wieder in Bewegung setzen. Außerdem werden dadurch potentielle Totzonen in Zwangsbewegung versetzt und somit einer stationären Verbackung entgegengewirkt.

Kommt es in Zuführschächten zur Brückebildung bzw. Ausbildung von toten Zonen kann alternativ zu flexiblen Leitungen und Behältern auch durch Einsatz eines mechanischen Rührwerks die Aktivierung des Materials im Inneren ermöglicht werden.

Falls es lediglich um die Vermeidung von Wandbelägen geht, welche mit zunehmender Betriebsdauer weiter anwachsen könnten, kann der Einsatz einer Anti-Haftbeschichtung Abhilfe schaffen. Die zu wählende Beschichtung kann nicht a priori ausgewählt werden, sondern muss durch Anwendungstests im Betrieb / Labor in Erfahrung gebracht werden. Bei sehr abrasiven Produkte sowie Produkten bei denen schon geringfügige Mengen an Kontaminationen nicht erlaubt sind, scheidet diese Art der Prozessoptimierung jedoch aus.

3. Dosierung von vorgemischten Multikomponenten-Systemen

Im Zuge der Prozessierung (Förderung, Lagerung und Dosierung) von vorgemischten Multi-Komponentensystemen besteht oftmals die größte Gefahr in der Entmischung dieser Systeme. Dies verursacht Schwankungen in der Produktzusammensetzung und somit der schlussendlichen Produktqualität und kann auch zu einer instabilen Prozessführung beitragen.

Die Entmischung der Komponenten kann durch eine unterschiedliche Partikelgröße, -form, -dichte, -rauhigkeit induziert sein. In der Literatur sind diverse Einzelmechanismen beschrieben:

ben [2], welche Entmischung hervorrufen können. Allerdings treten in realen Prozessen die Entmischungsmechanismen in einer Vielzahl der Fälle nicht einzeln auf, sondern es kommen im jeweiligen Prozessschritt mehrere Mechanismen zum Tragen. Daher wurden in der BASF in Zusammenarbeit mit der Firma Jenike und Johanson sowie durch Modifikation bestehender Entmischungstester für die relevanten Prozessschritte dezidierte Entmischungstester entwickelt (siehe Bild 1), um die Entmischungsneigung einer Schüttgutmischung / eines Schüttguts quantifizieren zu können (Lagerung, pneumatische Förderung, Schurrenförderung, und den Transport).

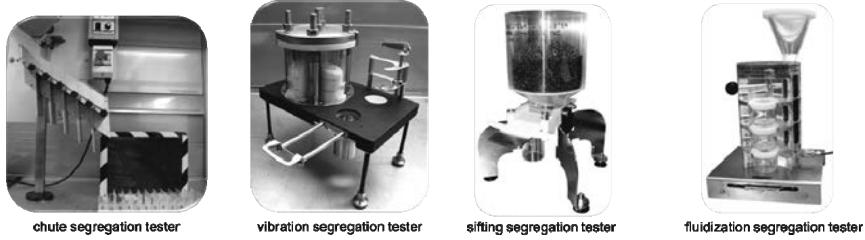


Bild 1: Entmischungstester zur Charakterisierung der Entmischungsneigung bei ausgewählten Prozessschritten

Falls die Entmischungsneigung als problematisch für den jeweiligen Prozessschritt eingestuft werden sollte, können prozessseitig aber auch produktseitig Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Auf Prozessseite kann bei einer Entmischung im Silo, z.B. durch Böschungswinkelentmischung, die Verwendung eines Massenflusssilos Abhilfe schaffen [3,4]. Durch eine Modifikation des Produkteintrags in das Silo (Anzahl und Positionierung der Eintragsstützen, Einsatz von Verteilern) kann Entmischung ebenfalls entgegengewirkt werden.

Als Rückfallposition besteht schlussendlich noch die Möglichkeit die Homogenität der Mischung durch den Einsatz eines / mehrerer Mischer direkt vor der Prozessierung zu gewährleisten.

Produktseitig lässt sich durch eine Agglomeration (z.B. Feuchtgranulierung) die Entmischungsneigung eliminieren und auch durch Modifikation der Fließeigenschaften, wie z.B. der Erhöhung der Kohäsion durch Feuchtezugabe, z.B. Wasser oder Öl, die Entmischungsneigung deutlich reduzieren [5].

- [1] David Mills: „Pneumatic Conveying Design Guide“, Elsevier Butterworth-Heinemann 2004
- [2] Jerry R. Johanson: “Predicting Segregation of Bimodal Particle Mixtures Using the Flow Properties of Bulk Solids”, Pharmaceutical Technology Europe, 1996, publ. No. 0124
- [3] Dietmar Schulze: „Pulver und Schüttgüter“, Springer Verlag, Berlin Heidelberg , 2009
- [4] Andrew W. Jenike: “Storage and flow of solids”, Bull. No. 123 (1964)
- [5] Lyn Bates: “Ten Key Steps to Counter Segregation in Bulk Solids Handling”

Mischen und Homogenisieren in der Compoundierung

Gleichmäßige Eigenschaften der Ausgangsstoffe und Compounds sorgen für hohe Produktqualität

Dr.-Ing. H. Wilms, Dipl.-Ing. H. Schneider,
Zeppelin Systems GmbH, Friedrichshafen

Kurzfassung

Die Kunststoff-Compoundierung ist heute ein Hochleistungsprozess, bei dem schwankende Eigenschaften der Eingangsstoffe unmittelbar einen Einfluss auf die Produktqualität und die Anlagenkapazität haben. Gleichmäßige Eigenschaften der eingesetzten Materialien, in der Regel in Form von Schüttgütern, sind deshalb unabdingbar. Die Möglichkeiten zum Mischen und Vergleichmäßigen der Produkteigenschaften großer Schüttgutmengen, insbesondere in Mischsilos, werden beschrieben.

Abstract

Plastic Compounding is a high performance process. Variation of properties of the components, mainly bulk solids, thus has a direct impact on product quality and throughput. Therefore, homogeneous and consistent properties are required. Processes for blending and homogenization of large bulk solids quantities, especially in blending silos are presented.

1. Einleitung

Der Prozess der Compoundierung in der Kunststofftechnik umfasst die Zusammenführung unterschiedlicher Kunststoffe, Additive, Farbstoffe und Modifizierer in einem Schmelzeprozess und die anschließende Formgebung, meist zunächst zu Granulaten. Alle diese Ausgangsstoffe unterliegen Schwankungen ihrer Eigenschaften aus ihrem jeweiligen Herstellungsprozess. Diese Schwankungen bewirken zwangsläufig Eigenschafts-Schwankungen in dem fertigen Compound, können aber auch zu Störungen im Prozessablauf führen und somit die Produktionskapazität beeinträchtigen.

Die Bereitstellung von gleichbleibenden Produkteigenschaften kennzeichnet somit einen stabilen Compoundierprozess. Das in diesem Zusammenhang vermutlich bekannteste Beispiel sind Lego-Steine, die über Generationen hinweg immer die gleichen Eigenschaften (Farbe) haben [1]. Derartige Herstellungsverfahren stellen somit extrem hohe Anforderungen

an die gleichbleibende Qualität der Ausgangsprodukte, an die Genauigkeit der Dosierung und Mischung sowie an die Konsistenz des Aufbereitungsprozesses. Die Homogenität zielt hierbei insbesondere auf die chemischen, mechanischen und optischen Eigenschaften ab.

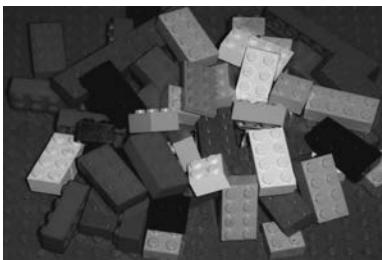


Bild 1: Lego-Steine als Beispiel nachhaltiger Homogenitätsanforderungen

2. Prozesskette

Die Prozesskette der Compoundierung umfasst zahlreiche Einzelschritte und beginnt bereits bei der Herstellung der Polymere. In Bild 2 ist die gesamte Prozesskette vereinfacht dargestellt.

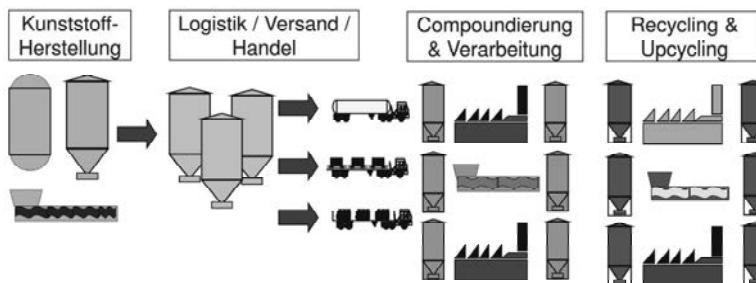


Bild 2: Prozesskette der Kunststoff-Herstellung, Compoundierung, Verarbeitung und Wiederaufbereitung

Auffällig ist die große Anzahl an Lagerprozessen in Silos in Bild 2. Aus diesem Grund liegt zunächst das Augenmerk auf den Mischprozessen, die in Silos erzielt werden können. Darüber hinaus gibt es entlang der Prozesskette zahlreiche weitere Schritte und Apparate, in denen Mischprozesse erfolgen. Dabei gibt es sowohl Prozessstufen, in denen Schwankungen der Kunststoffeigenschaften vergleichmäßigt werden als auch solche, in denen weitere Komponenten mit dem Kunststoff vermischt werden.

Die ersten Schritte zur Erzielung einer gleichbleibenden Qualität werden dabei bereits im Reaktor gemacht, gefolgt vom Pulver-Handling und der Additiv-Beimischung vor der Granu-

lierung im Extruder und der danach erfolgenden Homogenisierung in Mischsilos. Der nächste Schritt der Schüttgut-Logistik umfasst Silolagerung, Förder-, Aufbereitungs-, Transport- und Verpackungsvorgänge und wird häufig von Spediteuren oder Händlern durchgeführt. Danach erfolgen im Rahmen der Compoundierung erneut Lager-, Förder-, und Dosier- und Mischvorgänge, bevor wiederum in der Schmelze ein Granulat entsteht, das nach ähnlichen logistischen Prozessschritten wie seine Ausgangsprodukte und einer weiteren Aufbereitung beim Verarbeiter zum endgültigen Produkt umgeformt wird. Am Ende des Produktlebenszyklus wird der Kunststoff dann wieder in Aufbereitungsschritten recycelt und einer erneuten Verwendung zugeführt.

Diese allgemeine Prozesskette kann sich Produkt- und Prozess-spezifisch anders darstellen, umfasst aber immer zahlreiche Schritte, in denen Mischaufgaben bewältigt und - genauso wichtig - Entmischungen verhindert werden müssen. Mischvorgänge treten in dieser Prozesskette in allen dargestellten Apparaten auf – teilweise gewollt und gezielt, wie z.B. im Mischsilo, Mischer, Compounder oder Extruder, oder unkontrolliert in Silos, Förder- und Transportvorgängen sowie Dosiergeräten.

Prinzipiell besteht zwischen den Begriffen Mischen und Homogenisieren kein Unterschied: Vom Mischen spricht man, wenn es um die gleichmäßige Verteilung einer Komponenten in einer anderen geht, während man den Begriff Homogenisieren für die Vergleichmäßigung einer Eigenschaft einer Mischung verwendet. In beiden Fällen sollen gezogene Proben bestimmten statistischen Kriterien entsprechen. Dabei sind bei der Übertragung von Messergebnissen aus dem Labor in die industrielle Großausführung bestimmte Kriterien zu beachten [2].

Gegenspieler zum Homogenisierung oder Mischen sind Entmischungen - vornehmlich nach mechanischen Eigenschaften wie der Teilchengröße - beispielsweise durch Abrollen auf einer Böschung. Neben der Entmischung nach der Teilchengröße kann die Entmischung auch nach dem Teilchengewicht, der Teilchendichte, der Teilchenform oder der Oberflächenrauigkeit erfolgen. Bild 3 zeigt unterschiedliche Entmischungsmechanismen, dargestellt am Beispiel einer Entmischung nach der Teilchengröße [2,5].

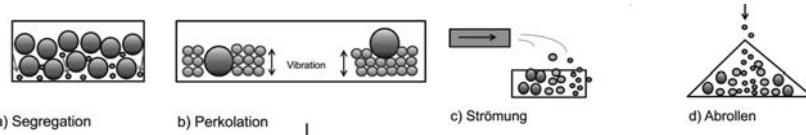


Bild 3: Mechanismen der Entmischung

3. Mischvorgänge in Lagersilos

Mischprozesse gehen immer mit einer Spreizung der Verweilzeitverteilung einher. Somit stellen auch Lagersilos einen Mischartapparat dar, denn auch Lagersilos verbreitern die Verweilzeitverteilung. Beim Massenflusssilo ergibt sich eine geringfügige Verbreiterung der Verweilzeitverteilung aus den Geschwindigkeitsunterschieden im Trichter und am Schüttkegel; bei Kernflusssilos entsteht eine nicht vorhersagbare Verbreiterung der Verweilzeitverteilung aufgrund der toten Zonen, wie Bild 4 zeigt. Soll es zu kalkulierbaren und reproduzierbaren Verweilzeitverteilungen kommen, beispielsweise zur Abgrenzung oder Rückverfolgung von Chargen, müssen Kernflusssilos auf jeden Fall vermieden werden. Dies gilt auch für kleinere Zwischenbehälter. Massenflusssilos müssen auf der Basis der Fließeigenschaften speziell für dieses Fließprofil ausgelegt werden [3].

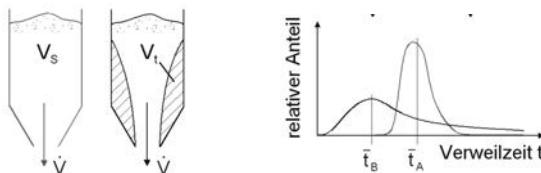


Bild 4: Veränderung der Verweilzeitverteilung in Silos

Der Einfluss der Vermischung bei der Entleerung eines Massenflusssilos wird aus Bild 5 ersichtlich: Die Bildserie im linken Teil des Bildes verdeutlicht, dass im Zylinder das Schüttgut schichtenweise absinkt und dort somit keine Vermischung entsteht, während im rechten Teil des Bildes die einzelnen Schichten bereits mehr vermischt sind, weil es bei der Entleerung im Trichter zu unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten kommt. Somit gibt es auch in Massenflusssilos einen Mischeffekt, allerdings einen geringen, weil es in diesem Fall im Trichter nur zu einer Verweilzeitverbreiterung in der Größenordnung von rund 15% kommt [4]. Dieser Effekt kann allerdings in Abhängigkeit der Silogeometrie und Fließeigenschaften auch größer oder kleiner sein.



Bild 5: Verweilzeitverteilung bei der Entleerung eines Massenflusssilos

Bei Kernflusssilos mit einer sehr viel breiteren Verweilzeitverteilung treten stärkere, aber nicht reproduzierbare Mischeffekte auf. Entsprechend der in Bild 2 dargestellten Prozesskette kommt es an zahlreichen Stellen zu Zwischenlagerungen, beispielsweise auch in Dosier- oder Zwischenbehältern die je nach Fließprofil zu gewollten oder nicht gewollten Mischvorgängen führen.

Im Zusammenhang mit der Compoundierung reichen die Fließeigenschaften der zu mischenden Schüttgüter von freiließenden Granulaten bis zu kohäsiven Pulvern und faserigen Zuschlagstoffen. Hierfür werden Michsilos mit statischen Einbauten, bewegten Mischelementen sowie mechanische Mischer eingesetzt.

4. Einteilung von Mischern nach Bauarten

Eine systematische Übersicht über Mischerbauarten ist in Bild 6 dargestellt [2]. Üblicherweise bezieht sich eine derartige Übersicht auf Mischer mit bewegten Mischwerkzeugen bzw. mit einem bewegten Mischbehälter. Hierbei ist die Froude-Zahl $Fr = Ru^2/g$ das ordnende Merkmal – von langsamer, wenig intensiver Fallbewegung über den Schubmischer bis zum Intensivmischer

Bezeichnung	Aggregate- und Apparatetyp	Bewegung gekennzeichnet durch	$Fr = Ru^2/g$	Baugröße in m^3	Spez. Leistung in kW/m^3
Freifallmischer	 	freier Fall	<1	<2	<1
Schubmischer	 	Schub	<1	<8	3 - 5
Fluidmischer	 	Schub, Fliehkraft	>1	<30	10
Intensivmischer	 	Fliehkraft	>>1	<1,5	20
Silo-Mischer	 	Schwerkraft, Pneumatik	Nicht definiert	<2000	Nicht definiert

Bild 6: Klassifizierung von Mischer-Bauarten

Im Bereich der Kunststoff-Industrie spielen darüber hinaus Mischesilos [6] mit einem Volumen zwischen 20 und 2000 m^3 eine große Rolle. Bei Mischesilos mit statischen Einbauten ist dementsprechend keine Fr -Zahl definiert. Die Bedeutung von Mischesilos mit statischen Einbauten steigt gegenüber früher eingesetzten Mischbehältern mit Schnecken. Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt bei diesen Mischesilos.

5. Mischsilos in der Compoundierung-Prozesskette

Bei den Mischsilos gibt es zahlreiche Varianten, die im Wesentlichen in der vorstehenden Klassifizierung zusammengefasst werden können, die auch schon die wesentlichen Einsatzbereiche der einzelnen Mischsiloarten verdeutlicht [6].

Homogenisierungssystem		Fließbett-mischer	Strohl-mischer	Silo-schnecken-mischer	Kegel-schnecken-mischer	Gravitations-mischer	Trichter-mischer	Durchlauf-mischer
Bezeichnung								
frei fließendes Pulver 50µm < x < 500µm	+	○	+	+	+	+	+	(+)
frei fließendes Granulat 200µm < x < 500µm	○	○	○	○	+	+	+	+
kohäsive Schüttgüter	-	+	+	+	(+)	+	+	-
Baugrößen bis (maximal) m ³	2000	200	100	60	300	1000	2500	
Energieeinleitung	pneumatisch		mechanisch		Schwerkraft		Schwerkraft	
Spezifische Mischenergie kWh/t	1 - 2	2 - 7	2 - 10		1 - 3		< 1	

* geeignet (+) bedingt geeignet - ungeeignet ○ unwirtschaftlich

Bild 7: Übersicht über Mischsilos

Mischsilos werden eingesetzt, um entweder kurz- bis langfristige Schwankungen bestimmter Produkteigenschaften auszugleichen oder um Übergangsschärgen beim Wechsel von einer Produktqualität zu einer anderen zu minimieren – letzteres mehr bei der Herstellung als bei der Compoundierung. Dementsprechend weisen Mischsilos im Vergleich zu mechanischen Mischern ein deutlich größeres Volumen von 5 – 2000 m³ auf.

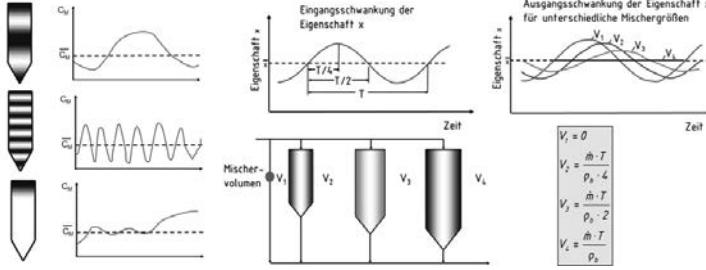


Bild 8: Aufgaben eines Mischsilos Bild 9: Einfluss des Mischsilo-volumens

Mischsilos werden eingesetzt, um entweder kurz- bis langfristige Schwankungen bestimmter Produkteigenschaften auszugleichen oder um Übergangsschärgen beim Wechsel von einer Produktqualität zu einer anderen zu minimieren – letzteres mehr bei der Herstellung als bei

der Compoundierung. Dementsprechend weisen Mischsilos im Vergleich zu mechanischen Mischern ein deutlich größeres Volumen von 5 – 2000 m³ auf.

Die Mischaufgaben bei unterschiedlichen Schwankungen eines Eingangssignals sind in Bild 8 dargestellt. Zur Lösung dieser Aufgabenstellungen werden Mischsilos bei der Kunststoffherstellung sowie vor und nach bei der Compoundierung zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Produktqualität größerer Chargen eingesetzt. Auch bei der Endverarbeitung und beim Recycling kommen Mischsilos bei der Vergleichsmäßigung von unterschiedlichen Produkteneigenschaften unterschiedlicher Vorlieferanten zum Einsatz.

Die zu wählende Größe eines Mischsilo hängt primär von der Mischaufgabe und damit von Art der Schwankung ab, vergl. Bild 8. Ist das Volumen des Mischsilos kleiner als zur Aufnahme der Masse eines kompletten Schwankungszyklus erforderlich, dann kann auch das beste Mischsilo keine gleichbleibende Produktqualität erzielen, wie Bild 9 demonstriert. In der Realität wird man versuchen, das Mischsilovolume so zu wählen, dass das Volumen mehrerer Schwankungszyklen in das Mischsilo passen. Dazu können auch Simulationsrechnungen eingesetzt werden, die entweder auf Verweilzeitverteilungen [7] oder DEM-Simulationen [8] beruhen.

Mischsilos mit statischen Einbauen haben den Vorteil, dass sie kontinuierlich und diskontinuierlich betrieben werden können. Dabei ist jeweils auch noch eine Rezirkulation zur Verbesserung des Mischeffektes möglich, wie in Bild 10 veranschaulicht wird. Beim diskontinuierlichen Betrieb werden häufig 3 Mischsilos eingesetzt, von denen eines gefüllt, eines umgewälzt und eines entleert wird. Bild 11 zeigt diese Betriebsweise.

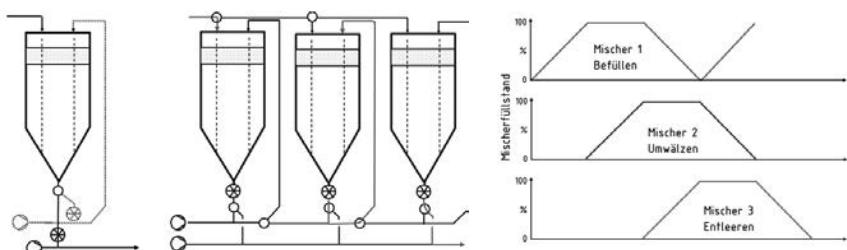


Bild 10: Kontinuierlicher und diskontinuierlicher Betrieb Bild 11: Sequentielle Umförderung

6. Bauarten von Mischsilos und Einsatzbeispiele

Die Grundprinzipien des Silomischens sind in Bild 12 dargestellt. Demnach wird die Energie zum Mischen entweder aus mechanischer Antriebsenergie, aus der Strömungsenergie oder aus der Schwerkraft bezogen.

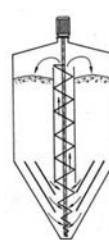
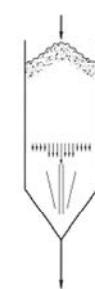
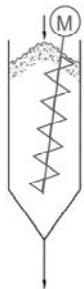


Bild 12: Grundprinzipien des Silomischens

Bild 13: Mechanische Mischsilos

Zu den mechanisch betriebenen Mischsilos (Bild 13) gehören die Kegelschneckenmischer (Nauta-Mischer) mit einer am Kegel entlang bewegten Schnecke und die Siloschneckenmischer mit einer vertikalen Mischnschnecke, die teilweise von einem Rohr umgeben sein kann. Der Einsatz dieser Mischer ist auf die Homogenisierung von schlechter fließenden Produkten und Mischungen aus Kunststoffen und Zuschlagstoffen vor der Compoundierung und – heute seltener – die Homogenisierung von PVC-Dryblends fokussiert. Probleme kann es bei mechanischen Mischsilos auch durch Produkterwärmung und Produktabrieb geben. Für die Homogenisierung von Compounds sind diese Mischer deshalb meist durch Schwerkraftmischsilos abgelöst worden, die weniger Energieeinsatz benötigen und zudem auch einfacher zu reinigen sind.

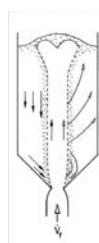


Bild 14: Pneumatische Mischsilos

Zu den pneumatischen Mischsilos (Bild 14) gehören Strahlmischer und Fließbettmischer. Während Fließbett-Mischsilos nur für fluidisierbare Schüttgüter und vornehmlich für feine Produkte wie PVC-Pulver eingesetzt werden, kommen Strahlmischer für schlechter fluidisierbare Schüttgüter zum Einsatz. Fließbettmischer werden vornehmlich zur Homogenisierung und Entgasung von PVC-Pulver eingesetzt. Strahlmischer werden eingesetzt zum Homogenisieren von Chargen gleichförmiger Schüttgüter, beispielsweise Granulaten vor oder nach der Compoundierung. Schüttgüter mit ungleicher Teilchengröße könnten sich bei der Wurf- und Fallbewegung entmischen. Strahlmischer benötigen aufgrund der Gasexpansion und der aufgewirbelten Schüttung ein großes Volumen. Mischsilos mit statischen Einbauten sind aus diesem Grund kostengünstiger und liefern ein gleich gutes Mischergebnis.

Die dritte Gruppe von Mischsilos sind die mit starren Einbauten. Diese Einbauten dienen dazu, die Verweilzeitverteilung bei Massenflusssilos zu verbreitern, indem entweder unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten durch Einbauten im Trichter erzeugt werden oder Schüttgut gleichzeitig aus unterschiedlichen Zonen im Silo über Mischrohre abgezogen wird. Entsprechende Varianten sind in Bild 15 gezeigt.

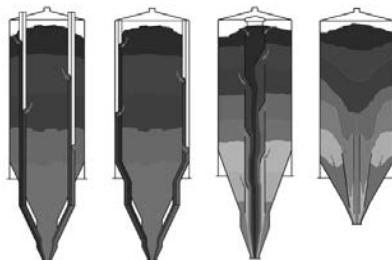


Bild 15: Schwerkraftfluss-Mischsilos

Nach der Herstellung von granulären Compounds kommen vornehmlich Schwerkraftfluss-Mischsilos mit rohr- oder trichterförmigen Einbauten zum Einsatz. Das Mischprinzip beruht darauf, dass durch das gleichzeitige Zusammenführen von Schüttgut aus unterschiedlichen Zonen im Silo eine breite Verweilzeitverteilung erzeugt wird und somit eine Vermischung erfolgt. Das gleichzeitige Abziehen erfolgt dabei über vertikal eingebaute Mischrohre, die in unterschiedlichen Höhen Schlucköffnungen aufweisen, in die dann das frei fließende Granulat einströmt. Am Auslauf werden die einzelnen Teilströme wieder zusammengeführt. Die Mischrohre können entweder im Zentrum des Mischsilos positioniert werden, direkt an der Wand befestigt sein oder ringförmig im Siloraum platziert werden. Durch den Einbau von Abweisdächern über den Schlucköffnungen können auch Schüttgutströme in unterschiedlichen Höhen in ein einzelnes, meist größeres und zentral angeordnetes Mischrohr realisiert

werden. Speziell für kohäsive Schüttgüter wurden die Trichtermischer entwickelt, deren Homogenisierung sich auf den Bereich des Trichtereinbaus und etwa einen Durchmesser darüber abspielt. Der Mischeffekt tritt bei Schwerkraftfluss-Mischsilos beim Abzug von Schüttgut auf. Zur Verbesserung der Mischwirkung kann eine Umwälzung erfolgen, so dass eine noch stärkere Verbreiterung der Verweilzeit erfolgen kann. Bei jedem Durchlauf lässt sich die Schwankungsbreite einer fluktuierenden Eigenschaft auf weniger als die Hälfte reduzieren und die Verweilzeitverteilung wird auf mehr als den doppelten Siloinhalt verbreitert. Bei Schüttgütern, die sich aufgrund ihrer Fließeigenschaften nicht zum Homogenisieren in Mischsilos mit relativ kleinen Rohreinbauten eignen, kann eine Verbreiterung der Verweilzeitverteilung auch durch unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten generiert werden, die durch trichterförmige Einbauten erreicht werden. Auch solche Mischsilos zeigen eine sehr gute Homogenisierungswirkung, wie die Versuchsergebnisse in Bild 16 zeigen. Ausgehend von einer Schichtenstruktur bei der Befüllung mit einer Markierschicht von 10% in der Mitte des Mischsilos, resultierend in einer Standardabweichung von 30%, ergibt sich beim Entleeren nach 1,5 bzw. 2,5 Umwälzungen eine Standardabweichung von lediglich 1,8 % bzw. 1,1 %. Häufig wird dies Mischergebnis durch ein Mischgütemaß als Verhältnis der Standardabweichung von Einlauf zu Auslauf charakterisiert. In diesem Fall beträgt das Mischgütemaß 17 bzw. 27.

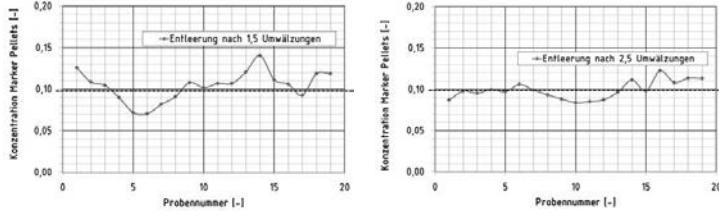


Bild 16: Ergebnisse von Mischversuchen mit einem Mischsilo mit Mischtrichter

Nachfolgend werden noch 2 Sonderformen von Schwerkraftfluss-Mischsilos beschrieben. In einem Fall wurde die Aufgabe gestellt, von einer Übergangscharge nie mehr als 10% in das Compound einzumischen. Die Aufgabe wurde derart gelöst, dass ein Zweikammersilo eingesetzt wurde, bei dem in der oberen, kleineren Kammer die Übergangscharge eingelagert wurde. Von dieser oberen Silokammer floss das Granulat in eine Mischkammer unterhalb der Hauptkammer, in der genau –wenn vorhanden– 10% zudosiert wurden. Diese Dosierung erfolgte über den Flächenanteil, den das Rohr aus der oberen Kammer in der Mischkammer abdeckte.

Eine andere, immer wieder eingesetzte Sonderform ist das Mehrkammersilo. Hierbei werden die einzelnen Silokammern nacheinander gefüllt und dann gleichzeitig Granulat aus allen Kammern abgezogen. Hierfür sind aufwändige Drehrohrverteiler bei der Befüllung erforderlich oder es wird eine Konstruktion mit internen Überlaufwehren und einer gemeinsamen Mischkammer gewählt.

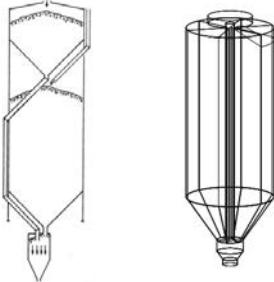


Bild 17: Restchargen-Einmischung und Mehrkammersilo

7. Zusammenfassung

Durch den Einsatz von Mischsilos kann dem Compoundeur und dem Verarbeiter ein homogener Kunststoff zur Verfügung gestellt werden, mit dem eine langfristig stabile Produktion in der Compoundierung und Verarbeitung zu realisieren ist. Eine weitere Homogenisierung erfolgt dann in den jeweiligen Prozessstufen noch in der Schmelze im Extruder. Unterschiedliche Betriebsweisen erlauben eine hohe Flexibilität. Bei der Auswahl des jeweils optimalen Mischsilos helfen Versuche im Technikum, wobei sowohl verfahrenstechnische als auch operative und finanzielle Gesichtspunkte zu betrachten sind.

8. Literaturangaben

- [1] Stein, A. Kunststoff-Klassiker im Kinderzimmer
Kunststoffe 106(2016), 5, 24-25
- [2] Dellmann, P.-G., Wilms, H. Mischtechnik für Schüttgüter, Bibliothek der Technik Bd. 372, Verlag Moderne Industrie, München, 2015
- [3] Wilms, H. Verfahrenstechnische und statische Aspekte der Siloauslegung
Chemie-Ingenieur-Technik 65(1993),3,284-292
- [4] Schneider, H. Die Berücksichtigung der Verweilzeitverteilung bei der verfahrenstechnischen Siloauslegung, GVC-Fachausschuss Agglomerations- und Schüttguttechnik, Tübingen, 14.03.2005
- [5] Kreis, H., Schneider, H., Wilms, H. Verbesserte Produktqualität durch geeignete Auswahl des Mischverfahrens, VDI-K-Tagung Aufbereitungstechnik, Nürnberg, 2015, 215-226
- [6] Wilms, H. Blending Silos – an Overview
Powder Handling & Processing 4(1992),3, 293-299
- [7] Schneider, H., Dau, G., Dürr, V., Ebert, F. Blending of Stochastic Fluctuating Bulk Materials in Gravity Mixers, In: Proceedings PARTEC 2001, Nürnberg, Germany, 27-29 March 2001
- [8] Kasina, V.P.R. et. al. DEM Modeling and Experiments on Granular Flow in Silos with Internals, CHoPS, Friedrichshafen, 2012

Simulation von Partikelströmungen mittels DEM anhand von Anwendungsbeispielen aus der industriellen Praxis

Dr.-Ing. R. Weiler, BASF SE, Ludwigshafen am Rhein

Kurzfassung

Die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) ist eine numerische Methode, mit der das Verhalten einer Ansammlung von Partikeln, dargestellt durch Scheiben oder Kugeln, beschrieben wird. So können die Wechselwirkungen von Partikeln untereinander sowie mit Apparateteilen dargestellt werden. Aufgrund des hohen Rechenaufwands bei DEM-Simulationen sind rechenzeitreduzierende Vereinfachungen notwendig. Letztere machen eine Kalibrierung der Modellschüttgüter notwendig, damit das Verhalten des Modellschüttguts dem des realen Schüttguts entspricht. Letztlich können auf diese Weise wertvolle Aussagen zur Apparate- und Prozessauslegung getroffen werden.

Neben einer kurzen Einführung in die Funktionsweise der Methode und der Kalibrierung von Schüttgütern werden verschiedene Beispielen aus der Praxis gegeben, in denen die DEM bereits erfolgreich einsetzbar ist. Abschließend wird auf zukünftige Herausforderungen der Methode eingegangen.

1. Beschreibung der Diskrete-Elemente-Methode (DEM)

Die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) ist eine numerische Methode, mit der das Verhalten einer Ansammlung von Partikeln, dargestellt durch Scheiben oder Kugeln, beschrieben wird [1]. Auf diese Weise können sowohl Wechselwirkungen zwischen Partikeln untereinander, als auch zwischen Partikeln und Apparateteilen, z. B. Einbauten oder Wänden, dargestellt werden. Die Methode berücksichtigt Partikel-Partikel- bzw. Partikel-Wand-Wechselwirkungen und berechnet auf dieser Basis das Verhalten des Schüttguts. Mit Hilfe der Ergebnisse solcher Simulationen können Kraftverläufe in ruhenden Schüttungen ermittelt und die Dynamik von Transportvorgängen beschrieben werden. Letzteres kann z. B. bei der Charakterisierung von Mischvorgängen anhand von Verweilzeitverteilungen geschehen. Ebenso kann die Krafteinwirkung von Partikeln auf Bauteile analysiert werden. Neben weiteren Partikel-Bauteil-Wechselwirkungen, wie z. B. Haftmechanismen, ist es auch möglich, die Beanspruchung von Partikeln und Partikelverbänden zu untersuchen.

Zur Berechnung der Partikelbewegungen werden zunächst die auf die Partikeln wirkenden Kräfte berechnet. So erhält man die Beschreibung der auf die Partikeln und Apparateteile

angreifenden Kräfte und Momente zu einem bestimmten Zeitpunkt. Im Anschluss werden die Newton'schen Bewegungsgleichungen integriert und das System über einen kleinen Zeitraum propagierte – die Partikeln werden bewegt. Diese beiden Schritte werden so lange wiederholt, bis die entsprechende Simulationsaufgabe gelöst ist.

Für eine praktikable Anwendung der DEM zur Simulation von industriell relevanten Apparaten ist zu beachten, dass ohne vereinfachende Annahmen die Simulation der Partikelbewegung sehr lange dauern würde. Dies liegt daran, dass solche Systeme oft mehrere Millionen sehr kleiner, oft nicht kugelförmiger Partikeln beinhalten. Dennoch liefert die DEM einen wertvollen Beitrag zur Analyse von verfahrenstechnischen Fragestellungen. Letztlich wird die Leistungsfähigkeit der Methode durch Forschungsarbeiten stetig weiterentwickelt. Einen Überblick über Entwicklungen auf dem Gebiet der DEM sowie eine Sammlung verschiedener Anwendungsbeispiele ist in [2] und [3] zu finden.

2. Bestimmung der Partikeleigenschaften durch Kalibrierung

Das Verhalten eines Schüttguts wird durch die vielen Eigenschaften der einzelnen Partikeln beeinflusst. So wird der makroskopische innere Reibwinkel des Schüttguts u. a. von der statischen Reibung, der Rollreibung und von Haftkräften zwischen den Kontaktpartnern auf der Partikelebene bestimmt. Die Form und Größe der einzelnen Partikeln des Schüttguts spielt hierbei ebenfalls eine Rolle. Diese Daten für die einzelnen Partikeln eines Schüttguts experimentell zu bestimmen ist mit erheblichem, für die Praxis nicht zweckmäßigen Aufwand verbunden. Einfacher ist es, dass in der Simulation verwendete Modellschüttgut anhand verschiedener, standardisierter Laborversuche, z. B. Scherzellenversuche, zu kalibrieren. Indem die Eigenschaften der Modellpartikeln in der Simulation so lange angepasst werden, bis das Verhalten des Schüttguts in der Simulation dem des Schüttguts in der Realität entspricht, werden die Modellpartikeln quasi „trainiert“ [4]. Danach kann die im Fokus stehende verfahrenstechnische Fragestellung untersucht werden.

3. Anwendungsbeispiele der DEM aus der Praxis

Die DEM kann zur Klärung verschiedener Problemstellungen angewendet werden. Die Aussagekraft hängt dabei prinzipiell von der Güte der zuvor durchgeführten Kalibrierung der Modellpartikeln und den resultierenden Simulationsparametern ab. Letztlich sind jedoch wertvolle Einblicke in Prozesse erzielbar, von denen einige nachfolgend exemplarisch beschrieben werden. Die DEM kann hier zum einen experimentellen Laboraufwand reduzieren, zum anderen kann sie zusätzlich Einblicke in das Schüttgut gewähren, die experimentell oft nicht erfassbar sind.

Charakterisierung von Mischapparaten mit Verweilzeitverteilungen

Bei der Charakterisierung von Mischapparaten wie z. B. Schwerkraftmischern bietet die DEM den Vorteil u. a. ohne aufwendige Messtechnik, Produktionsausfall oder Verwendung von Tracerpartikeln, welche das Produkt verunreinigen können, die Mischcharakteristik des Apparats zu bestimmen. Sobald die Mischcharakteristik bekannt ist, können dann verschiedene Mischaufgaben mit anderen Methoden berechnet werden [5]. Auch die Entmischung von Partikelsystemen kann mit der DEM untersucht werden [6].

Produktabrieb bei der Pneumatischen Förderung

Bei der pneumatischen Förderung eines empfindlichen Produkts kann es zu unerwünschtem Abrieb in den Transportleitungen kommen, was eine Abweichung von den gewünschten Produktspezifikationen bedeuten kann und/oder evtl. eine Aufreinigung als weiteren Verfahrensschritt bedeutet. Mit Hilfe von DEM-Simulationen können hier die Förderleitungen untersucht werden, um das Produkt beim Transport zu schonen, den Abrieb zu minimieren und die Kosten zu senken.

4. Zukünftige Herausforderungen

Zwar kann die DEM mittlerweile auf vielen Gebieten aufschlussreiche Informationen über das Partikelverhalten und den dessen Auswirkung auf die entsprechenden Apparate und den zugrundliegenden Prozess liefern, allerdings steht die Methode dennoch vor Herausforderungen, bei denen noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

Kohäsive Schüttgüter

Sofern in Simulationen das Verhalten von kohäsionslosen oder nur schwach kohäsiven Schüttgütern untersucht werden soll, kann die DEM problemlos angewendet werden, um zu Aussagen zu gelangen, die mit Messwerten aus Experimenten vergleichbar und somit belastbar sind. Handelt es sich allerdings um stark kohäsive Schüttgüter oder Pasten, so muss die Anwendung der Methode für den Einzelfall geprüft werden. Zwar existiert eine Vielzahl von Modellen, welche den Effekt der Kohäsion beschreiben, allerdings mangelt es noch an einer praxistauglichen Methode zur Kalibrierung der Modellschüttgüter. Ohne eine solche Methode ist die Aussagekraft von DEM Simulationen mit kohäsiven Schüttgütern nur eingeschränkt und kritisch zu betrachten.

5. Zusammenfassung

Die DEM als Simulationsmethode zur Beschreibung des Verhaltens von ruhenden und fließenden Schüttgütern kann in der industriellen Praxis Informationen liefern, die in Experimenten nur mit erheblichem Aufwand oder gar nicht gewonnen werden können. Die so erhältlichen Einblicke in Prozesse helfen, verfahrenstechnische Prozesse und Apparate zu entwickeln und zu optimieren. Die Simulation des Verhaltens kohäsionsloser oder leicht kohäsiver Schüttgüter, besonders mit kalibrierten Modellschüttgütern stellt heute keine besonderen Herausforderungen mehr dar. Obwohl die DEM so bereits auf ein breites Spektrum von Fragestellungen anwendbar ist, werden weitere Entwicklungen benötigt, um der Methode Anwendungsbereiche in der Praxis zu erschließen, bei denen z. B. stark kohäsive Schüttgüter untersucht werden müssen.

- [1] Cundall, P. A.; Strack, O. D. L.: A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies; In: *Géotechnique* 29 (1979), London, Nr. 1, S. 47-65, DOI: 10.1680/geot.1979.29.1.47
- [2] Zhu, H. P.; Zhou, Z. Y.; Yang, R. Y.; Yu, A. B.: Discrete Particle Simulation of Particulate Systems: Theoretical Developments; In: *Chemical Engineering Science* 62 (2007), Nr. 13, S. 3378-3396, DOI: 10.1016/j.ces.2006.12.089
- [3] Zhu, H. P.; Zhou, R. Y.; Yang, R. Y.; Yu, A. B.: Discrete Particle Simulation of Particulate Systems: A Review of Major Applications and Findings; In: *Chemical Engineering Science* 62 (2008), Nr. 23, S. 5728-5770, DOI: 10.1016/j.ces.2008.08.006
- [4] Simons, T. A. H.; Weiler, R.; Stuge, S.; Bensmann, S.; Schilling, M.; Kwade, A.: A Ring Shear Tester as Calibration Experiment for DEM Simulations in Agitated Mixers – A Sensitivity Study, In: *Procedia Engineering* 102 (2015), S. 741-748, DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.178
- [5] Weiler, R.; Ripp, M.; Dau, G.; Ripperger, S.: Using the Discrete Element Method for Predicting the Mixing Behavior of Gravity Blenders in Different Operation Modes, In: *Chemical Engineering & Technology* 35 (2012), S. 1465-1472, DOI: 10.1002/ceat.201100645
- [6] Dau, G.; Ripperger, S.: Entmischungsvorgänge bei Schüttgütern und ihre Simulation mit der Diskrete-Element-Methode, In: *Chemie Ingenieur Technik* 87 (2015), S. 119-127, DOI: 10.1002/cite.201400058

Reaktivextrusion von Biokunststoffen

Prof. Dr.-Ing. **C. Bonten**, M. Sc. **L. Goebel**,
Institut für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart

Kurzfassung

Ebenso wie herkömmliche Polymere, müssen Biopolymere erst mittels Compounding zu einem Biokunststoff aufbereitet werden. Mit Hilfe des Einsatzes eines Doppelschneckenextruders kann der vielversprechende Biokunststoff Polyhydroxybutyrat (PHB) in einem zweistufigen Compoundierprozess gezielt molekular abgebaut und mit einer geeigneten Weichphase zu einem Blockcopolymer reaktiv aufbereitet werden. Dadurch werden die Dehnfähigkeit und zugleich die Schlagzähigkeit des Werkstoffs verbessert, ohne dabei die thermischen oder chemischen Eigenschaften zu verändern.

Abstract

As conventional polymers, biopolymers have to be compounded to bioplastics. By using a twin-screw extruder the molecular weight of the bioplastic polyhydroxybutyrate (PHB) can be controlled degraded. In a second step the PHB and soft phase can be compounded to a blockcopolymer by means of reactive extrusion. This improves the elongation at break and at the same time the impact strength of the material without changing the thermal or chemical characteristics.

1. Einleitung

Biokunststoffe rücken in den vergangenen Jahren immer stärker in den Vordergrund. Jedoch müssen auch sie, wie die meisten herkömmlichen Polymere, auf Doppelschneckenextrudern aufbereitet werden. Die Aufbereitung umfasst Lösungen wie das Blenden von Kunststoffen, die Zugabe von Zusatzstoffen, aber auch die reaktive Extrusion. Unter einer reaktiven Aufbereitung wird die chemische Modifizierung, also beispielsweise die Spaltung oder Bildung von kovalenten Bindungen eines Polymers während der Aufbereitung, verstanden. [1]

2. Stand der Technik

Die meisten Polymere sind nicht miteinander mischbar. Um dennoch unterschiedliche Eigenschaften der jeweiligen Polymere in Blends zu kombinieren, müssen solche Polymere chemisch bzw. kovalent miteinander gekoppelt werden. Dies kann durch eine Copolymerisation, bei der die Polymerivate aus mehreren Monomeren aufgebaut sind, an Stelle von nur einem

Monomer erfolgen. Geschieht die Aneinanderreihung der Monomerbausteine in Blöcken, die eine typische Länge von 5 bis 50 nm aufweisen, wird von Blockcopolymeren gesprochen. Je nach Menge der verschiedenen Blöcken wird von Diblockcopolymeren, Triblockcopolymeren oder auch Multiblockcopolymeren gesprochen. Bild 1 zeigt mögliche Anordnungen dieser Blöcke. [1]

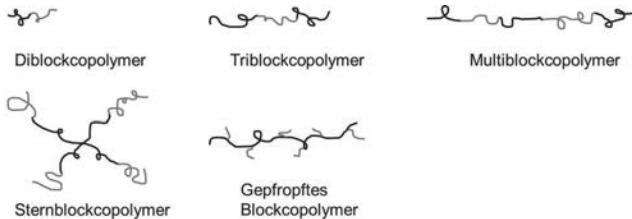


Bild 1: Anordnung verschiedener Blockcopolymere

Blockcopolymere werden für Eigenschaftsverbesserungen bzw. -veränderungen gebildet und für viele technische Lösungen angewandt. Eine der bekanntesten Gruppen von Blockcopolymeren sind Thermoplastische Elastomere. Diese Art von Blockcopolymeren kombiniert das Gebrauchsverhalten von Elastomeren und das Verarbeitungsverhalten von Thermoplasten. Der klassische bzw. der häufigste Weg für die Produktion eines Blockcopolymers verläuft über eine gemeinsame Copolymerisation, wie beispielsweise durch eine radikalische, anionische oder auch durch eine Ringöffnungspolymerisation. [2]

Biokunststoffe – Polyhydroxybutyrat

Polyhydroxybutyrat (PHB) gehört zu der Polymerfamilie der Polyhydroxyalkanoate (PHA) und ist ein biobasierter sowie biologisch abbaubarer thermoplastischer Kunststoff. Polyhydroxyalkanoate werden durch eine direkte Biosynthese in Mikroorganismen hergestellt, das heißt, ein zusätzlicher synthetischer Polymerisationsschritt ist nicht erforderlich. Im Falle von Polyhydroxyalkanoaten lagern Mikroorganismen ihren Energiespeicherstoff in Form von gesättigten und ungesättigten Hydroxyalkansäuren ein. Dabei kommen bis zu 300 verschiedene Mikroorganismen in Frage. Nach einem Gärungsprozess bestehen die Mikroorganismen bis zu 80 % aus dem gewünschten Polyester (Bild 2). Mit Hilfe von Lösungsmitteln wird der angehäufte Polyester zur Verarbeitung extrahiert und aufgereinigt.

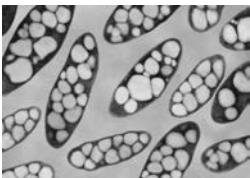


Bild 2: Mikroorganismen mit gespeichertem Polyester [3]

Die allgemeine Strukturformel von Polyhydroxyalkanoaten ist in Bild 3 dargestellt. Je nachdem, aus welcher Alkylgruppe der Rest-Baustein besteht, erhält man unterschiedliche Polymere aus der Polymerfamilie der Polyhydroxyalkanoate.

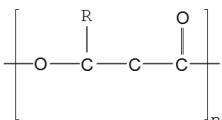


Bild 3: Allgemeine Strukturformel von PHA (bei R = CH₃ entsteht PHB)

PHB besitzt als Seitenkette eine Methylgruppe, die isotaktisch angeordnet ist. Es ist wasserunlöslich und hat im Gegensatz zu vielen anderen Biopolymeren eine gute Sperrwirkung gegen Wasserdampf. Besonders die geringe Dehnfähigkeit stellt ein Hindernis für die großtechnische Anwendung von PHB dar. Um dennoch die positiven Eigenschaften von PHB nutzen zu können, muss PHB dehnfähiger und somit schlagzäher gemacht werden.

Neben der Methode des Blendens von PHB mit einer geeigneten Weichphase ist in der Literatur die Modifizierung zu einem PHB-PEG-Blockcopolymer zu finden. Dabei wurde ein gezielter chemischer Molekulargewichtsabbau von PHB durchgeführt sowie ein darauffolgender erneuter Aufbau des Molekulargewichts zu einem Copolymer. In der Literatur wurde dieses Verfahren bereits in diskontinuierlichen Verfahren mit geringer Menge (800 g) durchgeführt. Der Abbau und der erneute Wiederaufbau erfolgte jedoch mit Hilfe von unterschiedlichen chemischen Katalysatoren, Lösungsmitteln, Aufreinigungsprozessen sowie einem zeitlichen Rahmen von bis zu zwölf Stunden im Labormaßstab. [4, 5] Dies ist zu lang für eine wirtschaftliche Verwendbarkeit.

In diesem Beitrag wird gezeigt, wie PHB durch den Einsatz eines Doppelschneckenextruders in größeren Mengen zu einem Blockcopolymer modifiziert wird. Während der Biosynthese des

PHB innerhalb der Bakterie ist es jedoch nicht möglich, ein Copolymer zu formen. So wird der Weg beschritten, zunächst das Molekulargewicht des in der Bakterie synthetisierten PHB durch den Einsatz eines Doppelschneckenextruders mit einem geeigneten Schneckenkonzept kontrolliert mechanisch und thermisch abzubauen, um in einem zweiten Compoundierschritt das kurzkettige PHB mit Polyethylenglykol (PEG) als Weichphase und Haftvermittler zu einem Blockcopolymer wieder aufzubauen. Es sollen weder Katalysatoren, Lösungsmittel noch Aufreinigungsprozesse in dem Verfahren Anwendung finden. Durch den kontinuierlichen Prozess des Compoundierens soll das werkstoffliche sowie wirtschaftliche Potenzial des Biokunststoffs und der Copolymersynthese aufgezeigt werden.

Von entscheidender Bedeutung bei dem zweistufigen Prozess sind die gewählten Schneckenkonzepte, da die Kombination aus der gewählten Zylindertemperatur, der entstehenden Schmelzetemperatur durch die eingebrachte Scherung der unterschiedlichen Elemente Einfluss auf den Abbau des Molekulargewichts hat.

3. Experimentelles

Es werden zunächst Untersuchungen zur Molekulargewichtsbeeinflussung mit unterschiedlichen Schneckenkonzepten auf einer ZSK 18 der Firma Coperion GmbH, Stuttgart durchgeführt. Im Anschluss daran wird mit Hilfe der Bestimmung der Nullviskosität, die proportional zum Molekulargewicht ist, mittels Platte-Platte Rheometer der Molekulargewichtsabbau analysiert. Hierzu wird bei einer Temperatur von 195 °C, einer Schubspannung von 100 MPa sowie einem Spalt von 1 mm ein dynamischer Frequenzsweep durchgeführt.

Als Schneckenkonzepte werden zwei unterschiedliche Designs verwendet. Das Erste besteht ausschließlich aus Förderelementen, die vor allem eine disperse Wirkung auf die Schmelze haben. Im zweiten Schneckenkonzept werden einige Förderelemente durch 5-scheibige Knetelemente mit einem Versatzwinkel von 45° sowie unterschiedlichen Knetscheibendicken, um eine distributive Mischung zu erzwingen, ersetzt. Zudem wird die Drehzahl von 120 bis 600 min⁻¹ variiert.

In einem zweiten Compoundierschritt wird das abgebaute PHB mit einer Weichphase und einem geeigneten Haftvermittler zu einem Blockcopolymer erneut aufgebaut. (Bild 4)

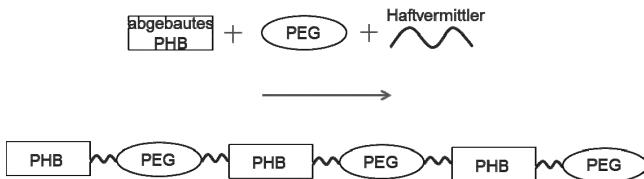


Bild 4: Reaktionsmechanismus schematisch

4. Ergebnisse und Diskussion

Anhand der Bestimmung der Nullviskosität der Schmelze kann der Auf- oder Abbau des Molekulargewichtes ermittelt werden. Bild 5 stellt die Nullviskosität in Abhängigkeit von der Drehzahl und von den vorgestellten Schneckenkonzepten dar. Deutlich zu erkennen ist, dass die Viskosität mit zunehmender Drehzahl sinkt. Zudem zeigt das Diagramm, dass das Schneckenkonzept mit den integrierten Knetelementen einen stärken Effekt auf den molekularen Abbau hat als das Schneckenkonzept, welches nur aus Förderelementen besteht. Zudem konnte der Werkstoff bei einer Drehzahl von 120 min^{-1} mit diesem Schneckenkonzept nicht durchgeführt werden, da der Werkstoffeinzug und die Förderung im Doppelschneckenextruder nicht möglich waren.

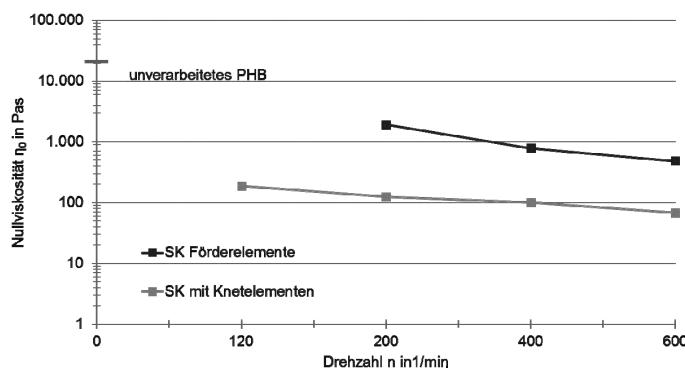


Bild 5: Nullviskosität in Abhängigkeit von dem Schneckenkonzept und von der Drehzahl

Der ideal kontrollierte Abbau des PHB konnte bei dem Schneckenkonzept mit Knetelementen und einer Drehzahl von 200 min^{-1} erzielt werden. Dieses wurde als Werkstoffgrundlage für den zweiten Compoundierschritt, der reaktiven Aufbereitung zu einem Blockcopolymer, gewählt.

Bild 6 zeigt die Nullviskosität des unveränderten PHB, des zuvor kontrolliert abgebauten PHB sowie des reaktiv aufbereiteten Blockcopolymers aus PHB, der Weichphase PEG und einem Haftvermittler. Zu erkennen ist, dass die Nullviskosität des Blockcopolymers nach der Aufbereitung das Niveau des unveränderten PHB erreicht. Da die Nullviskosität proportional zum Molekulargewicht ist, ist der Nachweis erbracht worden, dass eine chemische Reaktion während der Aufbereitung stattgefunden hat.

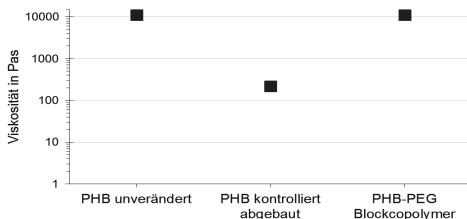


Bild 6: Nullviskosität der unterschiedlichen PHB-Modifikationen

5. Fazit und Ausblick

Es konnte erfolgreich gezeigt werden, dass mit Hilfe eines Doppelschneckenextruders das Molekulargewicht des Biopolymers PHB kontrolliert abgebaut werden kann. Es war möglich, durch einen zweiten Compoundierschritt eine reaktive Aufbereitung zur Bildung eines Blockcopolymers stattfinden zu lassen und dadurch ein Molekulargewichtsaufbau zu ermöglichen. Außerdem konnten durch den Einsatz eines Doppelschneckenextruders und der richtigen Wahl des Schneckenkonzepts Experimente aus dem Chemielabor in den kontinuierlichen Prozess übertragen werden und zusätzlichen Lösungsmittel, Katalysatoren sowie Aufreinigungsprozesse eingespart werden. So konnte erstmalig im relevanten Serienmaßstab ein PHB-Copolymer hergestellt werden, welches für technische Anwendungen ein großes Potenzial bietet.

Literatur

1. BONTEN, C. *Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen*. München: Hanser, 2014. ISBN 978-3-446-44093-7.
2. HADJICHRISTIDIS, N., S. PISPAS und G. FLOUDAS. *Block copolymers. Synthetic strategies, physical properties, and applications*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2003. ISBN 0-471-39436-X.
3. TÜRK, O. *Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Grundlagen - Werkstoffe - Anwendungen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN 978-3-8348-2199-7.
4. THOMAS D. HIRT, PTER NEUENSCHWANDER, ULRICH W. SUTER. Telechelic diols from poly[(R)-3-hydroxybutyric acid] and poly[lcub][(R)-3-hydroxybutyric acid]-co-[(R)-3-hydroxyvaleric acid][rcub]. In: *Macromol. Chem. Phys.* 197, 1996, 1609-1614.
5. NGUYEN, S., G.-e. YU und R.H. MARCHESSAULT. Thermal Degradation of Poly(3-hydroxyalkanoates): Preparation of Well-Defined Oligomers. In: *Biomacromolecules*, 2002, 3 (1), 219-224

Auf dem Weg zur energetischen Prozessoptimierung

Development towards energetically optimized processes

Dipl.-Ing. **C. Kugler**, Dr. rer. nat. **J. Werner**,
Dr.-Ing. **P. Heidemeyer**, SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg

Kurzfassung

Der Beitrag wirft einen kritischen Blick auf die Möglichkeiten zur Prozessoptimierung insbesondere im Hinblick auf den Energieverbrauch.

Abstract (optional)

The paper gives a critical overview on process optimization. The focus lies on optimization of energy consumption.

1. Quo vadis Energieeffizienz

Während kontroverse Diskussion darüber geführt werden, ob die Energiepreise durch die Verknappung von fossilen Brennstoffen ansteigen oder durch ein Überangebot an erneuerbarer Energie sinken, bleibt in diesem Zusammenhang die Frage unbeantwortet, wie wirtschaftlich moderne Produktionsanlagen sind bzw. sein können. Die meisten industriellen Prozesse sind hinsichtlich Durchsatz oder Qualität bereits stark optimiert und auch bei den Kosten gibt es nur noch wenige vielversprechende Stellschrauben. Dazu gehören zum einen die Kosten für das verbliebene notwendige Personal, die gerade in den Szenarien zur Industrie 4.0 eine Rolle spielen. Zum anderen sind dies die Kosten für Energie, die in der Kunststoffverarbeitung einen Anteil an der Wertschöpfung von 3 bis 8 % haben. Gleichzeitig zeigt sich, dass im Bereich der energetischen Optimierung von Prozessen noch ein großes Potential zur Kostensenkung zu heben ist, dies jedoch aktuell gerade bei Kunststoffverarbeitern wenig genutzt wird. Betrachtet man beispielsweise die Lebenszykluskosten eines Extruderantriebs inklusive Leistungselektronik, so werden diese von den Energiekosten mit einem Anteil von häufig über 90% klar dominiert. Beim Einkauf der Antriebe wird oft nicht bedacht, dass sich die Mehrkosten zur Anschaffung von Antrieben aus höheren Effizienzklassen (IE 3 oder 4) innerhalb weniger Jahre amortisieren.

Neben der elektrischen spielt die thermische Energie eine große Rolle in der Energiebilanz von Verarbeitungsprozessen, insbesondere durch vermeidbare Wärmeverluste. Diese lassen sich auch in der Extrusion bereits mit geringem finanziellem Aufwand durch Isolierungen, z.

B. des Plastifizierzylinders, deutlich reduzieren. Einen Schritt weiter geht die Rückgewinnung von Prozesswärme. In den meisten Verfahren wird der Kunststoff aufgeschmolzen, geformt oder compoundiert und danach wieder abgekühlt. Die zum Aufschmelzen aufgewendete Energie wird dabei zunächst an das Kühlmedium und schließlich in einer Rückkühlwanlage unter erneutem Energieeinsatz an die Umgebung abgegeben. Die Rückgewinnung dieser Energie und deren Nutzung, z. B. zur Materialvorwärmung, kommt aktuell erst in wenigen Betrieben zum Einsatz.

Durch die Kombination der genannten Maßnahmen zur gezielten Steigerung der Energieeffizienz lassen sich Energieverbrauch und -kosten z. B. in der Kunststoffextrusion um bis zu 30% reduzieren.

2. Nutzen moderner Prozessmesstechnik

Um einen Prozess in allen Belangen effizient zu gestalten, ist zunächst die messtechnische Erfassung der wichtigsten Prozessparameter notwendig. Neben dem Energieverbrauch handelt es sich dabei meist um qualitätsbestimmende Größen wie beispielsweise Viskosität, Füllstoffanteil, Dispergierung, Additivkonzentration und Farbe. Anhand solcher erfasster Parameter kann eine gezielte Optimierung des Prozesses vorgenommen werden. Trotzdem kommt in den Verarbeitungsprozessen der meisten Unternehmen nur eine sehr eingeschränkte Messtechnik zum Einsatz. Die qualitätsrelevanten Parameter werden häufig im Labor, entkoppelt vom Produktionsprozess, bestimmt. Dies hat zwei Hauptursachen: zum einen erreichen Maschinenbediener meist bereits durch ihr Prozesswissen und mit der Überwachung von Schmelzedruck und -temperatur eine beachtlich niedrige Ausschussquote, zum anderen scheuen viele Anwender die verfügbaren Systeme zur umfassenden Prozessüberwachung aufgrund ihrer hohen Preise und ihrer Komplexität. Klares Ziel für die Systemanbieter sollte daher sein, Messgeräte bereitzustellen, die einfach in den Prozess integriert, unkompliziert genutzt und kosteneffizient betrieben werden können.

Gleichzeitig ist seitens der Anwender eine größere Offenheit gegenüber innovativen Technologien gefragt. Oft fällt es ihnen noch schwer, den realen Mehrwert eines integrierten Messsystems einzuschätzen, bevor umfassende Erfahrungen aus der Praxis vorliegen. Dennoch erlauben die Ergebnisse der anwendungsnahen Forschung bereits eine realistische Abschätzung der Vorteile.

3. Aktuelle und zukünftige Herausforderungen

Zukünftig ist zu erwarten, dass auf Grund von stark schwankenden Auftragslagen und zunehmend kleineren Chargengrößen immer mehr eine Produktion gefragt ist, die qualitativ hochwertige Produkte bei unterschiedlichsten Durchsätzen und mit sehr schnellen Anlaufzeiten liefert. Dies kann nur mit einer multikriteriellen Prozessoptimierung erreicht werden, die nicht ausschließlich singuläre Ziele verfolgt, wie z. B. die Maximierung des Durchsatzes oder die Minimierung des Energieverbrauchs. Es wird vielmehr darauf ankommen, die unterschiedlichen Einflüsse gegeneinander abzuwägen, um bei gegebenem Qualitätsanspruch und Zeitfenster möglichst effizient zu produzieren. Dafür, dies zu ermöglichen, ist die technische Basis bereits heute vorhanden. Sie entsprechend einzusetzen und zu nutzen ist eine der kommenden Herausforderungen der Branche. Ob man diese Entwicklung im Kontext der Industrie 4.0 verstehen möchte oder nicht, ist dabei weniger relevant.

Modern multiscale simulation methods for solids processes and particle systems

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. **S. Heinrich**,

Prof. Dr.-Ing. **M. Dosta**,

Institute of Solids Process Engineering and Particle Technology,
Hamburg University of Technology

Abstract

Flowsheet modeling of processes with liquid, vapor, and solid phases is a very challenging task, since the description of granular materials is complicated by their disparity. On the other hand, the functional models of different apparatuses often contain a large set of empirical parameters which strongly depend on material properties and apparatus geometry. In this contribution the main problems related to the flowsheet simulation of solids processes are discussed and the usage of additional scales in the process description is proposed to estimate model parameters.

1. Introduction

In the area of process engineering, the overall use of computer systems for the simulation, optimization, analysis and control of various processes has been exceedingly increased over recent decades. Initially, the development and application of numerical approaches have been carried out with the focus on liquid-vapor systems. It resulted in the emerging of several software systems for the process modeling on different scales (ASPEN, gProms, Fluent, etc.). On the other hand, efforts to develop computer tools for the detailed description of particulate materials were intensified later. The necessity to distinguish between the computational methods for the processes involving solids and liquid vapor systems was underlined by many researchers [1 – 3]. It was pointed out that due to the dispersity of particulate materials, their proper description and modeling are very complex.

Different time and length scales to describe solids processes can be identified [4]. On the highest hierarchy level the whole industrial production plant is represented as a set of apparatuses combined into one network. On lower scales, the behavior of separate units, particle clusters or even individual particles are described. These different scales differ in size but also in characterizing times. While the whole process or macro-scale is usually characterized

by time constants in the minute up to the hour or even day range, for the micro scale the time constants are in the second or even below millisecond range.

The industrial scale processes often have a complex structure and consist of different apparatuses and subprocesses connected by energy and mass streams. For modeling of such processes, flowsheet simulation systems can be effectively used. Programs like gSOLIDS/gPROMS [5], SolidSim [6], and a new extension to Aspen Plus systems were especially developed for the flowsheet simulation of solids processes. SolidSim was initially developed only for steady-state calculations, however, for research purposes it was extended to dynamic simulations, and effectively applied to investigate the transient behavior of fluidized bed granulation plants [7].

To allow the simulation of complex flowsheets with multiple apparatuses within reasonable short times, the required computing resources for the simulation of the individual apparatuses or process steps have to be quite low. Therefore, in many cases empirical or semi-empirical models are applied. The disadvantage of these types of models is that they are usually applicable to a limited range of operating and material parameters and to standard geometries only. Additionally, very often model parameters have to be guessed on the base of experience, determined by fitting to existing measurement values or to be measured in special experiments.

On the other hand, to model solids materials on the scale of individual particles, the discrete element method (DEM) was proposed [8]. This approach considers the properties of solids materials precisely, and nowadays, it has become a state of the art for the process modeling on the microscale [9]. DEM models each particle as a separate entity. Therefore, the particle properties or their distributions, such as shape, modulus of elasticity, energy loss by nonelastic deformation behavior, surface roughness, etc., can be taken into account. One of the main disadvantages and limitation factors of DEM is a very high computational effort due to the necessity to consider large particle assemblies. However, a rapid increase in performances of computer systems and employing of special computer architectures [10, 11] has led to the wide use of this approach for a wide range of applications. As a result, in recent years various simulation systems based on the DEM have been created (EDEM, Itasca, LAMMPS, YADE, etc.). However, only in some rare cases can these systems be applied to simulate units of industrial size. And until now, neither of them has been used to model macroscopic processes, where it is necessary to simulate the large particle assemblies for long periods of time, in order of hours.

The models of different apparatuses and processes in the solids industry can be distinguished by detailing levels and application purposes, whereby each level can only be applied to some specific application of modeling (Fig. 1.)

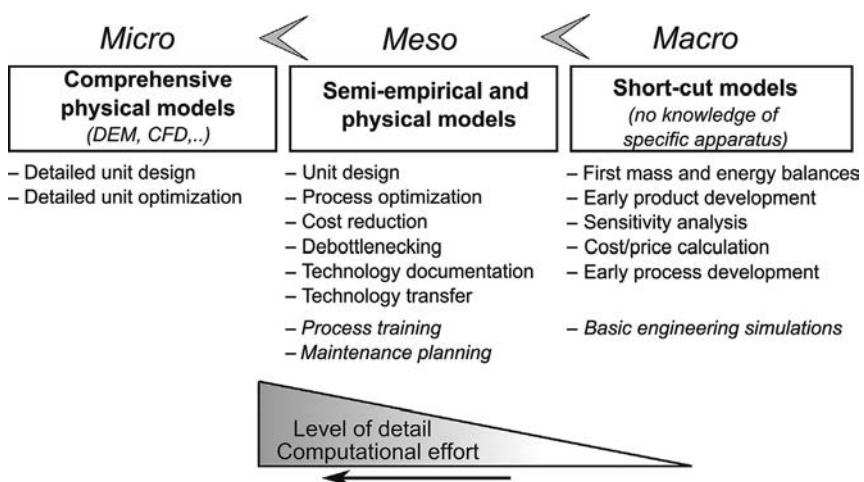


Fig. 1: Models classification according to application area

2. Flowsheet Simulation of the Solids Processes

The flowsheet simulation is much more complex compared to the modeling of separate unit operations. Firstly, this is due to the convoluted structural model of the flowsheet, which represents the interconnection of the process substeps. Such structural models can contain one or several recycle streams that lead to a high grade of interdependency between state variables. Secondly, the functional models of the unit operations often consist of systems of partial integro-differential equations. Their solution, however, is not a trivial task.

Additional complexity of the flowsheet simulation of solids processes, compared to the description of fluids, is caused by a more comprehensive description of solids. One of the main differences here is caused by the necessity to describe solid materials with multidimensional distributed parameters [3]. The particles can be distributed along various property coordinates (size, density, moisture content, etc.). On the one hand, this leads to a much larger number of equations since equations for each distribution interval have to be solved. On the other hand, problems arise when the number of dimensions along which the input streams are distributed is larger than the number of dimensions for which the functional model has

been developed. In this case, secondary distributed properties will not be treated correctly and information will be lost. To perform a correct simulation, multidimensional parameter distributions have to be considered. One method for the treatment of such multidimensional distributions is the application of transformation matrices for the implicit conversion of the material streams [6, 12]. In this case, based on the mathematical model of the unit, transformation laws are formulated. Afterwards, instead of an explicit calculation of the output streams, the input material streams and apparatus holdups are implicitly transformed.

Generally, two simulation methods exist that can be applied in flowsheet calculations, namely equation-oriented (simultaneous) and modular (sequential-modular) [13]. In the case of the simultaneous approach, the equations for the description of all units are combined into one equation set, which is afterwards solved simultaneously by a suitable solver. However, the heterogeneity of the mathematical models developed for the solids processes and the overall use of population balance models (PBM), which in most cases consist of complex partial integro-differential equations, makes the general use of the simultaneous approach a nearly infeasible task. As soon as a suitable solver for these very large sets of partial integro-differential equations is available, the simultaneous approach might show advantages in the dynamic simulation. Contrary to this, the modular approach can be effectively applied in steady-state [6] and even dynamic [12] simulations of solids processes. In the modular approach the units are solved independently from each other by separate calculation procedures [14]. This has significant advantages:

- any closed-form model can be added to the flowsheet and no internal information about the model is needed by the simulation framework;
- easier initialization of the flowsheet – the process units are executed in the sequence according to the flowsheet structure [15];
- higher flexibility to perform multiscale calculations.

The functional models used for the flowsheet simulation contain many empirical material or apparatus parameters that significantly decrease the accuracy of process description.

Some examples of such parameters are:

- Bulk porosity of the solids material: It has a significant influence on many parameters, such as filling degree of the apparatus. The bulk porosity depends on the particle size distribution [16] and on the shape of particles;
- Inner porosity of the solids: The particle porosity influences, amongst others, the apparent density, the terminal and minimum fluidization velocity, and also the drying and wetting behavior;

- Strength of solids: The strength of the particles and agglomerates determines the attrition and breakage of material in the apparatus. It depends on the shape of the agglomerates, the binder content, the distribution of primary particles, the porosity and the type of acting stress [17].

All of the characteristics listed above and many others are not included explicitly into the empirical models developed for general use. As a consequence, the accuracy of the simulations is significantly decreased.

3. Parameter Determination by Standardized Measurements

Due to their importance and the difficulties to easily predict these parameters with sufficient accuracy, they are often measured in standardized laboratory experiments. For example, the minimum fluidization velocity is strongly depending on particle size, its distribution, inner particle porosity and shape of the particles. There are some correlations to predict this parameter [18, 19], but prediction is only sufficiently accurate for nearly spherical particles. For lengthy or flat, plate-like particles the prediction may differ by an order of magnitude from the real values. Therefore, it is best to experimentally determine the minimum fluidization velocity and to perform the measurements under ambient conditions. For subsequent conversion to process conditions reliable methods are available. Similar approaches can be applied to many other parameters and subprocesses, e.g., the particle strength, the resistance against attrition, the drying behavior or the growth rate during agglomeration.

However, the experimental approaches have some obvious disadvantages. Firstly, a sample of the material has to be available. Thus, this method cannot be applied for a simulation during process development. Secondly, the parameters will only be valid for the particles which have been tested. A change of any of the particle properties (e.g., particle size distribution, shape, porosity, composition) needs an extrapolation of the measured value. Therefore, even for simulations of an existing process, for optimization or prediction of plant performance after a process modification, it is difficult to experimentally determine the parameters for the correct material properties.

4. Parameter Estimation with the Discrete Element Method

The above mentioned problems with the experimental determination of model parameters may at least partly be solved by using more detailed and better physically based models. The discrete element method [8] can be used to determine parameters needed by the empirical or semi-empirical models on the process scale.

For the parameter determination, two different DEM tools have been applied. The first is EDEM by DEM Solutions Ltd., which is coupled with ANSYS Fluent to simulate the flow field of the surrounding fluid. As a second choice, the component-based system MUSEN is being developed as an in-house system. In comparison to already existing techniques, one of the main distinctions of this system is its architecture, which consists of a set of interconnected components, such as solvers, simulators, package generators, etc. (Fig. 2). This allows the separate development of components and optimization for the solution of specific subproblems. The organization significantly increases software reuse and allows the creation of a library of components. It may also allow the optimal configuration of a particle simulation system in order to solve specific tasks of solids processes [19].

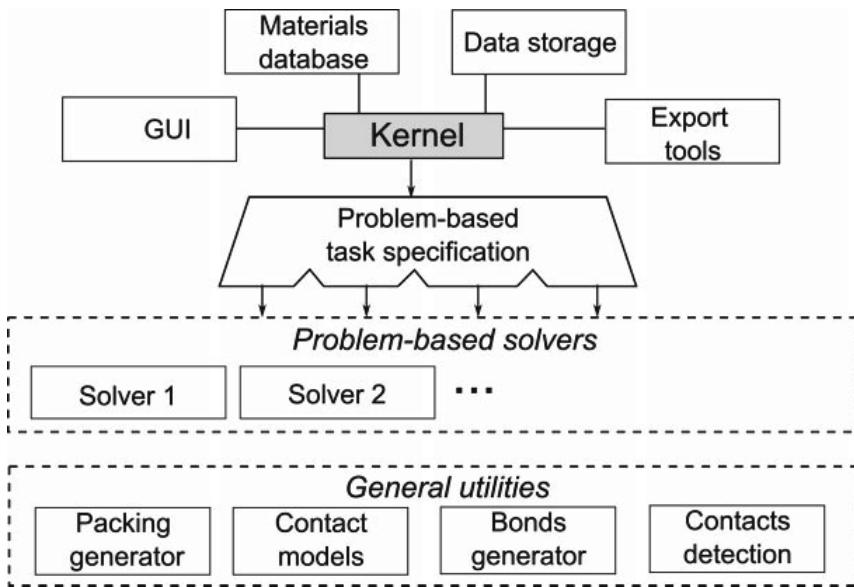


Fig. 2: Component-based architecture of the MUSEN system.

One of the MUSEN components has been developed to approximate the packing density of particles. In Fig. 3 the comparison between experimentally measured packing densities [16] and simulation results obtained with the MUSEN system are shown. In this diagram the packing density of a bimodal distribution of spherical particles is plotted versus the mass fraction of the smaller particles. The comparison has been done for two different mixtures

with the ratio of the particle diameters being 3.45 and 4.77, respectively. From the obtained results it can be concluded that the component allows accurate prediction of the packing density.

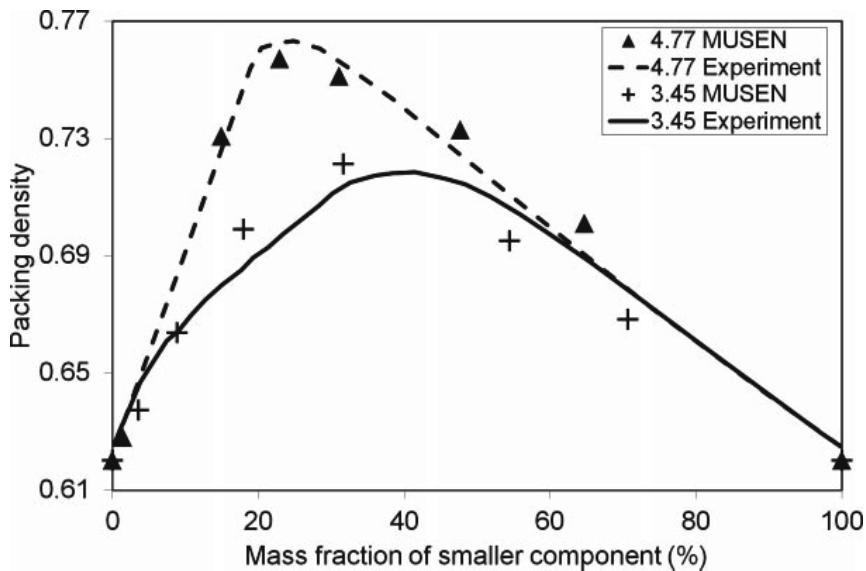


Fig. 3: Comparison between experimental and calculated packing density.

Initially, MUSEN was developed to model dry spherical particles. However, to investigate the behavior of dry or wet agglomerates with complex internal structure or non-spherical particles, cohesion models describing solid or liquid bonds have been included. In that case, the agglomerate shape and microstructure can be represented as set of primary particles connected with the bonds (Fig. 4).

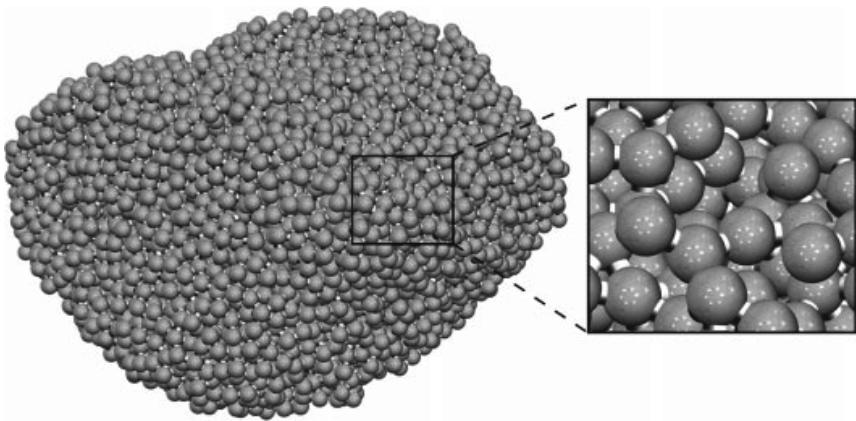


Fig. 4: DEM representation of non-spherical agglomerate.

With the help of this detailed model, breakage or deformation behavior can be investigated for different types of stresses. The numerical results obtained are in good agreement with corresponding experiments [20, 21].

5 Interscale Coupling

As shown above, many of the material-based model parameters can be predicted with DEM. If this is done only as pre-calculation before the flowsheet simulation is started, some disadvantages, similar to the experimental determination, appear. The DEM simulation is started with a guess of the operating conditions and the particle properties and is not adapted to the conditions calculated on the process scale.

In order to overcome these disadvantages and to perform detailed flowsheet simulations, the models on different scales need to be linked together. There exist different types of the spatial relationship between balance volumes that comprise the model. One can distinguish between multidomain, embedded, parallel, serial, and simultaneous types of communication [22]. However, mostly three orders of magnitude (or more) in time and length scales exist between the application areas of the DEM and flowsheet modeling approaches. Therefore, the direct inclusion of DEM into flowsheet calculations to simulate a macroscopic process is still an impracticable task, which will lead to an enormous computational time. Alternatively to this, the microscale DEM calculations can be employed implicitly by the description of a smaller process subdomain to obtain a database of material and apparatus specific parame-

ters. Afterwards, the results can be transferred to the macroscale to perform more detailed modeling (Fig. 5). This way, DEM can be effectively used to:

- calibrate the material parameters (e.g., breakage energy for various agglomerates, flowability of multicomponent solids, etc.);
- investigate the influence of apparatus geometry (e.g., influence of the nozzle position in a fluidized bed on growth kinetics or effect of the bunker geometry on discharge characteristics, etc.).

Due to the large gap between the scales, in some cases it is not possible to perform direct coupling between the DEM simulations of the single particles and the flowsheet simulations of the production plant. In such cases, it is necessary to introduce additionally boundary models on the mesoscale. A cluster scale can be inserted between particle and unit scales to simulate multi-phase flow and therefore serve as a boundary model [23, 24].

7 Conclusion

One of the main challenges related to the flowsheet simulation of solids processes is the physics-based estimation of the model parameters for the functional models of the various apparatuses or process substeps. Most of the empirical or semi-empirical macroscopic models cannot be effectively applied outside the parameter's domain, for which experimental investigation was performed. To increase the accuracy of the models the process description on additional scales can be employed. Usage of additional submodels, where the behavior of individual particles is modeled, allows to obtain material specific model parameters and to consider the apparatus geometry. In this contribution, the use of such multiscale modeling strategy has been illustrated on the example of a fluidized bed spray granulation process, where parameters for the PBM have been approximated from the DEM calculations.

References

- [1] A. P. Rossister, J. M. Douglas, Chem. Eng. Res. Des. 1986, 64, 175 – 183.
- [2] L. R. Evans, Comput. Chem. Eng. 1989, 13. DOI: 10.1016/0098-1354(89)85014-8
- [3] E.-U. Hartge, M. Pogodda, C. Reimers, D. Schwier, G. Gruhn, J. Werther, KONA 2006, 24.
- [4] J. Werther, S. Heinrich, M. Dosta, E.-U. Hartge, Particuology 2011, 9. DOI: 10.1016/j.partic.2011.03.006
- [5] F. Boukouvala, V. Niotis, R. Ramachandran, F. J. Muzzio, M. G. Ierapetritou, Comput. Chem. Eng. 2012, 42. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2012.02.015

- [6] M. Pogodda, Development of an advanced system for the modeling and simulation of solids processes, Shaker Verlag, Aachen 2007.
- [7] M. Dosta, S. Heinrich, J. Werther, Powder Technol. 2010, 204. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.07.018
- [8] P. A. Cundall, O. D. L. Strack, Geotechnique 1979. DOI: 10.1680/geot.1979.29.1.47
- [9] J. P. Zhu, Z. Y. Zhou, R. Y. Yang, A. B. Yu, Chem. Eng. Sci. 2008, 63. DOI: 10.1016/j.ces.2008.08.006
- [10] M. Xu, F. Chen, X. Liu, W. Ge, J. Li, Chem. Eng. J. 2012, 207. DOI: 10.1016/j.cej.2012.07.049
- [11] D. Jajcevic, E. Siegmann, C. Radeke, J. G. Khinast, Chem. Eng. Sci. 2013, 98. DOI: 10.1016/j.ces.2013.05.014
- [12] M. Dosta, Dynamic Flowsheet Simulation of Solids Processes and its Application to Fluidized Bed Spray Granulation, Cuvillier Verlag, Göttingen 2013.
- [13] W. Marquardt, CACHE Publications 1991, 131 – 180.
- [14] M. Hillestad, T. Hertzberg, Comput. Chem. Eng. 1986, 10. DOI: 10.1016/0098-1354(86)87008-9
- [15] L. T. Biegler, I. E. Grossmann, A. W. Westerberg, Systematic Methods of Chemical Process Design, Prentice Hall PTR, New Jersey 1997.
- [16] R. K. McGahey, J. Am. Ceram. Soc. 1961, 44. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1961.tb13716.x
- [17] L. Liu, K. D. Kafui, C. Thornton, Powder Technol. 2010, 199. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.01.007
- [18] C. Y. Wen, Y. H. Yu, AIChE J. 1966, 12 (3). DOI: 10.1002/aic.690120343
- [19] M. Dosta, S. Antonyuk, S. Heinrich, Ind. Eng. Chem. Res. 2013, 52. DOI: 10.1021/ie400244x
- [20] S. Antonyuk, S. Palis, S. Heinrich, Powder Technol. 2011, 206. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.02.025
- [21] S. Palis, S. Antonyuk, M. Dosta, S. Heinrich, in AIP Conf. Proc. 1542, AIP Publishing, Melville, NY 2013. DOI: 10.1063/1.4812070
- [22] G. D. Ingram, I. T. Camerom, K. M. Hangos, Chem. Eng. Sci. 2003, 59. DOI: 10.1016/j.ces/2004.02.010
- [23] J. Li, M. Kwauk, Chem. Eng. Sci. 2003, 58. DOI: 10.1016/S0009-2509(02)00577-8
- [24] J. Li, W. Ge, W. Wang et al., From Multiscale Modeling to Meso-Science, 1st ed., Springer, Berlin 2013.

Materialaufbereitung für die Additive Fertigung

Verfahren – Anforderungen an die Compoundierung - Beispiele

Prof. D. Schwendemann, Hochschule für Technik Rapperswil,
IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung,
Rapperswil, Schweiz

Kurzfassung

Additive Fertigungstechnologien sind eine der Schlüsseltechnologien der Zukunft. Viele dieser Technologien setzen thermoplastische Kunststoffe ein. Um gezielte Materialeigenschaften zu erreichen, müssen diese mittels Compoundierung aufbereitet werden. Aufgrund der geringen Mischwirkung der Folgeprozesse wird an die Compoundierung ein hoher Anspruch in Bezug auf die Mischgüte gestellt, zusätzlich ergeben sich auch Herausforderungen an die Verarbeitung durch neuartige Werkstoffe, wie zum Beispiel die wasserlöslichen Stützmaterien.

1. Einleitung

Additive Fertigungsverfahren sind momentan in aller Munde und werden vielfach als "die" Zukunftstechnologie betrachtet. Im Besonderen sind hierunter die generativen also die auftragenden Fertigungsverfahren zu sehen. In den Bildern 1 und 2 ist eine Übersicht der additiven Fertigungsverfahren nach dem Zustand der Basiswerkstoffe dargestellt. Aktuell werden quasi wöchentlich neue Verfahren der Öffentlichkeit vorgestellt, so dass diese Übersicht keinen Anspruch auf Vollständigkeit hat. Meist sind diese „neuen“ Verfahren aber Weiterentwicklungen der bereits bekannten Grundverfahren.

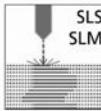
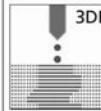
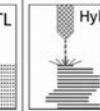
 FLM	 SLS SLM	 3DP	 PJ	 LOM	 STL	 Hybrid
Multi Jet Modeling (FDM, FLM, AKF)	Selective Laser Melting / Sintering (SLM, SLS, EBM)	3D-Printing (3DP)	Polyjet Modeling (PJ, PJM)	Laminated Object Modeling (LOM, LLM)	Stereolithografie (SL, STL, DLP)	Hybrid-Anlagen
Kunststoffe (+ Füllstoffe)	Metall (SLM), Kunststoffe u.a.	Quarz, Metall, Kunststoff	Fotopolymer, Wachs	Papier, Kunststoff, CFK	Fotopolymer (+ Füllstoff)	Metall
Modelle, Prototypen, Konsumartikel	Prototypen, Kleinserien, Reparatur, Werkzeug	Modelle, Prototypen, Gussformen	Modelle, Prototypen, Gussformen	Modelle, Gussformen	Modelle, Prototypen	Reparaturen, Einzelteile, Kleinserien

Bild 1: Übersicht der Additiven Verfahren [1]

Im Rahmen dieses Kapitels werden die kunststoffbasierten Verfahren betrachtet. Der Bereich der metallischen Werkstoffe, der im Maschinen-, Fahrzeug- und Flugzeugbau eine grosse Rolle spielt, wird nicht weiter beschrieben.

Generative bzw. additive Fertigungsverfahren (Einteilung nach dem Prozess)				
Prozess	Verfahren	Verfahrensprinzip	Werkstoffe	Symbol / Abkürzung
Sintern	Selective Laser Sintering / Selective Laser Melting	Lokales Aufschmelzen und Verbinden von Pulverwerkstoffen durch Laser / E-Beam	Kunststoffe, Metall	
Extrudieren	Fused Deposition Modeling / Fused Filament Modeling	Aufspritzen von geschmolzenen Polymeren mittels Düse	Kunststoffe	
UV-Härtung	Stereolithographie / Polyjet	Lokal induzierte Copolymerisation durch UV-Licht	Kunststoffe, Fotopolymer	 
Bindertechnik	3 Dimensional Printing	Bindewerkstoff wird in einem Pulverbett gezielt aufgebracht	Kunststoffe, Metall, Quarzsand	
Laminieren	Laminated Object Manufacturing	Ausschneiden und Fügen von Platten	Papier, Kunststoffe	

Bild 2: Übersicht generative bzw. additive Fertigungsverfahren [1]

2. Additive Fertigungsverfahren mit Kunststoffen

Bei den Additiven Verfahren mit Kunststoffen werden feste, flüssige und gasförmige Rohstoffe eingesetzt. Die nachfolgende Betrachtung fokussiert sich jedoch nur auf den festen Aggregatzustand und die Verfahren mit thermoplastischen Kunststoffen als Rohstoffe. Diese Gruppe stellt mengenmäßig die meisten Verfahrensvarianten. Hierbei wird die Wiederaufschmelzbarkeit der Thermoplaste ausgenutzt.

2.1 Selektives Lasersintern (SLS)

Beim Selektiven Lasersintern wird ein thermoplastisches Kunststoffpulver mit Hilfe eines Laserstrahles aufgeschmolzen und das Bauteil wird im Pulverbett aufgebaut. Dadurch werden keine zusätzlichen Stützstrukturen benötigt, es können leicht Hohlstrukturen oder Überhänge hergestellt werden. Im Bild 3 ist der Aufbau schematisch dargestellt. Die Auflösung ist relativ gut und hängt von der Qualität des Pulvers ab. Aktuell ist das Werkstoffspektrum im Kunststoffbereich noch eingeschränkt, meist wird mit Polyamid12 Pulvern gearbeitet.

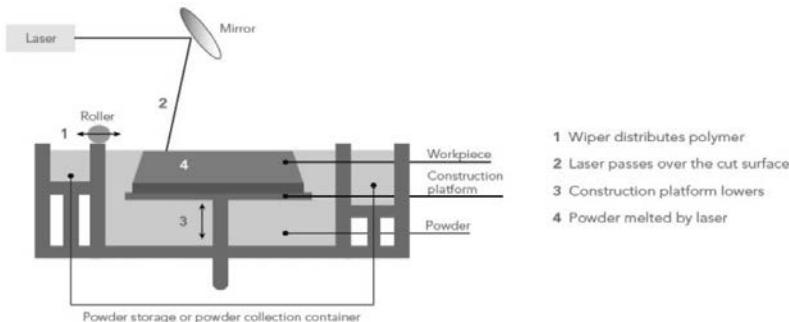


Bild 3: Selektives Lasersintern [2]

2.2 3-D Druck

Bei diesem Verfahren, siehe Bild 4, wird ein Bindemittel (Kleber) selektiv meist über Piezodruckköpfe auf eine Pulverschicht aufgebracht. Nach Fertigstellung der vollständigen Kontur wird das ungebundene Material abgenommen und die gewünschte Kontur bleibt bestehen. Dadurch können problemlos sowohl hohle Strukturen als auch Überhänge aufgebaut werden. Farbige Bauteile sind ebenfalls möglich.

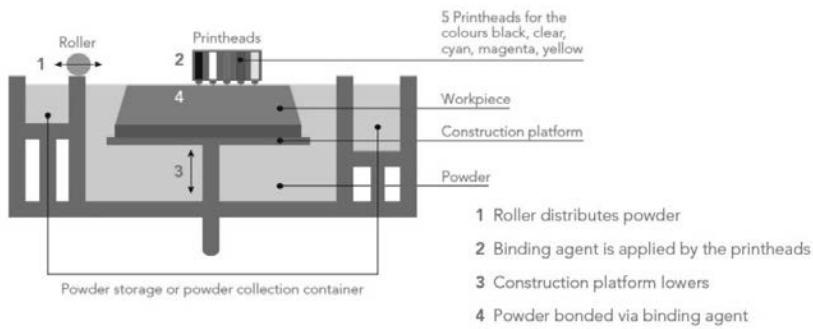


Bild 4: 3-D Druck (schematisch) [2]

2.3 Fused Layer Modelling (FLM)

Das Fused Layer Modelling (FLM) ist meist besser bekannt unter dem Namen FDM® (Fused Deposition Modelling®), allerdings ist die Bezeichnung und der Kurzname geschützt von der Firma Stratasys. Als eine weitere Alternativbezeichnung hat sich der Begriff Fused Filament Fabrication (FFF) etabliert. Nachfolgend wird für den ganzen Verfahrensbereich die Bezeichnung FLM verwendet, wie im Kapitel 1 eingeführt.

Die Fused Layer Modelling Verfahren können nach der Form des Rohstoffs unterschieden werden. So werden zum einen Kunststoffdrähte, sogenannte Filamente eingesetzt und zum anderen verarbeiten immer mehr Systeme das Kunststoffgranulat direkt. Prominentester Vertreter hierbei ist der Arburg Freeformer®. Nachfolgend werden beide Arten kurz vorgestellt.

Für das filamentbasierte Verfahren wird in der weiteren Diskussion die Kurzbezeichnung FFF verwendet. Beim FFF wird ein thermoplastischer Kunststoffdraht mit Hilfe angetriebener

Rollen durch eine heiße Düse gedrückt, aufgeschmolzen und aufgetragen, siehe Bild 5. Dabei sind verschiedenste Ausführungen im Einsatz, so wird die Bewegung meist über X,Y,Z Bewegungssachsen durchgeführt, wobei entweder der Bauteilträger oder die heiße Düse bewegt wird. Des Weiteren gibt es Ausführungen mit Delta Roboterachsen oder sogar 5-Achsenroboter.

Da die Grundpatente ausgelaufen sind, gibt es in diesem Bereich sehr viele Anbieter und es gibt auch schon sehr preiswerte Ausführungen für wenige Hundert Euro. Da die Systeme offen sind, werden viele unterschiedliche Materialien angeboten und verwendet. Im Home-printing Bereich wird meist auf Grund der geringen Geruchsbelastung und der niedrigen Verarbeitungstemperaturen Polylactide (PLA) oder PLA-Compound's eingesetzt. Im technischen Bereich sind Polyamide, Thermoplastische Polyurethane, ABS-Blend's oder PET im Einsatz. Hohle Strukturen oder Überhänge können jeweils nur mit Stützstrukturen erstellt werden.

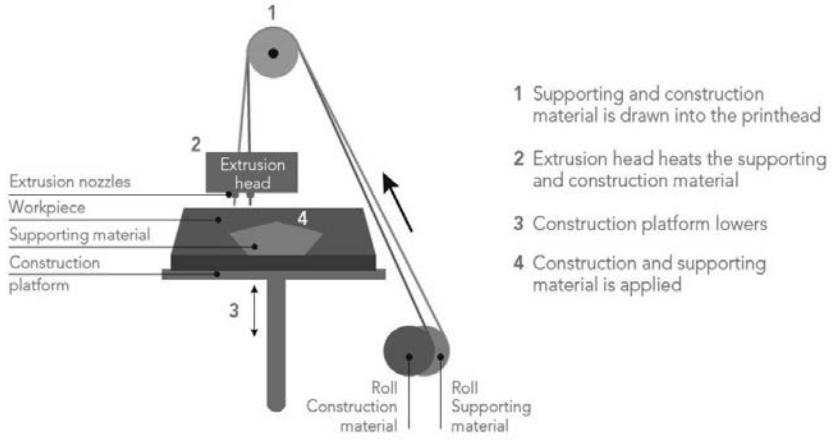


Bild 5: Fused Filament Fabrication (schematisch) [2]

Beim Arburg Freeformer® (AKF – Arburg Kunststoff Freiformen), siehe Bild 6, kann direkt mit Granulat gearbeitet werden. Das Kunststoffgranulat wird in einer kleinen Plastifiziereinheit aufgeschmolzen und in ein Materialreservoir gegeben. Mit Hilfe eines Piezoaktors wird der Düsenverschluss kurzzeitig geöffnet und wieder verschlossen, d.h. der Kunststoff wird tropfchenweise aufgetragen. Der Bauteilträger führt die X, Y, Z-Bewegungen aus.

Grundsätzlich könnten alle thermoplastischen Kunststoffe verarbeitet werden, jedoch liegt das Augenmerk momentan vor allem auf den ABS, Polyamid oder TPU's, da sich diese Ma-

terialien relativ gut additiv verarbeiten lassen. Auch beim Freeformer® müssen hohle Strukturen oder Überhänge mit Stützstrukturen erstellt werden.

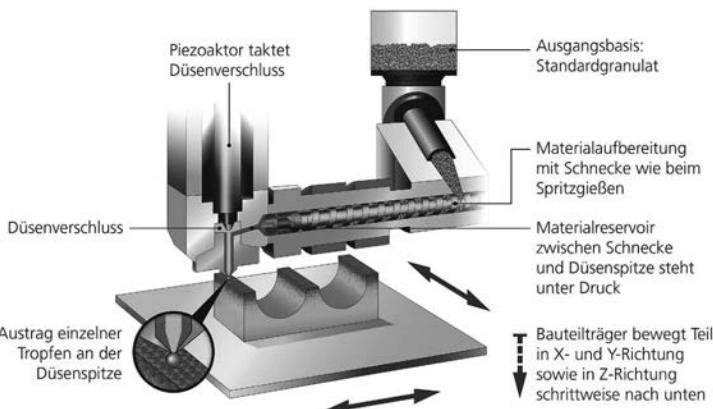


Bild 6: Funktionsweise Arburg Freeformer® [3]

3. Anforderungen an die Compoundierung

Für die Anforderungen an die Compoundierung wird im Rahmen dieses Kapitels nur die Verarbeitung in den FLM Verfahren betrachtet, sprich der Verarbeitung von Filamenten oder direkt vom Granulat.

Da meist im generativen Prozess nur aufgeschmolzen, aber nicht mehr gemischt wird, ist die Homogenität des Materials entscheidend für die Qualität der Bauteile. Eventuelle Schwankungen während der Verarbeitung können nicht mehr ausgeglichen werden, es ergeben sich Inhomogenitäten im Bauteil.

Abgesehen von der Homogenität der Materialmischung ist es sehr wichtig, dass die Granulatgröße und -form gleichmäßig ist, da bei der Verarbeitung auf den relativ kleinen Einschneckenextrudern bereits geringe Schwankungen zu Problemen im Einzug führen können. Diese wirken sich direkt auf den Ausstoss des Extruders und somit auf den Filamentdurchmesser aus. Da in der FFF-Verarbeitung das Filament anschliessend volumetrisch in die heiße Düse gedrückt wird, können sich Dünn- bzw. Dickstellen am Bauteil ergeben.

Der AKF kann kleinere Schwankungen in der Granulatgrösse abfedern, da er ein Materialreservoir hat, allerdings ist die Schneckengeometrie noch kleiner, so dass schlecht fliessendes Granulat zur Brückenbildung im Einzug führt.

Bei der Additiven Fertigung sind solche Probleme sehr ärgerlich bzw. kritisch, da über mehrere Stunden an einem Bauteil gearbeitet wird. Kommt es zu einem oben genannten Fehldruck muss die gesamte Prozedur neu gestartet werden. Die Prozesssicherheit ist deshalb ganz entscheidend für den Erfolg beim aufbauenden Fertigen.

4. Compoundieren von schlagzähem, bioabbaubaren Polylactid

Im Heimbereich bzw. auf den preisgünstigen Geräten wird häufig Polylactid (PLA) eingesetzt, da sich mit PLA relativ gute, verzugsarme Bauteile herstellen lassen. Diese Bauteile sind meist jedoch sehr spröde und brechen bzw. reissen schnell.

Im Rahmen von verschiedenen Arbeiten wurde ein schlagzähmodifiziertes, bioabbaubares PLA-Compound entwickelt. Das Augenmerk lag hier auf der Homogenität der Materialmischung und der Granulatform für die Weiterverarbeitung zum Filament.

Im Bild 7 ist die Compoundieranlage des Institutes für Werkstofftechnik und Kunststofftechnik (IWK) zu sehen, besonders hervorzuheben sind die vielfältigen Möglichkeiten der Materialzufuhr (fest und flüssig), das Verfahrensteil mit 44 L/D und die Unterwassergranulierung für kleine Mengen.

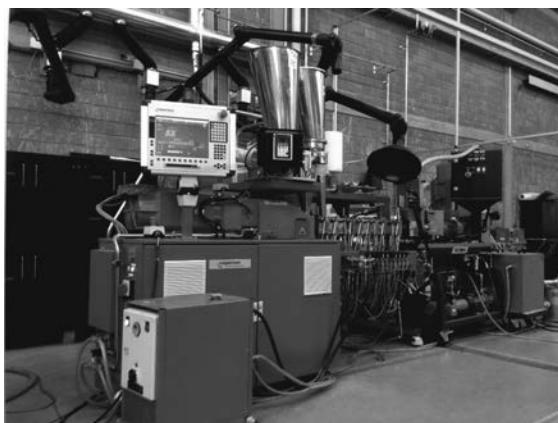


Bild 7: Compoundieranlage am Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung

5. Compoundieren von wasserlöslichen Stützmaterialien

Der AKF hat serienmäßig zwei Austragseinheiten, so dass mit zwei verschiedenen Kunststoffen oder einem Stützmaterial gearbeitet werden kann. Als Stützmaterial werden wasserlösliche Polymere gewünscht, da das Herauslösen des Bauteils dadurch keinen grossen Aufwand bzw. kein zusätzliches Sicherheitsrisiko (im Vergleich zu Säure- oder Laugenbäder) birgt.

Die Herausforderung liegt in der Mischung der unterschiedlichen Komponenten und vor allem in der Granulierung des Compounds. Auf Grund der Wasserlöslichkeit können die im Kunststoffbereich eingesetzten wasserbasierten Granuliersysteme nicht verwendet werden. Auf Grund der niedrigen Viskosität der Schmelze ergeben sich Probleme bei der Granulierung und somit Schwankungen in Form und Grösse.



Bild 8: Granulatgrössen und –formen von wasserlöslichen Stützmaterialien

Im Rahmen eines Entwicklungsprojektes und einer Bachelorarbeit wurden neue Materialkonzepte und der verfahrenstechnische Aufbau entwickelt. Die Mischungen sind momentan in der Erprobung. Die ersten Rückmeldungen sind äusserst vielversprechend. Im Bild 9 ist ein gedrucktes Bauteil mit wasserlöslichem Stützmaterial dargestellt.



Bild 9: Additiv gefertigtes Bauteil mit wasserlöslicher Stützstruktur

6. Ausblick

Die Additive Fertigung wird gegenwärtig als eine der Schlüsseltechnologien der nächsten Jahre gesehen. Für die Kunststoffaufbereitung ergeben sich einige Herausforderungen, wie zum Beispiel die Homogenität des Materials oder neue Rezepturen, diese können jedoch mit optimierten Prozessen und einer adaptierten Verfahrenstechnik gelöst werden. Es sind weitere Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen nötig, um die eingeschränkte Materialpalette zu erweitern. Zusätzlich benötigen die neuen Verfahren, die laufend auf den Markt kommen, Materialanpassungen bzw. neue Rezepturen.

Literaturangaben

- [1] www.vdma.org/technology, Graphiken wurden aus Qualitätsgründen nachgezeichnet
- [2] www.hessen-nanotech.de, «Additive Fertigung - Der Weg zur individuellen Produktion», Band 25 der Schriftenreihe der Technologielinie Hessen-Nanotech, April 2015
- [3] AKF - Arburg Kunststoff Freiformen, Prospekt, ARBURG GmbH + Co KG, Lossburg, 2015, Seite 5

ISBN 978-3-18-23**4345**-5