IN DIESEM KAPITEL

- Was der Unterschied zwischen Polymerblends und –legierungen ist
- Was Zuschlagstoffe sind, was Füllstoffe, was Additive
- Wie man das alles zusammenmischt

Bonuskapitel 1
Die Mischung machts

Polymerblends und –legierungen

Die so erzeugten Polymere können in manchen Fällen direkt und rein (englisch »Virgin«) zu Bauteilen verarbeitet werden. Im Gegensatz zu den Elastomeren, bei denen das Zumischen von weiteren Stoffen, mindestens dem Vernetzungsmittel, erforderlich ist, um einen technisch verwertbaren Werkstoff zu erzeugen.

Es können aber auch verschiedene Polymertypen miteinander gemischt werden, um einen Werkstoff zu erhalten, der die Vorzüge der einzelnen Typen miteinander vereint, beziehungsweise deren Nachteile kompensiert. So eine Mischung von unterschiedlichen Polymertypen wird fachsprachlich **Polymerblend** genannt. Wenn die verwendeten Typen sogar ineinander löslich sind, wird die Mischung **Polymerlegierung** genannt, weil, ebenso wie bei den Metallen, der neu entstandene Werkstoff vollkommen andere Eigenschaften hat als die Ausgangsstoffe.

Bei den Blends liegt die Polymersorte mit weniger Massenanteil in winzigen Tröpfchen innerhalb der anderen Sorte vor (siehe Tabelle 1.1, die hellgrauen Polymerketten). Diese Sorte mit höherem Anteil wird fachsprachlich auch **Matrix** genannt (in Tabelle 1.1 die dunkelgrauen Polymerketten). Grundsätzlich ist das die Bezeichnung für das Material in Verbundwerkstoffen, in welchem die anderen Bestandteile eingebettet sind.

Wenn die beiden Phasen, die man miteinander mischen will, sich partout nicht mischen lassen, sondern sich wie Öl und Wasser immer wieder trennen, dann hat der Polymer-Chemiker noch etwas in seiner Trickkiste. Er kann auf die Ketten des einen Polymers noch Seitenketten mittels kovalenter Bindung aufpfropfen. Das entstandene Gebilde wird dementsprechend **Pfropfpolymer** genannt. Diese Seitenketten sind dann verträglicher mit dem Mischungspartner als das Basis-Polymer.

Bonuskapitel zu *Kunststoffhandbuch für Dummies*, © Wiley-VCH Verlag (ISBN 978-3-527-71400-1)

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 2

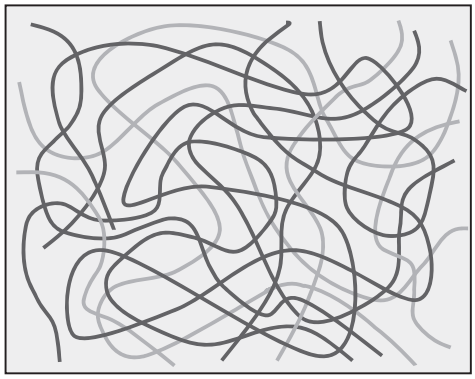
Polymerblend	Polymerlegierung
	

Tabelle 1.1: Prinzipskizze Polymerblend und –legierung

Warum mischt man Polymere überhaupt miteinander?

Weil beide Mischungstypen, Legierungen als auch Blends, sich auszeichnen durch höhere Schlagzähigkeit, höhere Steifheit und höhere Wärmeformbeständigkeit als jeder der beteiligten Mischungspartner.

Eine hohe Schlagzähigkeit ist z. B. wichtig für Fahrzeugteile. Sowohl die Außenteile (Stoßfänger, Außenspiegel-Gehäuse) als auch die Innenraumverkleidung sollen ja bei einem Unfall nicht splittern und gefährlich spitze und scharfe Zacken und Bruchkanten bilden, sondern sich verformen, wobei die Oberfläche heil bleibt (und das Unfallopfer so weit möglich auch). Für Wintersportgeräte können auch Blends gemischt werden, die auch noch bei Kälte schlagzäh bleiben.

Hintergrund der ganzen Mischerei ist, dass die Polymerchemie hinsichtlich der Kreation neuer Polymertypen so langsam an ihre Grenzen gestoßen ist. Die Chemiker haben zwar im Laufe der Zeit so an die tausend Moleküle entwickelt, die als Monomer verwendbar sind, also zu Polymerketten verbunden werden können. Davon werden aber nur etwa fünfzig tatsächlich technisch, industriell genutzt. Um einen neuen Kunststoff für ein spezielles Anforderungsprofil zu entwickeln, ist es einfacher, schon vorhandene Polymertypen miteinander zu kombinieren, statt bei »Adam und Eva« anzufangen und etwas Neues zu polymerisieren.

Zuschlagstoffe

Sowohl bei den reinen Polymeren als auch bei den Mischungen (Blend oder Legierung) können weitere Stoffe beigemischt werden. Sogar sehr gut, weil die meisten Kunststoffe über eine hohe Adhäsion verfügen und sich somit besonders gut zum Mischen mit anderen Substanzen eignen.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 3

Die Zuschlagstoffe können in zwei große Gruppen unterteilt werden:

1. Füllstoffe und

2. Additive

Füllstoffe sind unlöslich im Kunststoff. Sie werden in großer Menge beigegeben. Dementsprechend liegen sie relativ grob verteilt im Polymer vor. Additive sind viel feiner verteilt, oft sogar gelöst im Kunststoff. Ihr Anteil an der Gesamtmasse beträgt nur ein paar Gewichtsprozent.

Die Mischung aus Polymer(en) und Zuschlagstoffen wird **Compound** genannt. Das englische Verb »to compound« bedeutet auf Deutsch einfach nur »zusammensetzen«.

Füllstoffe

Füllstoffe dienen in erster Linie der mechanischen Verstärkung des Matrix-Materials. Umgekehrt können sie aber auch sehr spröde Elastomere elastischer machen. Manchmal werden sie auch gar nicht eingesetzt, um die Eigenschaften zu ändern, sondern um die Verarbeitung zu verbessern, beispielsweise um die Fließfähigkeit der Kunststoffschmelze zu erhöhen.

Organische Polymere sind leicht brennbar (siehe dazu auch Kapitel 8, »Brandverhalten«). Die meisten Füllstoffe sind hingegen anorganischer Natur und somit nicht brennbar. In großen Mengenanteilen untergemischt vermindern sie die Brennbarkeit des Kunststoffes und tragen so zum Brandschutz bei.

Schließlich sind Füllstoffe in der Regel billiger als die teuren Polymere, so kann das Material gestreckt und der Preis verringert werden. Füllstoffe, die nur diesen Zweck erfüllen, werden inaktiv genannt. Die Füllstoffe, welche die (mechanischen) Eigenschaften verändern, werden aktive Füllstoffe genannt.

Die meisten Füllstoffe sind wie gesagt anorganisch. Es gibt aber auch Füllstoffe organischen Ursprungs. Hier eine Übersicht:

Organische Füllstoffe (die mit Kohlenstoffverbindungen):

- ✔ Kohlenstofffasern,
- ✔ gemahlene Kunststoffe oder Elastomere,
- ✔ Holzmehl.

Anorganische Füllstoffe (ohne Kohlenstoffverbindungen):

- ✔ Silikate, z. B. Kaolin, Kieselerde, Talkum,
- ✔ Carbonate, z. B. Calciumcarbonat (Kalk, Kreide) ,
- ✔ Oxide, Hydroxide, z. B. Quarzmehl, Zinkoxid, pyrogenes Siliciumdioxid,

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 4

- ✔ Ruß, Graphit,
- ✔ Glasfasern, Glaskugeln.

Warum mischt man gemahlene Kunststoffe (oder Elastomere) in einen neuen Rohpolymer ein?

Die Kunststoffe, die klein gemahlen als Füllstoff Verwendung finden, kommen aus dem Recycling. Allerdings können sie nicht einfach wieder aufgeschmolzen werden. Ebenso wie die Elastomere sind diese Kunststoffe vernetzt. Polyvinylchlorid (PVC) ist ein bekanntes Beispiel für diese Art von Kunststoffen. Der Elastomer Butadien hingegen wird in den Thermoplast Styrol eingemischt, um diesen elastischer zu machen. Pures Styrol ist relativ spröde (siehe dazu auch Kapitel 14, »Polystyrol«).

Bei Glas- oder Kohlenstofffasern sind Sie nicht eingeschränkt darauf, diese als Matte, quasi am »Stück« in die Polymer-Matrix einzubringen. Dann ist das Ganze sowieso eher ein Verbundwerkstoff und kein Compound mehr. Auch wenige Millimeter lange Schnipsel dieser Faser verstärken den Compound erheblich. Glas kann zudem in Form kleiner Kügelchen eingemischt werden, dies hat ebenfalls verfestigende Wirkung. Der Durchmesser dieser Kugeln ist kleiner als ein Millimeter. Es sind auch Kügelchen mit einem Durchmesser von 3 μm herstellbar. Glaskugeln haben gegenüber den Fasern den Vorteil, dass der Compound isotrop bleibt und nicht in unterschiedlichen Richtungen unterschiedliche Festigkeiten aufweist. Außerdem ist so ein Compound leichter zu verarbeiten.

Im Folgenden noch weitere Informationen zu den wichtigsten Füllstoffen.

Ruß

Neben der schon erwähnten Verstärkung erhöht Ruß den Abriebwiderstand, die UV-Beständigkeit sowie die elektrische Leitfähigkeit. Aufgrund seiner starken Deckkraft färbt es jegliches Polymer, ob Gummi oder Kunststoff, gnadenlos schwarz ein. Aus diesem Grund sind KFZ-Anbauteile aus Kunststoff (z. B. Stoßfänger, Außenspiegel-Gehäuse, Scheibenwascher-Düsen etc.) in der Regel schwarz. Um diese Kunststoffteile ausreichend beständig gegen die UV-Strahlen im Sonnenlicht zu machen, gibt es nichts Besseres als Ruß. Die Leitfähigkeit von und mit Ruß kann sogar so eingestellt werden, dass der Ruß in der Lage ist, Radarstrahlen zu schlucken. Falls Sie mal ein Stealth-Flugzeug bauen wollen.

Ruß ist schon seit der Antike bekannt und wurde benutzt als Pigment für Tusche und Tinte. Es ist bis heute der wichtigste Füllstoff, vor allem in der Gummi-Industrie. Ein wichtiger Grund, warum er als Füllstoff so gut geeignet ist: Ruß hat ein extrem hohes Oberflächen/Massen-Verhältnis. Die Partikel von einem Gramm Ruß können zusammengerechnet eine Oberfläche von bis zu 1.500 m^2 haben. Leicht nachvollziehbar, dass mit einer dermaßen großen Oberfläche eine hervorragende Haftung in der Polymer-Matrix erreicht wird.

Herstellung von Ruß

Der technisch verwendete Ruß wird in genau gesteuerten Prozessen industriell hergestellt. Deswegen wird er auch Industrieruß oder, auf Englisch, »Carbon Black« genannt.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 5

Den Dreck, der im Auspuff oder im Schornstein klebt, nennt der Engländer »soot«. Dieser ist nicht so rein wie der Industrieruß, sondern enthält noch krebsgefährdende Kohlenwasserstoffe.

Heutzutage wird Ruß zu 95% im Furnaceruß-Verfahren hergestellt. In einer Brennkammer (engl. »Furnace«) verbrennt Gas oder Öl. In das heiße Abgas wird der Ruß-Rohstoff, meistens sind das Öl-Rückstände aus der Raffination, eingespritzt. Der Ruß entsteht dann mittels zweier verschiedener Prozesse:

1. Durch unvollständige Verbrennung. Der dabei entstehende Ruß wird **Verbrennungsruß** genannt. Die Kohlenwasserstoffe des Ausgangsmaterials verbrennen zwar, es ist aber nicht genug Sauerstoff vorhanden, um alle Atome zu oxidieren, es bleibt freier Kohlenstoff übrig.
2. Durch Pyrolyse. Der dabei entstehende Ruß wird **Spaltruß** genannt. Aufgrund der großen Hitze bei der Verbrennung zerfallen die Kohlenwasserstoffe in ihre Bestandteile Wasserstoff und Kohlenstoff. Der Wasserstoff ist leicht flüchtig und entweicht oder reagiert mit zufälligerweise doch noch vorhandenem Sauerstoff, ist auf jeden Fall weg. Es wird aber auch Kohlenstoff freigesetzt.

Nachdem der eingespritzte Rohstoff vollständig zu Ruß umgewandelt worden ist, kann die Größe der Rußpartikel genau eingestellt werden, indem die Rußwolke noch eine gewisse Zeit in der heißen Brennkammer belassen wird. Die kleinen Rußpartikel verklumpen dabei zu größeren Aggregaten. Ist die gewünschte Partikelgröße erreicht, wird dieser Prozess schlagartig abgebrochen, indem in der Brennkammer über Düsen kaltes Wasser zerstäubt wird.

Graphit

Bereits Ruß macht Kunststoffe elektrisch leitfähig. Da seine innere Struktur aber amorph, also ohne Fernordnung ist, können die Elektronen doch nicht so gut wandern. Im Graphit sind die Kohlenstoffatome in hexagonaler Kristallstruktur zusammengesetzt. Da die Kohlenstoffatome miteinander verbunden sind, leitet dieser Werkstoff den elektrischen Strom besser.

42% aller synthetisch hergestellten Graphite werden zu Elektroden verarbeitet. Bei der Erzeugung von einer Tonne Elektrostahl werden 2 bis 2,5 kg Graphit-Elektroden verbraten.

Außerdem senkt Graphit den Reibungswiderstand, der Kunststoff wird gleitfähiger und eignet sich so z. B. als Material für Lagerbuchsen.

Weltweit existieren natürliche Vorkommen, aus denen Graphit abgebaut wird. Graphit kann aber auch künstlich hergestellt werden. Dazu werden erst mal Erdöl oder auch Steinkohle oder sogar Kunststoffe mittels großer Hitze verkokt. Es findet also im Gegensatz zur Rußherstellung keine unvollständige Verbrennung statt, sondern nur die Pyrolyse. Anschließend kristallisiert der Kohlenstoff unter Luftabschluss bei 3.000°C zu Graphit.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 6

Siliciumdioxid

Auch hier liegt der Grundstoff, das Siliciumdioxid, vollkommen amorph vor.

Vielleicht ist Ihnen dieser Werkstoff auch noch geläufig unter der alten Bezeichnung Kieselsäure. Diese Bezeichnung ist aber falsch. Siliciumdioxid ist chemisch korrekt ein Anhydrid der Monokieselsäure. Diese hat die Summenformel $Si(OH)_4$. Bei Siliciumdioxid lautet die Formel SiO_2. Bei der Umwandlung sind also zwei Wassermoleküle (H_2O) verloren gegangen.

Siliciumdioxid kann auf zwei Arten hergestellt werden. Dementsprechend wird unterschieden in:

1. gefälltes Siliciumdioxid oder

2. pyrogenes Siliciumdioxid.

Bei beiden Arten ist Sand der Ausgangsstoff. Sand ist zwar bereits Siliciumdioxid, aber zu großen Partikeln verbunden. So fein können Sie Sand nicht mahlen, dass Partikel mit einer dermaßen großen Oberfläche entstehen wie bei den beiden im folgenden beschriebenen Methoden.

Gefälltes Siliciumdioxid ist auch bekannt als Wasserglas. Zur Herstellung werden Quarzsand und Kalium- oder Natriumcarbonat miteinander verschmolzen und anschließend vermahlen. Dieses Pulver wird in Schwefelsäure aufgelöst, dabei fällt das Siliziumdioxid aus. Es setzt sich als feines Pulver auf dem Boden des Reaktionsgefäßes ab.

Für das pyrogene Siliciumdioxid wird zunächst Sand mit Kohlenstoff reduziert. Das heißt, der Sauerstoff im Siliciumdioxid des Sandes reagiert mit dem Kohlenstoff. Zum einen entsteht Kohlendioxid, das ist gasförmig und verflüchtigt sich. Zum anderen entsteht reines Silicium. Dieses lässt man mit Chlor reagieren. Das entstandene Siliciumtetrachlorid wird verdampft und mit Wasserstoff und Sauerstoff, also Knallgas, vermischt. Das Gasgemisch wird entzündet, es kommt zur Pyrolyse. Es reagieren jeweils Sauerstoff und Silicium und Chlor und Wasserstoff miteinander. Als Nebenprodukt dieser Methode entsteht also Salzsäure.

In ihren Eigenschaften unterscheiden sich die beiden Arten ein wenig voneinander. Einen entsprechenden Vergleich finden Sie in Tabelle 1.2.

Auch dieser Werkstoff verfügt, in beiden Herstellungsarten, über eine extrem hohe spezifische Oberfläche.

Siliciumdioxid zeichnet sich aus durch besondere Härte und chemische Beständigkeit. Außerdem sorgt es dafür, dass mit steigender Schergeschwindigkeit die Viskosität abnimmt (die sogenannte Thixotropie, siehe den Unterpunkt »Panta rhei – alles fließt« in Kapitel 5, »Messungen bei Herstellung und Verarbeitung«). Ein Kunststoff mit Siliciumdioxid als Füllstoff ist also leichter verarbeitbar als ohne.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 7

Eigenschaft	Einheit	Pyrogen	Gefällt
Spez. Oberfläche	m^2/g	50 bis 600	30 bis 800
Primärteilchengröße	nm	5 bis 50	5 bis 100
Agglomeratgröße	μm	0,1 bis 100	1 bis 40
Spezifische Dichte	g/cm^3	2,2	1,9 bis 2,1
pH-Wert		3,6 bis 4,3	5 bis 9
Porendurchmesser	nm	0 bis 300	> 30
Trocknungsverlust	%	≤ 2,5	3 bis 7

Tabelle 1.2: Vergleich pyrogenes und gefälltes Siliciumdioxid

Kieselgur

Möchten Sie amorphes Siliciumdioxid haben, sind Sie nicht auf die synthetische Herstellung beschränkt. Auch Kieselalgen (die sogenannten Diatomeen), die in der Urzeit die Erde bevölkerten, haben diese Substanz zum Bau ihrer Schalen verwendet. Dementsprechend liegt dieser Werkstoff heute als Sedimentgestein vor. Kieselgur ist ebenfalls ein sehr hochporöser, chemisch neutraler Werkstoff.

Eigenschaften:

- ✔ Geringes spezifisches Gewicht, somit beeinträchtigt Kieselgur nicht einen der wichtigsten Vorteile von Kunststoffen, nämlich deren Leichtigkeit.
- ✔ Schlechter Wärmeleiter, auch das passt hervorragend zu Kunststoffen, die ebenfalls schlechte Wärmeleiter sind.
- ✔ Biozid, das kann überall da von Nutzen sein, wo Kunststoffe zur Herstellung von Produkten, die besonders hygienisch sein müssen, verwendet werden. Also Sanitärbereich, Medizintechnik und auch für Produkte, die mit Lebensmitteln in Kontakt kommen.

Als Füllstoff wird Kieselgur außer für Kunststoffe auch für Elastomere verwendet. Autoreifen werden dadurch abriebfester und temperaturbeständiger.

Quarzmehl

Auch Siliciumdioxid liegt nicht nur amorph vor, sondern kann wie der Kohlenstoff auskristallisieren. Das so entstandene Quarz wird schon seit der Steinzeit vom Menschen verwendet (daher ja die Bezeichnung für dieses Zeitalter). Quarzmehl als Füllstoff macht Kunststoffe sehr hart und abriebfest. So können ideale Werkstoffe für Fußbodenbeläge oder Arbeitsplatten gemischt werden. Praktischer Nebeneffekt von Quarzmehl als Füllstoff: Quarz selber ist überhaupt nicht brennbar, somit senkt es die Brennbarkeit des Compounds. Wie die anderen Formen des Siliciumdioxids ist auch Quarz sehr säurebeständig, nur von Flusssäure wird es angegriffen.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 8

Calciumcarbonat

Calciumcarbonat, auch bekannt als Kreide oder als (kohlensaurer) Kalk, ist eine der am weitesten auf der Erde verbreiteten Verbindungen. Mehr als fünf Prozent der Erdkruste bestehen daraus. Vor allem als Sedimentgestein kommt es vor, der sogenannte Kalkstein. Eine besonders edle Form von Calciumcarbonat ist Marmor.

Gemessen am weltweit verkauften Volumen ist Calciumcarbonat der bedeutendste Füllstoff, allerdings nicht nur für Kunststoffe. Die Papierindustrie verbraucht noch mehr davon.

Synthetisch hergestelltes Calciumcarbonat wird auch als PCC bezeichnet. Die Abkürzung steht für **precipitated calcium carbonate**, englisch für gefälltes Calciumcarbonat. Das natürlich vorkommende Calciumcarbonat wird abgekürzt GCC bezeichnet. Das steht für das Englische **ground calcium carbonate**, auf Deutsch gemahlenes Calciumcarbonat.

Calciumcarbonat wird als Füllstoff vor allem verwendet, wenn der Compound schön weiß sein soll. Aber ebenso wie der Kalkstein am Wasserhahn am besten mit Essigkonzentrat entfernt, genauer gesagt, einfach aufgelöst wird, ist auch Calciumcarbonat nicht säurebeständig.

Calciumcarbonat macht nicht nur schön weiß, es verbessert auch die mechanischen Eigenschaften. Zum Beispiel verbessert es bei Polypropylen die Steifigkeit, ohne dass die Schlagzähigkeit abnimmt. Auch die Warmformbeständigkeit nimmt zu. Ein aus so einem Compound hergestelltes Produkt kann bei höheren Temperaturen eingesetzt werden. Calciumcarbonat erhöht auch die Wärmeleitfähigkeit des Compounds. Was erst mal eher wie ein Nachteil klingt, hat auch den Vorteil, dass ein Kunststoff mit Calciumcarbonat schneller schmilzt und nach dem Spritzgussvorgang schneller abkühlt und erstarrt. Somit verkürzt sich die Zykluszeit bei der Verarbeitung. Ein Nachteil muss auf jeden Fall in Kauf genommen werden. Calciumcarbonat mit seiner Dichte von 2,73 g/cm^3 macht den Compound schwerer. Zum Teil kann dieser Nachteil wieder dadurch ausgeglichen werden, dass der Compound höhere Festigkeit besitzt. So können die Materialstärken reduziert werden.

Muscheln, Krebse, Korallen und Schnecken wissen die Härte, Festigkeit und Beständigkeit dieses Werkstoffes ebenfalls zu schätzen. Und bauen sich ihren Außenpanzer daraus.

Kaolin

Kaolin ist ein Mineraliengemisch mit dem Hauptbestandteil Kaolinit, einem Aluminiumsilikat. Auch Kaolin kann mit einer großen spezifischen Oberfläche aufwarten. Es ist das einzige weiße Mineralpigment, dessen Partikel schon von Natur aus kleiner als 2 μm sind. Das führt zu einer hohen Adhäsion im Polymer.

Es macht ebenfalls schön weiß, gepaart mit einer hohen Helligkeit und starken Deckkraft. Kaolin verfügt über eine hohe chemische Beständigkeit. Außerdem trägt es dazu bei, die Abrasion zu verringern. Deswegen wird Kaolin unter anderem als Füllstoff für Fahrzeugreifen verwendet. Bei Kunststoffen verbessert es die mechanischen Eigenschaften. Zum Beispiel erhöht es den E-Modul von Polyethylen.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 9

Neuburger Kieselerde

Dies ist ein weltweit einmaliges Gemisch aus Kieselgur und Kaolin, welches nur in Neuburg an der Donau zu finden ist.

Neuburger Kieselerde ist ein sehr reiner Stoff. Er ist nicht nur nicht gesundheitsschädlich, sondern wird im Gegenteil sogar als Nahrungsergänzungsmittel verwendet. Somit ist es ein idealer Füllstoff für Kunststoffe, die mit Lebensmitteln in Kontakt kommen. Es ist ein lockeres, gut einmischbares Pulver mit geringer Korngröße. Als Füllstoff für Polymere kommt es hauptsächlich bei Elastomeren zum Einsatz.

Talkum

So wird die pulverisierte Form des Minerals Talk genannt. Chemisch handelt es sich um Magnesiumsilikathydrat. Dieser Füllstoff macht den Compound ebenfalls weiß, zudem mit sehr hoher Helligkeit. Zwar ist Talk das weichste aller Minerale, trotzdem sorgt es für eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften.

Hauptsächlich wird es zur Verstärkung von Polyethylen und Polypropylen eingesetzt. Bei Polypropylen ist es der am häufigsten verwendete Füllstoff. Talkum verbessert die Steifigkeit, die Dimensions-Stabilität, die Wärmestandfestigkeit sowie das Kriechverhalten.

Nicht als Füllstoff, der sich ja gut in die Matrix einbinden soll, sondern als das genaue Gegenteil, nämlich als Trennmittel, wird Talkum auch verwendet, beispielsweise zwischen Reifenmantel und Schlauch oder auch in Kabeln.

Genug der anorganischen Füllstoffe, jetzt kommt das spannende Feld der organischen Füllstoffe.

Holzmehl

Holzmehl wie aus der Schreinerei ist in der Tat ein so besonderer Füllstoff, dass ein Compound damit nicht mehr einfach als füllstoffverstärkter Kunststoff bezeichnet werden kann. Zurzeit bekannt sind Compounds dieser Art unter der englischen Bezeichnung **Wood-Plastic-Composite**, abgekürzt WPC, auf Deutsch Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoff, abgekürzt HKV. Es gibt auch die Bezeichnungen Thermoplastischer Faserstoff, abgekürzt TPF und Hightech-Holz.

Statt Holzmehl können auch andere Pflanzenfasern, z.B. Abaka, Kenaf, Jute, Hanf oder Flachs verwendet werden. Auch Baumwolle wird verwendet. Deswegen finden sich auch die Bezeichnungen naturfaserverstärkter Kunststoff, abgekürzt NFK oder Naturfaserverbundwerkstoff.

Abaka wird auch Manilahanf genannt. Diese Pflanze ist aber gar kein Hanf, sondern ein Bananengewächs. Allerdings sind die Früchte nicht genießbar. Die Pflanze ist ca. drei bis acht Meter hoch und in Ostasien heimisch. Die Fasern werden verwendet zur Herstellung von Schiffstauen und Fischnetzen. Dazu prädestiniert sie ihre Eigenschaft, dass sie besonders resistent gegen Salzwasser sind. Weiter

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 10

werden die Fasern für Hängematten, Teppiche und zur Papierherstellung verwendet. Kenaf ist eine drei bis vier Meter hohe Pflanze, welche in Afrika und Asien wächst. Sie gehört zu den Malvengewächsen, genauer zum Hibiskus. Die Fasern werden zu Seilen oder Sacktuch verarbeitet. Sie sind weniger lichtempfindlich als Jutefasern. Auch die Kenaffasern werden für die Papierherstellung verwendet.

Damit sich solche Werkstoffe auch noch Biowerkstoff nennen dürfen, muss der Holzanteil größer als zwanzig Prozent sein. Dies ist aber in der Regel der Fall, üblich sind in Europa fünfzig bis neunzig Prozent Holzfaseranteil und in Nordamerika fünfzig Prozent.

Holzmehl wird meistens mit Polyethylen oder Polypropylen compoundiert. Beide sind sehr preisgünstige Thermoplaste, die auch sehr leicht zu verarbeiten sind. Aber ungefüllt, pur sind beide Thermoplaste »etwas schwach auf der Brust«. Sie verfügen nur über geringe mechanische Festigkeit, siehe dazu auch die Kapitel »Polyethylen« und »Polypropylen«. Das Einmischen von Holzmehl liefert einen Compound mit weit höherer mechanischer Festigkeit. Der Einsatz von Holzmehl bei anderen Kunststoffsorten ist allerdings eher unüblich.

Die genannten Pflanzenfasern werden verarbeitet mit Duromeren, zum Beispiel Phenolharz, Polyesterharz oder Epoxidharz. Oder auch mit Thermoplasten wie Polyamid, Polystyrol oder Polycarbonat. Sowohl die Verwendung von langen als auch kurzen Fasern ist möglich. Verarbeitbar sind solche Compounds mit allen gängigen Verfahren für Kunststoffe: Spritzguss, Extrusion, Pressen, Thermoformen.

Und was bringen die organischen Füllstoffe an Vorteilen?

Vorteile von organischen Füllstoffen

Erst mal ist die Dichte von Naturfasern geringer als die von Glasfasern oder anorganischen Füllstoffen, bei (fast) gleich guter Verbesserung der Eigenschaften, wie z.B. bessere Wärmeformbeständigkeit, geringerer thermischer Ausdehnungskoeffizient und höhere Steifigkeit.

Zusätzlich sind Naturfasern gesundheitlich weniger bedenklich als anorganische Fasern. Die Arbeitssicherheit bei der Verarbeitung ist eindeutig höher.

Und natürlich sind organische Füllstoffe biologisch abbaubar. In Verbindung mit ebensolchen Polymeren (siehe den Unterpunkt »Biologisch abbaubare Kunststoffe, Biokunststoffe« in Kapitel 26, »Kunststoffe und Umwelt«) ist dann das komplette Produkt biologisch abbaubar und belastet nicht die Umwelt nach Ende der Gebrauchsdauer. Als Beispiel sei hier ein Mobiltelefongehäuse der NEC Corporation genannt, welches aus kenafverstärktem Polylactid hergestellt wird (zu Polylactid siehe den entsprechenden Unterpunkt, ebenfalls im o.g. Kapitel).

Das WPC hat gegenüber Spanplatten zwei Vorteile. Zum einen ist es dreidimensional formbar, zum anderen ist es beständiger gegen Feuchtigkeit.

Der Umweltschutz fängt schon bei der Herstellung an. Denn dafür wird bei organischen Füllstoffen weniger Energie benötigt als bei Glas- oder Kohlenstoff-Fasern.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 11

Allerdings sind auch ein paar Nachteile von organischen Füllstoffen zu nennen, vor allem in der Verarbeitung.

Nachteile von organischen Füllstoffen

Erstens halten sie praktisch durchweg nicht so hohe Temperaturen aus wie die weiter oben beschriebenen »industriellen« Füllstoffe. Deswegen können sie nur in Polymeren verarbeitet werden, deren Schmelztemperatur weit unterhalb von 200°C liegt.

Zweitens sind Naturfasern stark hydrophil, auf Deutsch: wasserliebend. Sie nehmen also sehr gut Wasser auf (deswegen sind Handtücher aus Baumwolle!). Dies liegt an den Hydroxy-Gruppen in der Cellulose. Diese sind aber auch verantwortlich dafür, dass die Fasern nicht gut in der Polymer-Matrix haften. Somit können sie ihre guten mechanischen Eigenschaften nicht auf die Polymer-Matrix übertragen. Abhilfe verschaffen hier **Haftvermittler**.

Prinzipiell gibt es zwei Arten von Haftvermittlern:

- ✔ reaktive Haftvermittler, welche eine chemische Bindung zwischen Polymer und Füllstoff herstellen und
- ✔ nicht reaktive Haftvermittler, welche die Bindung mit physikalischen Effekten erzeugen, zum Beispiel mittels Dipol-Dipol-Wechselwirkungen.

Beide Arten erhöhen die Benetzbarkeit der Oberflächen der beiden Stoffe.

Hier die drei wichtigsten Arten von Haftvermittlern:

1. Silane (Silicium-Wasserstoff-Verbindungen)
2. Metallorganische Verbindungen, Titanate, Zirkonate
3. Polymere, Polyolefine, Polyester, Polyethylenimin

Drittens kennzeichnet Naturstoffe eine Eigenschaft, die einen großen Unterschied zu industriell hergestellten Stoffen ausmacht: die große Schwankungsbreite der Materialdaten von Charge zu Charge oder sogar innerhalb einer Charge. Bei vielen Naturprodukten ist diese Eigenschaft ja sogar erwünscht. Ein Sommelier kann Ihnen stundenlang die Unterschiede zwischen dem 2012er und dem 2013er Jahrgang beschreiben – bei derselben Weinsorte wohlgemerkt. In der Technik ist diese Eigenschaft aber schlichtweg inakzeptabel. Mal hält das Bauteil derselben Belastung stand und ein andermal nicht, das geht nicht. Um diese Schwankungsbreite einzugrenzen, können die Fasern mit Ultraschall behandelt werden. Dadurch werden die Fasern aufgeschlossen, sodass ihre Materialdaten annähernd angeglichen werden.

Viertens sind Biopolymere meistens teurer als die klassischen erdölbasierten Polymere. Dafür sind sie aber auch unabhängig vom stark schwankenden Erdölpreis und somit preisstabiler. Böse Zungen mögen jetzt einwenden: »Also sind Biopolymere immer teuer?!«.

Und fünftens besitzt WPC gegenüber Vollholz geringere Bruchfestigkeit und gegenüber Kunststoff eine deutlich höhere Wasseraufnahme.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 12

Kennwert	Einheit	NF-EP	CF-EP	Alu-Legierung
Dichte	g/cm^3	1,31 bis 1,33	1,5	2,7
Zugfestigkeit	MPa	330 bis 365	2850	49 bis 700
Spez. Zugfestigkeit	$MPa \cdot cm^3/g$	248 bis 278	1900	18 bis 259
E-Modul	GPa	35	225	70 bis 73
Spez. E-Modul	$GPa \cdot cm^3/g$	26,3	150	25,9 bis 27

Tabelle 1.3: Vergleich Naturfaser zu Kohlenstoff-Faser und Alu-Legierung

In der Regel verfügen naturfaserverstärkte Kunststoffe nur über geringe Schlagzähigkeit. Hier ein tabellarischer Vergleich einiger mechanischer Kennwerte von Epoxidharz verstärkt mit Flachsfasern (NF-EP), verstärkt mit Kohlenstoff-Fasern (CF-EP) und einer Aluminiumlegierung.

Sie sehen, Kohlenstoff-Fasern sind als Füllstoff immer noch unschlagbar. Und was die Zugfestigkeit angeht, schlagen sie sogar den metallischen Werkstoff. Aber das Epoxid mit den Flachsfasern ist der leichteste Werkstoff in diesem Vergleich. Deswegen können die spezifischen Kennwerte, also Zugfestigkeit beziehungsweise E-Modul bezogen auf das spezifische Gewicht, immerhin sogar mit Aluminium mithalten.

Anwendungen

Naturfaserverstärkte Kunststoffe werden unter anderem eingesetzt im Fahrzeugbau und hier in der Innenraumverkleidung. Dort sind sie vor Witterung (UV-Licht, Feuchtigkeit) geschützt. Sie sind leichter als Glasfasern, machen das Auto leichter und damit umweltfreundlicher.

Eine gar nicht mal so neue Anwendung. Ford stellte bereits 1941 so ein Fahrzeug vor, allerdings nur als Studie. Dagegen wurde der Trabant jahrzehntelang in Serie gefertigt mit einer Karosserie aus faserverstärktem Duromer.

Additive

Diese werden auch als Hilfs- oder Zusatzstoffe bezeichnet. Im Gegensatz zu den Füllstoffen, deren Anteil am Compound bis zu neunzig Prozent betragen kann, werden Additive sehr sparsam eingesetzt. Ihr Anteil beträgt meistens weniger als ein Prozent an der gesamten Compound-Masse. Der Aufgabenbereich von Additiven kann allerdings nicht so klar gegenüber dem von Füllstoffen abgegrenzt werden.

Bereits Füllstoffe können einige Aufgaben übernehmen, die typisch für Additive sind. So ist beispielsweise Ruß auch ein hervorragender UV-Schutz. Und anorganische Füllstoffe senken die Brennbarkeit quasi als Nebeneffekt.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 13

Umgekehrt sind zwar Füllstoffe in erster Linie für die mechanischen Eigenschaften zuständig. Aber auch Weichmacher verändern diese Eigenschaften grundlegend und Weichmacher werden zu den Additiven gezählt.

Auf jeden Fall sind Additive Spezial-Chemikalien, ein gewisses Know-how ist zu deren Herstellung erforderlich. Die produzierte Menge ist in der Regel gering. Das hat zur Folge, dass Additive relativ teuer sind, somit erhöhen sie den Preis des Compounds beträchtlich.

Im Folgenden möchte ich Ihnen eine Übersicht über gängige Additive geben. Da aber Additive einen dermaßen immensen Einfluss auf die Eigenschaften des Compounds haben, werde ich sie hier in dieser Auflistung nur kurz vorstellen und im jeweiligen Kapitel in diesem Buch ggfs. ausführlicher darauf eingehen. Hier bleibt Ihnen ein Hin- und Herblättern leider doch nicht erspart.

Trocknungshilfsmittel

auch Sikkative genannt, werden in ölhaltige Anstriche eingemischt. Sie wirken als Katalysator und verkürzen somit das Abbinden der Farbe. Umgangssprachlich, aber falsch, wird das als »Trocknen« der Farbe bezeichnet. Falsch ist es, weil mit Trocknen das Verdunsten des Lösungsmittels bezeichnet wird. Beispielsweise trocknen Wasserfarben. Ölfarben werden aber fest durch Vernetzen der Polymerketten im Öl.

Antioxidantien

Diese verhindern oder verlangsamen wenigstens die Oxidation und damit die Degradation von Kunststoffen. Dadurch erhöhen die Antioxidantien die Beständigkeit gegenüber:

- ✔ Temperatur,
- ✔ Licht,
- ✔ Wetter, Luft-Sauerstoff, Ozon, Feuchtigkeit sowie
- ✔ UV-Strahlen, siehe den Unterpunkt »UV-Beständigkeit«, in Kapitel 10.

Das Material beständiger zu machen bedeutet chemisch gesehen, dass das Polymer-System stabiler wird. Deswegen werden diese Art Additive auch **Stabilisator** genannt.

Nukleierungsmittel

Diese wurden schon im Kapitel »Teilkristalline Thermoplaste« vorgestellt. Sie sorgen in teilkristallinen Kunststoffen dafür, dass in der Schmelze schnell viele Sphärolithe entstehen, die sich gegenseitig am Weiterwachsen behindern. So entsteht ein feinkörniges, festes Material. Außerdem erstarrt der Kunststoff auf diese Weise schneller, somit kann die Taktzeit gesenkt werden.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 14

Weichmacher

Wie der Name schon sagt, bewirken diese, dass an und für sich spröde Kunststoffe weicher und elastischer werden. Außerdem erhöhen sie die Kerbschlagzähigkeit.

Weichmacher können auf zwei Arten wirken:

1. äußere Weichmachung und
2. innere Weichmachung.

Innere Weichmachung

Bei der inneren Weichmachung wird der Weichmacher in die Polymerkette eingebaut. Es kommt also ein Copolymer dabei heraus. Vorteil dieses Verfahrens: der Weichmacher kann nicht ausdiffundieren. Somit bleibt der Kunststoff dauerhaft weich und die Umwelt wird nicht geschädigt.

Äußere Weichmachung

Bei der äußeren Weichmachung wird der Weichmacher nicht kovalent mit der Polymerkette verbunden, sondern zwischen den Polymerketten eingelagert. Dadurch werden die Bindungskräfte zwischen den Ketten schwächer, die Ketten können sich leichter gegeneinander bewegen. Allerdings ist auch die Bindung des Weichmachers in der Polymermatrix schwächer. Der Weichmacher kann ausdiffundieren. Das wäre weiter nicht so schlimm, wenn nicht die meisten Weichmacher leider auch sehr gesundheits- und umweltschädliche Stoffe wären. Der mit großem Abstand am meisten eingesetzte Weichmacher ist **Diethylhexylphthalat** (DEHP). Diese Substanz wird aber auch als fruchtbarkeitsschädigend eingestuft. Ersatzstoffe sind zwar vorhanden, z.B. **(C10-C21) Alkansulfonsäurephenylester** oder **1,2-Cyclohexandicarbonsäurediisononylester** (DINCH). Außerdem gibt es Weichmacher auf Basis von Zitronensäure und Adipinsäure. Diese sind aber teurer. Zur Problematik von Weichmachern in PVC siehe den Unterpunkt »PVC – der umstrittenste aller Kunststoffe« in Kapitel 13, »Polyvinylchlorid«.

Antistatika

Um die nicht nur lästige, sondern zuweilen sogar schädliche elektrostatische Aufladung von Oberflächen aus Kunststoff zu unterbinden, stehen drei Wirkmechanismen zur Verfügung:

1. die elektrische Aufladung ableiten mittels eines Additivs, welches selber leitfähig ist, z. B. kann Ruß auch hier genannt werden, ein weiteres leitfähiges Additiv sind Aluminiumflocken,
2. ein Additiv verwenden, welches selber zwar nicht leitfähig ist, aber mit der Luftfeuchtigkeit einen leitfähigen Film bildet,
3. mittels eines geeigneten Additivs die Reibung verringern, durch welche die Oberfläche sonst elektrostatisch aufgeladen wird.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 15

Die selber nicht leitfähigen Antistatika können entweder auf die Oberfläche aufgetragen werden, dann spricht man von externen Antistatika, oder sie werden in den Kunststoff eingemischt, dann sind es interne Antistatika. Dann sind es auch Additive im engeren Sinn.

Nachträglich auf die Oberfläche aufgetragen werden Tenside. Die Tenside setzen die Oberflächenspannung herab, die Oberfläche kann durch Feuchtigkeit benetzt werden. Dies ist bei allen Kunststoffarten möglich. Der Tensidfilm kann allerdings schon durch Reiben abgetragen werden. Die Tenside können aber auch in den Kunststoff eingemischt werden. Sie diffundieren dann im Kunststoff, bis sie von innen an die Oberfläche stoßen. Dort richten sie sich aus, der hydrophile Teil der Tenside schaut aus der Oberfläche raus und zieht das Wasser aus der Luftfeuchtigkeit an. Der Vorteil liegt auf der Hand: Die Tenside können so nicht durch Reibung abgetragen werden.

Weitere Additiv-Typen

Zum Schluss sind noch ein paar weitere wichtige Zusatzstoffe zu nennen, die ich hier aber nur aufliste. In den entsprechenden Kapiteln werden diese Stoffe im Zusammenhang näher beschrieben.

- ✔ Härter zum Aushärten von Duromeren, siehe den fünften Teil, »Gelobt sei, was hart macht«
- ✔ Triebmittel zur Schaumbildung, siehe Kapitel 14, »Polystyrol«
- ✔ Flammschutzmittel, siehe den Unterpunkt »Feuerschutz« in Kapitel 8, »Brandverhalten«

Farbstoffe und Pigmente

Zur Einfärbung stehen sowohl Farbstoffe als auch Pigmente zur Verfügung. Farbstoffe lösen sich im Polymer oder werden von eventuell eingemischten Fasern auf deren Oberfläche absorbiert oder sogar chemisch gebunden. Einige Kunststoffsorten werden mit Farbstoffen eingefärbt, so Polystyrol (PS), Styrol-Acrylnitril (SAN), Acrylnitril-Butadien (ABS), Polymethylmethacrylat (PMMA), Polycarbonat (PC), Polysulfone, Polyvinylchlorid ohne Weichmacher (Hart-PVC). Farbstoffe verfügen über hohe Farbkraft, eine Beimengung von weniger als 0,1% reicht aus.

Pigmente lösen sich nicht, sondern sind als kleine Partikel im Polymer eingebettet. Und zwar ausreichend fest, dass sie nicht ausdiffundieren können. Die Einfärbung mit Pigmenten wird bei Kunststoffen hauptsächlich angewandt. Pigmente sind nicht nur für den Farbton zuständig, sondern können dem Kunststoff auch mehr Glanz bringen.

Ruß kann auch zu den Pigmenten gezählt werden. Zweitwichtigstes Pigment ist Titandioxid, welches für die Farbe Weiß zuständig ist. Der Anteil dieser beiden Pigmente zusammen beträgt etwa 85% am Gesamt-Farbstoff-Verbrauch bei Kunststoffen.

Hier ein paar Beispiele für Pigmente, selbstverständlich aufgelistet mit der Farbe, die sie erzeugen:

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 16

Farbe	Pigment
Weiß	Titandioxid, Zinkoxid, Zinksulfid
Schwarz	Ruß
Blau	Ultramarinblau, Manganblau, Cobaltblau, Phthalocyaninblau
Grün	Chromoxidgrün, chloriertes Kupferphthalocyanin
Gelb	Chromgelb, Benzidingelb, Flavanthrongelb
Orange	Pigmente aus der Anthrachinongruppe
Rot	Eisenoxid, Molybdänrot, organische Pigmente
Bordeaux	Thioindigo
Violett	Organische Pigmente
Silber	Aluminium
Perlglanz	Blättchenförmige Bleicarbonate

Tabelle 1.4: Übersicht Pigmente

Weitere Zuschlagstoffe

Neben den Additiven, welche die Eigenschaften des Compounds direkt beeinflussen, kommen noch eine Reihe von Verarbeitungshilfsmitteln in der Kunststofferzeugung zum Einsatz.

Meistens dienen sie dazu, das Fließverhalten der Schmelze zu verbessern. Zum Beispiel werden in Wood-Plastic-Composite (WPC) Gleitmittel eingemischt, um das Holz im Extruder und im Spritzgusswerkzeug zu schützen. Außerdem sinkt dadurch die erforderliche Maschinenleistung, so kann Energie und damit Kosten eingespart werden. Für WPC ist noch ein spezielles Additiv erforderlich, nämlich Fungizide, um Pilzbefall zu verhindern.

Zum Schluss sei noch ein sehr wichtiges Verarbeitungshilfsmittel genannt: die Trennmittel. Diese sorgen dafür, dass der erstarrte Kunststoff nach dem Spritzguss (oder anderen Ur- oder Umformverfahren) nicht im Werkzeug kleben bleibt.

Trennmittel werden meistens nicht eingemischt, sondern auf die Innenflächen des Werkzeugs aufgetragen. Es gibt aber auch Kunststoffe mit eingemischtem Trennmittel. Hierfür wird in der Regel Zinkstearat verwendet. Zinkstearat verbessert auch die Fließfähigkeit der Kunststoff-Schmelze, zum Beispiel bei Polyamid 6.0.

Auch Kartenmagier vertrauen auf Zinkstearat-Pulver! Sie verwenden es, um die Gleitfähigkeit ihrer Spielkarten zu verbessern.

Einige Kunststoffsorten, beispielsweise solche auf Silikonbasis, benötigen gar kein Trennmittel, sondern sind selbsttrennend.

Alle diese Stoffe kommen im nächsten Arbeitsschritt, der Compoundierung, zusammen.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 17

Compoundierung

Ein anderer geläufiger Begriff für diesen Arbeitsschritt lautet **konfektionieren**. Compoundiert wird nicht nur, um die genannten Zuschlagstoffe einzumischen, sondern auch, um unerwünschte Bestandteile zu entfernen. Im Polymer und/oder in den Zuschlagstoffen verbleibt bisweilen noch etwas Restwasser aus der Herstellung. Da der Kunststoff zur Formgebung bei über 100°C aufgeschmolzen wird, verdampft das Wasser. Die entstehenden Dampfblasen erzeugen Hohlräume im Produkt und machen es somit unbrauchbar. Aber schon beim Compoundieren wird es aufgrund der Reibung warm genug, um das Wasser zu verdampfen. Der Dampf kann dann entweichen. Auch müssen Sie davon ausgehen, dass die Polymerisation in der Praxis nicht so schön vollständig abläuft, wie es die Reaktionsgleichung auf dem Papier vorgibt. In der Praxis verbleiben noch Monomere in der Rohmasse. Aber auch diese verdampfen beim Compoundieren und können dann gasförmig entweichen. Schließlich liegen die Zutaten, also die Polymerrohmasse und die Zuschlagstoffe, nicht in einheitlicher Form vor. Polymere fallen in der Polymerisation oft in groben Stücken oder Klumpen aus. Viele Zuschlagstoffe liegen hingegen als (feines) Pulver vor. Eventuell wird auch noch Kunststoff-Recyclat verarbeitet. Das liegt nun wieder in völlig undefinierten Bruchstückchen vor. Das Compoundieren soll daraus eine homogene Masse schaffen, die relativ einfach und genau beliebig portioniert werden kann.

Ablauf

Das Compoundieren umfasst die folgenden sechs Verfahrensoperationen:

1. Fördern
2. Mischen
3. Dispergieren
4. Aufschmelzen
5. Entgasen
6. Druckaufbau

Diese Operationen laufen nicht hintereinander ab, sondern überlagern sich teilweise. Zunächst werden die einzelnen Bestandteile noch im festen Zustand vorgemischt, also gleichmäßig untereinander verteilt. Die Partikelgröße der einzelnen Bestandteile ändert sich dabei nicht. Diese Art zu mischen wird **distributives Mischen** bezeichnet. Das reicht natürlich nicht aus, um einen verarbeitungsfähigen Compound herzustellen, deswegen wird es auch als Vormischen bezeichnet. Um einen verwertbaren Compound herzustellen, muss auch die Größe der Partikel der einzelnen Bestandteile aneinander angeglichen werden. Diese Art zu mischen wird **dispersives Mischen** genannt. Dies erfolgt im anschließenden Verfahrensschritt. Durch die immer höhere Reibungswärme schmilzt dabei der Polymer. Wenn das Polymer geschmolzen ist und in flüssiger Phase vorliegt, kann die Mischung entgast werden. Und erst, wenn die unerwünschten gasförmigen Bestandteile ausgetrieben sind, kann die Masse unter Druck extrudiert werden. Da diese einzelnen Operationen bei unterschiedlichen Temperaturen optimal laufen, können sie nicht in einer einzigen Mischkammer

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 18

durchgeführt werden, sondern müssen in verschiedenen, nacheinander angeordneten Stationen ablaufen. Diese Stationen können unabhängig voneinander temperiert werden. Das Material wird dabei kontinuierlich von Station zu Station befördert.

Eine Dispersion ist eine Mischung aus fein verteiltem Feststoff in einer Flüssigkeit. Dabei sind die beiden Stoffe nicht ineinander löslich. Beim Compoundieren schmilzt das Polymer und wird flüssig. Und die Zuschlagstoffe, zum Beispiel Ruß, sind pulverförmig und werden fein verteilt.

Anlagen zum Compoundieren

Compoundiert wird überwiegend in Extrudern. Im Laufe der Zeit wurden eine Reihe von unterschiedlich arbeitenden Extrudern entwickelt, also kommt hier erst mal wieder eine Übersicht:

- ✔ Planetwalzenextruder,
- ✔ Doppelschneckenextruder, kann auch Compoundierextruder genannt werden,
- ✔ Ko-Kneter, ebenfalls im Prinzip ein Extruder, ein Einschneckenextruder.

Die Bezeichnung **Extruder** kommt vom Lateinischen »Extrudere«, was auf Deutsch hinaustreiben, hinausstoßen bedeutet.

Neben den Extrudern gibt es auch kontinuierliche Knetmaschinen. Diese werden vor allem bei hohem Füllstoffanteil eingesetzt.

Dass es sich beim Compoundieren um einen entscheidend wichtigen Prozess innerhalb der Kunststoffverarbeitung handelt, können Sie auch an der Vielzahl der unterschiedlichen Typen von Compoundier-Maschinen erkennen. Los geht es mit dem

Planetwalzenextruder

Dieser Typ ist besonders geeignet für empfindliche Materialien, da die Temperatur im Extruder sehr genau geführt werden kann. Auch sind hohe Füllstoffanteile (bis zu achtzig Prozent) möglich.

Aufgebaut ist dieser Extruder im Prinzip wie ein Planetenrad-Getriebe (siehe Abbildung 1.1), nur dass keine Zahnräder aufeinander abwälzen, sondern langgestreckte Spindeln. Die Zentralspindel wird angetrieben, darauf rollen die Planetspindeln ab. Damit die Planetspindeln wirklich abrollen, steckt das Ganze in einer Trommel, an deren Innenwand ebenfalls ein Gewindegang angebracht ist. Die verschiedenen »Zutaten«, die eingefüllt worden sind (Polymerrohmasse + Zuschlagstoffe), werden im Zahneingriff zu dünnen Schichten ausgewalzt. Auf die gewünschte Temperatur wird die Masse über Zentralspindel und Trommel gebracht. Aufgrund des großen Oberflächenkontakts wird die Masse sehr gleichmäßig und schnell temperiert. Das Temperaturgefälle in der Masse ist niedrig.

Da Zentral- und Planetenspindel schneckenförmig verzahnt sind, wird das Material innerhalb des Extruders durch die Drehbewegung von der Einfüllung bis zum Compound-Austritt befördert.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 19

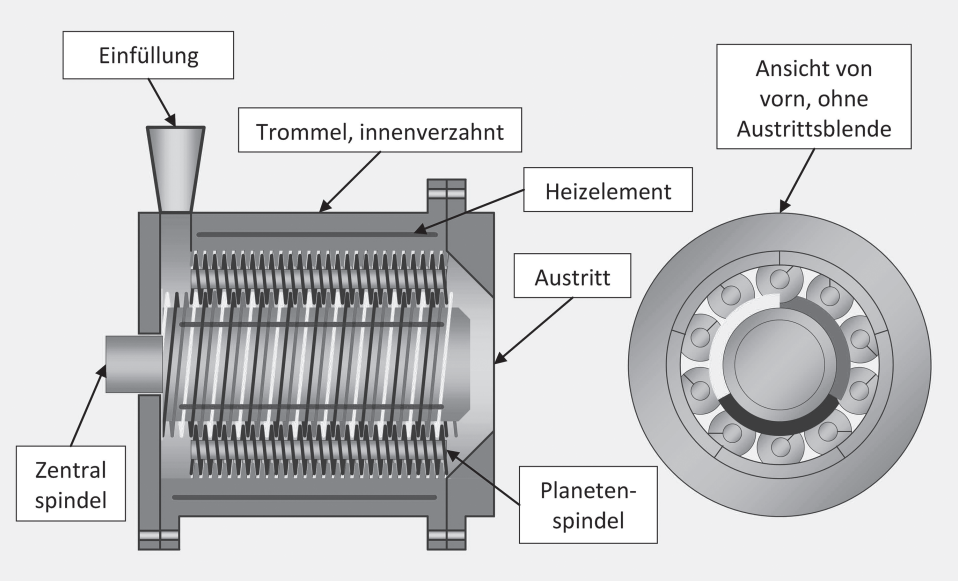


Abbildung 1.1: Planetwalzenextruder

Gleichläufiger Doppelschneckenextruder

Hier drehen sich zwei Schneckenwellen in einem Zylinder mit achtförmiger Bohrung.

Der Extruder ist komplett modular aufgebaut. Der Zylinder ist aus einzelnen Segmenten zusammengesetzt, die je nach Bedarf mit Heizpatronen ausgerüstet sind oder Öffnungen für Einfülltrichter oder Entgasungsdom vorweisen. Auch die Schneckenwelle ist nicht aus einem Stück gefertigt. Wie Sie der Abbildung 1.2 entnehmen können, ist die Schneckenwelle nicht mal über die gesamte Länge eine Schnecke. Diese Welle ist aufgebaut aus einer Zahnwelle, auf welche Schneckenspindeln mit unterschiedlicher Steigung sowie die Knetscheiben aufgeschoben werden. Die Unterteilung der Schneckenwelle in verschiedene Zonen entspricht der Abfolge der erforderlichen Verfahrensschritte (siehe Tabelle 1.5).

Je nachdem, wie weit die beiden Schneckenwellen auseinander liegen, unterscheidet man tangierende oder dichtkämmende Extruder. Außerdem können die beiden Wellen die gleiche oder gegensätzliche Drehrichtung haben.

Bei gegenläufiger Drehrichtung greifen die Elemente (Schnecken, Knetscheiben) der beiden Wellen ineinander wie ein Zahnradpaar. Dies bringt den Vorteil einer geringen Scherung und somit einer geringen Materialbelastung. Diese Betriebsart ist geeignet für temperaturempfindliche Werkstoffe, z. B. Polyvinylchlorid.

Oft müssen Polymerrohmasse und Zuschlagstoffe aber stark geschert werden, um die erforderliche Temperatur zum Aufschmelzen zu erreichen und um ausreichend miteinander zu dispergieren. Für diesen Fall werden die beiden Schneckenwellen im Gleichlauf betrieben. Dies ist auch die am häufigsten verwendete Betriebsart.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 20

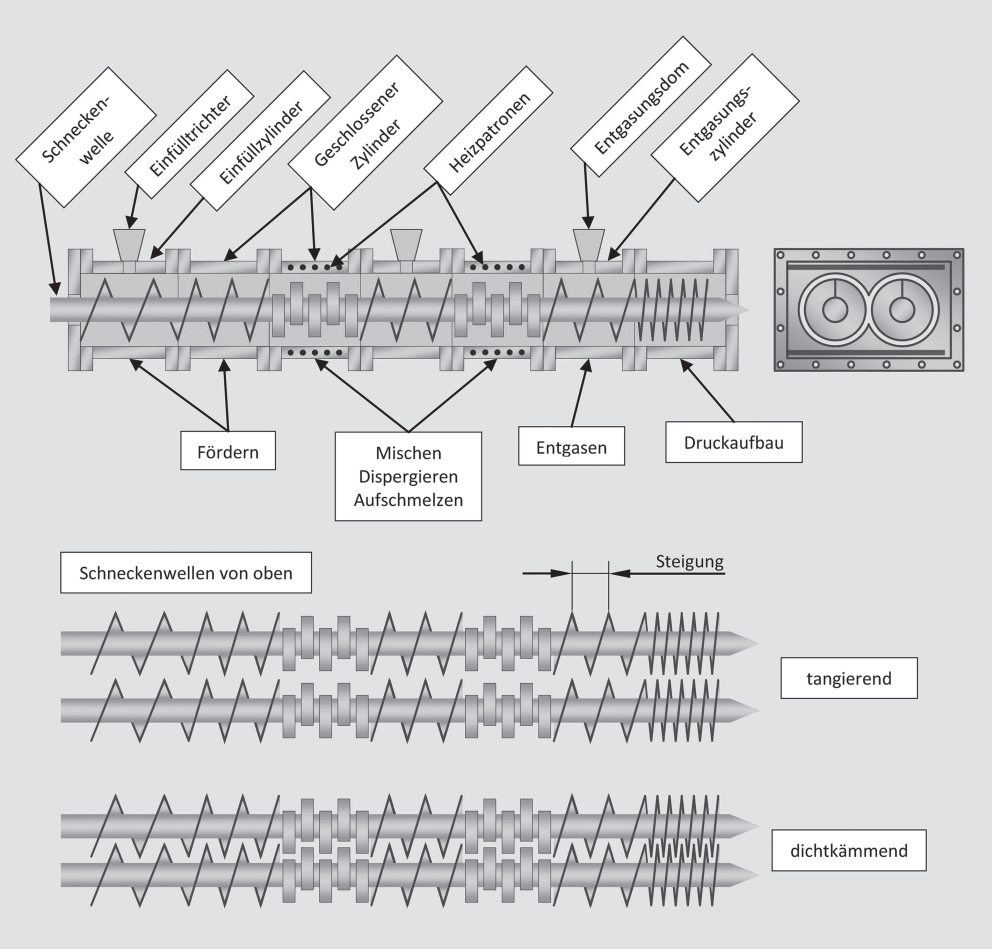


Abbildung 1.2: Doppelschneckenextruder

Der Doppelschneckenextruder ist wesentlich teurer als der Einschneckenextruder, deswegen wird er in geringeren Stückzahlen hergestellt. Aber aufgrund der geringeren Stückzahl ist er auch teurer in der Herstellung. Hier fallen Ursache und Wirkung zusammen. Außerdem ist die Technik des Doppelschneckenextruders aufwendig: Aufgrund der ungleichmäßigen Druckverteilung müssen die Wellen biegefest sein und in den Zylinder-Segmenten müssen achtförmige Bohrungen eingebracht werden.

Dafür bietet er folgende Vorteile:

- ✔ deutlich bessere Mischwirkung als Einschneckenextruder,
- ✔ selbstreinigende Eigenschaften,
- ✔ sehr gute Entgasungsleistung.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 21

Schneckenwellen-Zone	Verfahrensschritt
Einzugszone	Material wird eingezogen und gefördert, hier hat die Schnecke die größte Steigung, damit viel Material aufgenommen und weiter befördert werden kann
Aufschmelzzone	Polymer wird aufgeschmolzen und Zuschlagstoffe werden vordispergiert
Kompressionszone	Material wird verdichtet, dies wird erreicht durch kleiner werdende Steigung
Mischzone	Hier wird intensiver als in den Schneckenbereichen gemischt, dies wird erreicht durch Misch- und Knetelemente, z. B. Exzenter- oder Nockenscheiben
Entgasungszone	In diesem Bereich befinden sich Entgasungsstutzen im Zylinder, außerdem wird die Steigung der Schnecke wieder größer, damit die Kunststoffmasse nicht durch den Stutzen gepresst wird
Austragszone	Hier wird die Steigung wieder kleiner, um genug Druck zum Auspressen aufzubauen

Tabelle 1.5: Verfahrenszonen im Doppelschneckenextruder

Ko-Kneter

Um die aufwendige Technik von zwei Schneckenwellen im wahrsten Wortsinn zu halbieren, wurde der Ko-Kneter entwickelt (siehe Abbildung 1.3).

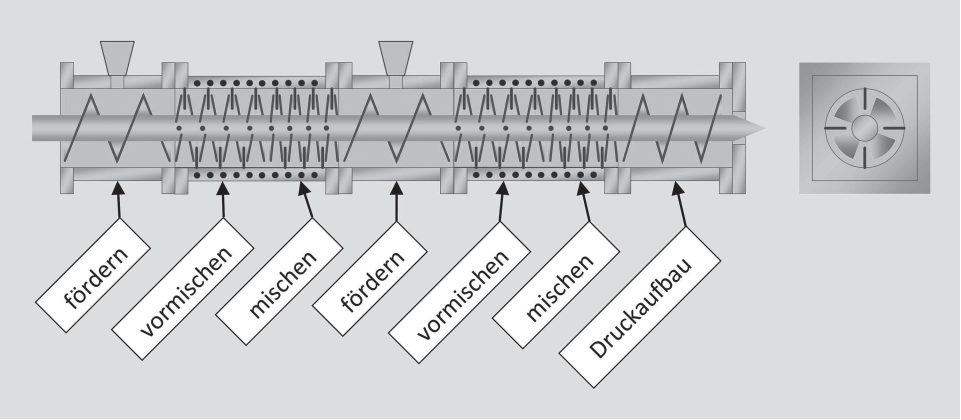


Abbildung 1.3: Einschneckenextruder (Ko-Kneter)

Hier dreht sich nur noch eine Schneckenwelle. Sie mögen jetzt einwenden, okay, so wird zwar das Material von der Einfüllung bis zum Austrieb gefördert, aber wie wird es gemischt und dispergiert? Ganz einfach: Die Welle macht zusätzlich zur Drehbewegung auch noch eine sinusförmige Hub-Bewegung. Außerdem verläuft die Schneckenwindung nicht durchgehend, sondern ist unterteilt in Flügel. Und an der Innenwand des Zylinders sind in axialer Reihe sogenannte Knetbolzen angebracht. Bei jeder Hub-Bewegung wird die Compound-Masse von den Flügeln einen Bolzen weiter nach vorne geschoben und dort abgestreift.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 22

Vorteile:

- ✔ kein hoher Radialdruck,
- ✔ bei jedem Rückhub wird die Knetmasse wieder entspannt,
- ✔ niedrigere Prozesstemperatur möglich,
- ✔ kurzer Verfahrensweg,
- ✔ kurze Verfahrensdauer.

Diese spezielle Mischtechnik ist besonders geeignet, wenn die Viskositäten sehr unterschiedlich sind oder wenn sogar Flüssigkeiten eingemischt werden sollen. Ebenfalls geeignet ist diese Technik, wenn ein hoher Faser- oder Füllstoffanteil eingemischt werden soll.

Kontinuierliche Knetmaschine

Nach einem vollkommen anderen Wirkprinzip arbeitet dieser Typ Compoundier-Maschine. Hier wird das Material nicht axial entlang einer (oder zwei) Welle(n) gefördert und gemischt, sondern durch mehrere gleichlaufende Einscheiben-Kneter radial weiter transportiert.

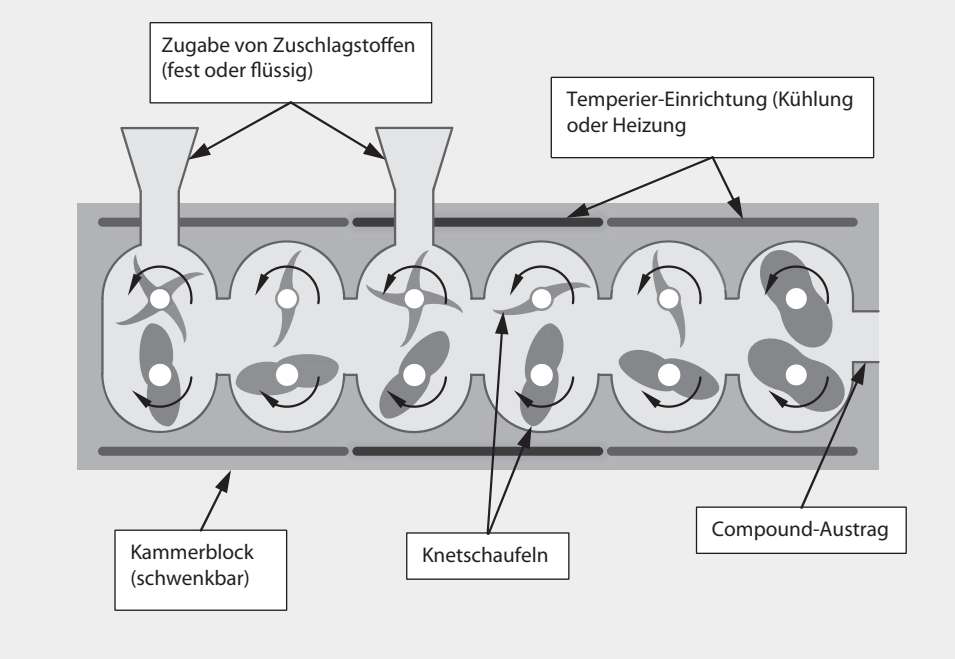


Abbildung 1.4: Kontinuierliche Knetmaschine

Wie Sie in Abbildung 1.4 erkennen können, ist auch diese Compoundier-Vorrichtung in mehrere Stationen unterteilt. Diese können unabhängig voneinander temperiert werden.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 23

Und auch hier ist es möglich, die einzelnen Zuschlagstoffe nacheinander über verschiedene Stationen einzufüllen. Es muss nicht alles auf einmal eingekippt werden.

Da der Materialtransport nicht axial, sondern radial erfolgt, benötigt dieser Maschinentyp zwar viel mehr Wellen (für jeden Prozessschritt ein Kneterpaar, gleich zwei Wellen), aber dafür sind diese sehr viel kürzer als die Schneckenwellen bei den Extrudern. Somit hält die Maschine insgesamt eine viel höhere Belastung aus. Somit können auch hochviskose Materialien oder hohe Füllstoffanteile verarbeitet werden.

Granulieren

Die fertig gemischte Kunststoffmasse wird als Strang aus dem Austrieb gepresst. In dieser Form wäre das Material aber in den meisten Fällen zu unhandlich für die weitere Verarbeitung. Deswegen ist direkt am Austrieb ein Granuliermesser angebracht, welches schnell rotiert und so den Strang in kleine Körner zerhackt (siehe Abbildung 1.5).

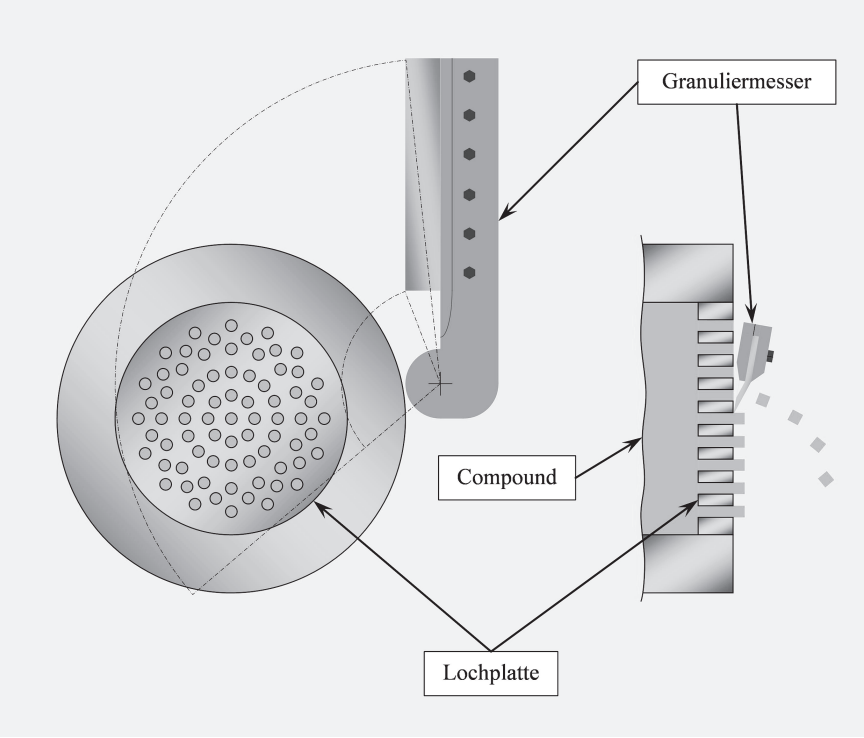


Abbildung 1.5: Prinzipskizze Granulieren

Die Rohmasse wird durch eine Lochplatte gedrückt. Diese sieht aus wie ein Sieb. Direkt über diese Platte gleitet das Granuliermesser und schneidet so vom herausquellenden Strang kontinuierlich kleine Stückchen ab, ähnlich wie ein Rasierapparat die Bartstoppeln abschneidet.

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 24

Ist die Masse noch heiß, spricht man vom **Heißabschlag**. In diesem Fall sehen die entstehenden Partikel aus wie Perlen oder Linsen. Die Partikel fallen in ein Wasserbad, um sofort zu erstarren und nicht gleich wieder miteinander zu verschmelzen. Ist der Strang bereits kalt und erstarrt, spricht man vom **Kaltabschlag**. Hier sehen die entstehenden Partikel zylinder- oder würfelförmig aus. In beiden Fällen ist das so entstandene Granulat rieselfähig und kann als Schüttgut in Behälter abgefüllt werden.

In den meisten Fällen, aber nicht immer, ist das Granulieren erforderlich. Bei der Fused Filament Fabrication, einem 3D-Druckverfahren, werden als Rohmaterial Fäden aus Kunststoff verarbeitet (siehe den Unterpunkt »Generative Fertigungsverfahren« in Kapitel 2, »Verarbeitungsverfahren«). Diese Fäden sind ebenfalls aus einem Extruder herausgepresst worden, aber das Abhacken entfällt hier.

Masterbatch

In der Praxis wird meistens nicht ein sofort verarbeitungsfertiger Compound hergestellt. Oft wird vom Compoundier-Betrieb ein sogenannter Masterbatch angeboten.

Wörtlich übersetzt heißt es »Meistermischung«. Treffender, aber leider ungebräuchlicher, wäre die Bezeichnung »polymergebundene Zusatzstoffe«. Bei dieser Bezeichnung wird aber schon eher klar, worum es sich handelt.

Einfach gesagt, bei einem Compound handelt es sich um eine Polymermasse, in welche Zuschlagstoffe eingemischt worden sind. Bei einem Masterbatch handelt es sich um Zuschlagstoffe, die in einer Polymermasse gebunden sind. Die Konzentration der Zuschlagstoffe in dieser Mischung ist also viel höher, als für die Anwendung des Compounds erforderlich wäre.

Und warum stellt man solche Konzentrate her? Weil dadurch ein Betrieb, der sich auf das Compoundieren spezialisiert hat, nicht die komplette Menge herzustellen braucht, sondern sich auf das Konzentrat konzentrieren kann (dummer Kalauer, ich weiß). Somit können die Compoundier-Maschinen ein paar Nummern kleiner ausfallen. Dafür kann sich der Compoundierbetrieb mehr davon in die Halle stellen. Auch benötigt die kleinere Maschine weniger Antriebsenergie. Und der Betrieb muss nicht viel Polymerrohmasse einkaufen, verarbeiten, lagern und ausliefern. Typischerweise liegt der Anteil Masterbatch an der gesamten Compound-Menge bei zwei Prozent. Der Compoundierbetrieb spart sich somit 98% der Materialverarbeitung.

Welchen Nutzen hat der Kunststoffverarbeiter davon? Er muss zwar noch Masterbatch mit Rohmasse mischen, das ist aber viel einfacher als eine komplette Compoundierung.

Zuschlagstoffe, die bereits in einer Polymermasse dispergiert vorliegen, in weiteren Polymermengen zu »verdünnen«, ist einfacher und prozesssicherer, als diese Stoffe in eine Polymermasse einzumischen. Es müssen ja nur noch zwei Sorten Granulat mit ungefähr

Trim Size: 176mm x 240mm NewDummies both01.tex V1 - 23. Dezember 2019 8:13 P.M. Page 25

gleicher Korngröße miteinander vermischt und anschließend durch einen Extruder geschickt werden. Hingegen müssen beim Compoundieren die Zuschlagstoffe in Form von Paste, Pulver oder sogar Flüssigkeit erst noch in die Polymermasse eingemischt werden.

Drei Gruppen von Masterbatches werden angeboten:

1. Farb-Masterbatch,
2. Additiv-Masterbatch,
3. Kombinations-Masterbatch, enthält Farbstoffe und Additive.

Etwas zur Herkunft der Bezeichnung »Masterbatch«: früher durfte nur der Meister (engl. »master«) solche hoch konzentrierten und damit teuren Mischungen (engl. »batches«) herstellen.

Die so erzeugten Kunststoffmischungen sind nun verarbeitungsfähig, das heißt, daraus können nun endlich Produkte hergestellt werden. Aber wie?