

# Unbestechlich mischen

## Die Mischgüte von Extrudaten mittels digitaler Bildauswertung bestimmen

Der Mischerfolg in der Extrusion und die Homogenität der Produkte werden oft nur optisch und auf Basis individueller Erfahrung eingeschätzt. Ein neues Charakterisierungsverfahren erlaubt es nun jedoch, die Farbverteilung objektiv und anhand klarer Kriterien zu beurteilen. Damit lässt sich auch die Mischgüte von Extrusionsanlagen für unterschiedliche Kunststoffe und Prozessparameter bewerten.

Der Trend in der Kunststoffverarbeitung geht aufgrund der steigenden Anforderungen an die Produktionsflexibilität zu immer kleineren, kundenindividuellen Losgrößen [1], geringer Lagerhaltung und einer Just-in-time-Produktion. Häufig werden dabei mehrere verschiedene Produkte oder Farbvarianten, beispielsweise bei der Ummantelung von Adern und Kabeln (**Bild 1**), auf derselben Produktionsanlage hergestellt, sodass Produktionsumstellungen durch Farb-

Granulaten und Masterbatches, immer attraktiver. Das Zumischen eines Masterbatches zu einem Basisgranulat erlaubt ein kurzfristiges Verändern von Farbpigmenten oder anderen Additiven und so eine flexible Produktionsumstellung.

### *Ungleichmäßig verteilte Farbpartikel oder Füllstoffe*

Während in Compounds die gewünschten Pigmente oder Additive zuvor in ei-

und Masterbatch nicht nur zu fördern und zu plastifizieren, sondern auch ausreichend thermisch und stofflich zu vermischen. Dies macht vor allem bei Prozessen Schwierigkeiten, die auf eine hohe Ausstoßleistung hin optimiert wurden, da dies oft zu Einbußen bei der Mischleistung der Anlage führt. In der Folge können Farbpartikel oder anderen Füllstoffe ungleichmäßig verteilt sein, was mindestens die optischen Eigenschaften beeinträchtigt, im schlimmsten Fall aber auch die Gebrauchseigenschaften der Produkte. Um dem entgegenzuwirken und eine ungleichmäßige Verteilung zu kaschieren, werden Masterbatches oft großzügig dosiert. Vor allem bei dünnwandigen Produkten, insbesondere Folien, führt jedoch auch dies nicht zum gewünschten Erfolg. Allgemein lässt sich sagen, dass der Anspruch an die Farb- und Füllstoffverteilung bei geringeren Wanddicken zunimmt, da Ungleichmäßigkeiten auch für das bloße Auge leichter sichtbar sind. Bei der Herstellung von Blasfolien unterliegt die Folienblase zudem einer biaxialen Verstreckung bis hin zu Dicken unter 100 µm, sodass Inhomogenitäten in der Schmelze sich auch unmittelbar auf die Reißfestigkeit bei der Herstellung auswirken und bei Kollabieren der Folienblase sogar einen kurzfristigen Linienausfall verursachen können.

Es existiert bislang keine Norm oder allgemein akzeptierte Grundlage für die quantitative Bewertung der Mischgüte von Extrudaten bei experimentellen Untersuchungen. In der Fachliteratur etabliert sind statistische Mischgütemaße, die in einer Probe die mittlere Konzentration eines Additivs ins Verhältnis zur lokalen

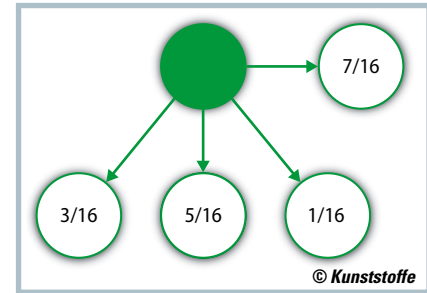
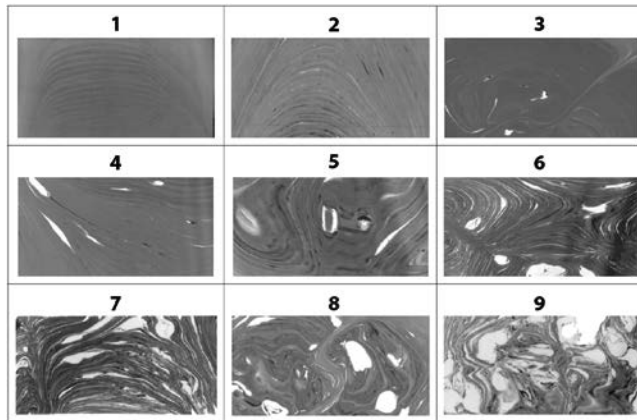


**Bild 1.** Farbvielfalt erfordert flexible Umstellungen der Produktion: Durch das Zumischen von Masterbatches gelingt es beispielsweise, Ader- und Kabelummantelungen in mehreren Produkt- oder Farbvarianten auf einer Produktionsanlage herzustellen (© LappKabel)

und Materialwechsel immer kürzer aufeinander folgen. Aus diesem Grund wird der Einsatz sogenannter Dryblends, also Trockenmischungen aus verschiedenen

nem Aufbereitungsschritt eingearbeitet und homogenisiert wurden, übernimmt beim Einsatz von Dryblends die Extrusionseinheit die Aufgabe, Basisgranulat

**Bild 2.** Referenzbilder zur Einteilung der Extrudathomogenität in neun Klassen © IKT; nach [4]



**Bild 3.** Fehlerverteilung nach Floyd-Steinberg: Verteilung des Fehlers bei der Binarisierung von Pixel 1 auf die Pixel 2 bis 5 (Quelle: IKT)

Konzentration setzen [2]. Dieses Vorgehen ist zur Bewertung in Produktionsbetrieben allerdings wenig praktikabel, zumal die Konzentrationsbestimmung – je nach Additiv – sehr aufwendig werden kann. Stattdessen wird in der Praxis daher oft eine rein optische und somit sehr subjektive Beurteilung von Stichproben vorgenommen. In Forschungsarbeiten der letzten Jahre, die sich der gestiegenen Herausforderung an Mischteile widmen, wurden auf das jeweilige Forschungsprojekt zugeschnittene Verfahren angewandt [3]. Gemein ist diesen Verfahren, dass sie für eine Umsetzung im Produktionsalltag meist im Hinblick auf die Messtechnik oder die Auswertung zu aufwendig sind und oftmals eine Laborausstattung erfordern.

### Verfahren zur Bewertung der Mischgüte

Ein Ansatz, die Bewertung der Mischgüte von Extrudaten für die Praxis besser handhabbar zu machen, wurde bereits in den 1970er-Jahren am damaligen Institut

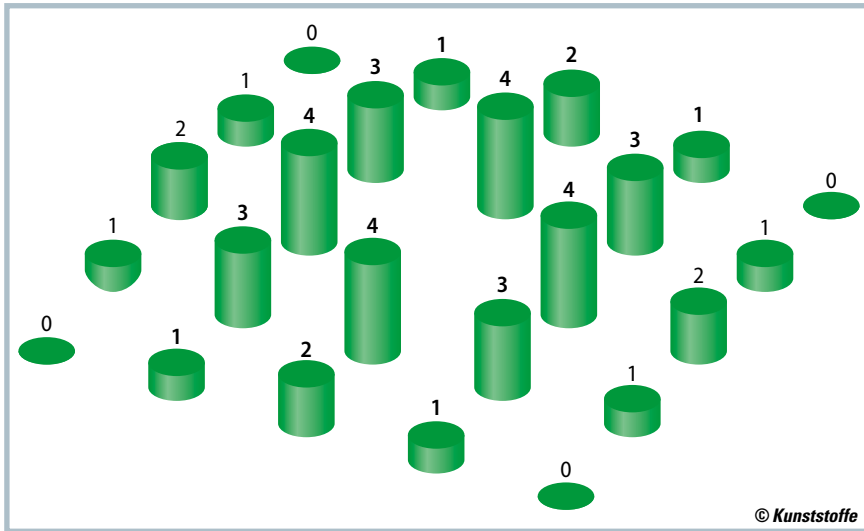
für Kunststofftechnologie der Universität Stuttgart aufgestellt [4]. Hierbei wurden anhand von Vergleichsbildern neun Homogenitätsklassen eingeführt, wobei 1 die beste und 9 die schlechteste Homogenität bedeutet. Die Bewertung erfolgte anhand von Dünnschnitten, die mit einfachen Werkstoffhobeln aus Extrudatproben entnommen und mit den Referenzen abgeglichen wurden. Ein Beispiel hierfür zeigt **Bild 2**. Bei diesem Vorgehen bleibt allerdings das Problem bestehen, dass – auch wenn die Referenzbilder Anhaltspunkte zur Einordnung geben – die Bewertung durch den jeweiligen Betrachter von dessen Erfahrung und den Beurteilungsumständen abhängt und somit subjektiv ist.

Zur Lösung dieses Problems und um ein in der Praxis einsetzbares und dennoch belastbares, reproduzierbares Bewertungskriterium für die Mischgüte zu schaffen, wurde am Institut für Kunststofftechnik (IKT) in Stuttgart in den letzten Jahren ein automatisiertes Verfahren entwickelt, das sich der rechnergestützten, digitalen Bildanalyse bedient. Wie

oben beschrieben, werden mit einem einfachen Hobel hergestellte Dünnschnitte mittels eines handelsüblichen Flachbettscanners digitalisiert und anschließend mithilfe eines Bildanalyseverfahrens ausgewertet, das die Homogenität der gescannten Dünnschnitte anhand der Kontrastverteilung der Bilder auf Basis der Software Matlab (Hersteller: MathWorks, Natick, MA/USA) bewertet.

### Algorithmus für die Auswertung der Probenbilder

Das entwickelte Verfahren arbeitet dabei nach folgendem Algorithmus: Zunächst werden die gescannten Probenbilder in Binärbilder umgewandelt, indem alle Pixel mit einem mittleren Grauwert  $< 128$  der Wert 0 (schwarz) zugeordnet wird, allen anderen Pixeln der Wert 1 (weiß). Da bei dieser Zuordnung ein Fehler in der Helligkeitswahrnehmung entsteht, kommt der sogenannte Floyd-Steinberg-Algorithmus zur Anwendung, der den optischen Eindruck bei der Binarisierung erhält: Nach der Binarisierung von Pixel 1 (siehe »



**Bild 4.** Bayes-Gewichtung der Nachbarn eines mittleren Bildpunkts (Quelle: IKT)

**Bild 3)** wird der Fehler zu den dargestellten Anteilen auf die Pixel 2, 3, 4 und 5 übertragen. Bevor diese also binarisiert werden, wird ihr Grauwert um den jeweiligen Fehleranteil angepasst. Auf diese Weise bleibt der ursprüngliche optische Eindruck des Graubildes nach der Binarisierung erhalten.

Als Maß für die Mischgüte wird die Größe der zusammenhängenden Flächen weißer und schwarzer Bildpunkte genommen und auf Basis der Bayes-Methode ausgewertet. Bei dieser Methode werden für jeden Bildpunkt die jeweiligen Nachbarpixel innerhalb eines definierten Bildausschnitts von 25 Pixeln (ein Mittelpunkt, acht direkte Nachbarn sowie 16 Nachbarn zweiter Ordnung) untersucht und je nach Position zum Mittelpunktspixel unterschiedlich gewichtet (**Bild 4**). Auf dieser Basis lässt sich die jeweilige Anzahl gleichfarbiger Nachbarn für jeden Bildpunkt auswerten, die Aufschluss über das Auftreten zusammenhängender Schwarz- oder Weißflächen und somit Inhomogenitäten gibt. Das Maximum solcher Nachbarn gemäß der in **Bild 4** dargestellten Bayes-Verteilung beträgt dabei 44.

Für einen idealen Grauwert von 50 % ergibt sich demnach eine theoretische Anzahl gleicher Nachbarn von 20 und eine Anzahl gegenfarbiger Nachbarn von 24, wobei diese Asymmetrie direkt aus den Gewichtungsfaktoren der Bayes-Verteilung hervorgeht. Für dunklere oder hellere Grautöne verschieben sich diese Zahlen, sodass über ein Bild mit verschiedenen Helligkeiten hinweg eine Verteilung mit einem Maximum entsteht. Auf dieser Basis lässt sich die Homogenität einer Probe auswerten, indem die Anzahl der Pixel einer Farbe über die Anzahl ihrer gleichfarbigen Nachbarn aufgetragen wird. Die Breite dieser Verteilung sowie die Lage ihres Maximums lassen sich mit einer Referenzverteilung vergleichen (siehe beispielhaft **Bild 5** für die Anzahl weißer Nachbarn).

Die relativen Abweichungen von diesen ideal homogenen Flächen dienen als Bewertungsmaß für die Inhomogenität der Farbverteilung. Da die so ermittelten Werte in einem Zahlenraum von 0 bis 1 liegen, lassen sich anhand der ersten Dezimalstelle zehn Homogenitätsklassen von 0 (vollkommen homogen) bis 9 (sehr inhomogen) darstellen. Um Kongruenz zum bestehenden Klassifizierungssystem mit neun Klassen herzustellen, können Proben, die den Homogenitätsklassen 0 und 1 zugeordnet sind, zusammengefasst werden.

### Versuche mit extrudierten Kunststoffen

Die **Tabelle 1** zeigt beispielhaft Bilder verschiedener Dünnschnitte zusammen mit der ermittelten Homogenitätsklasse. Untersucht wurden ein Polypropylen-Homopolymer (PP-H), Polypropylen-Copolymer (PP-R), ein Polyethylen hoher (PE-HD) und eines niedriger Dichte (PE-LD), wobei jeweils ein Dryblend mit einem schwarzen Farbmasterbatchanteil von 1 Gew.-% angemischt und verarbeitet wurde (Versuchsparameter und Ergeb-

## Die Autoren

**Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Oliver Kast** war von 2012 bis 2018 als Mitarbeiter am Institut für Kunststofftechnik (IKT) beschäftigt, seit 2017 als Leiter der Abteilung Verarbeitungstechnik.

**Dr.-Ing. Stefan Epple** war von 2011 bis 2018 Mitarbeiter am IKT, seit 2015 Leiter der Abteilung Werkstofftechnik.

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten** ist Leiter des IKT an der Universität Stuttgart; christian.bonten@ikt.uni-stuttgart.de

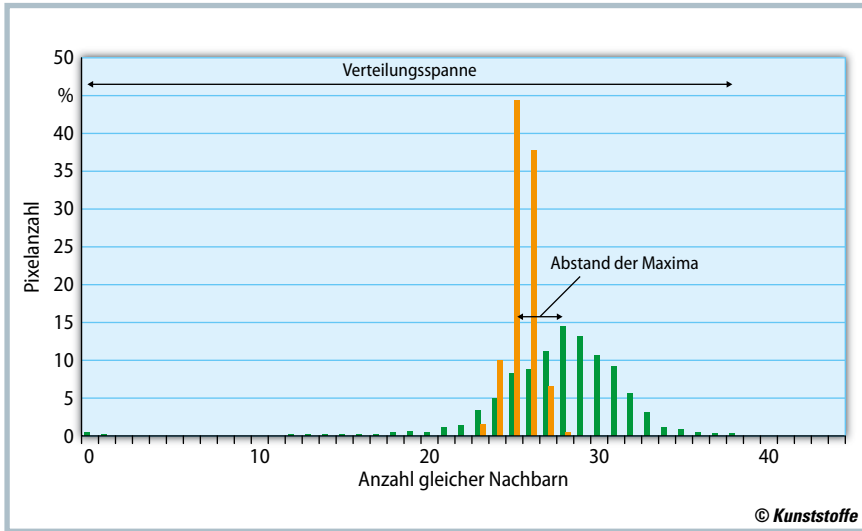
## Service

### Literatur & Digitalversion

- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/8152970](http://www.kunststoffe.de/8152970)

### English Version

- Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)



**Bild 5.** Anzahl gleichfarbiger Nachbarpunkte für die Farbe Weiß: Verteilungsspanne und Maximum (grün: Messung der Probe, orange: Referenz) (Quelle: IKT)

	PP-H	PP-R	PE-HD	PE-LD
100 min <sup>-1</sup> , 100 bar	1	1	1	2
100 min <sup>-1</sup> , 300 bar	1	1	2	2
300 min <sup>-1</sup> , 100 bar	5	3	4	3
300 min <sup>-1</sup> , 300 bar	4	2	2	2

**Tabelle 1.** Homogenitätsbewertung ausgewählter Dünnschnitte aus [5] (Quelle: IKT)

nisse siehe [5]). Alle Dünnschnitte wurden in der mechanischen Werkstatt des IKT hergestellt. Dabei wird eine Extrudatprobe vor einem Hobel in eine Halterung eingespannt, deren Höhe verfahrbar ist. Anschließend können mit dem Hobel Dünnschnitte abgetragen werden. Über die Höhenverstellung der Halterung lässt sich die Dicke des Dünnschnitts einstellen; die hier gezeigten Beispiele weisen jeweils eine Dicke von 40 µm auf und repräsentieren somit eine Größenordnung, die auch für Blasfolien relevant ist. Vergleichende Versuche mit Dünnschnitten unterschiedlicher Dicke haben zudem gezeigt, dass der Auswertalgorithmus auch dann zu reproduzierbaren Ergebnissen führt, wenn die Probendicke abweicht.

**Fazit: Auswertung auf Basis objektiver Kriterien**

Die Ergebnisse zeigen, dass das Auswertverfahren eine Einteilung ermöglicht, die den optischen Eindruck der

Proben bestätigt, dabei aber objektiven Kriterien folgt. Auch ersichtlich ist der zu erwartende Einfluss der Prozessparameter: Bei höheren Schnecken-drehzahlen sinkt die Mischgüte aufgrund des steigenden Ausstoßes, was sich in einer höheren Homogenitätsklasse ausdrückt.

Bei Drehzahlen von 100 min<sup>-1</sup> kann für alle Werkstoffe noch eine sehr gute Homogenität der Klasse 1 erzielt werden. Mit steigendem Durchsatz und sinkender Verweilzeit verschlechtert sich die Mischgüte zunehmend. Insbesondere PP-H weist schon bei einer Drehzahl von 300 min<sup>-1</sup> unbefriedigende Homogenitäten auf, wie sie beispielsweise für die Herstellung von Blasfolien nicht akzeptabel sind.

Anders verhält es sich beim Werkzeuggedruck: Bei höheren Drücken und damit einhergehend höheren Temperaturen kommt es durch die geringere Viskosität zu einer besseren Durchmischung der Schmelze und somit einer höheren Mischgüte. ■