

# Bei thermoplastischen Polyurethanen bestimmt das Herstellverfahren die Verarbeitungseigenschaften

Diplom-Ing. Jürgen **Hättig**, Bayer MaterialScience, Leverkusen  
Diplom-Ing. Jürgen **Winkler**, Bayer MaterialScience, Dormagen

## Kurzfassung

Jedes Kunststoff-Verarbeitungsverfahren – sei es Spritzguss, Kalandrierung oder Extrusion – stellt andere Anforderungen an die eingesetzten thermoplastischen Werkstoffe. Hinzu kommen produktspezifische Sonderwünsche: Massenprodukte etwa sollen nach dem Spritzen schnell verfestigen, um einen hohen Durchsatz zu gewährleisten, andere – wie zum Beispiel Skistiefel – müssen zum Entformungszeitpunkt noch elastisch sein. Bei thermoplastischen Polyurethanen (TPU) können diese Eigenschaften bei der Granulatherstellung ohne Änderung der chemischen Zusammensetzung, lediglich durch Variation des Herstellverfahrens im Zweischnellenknetzer, justiert werden. Durch intelligente Reaktionsführung entstehen dann TPU-Typen, die – bei gleicher Rezeptur – zum Beispiel über ausgeprägte und weniger ausgeprägte Hartsegment-Kristallite verfügen und infolgedessen mit einer maßgeschneiderten Aushärtungszeit aufwarten. Die (rezepturabhängigen) Endigenschaften der Produkte werden dadurch nicht beeinflusst.

## 1. Einleitung

Rund 100 Jahre nach ihrer Entdeckung bzw. Entwicklung haben sich die modernen polymeren Werkstoffe zu einer ungeheuer breiten und vielseitigen Materialfamilie diversifiziert. Ursache der im Vergleich zu den Ur-Kunststoffen drastisch gesteigerten Vielfalt sind tiefe Einsichten in den molekularen Aufbau der Polymere, die die Potenziale moderner Kunststoffe über gezielte Monomerauswahl, verfeinerte Möglichkeiten der Katalyse sowie hochentwickelte Additive erheblich erweitert haben.

Dabei darf jedoch nicht vergessen werden, dass auch der Kunststoff-Maschinenbau sowie eine ausgeklügelte Verfahrenstechnik erheblichen Anteil am heute erreichten Niveau haben. Ein hervorragendes Beispiel hierfür ist die Entwicklung, die die *thermoplastischen Polyurethane* in den vergangenen Jahren erlebt haben.

## 2. Polyurethane

Unter den polymeren Werkstoffen, die heute eine gewisse Verbreitung gefunden haben, dürfen die Polyurethane (PUR) sicher als „Weltmeister“ in Sachen Vielseitigkeit gelten. Diese enorm wandelbaren Duromere, also nicht-schmelzbaren Kunststoffe finden sowohl in weichen Schaumstoffen wie auch in harten, gleichwohl schlagzähen Gehäusen Einsatz. Ihre anwendungstechnische Flexibilität erhalten sie unter anderem durch einen „Baukastensystem“-artigen Aufbau aus jeweils zwei bzw. drei Komponenten, die der Anwender je nach gewünschtem Einsatzzweck und Endigenschaften aus einem breiten Pool zur Verfügung stehender Rohstoffe auswählen kann. Wesentlich ist, dass diese reaktiven, in der Regel flüssigen Komponenten beim Anwender vermischt werden und erst in der Form zum fertigen Produkt aushärten. Die optimale Vermischung ist entscheidend für die Eigenschaften des Endprodukts, daher bekommt der Reaktionstechnik in der PUR-Verarbeitung eine ganz erhebliche Bedeutung zu.

Als ein Sonderfall der Polyurethane können die **thermoplastischen Polyurethane** (TPU) gelten. Dabei handelt es sich um Kunststoffe, die in ihrem molekularen Verknüpfungsmuster den klassischen Polyurethanen gleichen. Ein wichtiger Unterschied liegt aber in ihrer räumlichen Struktur: Während man es bei den duromeren Polyurethanen mit auf gummiähnliche Weise räumlich vernetzten Bausteinen zu tun hat, sind ihre thermoplastischen, d.h. aufschmelzbaren Pendanten linear aufgebaut. Damit ähnelt ihre Topologie eher der der klassischen thermoplastischen Werkstoffe. Da die chemische Zusammensetzung der TPUs jedoch identisch mit der der Polyurethane ist, bringen sie trotzdem eine Reihe vorteilhafter Eigenschaften dieser Polymerfamilie mit.

Ein weiterer wichtiger Unterschied: Die Verknüpfung der chemischen Bausteine zum Polymer geschieht im Wesentlichen bereits beim Kunststoff-Hersteller, so dass der Anwender nicht auf spezielle Polyurethan-Verarbeitungsanlagen zurückgreifen muss. Die thermoplastischen Polyurethane bestehen also aus ähnlichen Bausteinen wie die „klassischen“ Polyurethane, kommen aber bereits „vorreagiert“ beim Kunden an – in der Regel als transparentes bis weißes Granulat, das ähnlich wie dasjenige „klassischer“ thermoplastischer Kunststoffe verarbeitet werden kann. Die Formgebung kann nach den aus der Verarbeitung thermoplastischer Kunststoffe gewohnten Verfahren geschehen. Damit verbinden TPUs gewissermaßen „das Beste aus zwei Welten“.

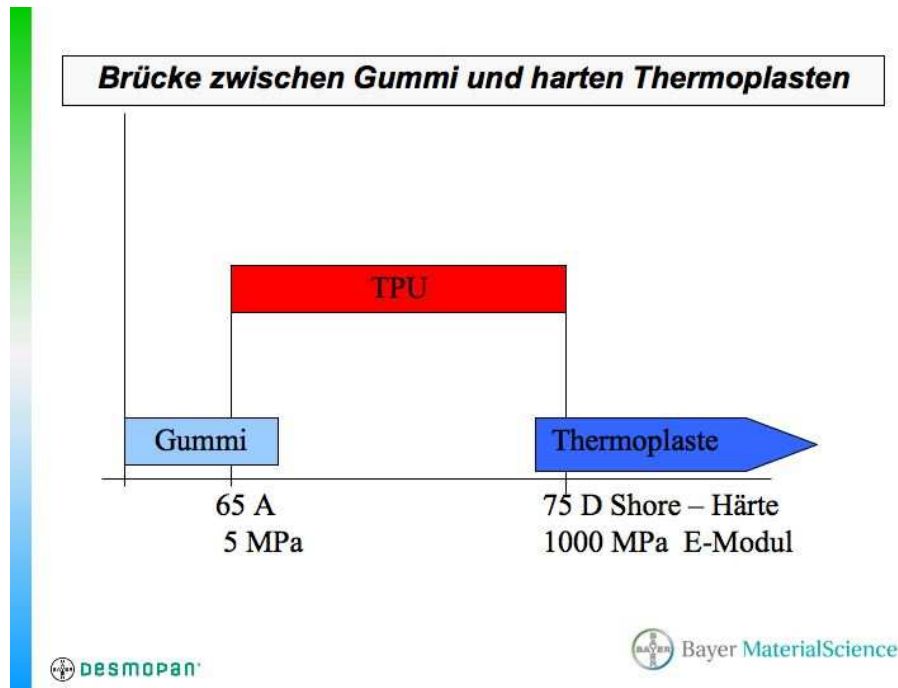


Bild 1: Thermoplastische Polyurethane schließen die Lücke zwischen Gummi und thermoplastischen Kunststoffen

Materialtechnisch sind thermoplastische Polyurethane vor allem interessant, weil sie eine bedeutende Lücke zwischen Gummi und „klassischen“ thermoplastischen Kunststoffen schließen: Mit TPUs wie Desmopan<sup>®</sup> der Bayer MaterialScience AG, Leverkusen, lässt sich – je nach Rezeptur – ein weiter Härtebereich zwischen 65 Shore A und 75 Shore D überstreichen. Weiche Formteile lassen sich ohne Verwendung von Weichmachern realisieren, denn aufgrund ihrer speziellen Struktur erreichen TPUs niedrige Härten auch ohne Zusatz dieser Additive. Kunststoffe, die diese Eigenschaften erfüllen, nennt man auch thermoplastische Elastomere (TPE). Damit erlauben TPUs zum Beispiel die rationelle Fertigung von Formteilen mit hart-weich-Kombinationen per Zweikomponentenspritzguss oder die Herstellung gummiähnlicher Artikel unter Verzicht auf die aufwändige Vulkanisation.

Die mit Desmopan<sup>®</sup> realisierbaren E-Module liegen zwischen 5 und 2000 MPa; harte Typen erreichen Werte, die tief in der Polyamid-Domäne liegen. Thermoplastische Polyurethane verhalten sich außerdem über einen weiten Temperaturbereich elastisch und zeichnen sich darüber hinaus durch eine hohe Verschleiß- und Kratzfestigkeit, eine gute Beständigkeit gegenüber Ölen, Fetten und Lösemitteln aus und sind robust gegenüber Witterungseinflüssen.

Hinzu kommen ein gutes Rückstellvermögen, gute Dämpfungseigenschaften und eine hohe dynamische Belastbarkeit.

Mit dieser Eigenschaftskombination haben sich thermoplastische Polyurethane – sowohl als Elastomere wie auch in glasfaserverstärkter Form – breite Einsatzbereiche erobert, in denen sie häufig ohne Alternative sind. Zum Beispiel im Sportsektor: Hier werden sie etwa zur Herstellung von kälteschlagzähen Skistiefeln und kratzfesten Inline-Skates sowie hoch abriebfester Sohlen für Fußballschuhe, für die Fertigung von Skioberflächen und Sportuhrarmbändern herangezogen; im Automobil findet man Lagerschalen, Dichtungen und Faltenbälge aus TPUs sowie grifffreundliche Schaltknäufe, Stecker an Sensorkabeln und Schutzschläuche. Spezielle hochtransparente Typen eignen sie sich auch als Material für flexible Cabrio-Heckscheiben.

Im Maschinenbau setzt man zum Beispiel in Siebelementen, Abstreifleisten, Rollen und Walzen sowie Dichtungen, Dämpfungs- und Antriebselementen wie Kupplungsteilen und Zahnriemen auf die hohe Verschleiß- und Abriebfestigkeit von Desmopan<sup>®</sup>. Im Haushalt trifft man TPUs zum Beispiel in weichen und beständigen Griffmaterialien sowie soft-touch-Oberflächen an.

### **3. Chemischer Aufbau**

Wie bei den Polyurethanen selbst resultiert auch die außerordentliche Vielseitigkeit der thermoplastischen Polyurethane auf der hohen Flexibilität des „modularen“ Bauprinzips, das diesen Kunststoffen zu Grunde liegt.

Bei den drei Komponenten, die beim TPU-Hersteller zum Polymer verknüpft werden, handelt es sich um sogenannte langkettige Polyole, Isocyanate und kurzkettige Diole. Diese Bausteine werden – typischerweise in Gegenwart chemischer Reaktionsbeschleuniger, ggf. auch Füllstoffen und Additiven – untereinander zur Reaktion gebracht; die „Aushärtung“ zum Werkstoff läuft bei moderaten Temperaturen in der Regel innerhalb weniger Sekunden bis Minuten ab. Anschließend muss das Material nur noch granuliert, getrocknet und zum Kunden transportiert werden.

Wie bei den Polyurethanen ergibt sich die Vielseitigkeit der TPUs aus der Wahl der Bausteine, die zum Polymer verknüpft werden – bei den Polyolen kann der Chemiker gleich auf Mitglieder diverser Substanzklassen zurückgreifen, deren spezifische Eigenschaften sich im

ausgehärteten Endprodukt natürlich wiederfinden. Bei den Polyolen sind dies zum Beispiel Polyadipate, Polycaprolactone und Polycarbonate; hydrolyseunempfindliche und gegen mikrobiellen Abbau gefeite Polyurethane sind oft durch die Verwendung von Polyether-Polyolen charakterisiert.

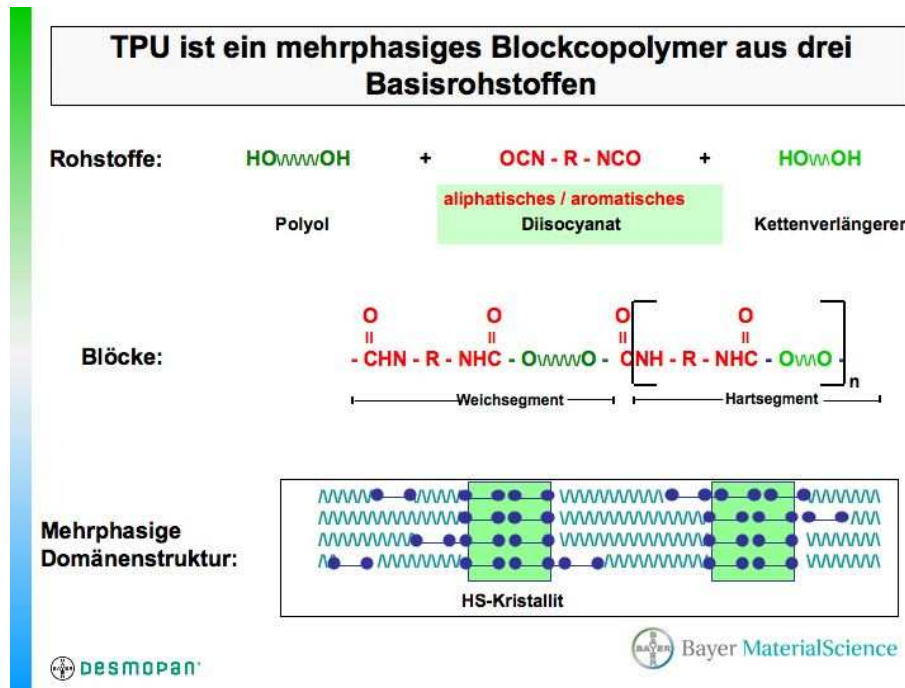


Bild 2: Aufbauprinzip der thermoplastischen Polyurethane

Bei den Isocyanaten ist für den Anwender insbesondere die Entscheidung zwischen aliphatischen und aromatischen Bausteinen von Bedeutung: Sie bestimmen, ob das Endprodukt unter UV-Bestrahlung zur Vergilbung neigt oder nicht. Für TPU-Bauteile etwa im Sichtbereich eines Automobils – zum Beispiel Instrumententafel-Häuten – sind daher vergilbungsfreie aliphatische Isocyanate zu empfehlen, die über lange Zeit eine hohe Farbstabilität sicherstellen.

Jedoch ist auch bei thermoplastischen Polyurethanen das Produkt mehr als die Summe seiner Teile. So organisieren sich die entstehenden Polymerketten im aushärtenden Kunststoff zu kristallinen und amorphen, leichter beweglichen Domänen, die als Hart- und Weichsegmente bezeichnet werden. Unter dem Begriff „Weichsegment“ fasst man Abschnitte des Polymers zusammen, die durch Abfolge langkettiger – gewissermaßen flexibler – Polyolbausteine charakterisiert sind; „Hartsegmente“ nennt man Abschnitte, die sich aus starren Abfolgen von Diisocyanaten und Kettenverlängerern zusammensetzen.

Vor allem diese Hartsegmente lagern sich aneinander und bilden im Polymer – in der Regel spontan, zuweilen aber erst durch Tempern des Rohmaterials in einem annehmbaren Tempo – Kristallite aus, die letztlich über die Härte des Produktes mitbestimmen. Kristallinität der Hartsegmente ist jedoch nicht das einzige Kriterium für die zu beobachtende Shore-Härte; auch Polyole können sich im Kunststoff durchaus zu kristallinen Bereichen aneinanderlagern.

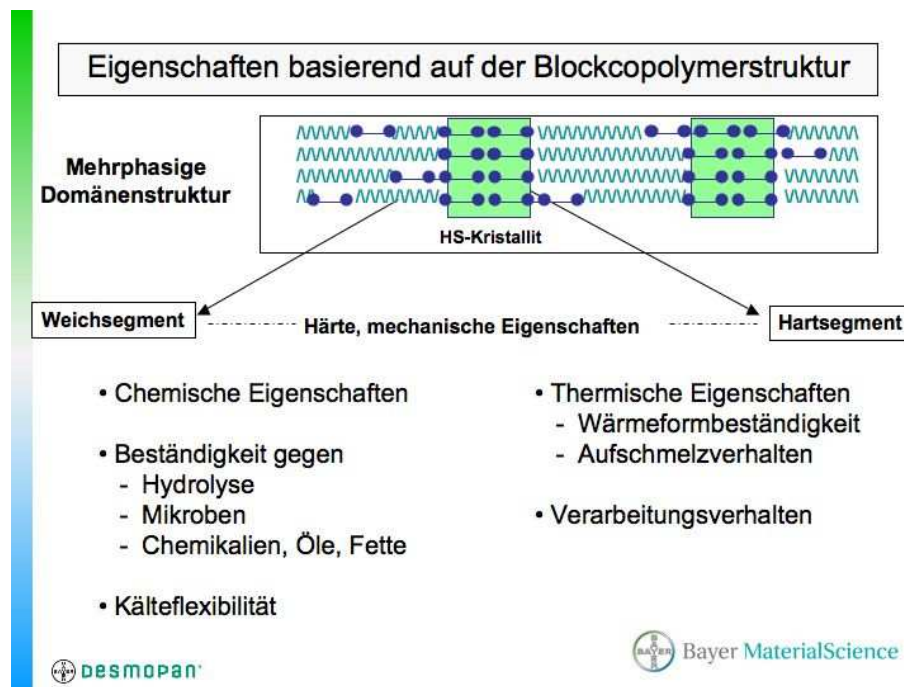


Bild 3: Die Mikrostruktur der thermoplastischen Polyurethane bestimmt über die makroskopischen Eigenschaften der daraus gefertigten Produkte

Die mehrphasige Domänenstruktur des Polymers hat jedoch stets einen tiefen Einfluss auf seine makroskopischen Eigenschaften; hierzu sind nicht nur Shore-Härten, Kälteflexibilität und Medienbeständigkeit, sondern insbesondere auch Wärmeformbeständigkeit und Aufschmelzverhalten des Produktes zu zählen.

Auch die **Verarbeitungseigenschaften** der thermoplastischen Polyurethane lassen sich über gezieltes Design der Mikrostruktur steuern. Hier liegt ein weiterer, entscheidender Schlüssel für die verarbeitungstechnische Flexibilität und mithin die weite Verbreitung, die thermoplastische Polyurethane wie Desmopan® heute gefunden haben.

#### 4. Verarbeitungsformen

Denn um Polyurethane für den Einsatz in der Domäne thermoplastischer Kunststoffe fit zu machen, genügt es nicht, die „Aushärtereaktion“ vom Anwender zum Hersteller vorzuverlegen und das Material als Granulat zugänglich zu machen. Tatsächlich gilt es selbstverständlich auch, den Werkstoff auf die etablierten Verarbeitungsverfahren zuzuschneiden.

In der Kunststoffbranche gibt es bekanntlich verschiedene, breit eingesetzte Verarbeitungstechniken: *Spritzgießen*, *Extrusion*, *Blasformen*, *Kalandrieren* sowie *Sintern* bzw. *Slushen*. Für jede dieser Techniken werden dem Material stark abweichende Verarbeitungscharakteristiken abverlangt.

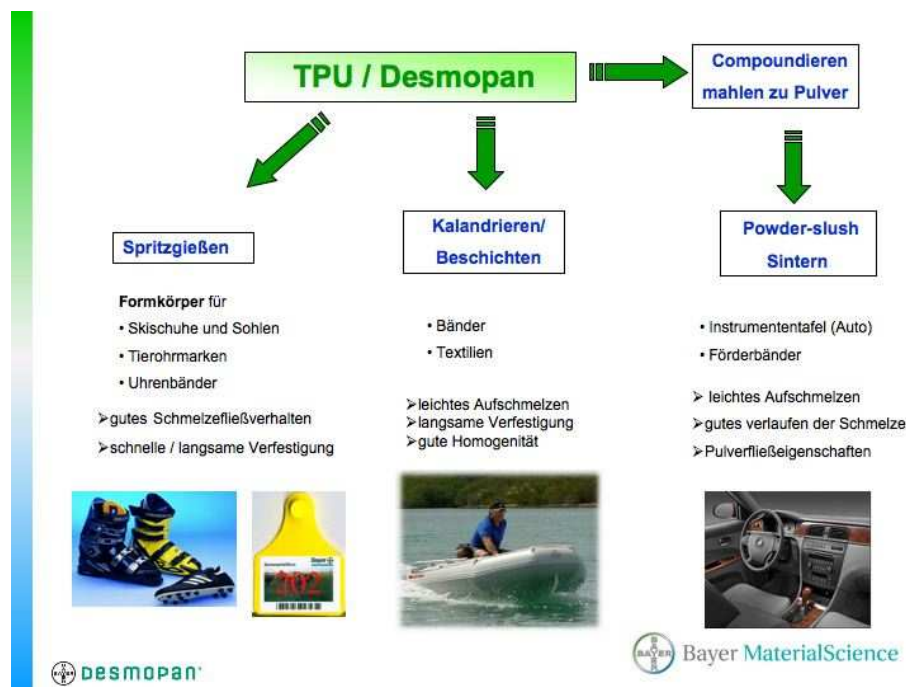


Bild 4: Anforderungen an thermoplastische Polyurethane im Spritzguss, im Kalandrieren und im Slush- bzw. Sinterverfahren

So ist der **Spritzguss**-Prozess zum Beispiel auf ein gutes Schmelzfließverhalten angewiesen, damit auch feine Oberflächendetails gut abgebildet und entlegene Werkzeugregionen zuverlässig gefüllt werden. Bei Massenartikeln wie zum Beispiel witterungsbeständigen Tierohrmarken ist darüber hinaus eine schnelle Verfestigung des Materials gefragt, damit ein hoher Durchsatz gesichert ist.

In manchen Fällen kann allerdings genau das Gegenteil gefragt sein: Zum Beispiel in der Fertigung von Skischuhen, die unmittelbar nach der Entformung vom Leisten gezogen werden und dafür im frischen Zustand eine gewisse Flexibilität an den Tag legen müssen.

In der **Kalandrierung** braucht es leicht aufschmelzbare, äußerst homogene Materialien (Stippenfreiheit!), die langsam verfestigen; für das **Powder-Slush-** bzw. **Sinter-**Verfahren sind darüber hinaus ein besonders gutes Verlaufen der Schmelze und gute Pulverfließigenschaften gefragt.

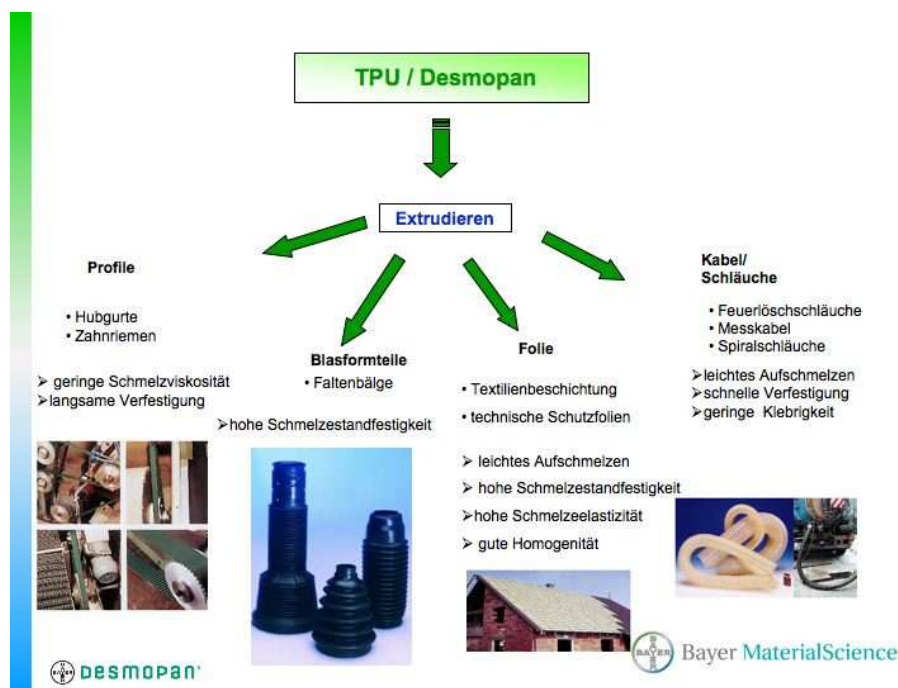


Bild 5: Anforderungen an thermoplastische Polyurethane in der Extrusion

Besonders komplex sind die Anforderungen, die an **extrudierbare thermoplastische Polyurethane** gestellt werden müssen: Während bei der Fertigung von Hubgurten und Zahnriemen zur optimalen Durchdringung der Festigkeitsträger vor allem eine geringe Schmelzviskosität und langsame Verfestigung gefragt sind, zählt bei *blasgeformten* Faltenbälgen vor allem eine hohe Schmelzstandfestigkeit, damit das ausgeformte Teil unter seinem Eigengewicht nicht einfällt.

In der *Folienfertigung* und zur Produktion *beschichteter Textilien* ist neben einer guten Aufschmelzbarkeit auch eine hohe Schmelzeelastizität gefragt. Bei Schläuchen und Kabelummantelungen ist darüber hinaus auf schnelle Verfestigung und geringe Klebrigkeit Wert zu

legen – diese Massenprodukte werden unmittelbar nach dem Passieren einer kurzen Kühlstrecke zu Rollen aufgewickelt. Extrusionstypen sollten sich darüber hinaus durch eine geringe Schmelzkristallisationsneigung auszeichnen.

## 5. Einstellung des Verarbeitungsverhaltens

Alle diese zum Teil gegenläufigen Anforderungen lassen sich inzwischen durch Variationen des Polymer-Herstellverfahrens erfüllen – meist sogar völlig ohne Rückgriff auf Variationen auf der Baustein-Ebene. So ist es zum Beispiel möglich, aus ein- und denselben chemischen Komponenten sowohl schnell als auch langsam verfestigende TPU-Typen herzustellen – allein durch gezielte Steuerung der Aushärtungsreaktion beim TPU-Produzenten.

Vorteil: Die Rohstoffauswahl kann wie gewohnt anhand der gewünschten Endeigenschaften des Kunststoffs getroffen werden; Zugeständnisse an Besonderheiten des Verarbeitungsverfahrens sind nicht erforderlich.

### 5.1. Einstufiges Herstellungsverfahren



Bild 6: Einstufiges Herstellungsverfahren

Auf klassische Weise wurden thermoplastische Polyurethane hergestellt, indem man die drei chemischen Bausteine dieses Kunststoffs in einem Zweischneckenknetler (ZSK) zur Reakti-

on brachte. Wie zu erwarten, reagieren sie unter diesen Bedingungen zu einem Polymer ab, in dem die Weich- und Hartsegmente statistisch verteilt sind. Die vergleichsweise hohe Entropie dieses „ungeordneten“ Polyurethans bedingt eine langsame Verfestigung, da es – vereinfacht gesprochen – eine Weile dauerte, bis die Hartsegmente dieses Polymers ihre endgültige, kristalline Ordnung erreicht hatten.

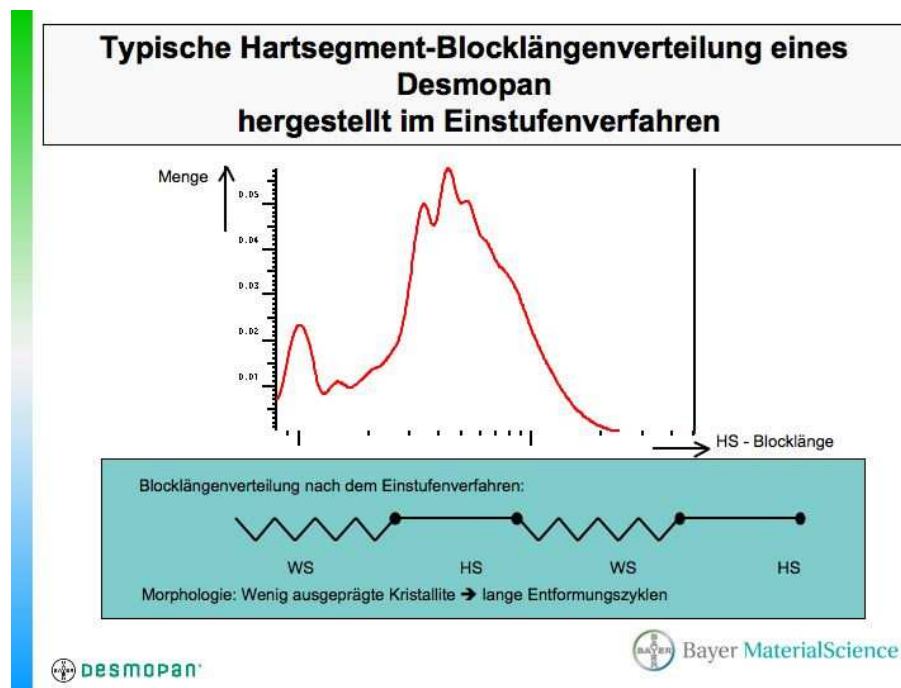


Bild 7: Typische Hartsegment-Blocklängenverteilung eines im Einstufen-Verfahren hergestellten thermoplastischen Polyurethans

Eine typische Verteilung ist in Bild 7 zu sehen. Die Peaks der Verteilungskurve entsprechen den relativen Häufigkeiten von Hartsegment-Blöcken aus einem, zwei, drei (absolutes Kurvenmaximum) und mehr Diisocyanat/Kettenverlängerer-Einheiten.

In Fällen, in denen eine langsame Verfestigung des Kunststoffes nicht erwünscht ist, führt ein solch statistischer Aufbau zu unnötig hohen Erstarrungs- und damit Zykluszeiten. Mehr noch: Da die Polyurethan-Aushärtungsreaktion – zusammengesetzt aus mehreren Teilreaktionen – sehr komplex ist und die Eingriffsmöglichkeiten zur Reaktionssteuerung in dieser einfachen, *einstufigen* Anordnung begrenzt sind, ließen sich die Eigenschaften des Polymers selbstverständlich noch nicht auf das heute gewohnte Optimum treiben; die Wärmebeständigkeit der so gefertigten TPUs etwa erreicht nur niedrige bis mittlere Werte. Zudem war es auch um die Reproduzierbarkeit der Produkteigenschaften nicht besonders gut bestellt.

## 5.2. Zweistufiges Herstellungsverfahren

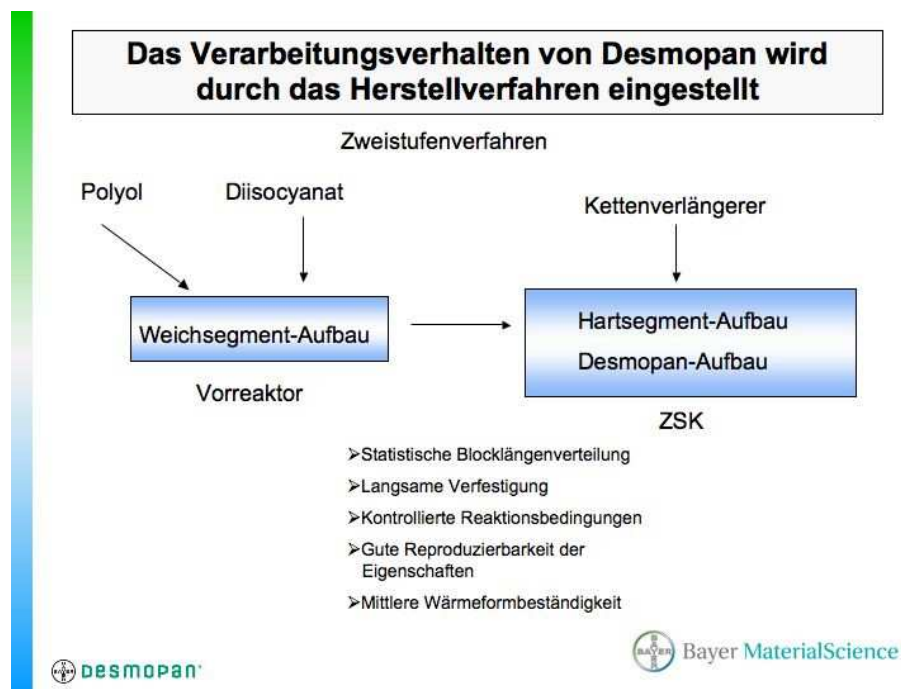


Bild 8: Zweistufiges Herstellungsverfahren

Ein erster Schritt zur Lösung dieser Herausforderung war die Einführung eines *zweistufigen Herstellungsverfahrens*, bei dem in einem Vorreaktor aus Polyol und Diisocyanat gezielt zunächst die Weichsegmente hergestellt werden. Diese „Polymer-Teilketten“ müssen dann im Zweischnellenknetzer lediglich noch über die Kettenverlängerer untereinander verbunden werden.

Auf diese Weise werden die beiden konkurrierenden Aufbaureaktionen zwischen Diisocyanat und Polyol sowie zwischen Diisocyanat und Kettenverlängerer, die im *Einstufenverfahren* zwangsweise gleichzeitig und in Konkurrenz zueinander stattfinden müssen, entflochten. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass beide Teilreaktionen nun unter jeweils optimalen Reaktionsbedingungen stattfinden können, d.h. die Gesamtreaktion deutlich besser zu steuern ist. Damit bringt dieses Verfahren deutlich reproduzierbarere Ergebnisse.

Die Struktur des resultierenden Polymers unterscheidet sich indes lediglich graduell von der im *Einstufenverfahren* etablierten. Zwar ist die Konkurrenz zwischen der langsamen Diisocyanat-Polyol-Reaktion und der schnelleren zwischen Diisocyanat und Kettenverlängerer auf-

gehoben, was sich in einer geringfügig höheren Anzahl längerer Hartsegmentblöcke niederschlägt.

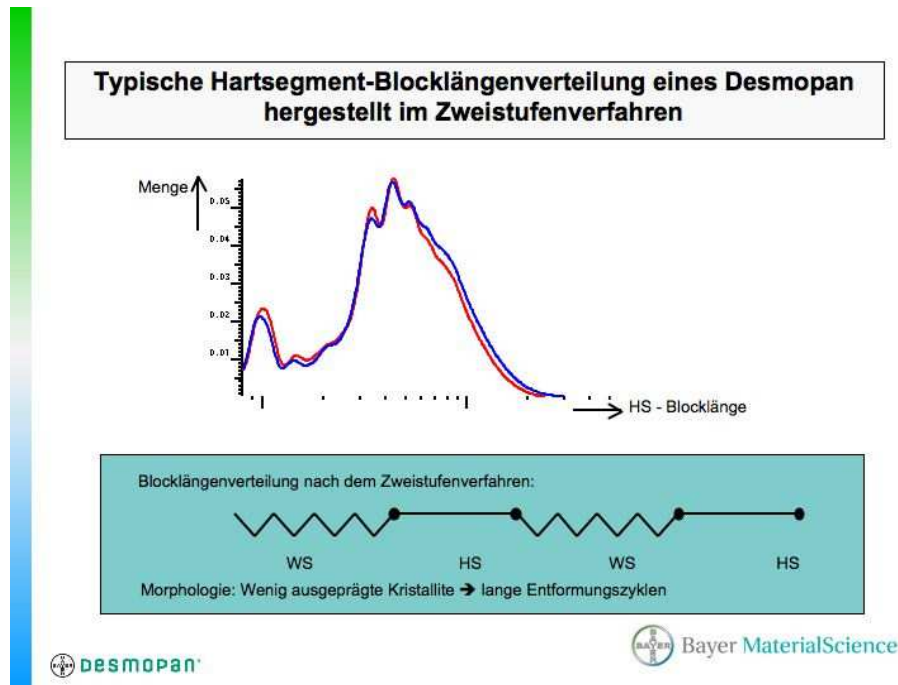


Bild 9: Vergleich der Hartsegment-Blocklängenverteilung nach Herstellverfahren. Nach dem Zweistufenverfahren entstehen geringfügig mehr längere Hartsegmente (höhere Schulter am rechten Ende der Kurve)

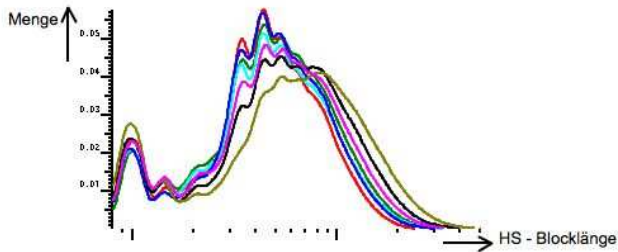
In beiden Fällen sind die für die Ausbildung der Hartsegmente maßgeblichen Diisocyanatbausteine unter dem Strich jedoch nach wie vor statistisch im Kettenmolekül verteilt. Nach dem *Zweistufenverfahren* hergestellte thermoplastische Polyurethane weisen daher ebenfalls wenig ausgeprägte Kristallite auf, verfestigen nach wie vor vergleichsweise langsam und weisen lediglich eine mittlere Wärmeformbeständigkeit auf.

### 5.3. Zweistufiges Herstellungsverfahren mit Blocklängensteuerung

Die unterschiedliche Kinetik der beiden Teilreaktionen lässt sich indes auch nutzen, um die Blocklängenverteilung des Polymers im Zweisechneckenknetzer gezielt zu steuern. Die entscheidende Verbesserung besteht darin, die Reaktion zwischen Polyol und Diisocyanat im Vorreaktor bezogen auf die Gesamtmenge mit einem *Diisocyanat-Unterschuss* durchzuführen und den Rest dieses Bausteins im Zweisechneckenknetzer mit den so gewonnenen Weichsegmenten und den Kettenverlängerern abreagieren zu lassen.



### Typische Hartsegment-Blocklängenverteilung eines Desmopan hergestellt im Zweistufenverfahren mit Blocklängensteuerung



Blocklängenverteilung nach dem neuen Zweistufenverfahren mit Blocklängensteuerung



Morphologie: Ausgeprägte Kristallite → besseres Entformungsverhalten, ermüdungsarmes mech. Verhalten



Bild 11: Im Zweistufenverfahren mit Blocklängensteuerung entstehen Polymere mit maßgeschneiderten Eigenschaften

### Verfestigungsgeschwindigkeit eines mittelharten Polyester TPU

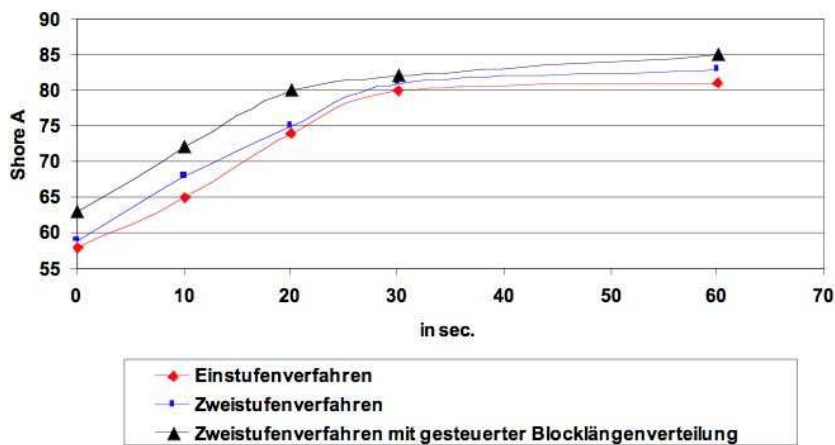


Bild 12: Verfestigungsgeschwindigkeit eines mittelharten thermoplastischen Polyurethans

Wichtig: Durch die Blocklängensteuerung wird lediglich die statistische Verteilung der Hartsegmente im Polymer beeinflusst – nicht ihre Anzahl. Diese wird nach wie vor durch die Rezeptur, d.h. durch das Mengenverhältnis zwischen Polyol, Diisocyanat und Kettenverlängerer eingestellt. Das bedeutet, dass die *Endhärte* des Kunststoffes nach der Entformung bei allen thermoplastischen Polyurethanen gleicher Zusammensetzung im Wesentlichen gleich ist – sie wird nur mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten erreicht.

In Bild 12 ist zu erkennen, dass Desmopan<sup>®</sup>-Typen, die nach dem zweistufigen Verfahren mit Blocklängensteuerung produziert wurden, bereits unmittelbar nach der Entformung eine Härte aufweisen, die bei „Einstufen-TPUs“ erst nach einigen Sekunden zu verzeichnen sind. Dadurch kann die Zykluszeit der TPU-Verarbeitung im Spritzguss häufig um rund 10 bis 20% verringert werden. Andere Kunststoff-Verarbeitungsverfahren werden durch die optimierte Härte-Steuerung überhaupt erst sinnvoll erschlossen.

## **6. Zusammenfassung und Ausblick**

Selbstverständlich kann in diesem kurzen Abriss nur ein relativ schmaler Überblick über die Möglichkeiten der TPU-Herstellung mittels Blocklängensteuerung gegeben werden. Wesentlich ist, dass sich über dieses Verfahren Desmopan<sup>®</sup>-Typen herstellen lassen, die bei gleicher chemischer Rezeptur und damit vergleichbarem Eigenschaftsprofil jeweils speziell auf den Einsatz sowohl im *Spritzguss* als auch im *Extruder*, im *Kalander* und in der *Slush-Technologie* sowie zum *Blasformen* zugeschnitten sind.

Über die gezielte Steuerung der Hartsegment-Blocklängen lassen sich thermoplastische Polyurethane wahlweise so herstellen, dass sie entweder die häufig im Spritzguss gewünschte schnelle Verfestigung aufweisen, oder aber, wie in Sonderfällen (z.B. Skischuhen) die notwendige langsamere Verfestigung ermöglichen. Auch hohe Schmelzstandfestigkeit und leichte Aufschmelzbarkeit bzw. geringe Schmelzviskosität sind nun weitgehend unabhängig von der „Chemie“ zu realisieren.

Gleichwohl ist diese immer noch von großer Bedeutung. So liegt ein großer Teil des TPU-Know-hows nach wie vor in der Auswahl geeigneter Katalysatoren, in der Optimierung von Reaktionsbedingungen (z.B. der ZSK-Temperaturen) sowie in der Auswahl der für den gewählten Einsatzzweck am besten geeigneten Polyole, Isocyanate und Kettenverlängerer. Bemerkenswert ist jedoch, dass die hier geschilderten neuen Freiheitsgrade ausschließlich

durch Variationen des Herstellverfahrens erzielt werden. Das zeigt, welchen profunden Einfluss Verfahrenstechnik und Anlagenbau heute auf die Polymertechnik haben.

Der Anwender bekommt von alledem selbstverständlich nichts mit: Er bezieht lediglich die Desmopan<sup>®</sup>-Granulate, die auf den jeweiligen Einsatzzweck hin optimiert wurden. Derzeit sind bei Bayer MaterialScience über 90 verschiedene Desmopan<sup>®</sup>-Typen erhältlich; allein für die Fertigung von Schuhen (inkl. Skistiefel) hat Bayer weit über ein Dutzend Varianten im Programm – das zeigt, wie stark die TPU-Palette bereits ausdifferenziert ist.

Sicher lässt sich diese Technik weiter ausbauen. So bestehen sicherlich einige Chancen in der Erweiterung der zwei- zu mehrstufigen Verfahren – eventuell sogar unter Einsatz von Weichsegmenten aus unterschiedlichen Polyolen – zur noch tiefer gehenden Steuerung der Polymerstruktur. Bayer MaterialScience wird die hier dargestellten Verfahren stetig weiterentwickeln.