

Qualitätsschwankungen aufspüren

Analyse von Welligkeiten mittels Abkühlsimulation

Bei der Extrusion von Kunststoffprodukten treten immer wieder Qualitätsprobleme auf, wobei sich Fehler in Extrusionsrichtung oft auf pulsierende Schmelzetemperaturen zurückführen lassen. Dies zeigt beispielhaft die Abkühlsimulation eines Rohres aus Polyethylen.

Produktionsmängel in der Extrusion lassen sich in Fehler in Umfangsrichtung (z.B. Ovalität, Wanddickenschwankung) und Fehler in Extrusionsrichtung (z.B. Welligkeit, Sharkskin) unterteilen. Neben Temperaturschwankungen sind eine Reihe weiterer Ursachen für die Ausbildung von Geometriefehlern bekannt. Overijnder [1] nennt u.a. Ursachen wie etwa

- spannungsbasierte Verformungen, insbesondere in Doppelschneckenextrudern,
- Destabilisierung der Schmelze durch nichtoptimale Auslegung von Schmelzekanälen,
- Schwankungen der Wandstärke durch nichtoptimale Einstellung von Temperaturen an Zylinderzonen, Schnecken und Werkzeugen,
- Grenzschichtphänomene (z.B. Wave Instability) bei der Extrusion mehrschichtiger Rohre, ausgelöst durch unterschiedliche Viskositäten der einzelnen Schichten und
- Geschwindigkeitseinbrüche durch hohe Reibung im Bereich der Kalibrierhülse (Ruckeln) aufgrund von nicht optimaler Ausrichtung von Hülse und Werkzeugaustritt.

Diese Liste ist bei Weitem nicht vollständig, vermittelt aber einen guten Eindruck davon, wie vielfältig die Probleme in der Extrusion sein können.

Schmelzetemperaturen im Extruder

Die Temperatur der Schmelze im Extruder wird im Wesentlichen bestimmt von der friktionsbedingten Dissipation aufgrund der Schneckendrehung, wobei elektrische Heizelemente über die Zylinderoberflächen oft noch Wärme einbringen. In der Meteringzone des Extruders wird hingegen in vielen Fällen bereits gekühlt, um ein Überhitzen der Schmelze zu verhindern oder um – bei begrenzter Kühlstreckenlänge – die Produktivität der Linie zu erhöhen. Die Schmelzetemperatur reagiert auf Einflüsse von außen allerdings nur sehr träge, da Kunststoffe schlechte Wärmeleiter sind; ihre Wärmeleitfähigkeit ist etwa einhundertmal niedriger als die von Stahl. In der Meteringzone eines Einschneckenextruders ist die Wärmeübertragung in der unmittelbaren Nähe der Zylinderwand dennoch vergleichsweise effektiv. Eine dünne Schmelzeschicht an der Innenseite des Zylinders kann somit recht schnell abkühlen [2]. Der auf die Schmelze wirkende Kühleffekt wird mit zunehmender Entfernung von der Zylinderwand aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit jedoch

immer ineffektiver. Die Temperatur in der Schmelze ist daher systembedingt ungleichmäßig verteilt, was es schwierig macht, sie im Bereich der Meteringzone homogen abzusinken.

Bild 1 zeigt das Konturdiagramm der Schmelzetemperaturverteilung aus einer FEM-Simulation (Finite-Elemente-Methode). Die großen Temperaturunterschiede in der Schmelze, die zu pulsierenden Durchschnittstemperaturen am Extruderaustritt führen, sind hier gut zu erkennen.

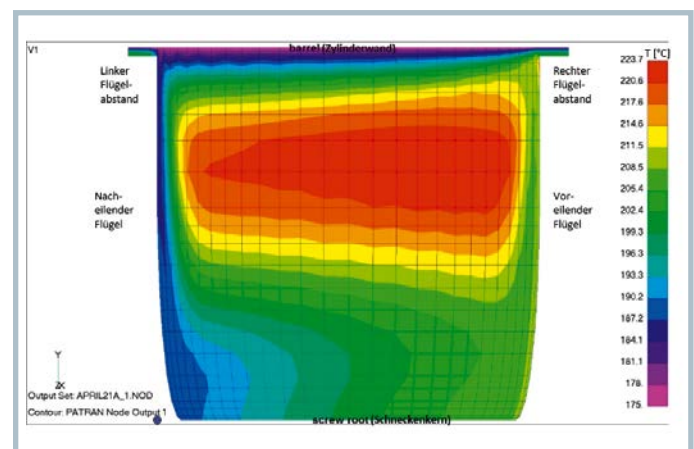


Bild 1. Schmelzetemperaturverteilung in der Meteringzone bei aktiver Kühlung von außen in einem Extruder mit 63,5 mm Schneckendurchmesser, in dem eine PE-HD-Schmelze (MFR: 0,2 g/10 min; Fractural Melt) bei Schneckendrehzahl von 100/min verarbeitet wird. Die Tiefe des Schneckenkanals in vertikaler Richtung wurde im Diagramm um den Faktor acht vergrößert, um die Temperaturverteilung besser darstellen zu können (Quelle: [3-6])

An der University of Bradford, Großbritannien, wurden Temperaturunterschiede in Polymerschmelzen im Detail untersucht [3-6]. **Bild 2** zeigt den Versuchsaufbau, in dem die Schmelzetemperaturen mittels in die Zylinderwand integrierten Thermoelementen, einem in den Schmelzekanal eingebrachten Thermoelemente-Drahtgitter und per externer Infrarotmessung (Bohrungen in Zylinder und Werkzeug) im Zylinder und Werkzeug ermittelt wurden. Da die Zylinderwand thermisch viel zu träge ist, reagieren die Thermoelemente nicht wesentlich »

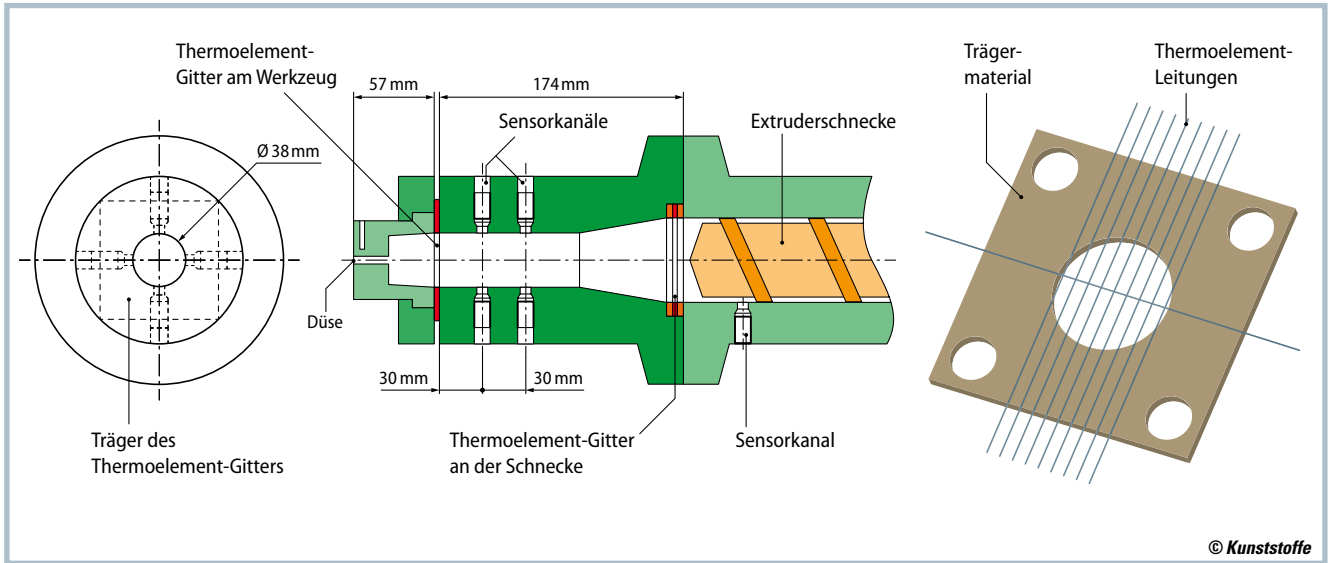


Bild 2. Versuchsaufbau: Thermoelemente in den Sensorkanälen der Zylinderwand (Mitte) und ein Thermoelement-Drahtgitter (Detailansicht rechts) im Schmelzekanal erfassen die Temperatur (Quelle: [3-6])

auf Temperaturänderungen in der Schmelze (**Bild 3**). Das Thermoelemente-Netz zeigt signifikante Änderungen (10...20 K) der Temperatur erst ab Drehzahlen über 70/min, während das IR-Thermometer in allen Drehzahlbereichen starke Änderungen anzeigt, oberhalb von 90/min sogar bis zu 20...25 K.

Wirkung auf das Endprodukt

Aufgrund der unveränderlichen Abkühlungssituation (festgelegte Kühlwassertemperaturen, Unterdruckniveaus, Geometrie der

Kühlstrecke etc.) wirkt sich eine inhomogene Temperaturverteilung auf den gesamten Produktionsprozess aus und pflanzt sich durch das Extrusionswerkzeug über die Kalibrierung bis in die Kühlstrecke fort. Eine Folge davon ist die unregelmäßige Formgebung des Endprodukts, da Kunststoffe bei ihrer Abkühlung einer Volumenschwindung unterliegen (**Bild 4**).

So zeigen Messungen eine Materialschrumpfung um 23% über den gesamten Abkühlvorgang. Die Volumenabnahme ist in radiale, axiale und tangential Richtung aufgeteilt, während ihre Verteilung von verschiedenen Faktoren wie Material, SDR-Klasse (Standard Dimension Ratio, Verhältnis von Durchmesser zu Wandstärke) und Produktionsgeschwindigkeit abhängt und somit auch die Absolutwerte der Geometrieänderung (Außendurchmesser und Wandstärke) von der Schmelztemperatur abhängen. Nähere Informationen zu temperaturabhängigen Materialeigenschaften finden sich in [7].

Obgleich dieser Effekt bei allen extrudierten Produkten auftreten kann, konzentriert sich dieser Artikel auf die Rohrextrusion, wo sich die Verformung üblicherweise als Welligkeit auf den Rohroberflächen bemerkbar macht. Da die Effekte während des Abkühlvorgangs auf messbaren Materialdaten und gut erforschten physikalischen Vorgängen beruhen, ist es möglich, ihre Auswirkungen auf das fertige Produkt zu berechnen.

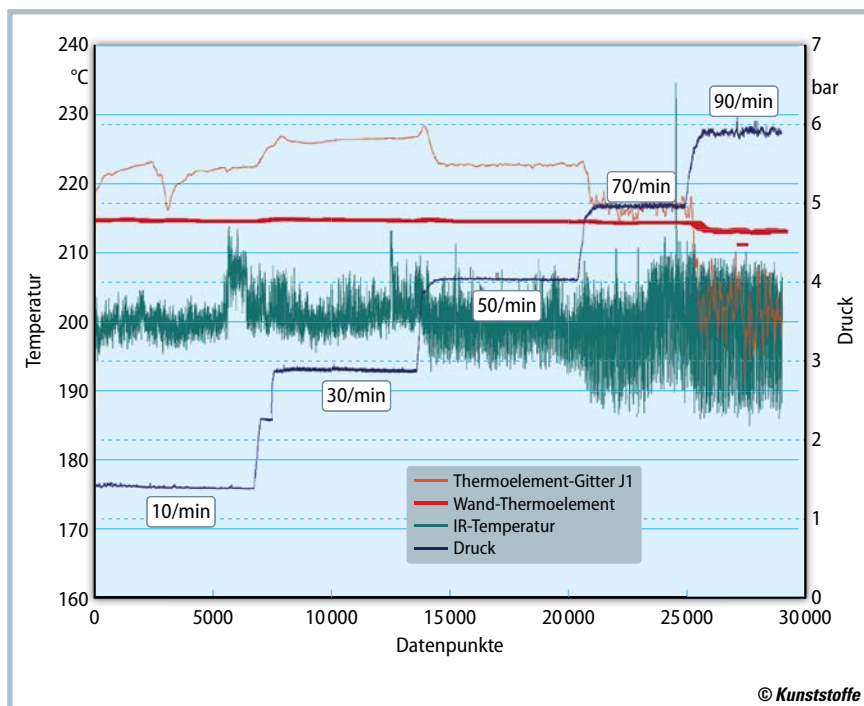


Bild 3. Verlauf der Schmelztemperatur gemessen von Thermoelementen in der Zylinderwand (dicke rote Linie), vom Thermoelemente-Netz (dünne orange Linie) und mit Infrarot (grün) (Quelle: [3-6])

Software

Software für die Abkühl-Simulation

Die Abkühl-Simulationssoftware Chillware ermöglicht es, den Abkühlprozess von extrudierten Rohren, Platten, Folien und Profilen an beliebigen Stellen im Extrusi-

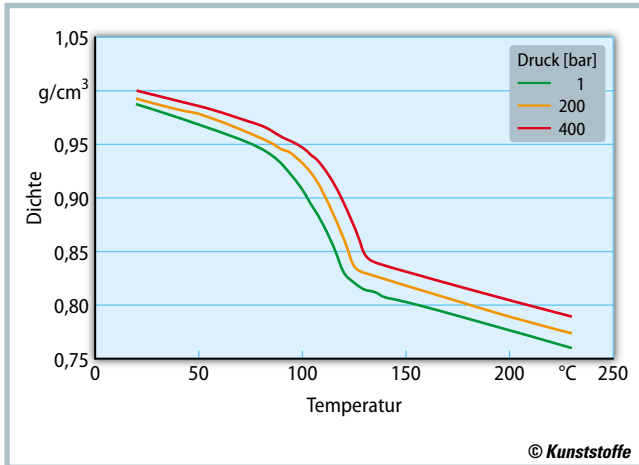


Bild 4. Dichteänderung beim Abkühlen: Das PE100-Referenzmaterial zeigt abhängig vom Druck bei etwa 120 °C beispielhaft den Einfluss der Kristallisation (Quelle: SHS plus)

onsprozess zu simulieren. Zusätzlich zur reinen Temperaturverteilung im Querschnitt des Produkts berechnet die Software Eigenspannungen, thermische Schwindung/Schrumpfung und selbst die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschallsignalen. Beispiele für Anwendungsfälle beschreiben [8-10].

Die Software basiert auf der Finite-Differenzen- und Finite-Elemente-Methode und simuliert (in den Modulen PipeSim und CoexSim) die Temperaturverteilung von mono- und co-extrudierten Rohren in radialen Schichten über die gesamte Kühlstreckenlänge. Materialeigenschaften des Kunststoffes, wie temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit oder Kristallisationsverhalten, sind für die Simulation von großer Wichtigkeit und daher durch Labormessungen ermittelt und im System hinterlegt. Durch Anpassung von Parametern (z.B. Kühlmitteltemperatur, Produkti-

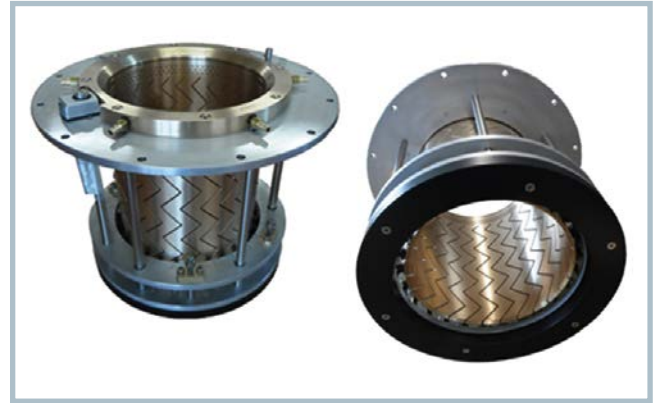


Bild 5. Kalibrierhülsen: Als Beispiele links eine verstellbare und rechts eine konische Kalibrierhülse (© CCA)

ongeschwindigkeit oder Aufbau der Kühlstrecke) lässt sich so ein optimales Kühlstreckendesign oder der optimale Betriebspunkt für die Kühlstrecke ermitteln. Die Software zieht dazu die vom Anwender vorgegebene Soll-Temperatur des Kunststoffprodukts am Ende der Kühlstrecke für eine vollautomatische Kühlstreckenoptimierung heran.

Einflussfaktoren auf die Produktgeometrie

Die Rohrgeometrie wird hauptsächlich durch die Schmelztemperatur, den Massedurchsatz, die äußere Vakuumkalibrierung und ihren Vakuumwert sowie durch die Temperatureinstellung in der Kühlstrecke bestimmt. Den größten Einfluss auf den Außendurchmesser des fertigen Rohrs hat allerdings die Vakuumkalibrierhülse (**Bild 5**).

Durch ein praktikabel eingestelltes Vakuum erhält die Außenfläche des Rohrs im Optimalfall vollen Kontakt zur Innenflä- ➤

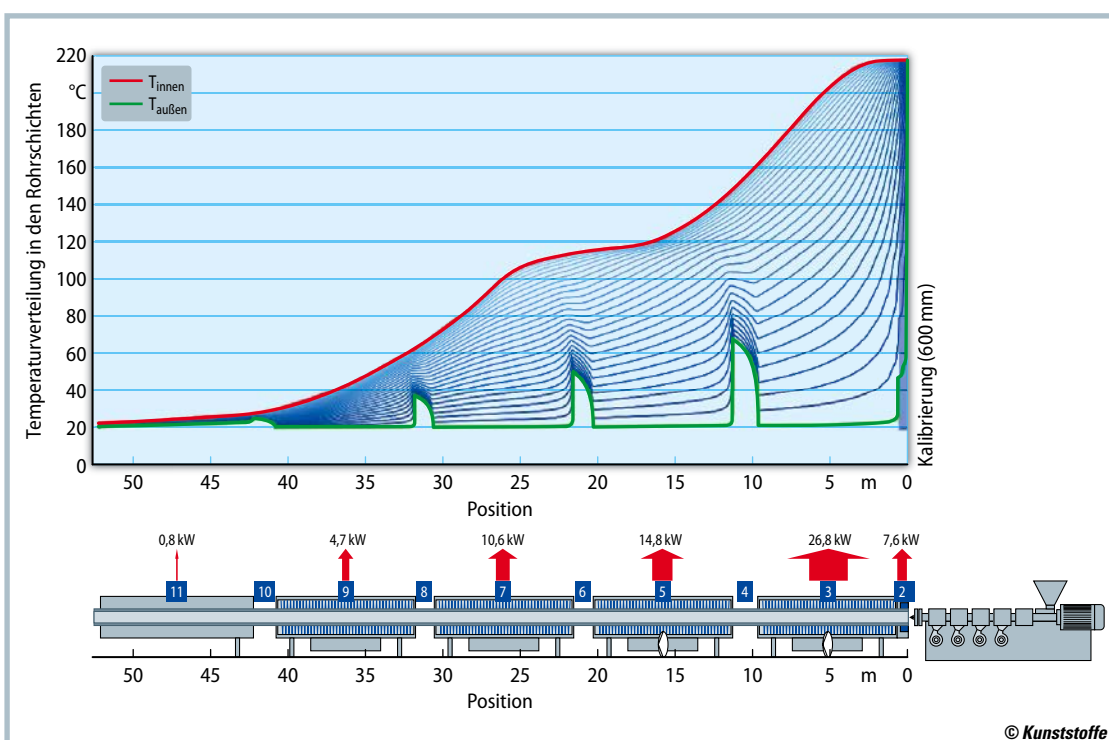


Bild 6. Temperaturverlauf im Referenzprozess: Bereits die Vakuumkalibrierung entzieht dem Rohr 7,6 kW thermische Energie. Die Temperatur der äußeren Rohrwand beträgt 47,4 °C, die innere Rohrwand hat mit 218 °C noch Schmelztemperatur (Quelle: SHS plus)

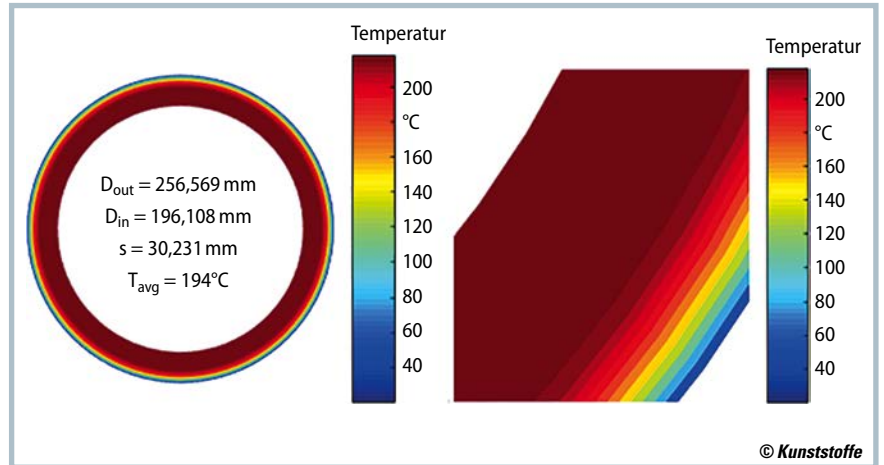


Bild 7. Homogene Temperaturverteilung im Rohrquerschnitt am Ende der Kalibrierung: Die Temperatur an der Rohrwand liegt noch nahe der Schmelzetemperatur von 218°C. Die Durchschnittstemperatur der Rohrwand beträgt 194°C (Quelle: SHS plus)

Die Autoren

Dr.-Ing. Kenny Saul ist Geschäftsführer der SHS plus GmbH in Oberhausen; saul@shs-plus.de

Dr.-Ing. Gregor Hiesgen ist Geschäftsführer der SHS plus GmbH in Oberhausen; hiesgen@shs-plus.de

Dr. Chris Rauwendaal ist Geschäftsführer bei der Rauwendaal Extrusion Engineering Inc.

Manuel Möllenbeck ist Elektrotechniker bei der SHS plus GmbH.

Service

Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/3153736

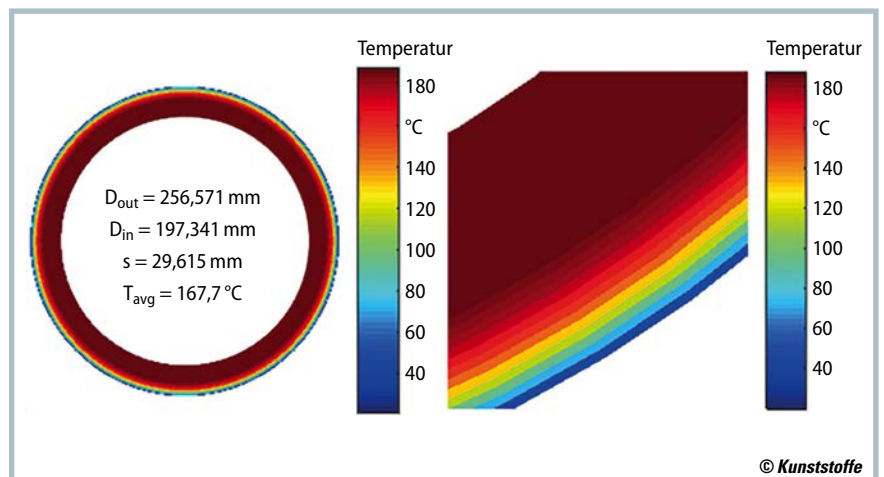


Bild 8. Modifizierter Prozess: Temperaturverteilung im Rohrquerschnitt am Ende der Kalibrierung (Schmelzetemperatur auf 188°C reduziert). Die Durchschnittstemperatur der Rohrwand beträgt nur noch 167,7°C (vorher 194°C) (Quelle: SHS plus)

che der Kalibrierhülse, wodurch ein bestmöglicher Wärmeübergang realisiert und die äußere Schicht der Rohrwand sofort eingefroren wird; das Rohr wird zudem durch die Kalibrierung und das Vakuum perfekt geführt und hinsichtlich der Dimension eingestellt („kalibriert“). Die Zeit in der Kalibrierung hängt von der Länge der Kalibrierhülse und der Produktionsgeschwindigkeit ab

Parameter	Wert
Material	PE100
Ziel-Außendurchmesser	250 mm
Ziel-Wandstärke	24 mm
SDR (Standard Dimension Ratio)	10,4
Massedurchsatz	350 kg/h
Schmelzetemperatur	218 °C
Produktionsgeschwindigkeit	0,35 m/min
Außendurchmesser der Kalibrierung	256,6 mm
Wanddicke am Werkzeug	31,04 mm

Tabelle 1. Parameter für die Simulation des Referenzprozesses (Quelle: SHS plus)

SHS plus)

und reicht bei praxisrelevanten Extrusionsgeschwindigkeiten nicht aus, das Produkt vollständig auf seine Zieltemperatur zu kühlen, weshalb weitere Kühlaggregate eingesetzt werden, z. B. (Vakuum-)Sprühkühltanks oder Tauchbäder.

Die Schmelze-Temperaturniveaus und -verteilungen innerhalb der Rohrwand, nach dem Verlassen der Kalibrierung, haben einen erheblichen Einfluss auf die finale Produktgeometrie. Nach dem aktuellen Stand der Technik ist es in der Praxis kaum möglich, auftretende hochfrequente Temperaturunterschiede in der Schmelze (pulsierendes Temperaturprofil) effektiv zu kompensieren, sodass eine ungleichmäßige Temperaturverteilung des Schmelzeaustritts die erreichbaren Produktqualitäten signifikant beeinflusst.

Simulation von Geometriefehlern

Wie stark der Einfluss einer inhomogenen Temperaturverteilung auf die Produktdimensionen ist, wird hier am Beispiel eines PE100-Rohrs mit der Simulationssoftware Chillware untersucht (Parameter siehe **Tabelle 1**).

Als Kühlstrecke dient ein für ein solches Produkt typischer Aufbau: eine 600 mm lange Vakuumkalibrierung, zwei jeweils 9000 mm lange Vakuum-Sprühkühltanks und zwei ebenso lange gewöhnliche Sprühkühltanks. Der Temperaturverlauf in der Rohrwand lässt sich im Referenzprozess leicht nachvollziehen (Bild 6).

In Bild 7 ist die Temperaturverteilung über den Rohrquerschnitt am Ende der Kalibrierung dargestellt. Der Außendurchmesser des Rohrs unterliegt über den gesamten Produktionsprozess einer thermischen Volumenschwindung von 3,5%, wobei der Gesamtwert der Schwindung von der Schmelztemperatur abhängt. Diese wird virtuell von 218°C auf 188°C verringert, um die Auswirkungen von pulsierender Schmelztemperaturverteilung auf das Produkt zu simulieren. Der Volumenstrom des Kunststoffs bleibt dabei konstant.

Die Auswirkungen der pulsierenden Schmelztemperatur sind in Bild 8 ersichtlich. Die Durchschnittstemperatur der Schmelze hat sich von 194°C auf 167,7°C reduziert. Der Außendurchmesser des Rohrs wird weiterhin durch die Kalibrierung und das dort anliegende Vakuum fixiert, wobei aber die insgesamt auftretende Volumenschwindung durch die niedrigeren Schmelztemperaturen in verringertem Maße wirken. Die in der Kalibrierung abgeführte thermische Leistung reduziert sich von 7,6 kW auf 6,7 kW, da aufgrund der geringeren Schmelztemperatur auch das treibende Potenzial für den Temperatureausgleich verringert wird.

Von besonderem Interesse ist bei der Auswertung der Simulationsergebnisse die Betrachtung der Produktdimension bzw. die Abnahme des Außendurchmessers. Bei vollständig konstanter Kühlstreckengeometrie und -prozessführung, die für einen Soll-Außendurchmesser von 250 mm und eine Soll-Wanddicke von 24 mm optimiert wurde, ergibt sich für den variierten Prozess eine Zunahme des Außendurchmessers von 250 mm auf 250,99 mm (+0,4%) und eine Zunahme der Wanddicke von 24 mm auf 24,54 mm (+2,2%). Diese Veränderungen in der Geometrie würden sich durch eine Anpassung des Vakuumniveaus oder eine einstellbare Kalibrierhülse beeinflussen lassen, sofern der Prozess konstant verläuft. Dies ist allerdings in der Praxis oft nicht der Fall, wie Messungen an verschiedenen Anlagen gezeigt haben.

Die aus diesen Temperaturschwankungen zu erwartende Welligkeit des Produkts liefert ein Rechenmodell, das die Simulationsergebnisse des Referenzprozesses sowie des variierten Prozesses zusammenführt (Bild 9). Die Temperatur der Schmelze schwankt hier mit einer Frequenz $f = 0,833 \text{ Hz}$, was einer Schneckendrehzahl von $n_{\text{Schnecke}} = 50/\text{min}$ entspricht. Der resultierende, zeitabhängige Außendurchmesser $D_a(t)$ berechnet sich aus dem Referenz-Außendurchmesser $D_{a,\text{ref}} = 250 \text{ mm}$ und dem vergrößerten Durchmesser $D_{a,\text{mod}} = 250,99 \text{ mm}$ aus der Modifikation zu:

$$D_a(t) = 0,5 \cdot (D_{a,\text{mod}} - D_{a,\text{ref}}) \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) + D_{a,\text{mod}} + D_{a,\text{ref}}$$

Zusammenfassung und Fazit

Es ist allgemein bekannt (und gilt als Qualitätskriterium für die Auslegung von Extrudern), dass eine unregelmäßige (pulsierende) Schmelztemperatur Auswirkungen auf die Qualität eines extrudierten Produkts haben kann. Ebenfalls ist bekannt, dass diese inhomogene Schmelze-Temperaturverteilung sich in

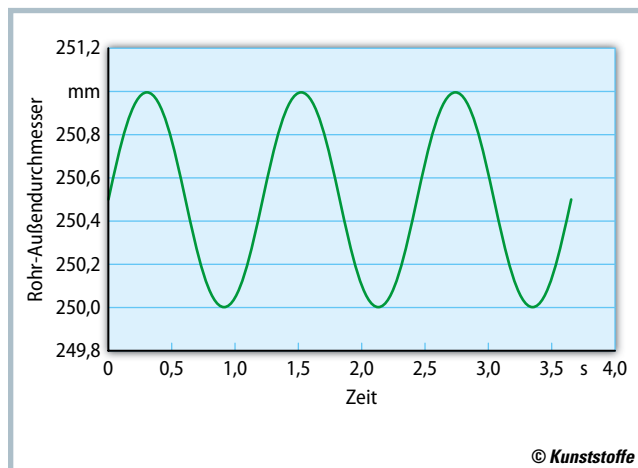


Bild 9. Außendurchmesser: Die aus der ungleichmäßigen Verteilung der Schmelztemperatur resultierende sinusförmige Änderung der Rohroberfläche (Quelle: SHS plus)

Form von Geometriedefekten (z. B. Welligkeiten an den Produkt-oberflächen) bemerkbar machen kann. Neben der korrekten Auslegung und Gestaltung des heißen Anlagenteils/Extruders sowie sämtlicher dazugehöriger Komponenten nimmt jedoch auch die Kühlstrecke einen wesentlichen Stellenwert ein.

Die Computersimulationen zeigen, dass sich Außendurchmesser und Wanddicke während des Abkühlens verändern, wodurch sich auf Grundlage der Simulationsergebnisse und der Schneckendrehzahl die Entstehung der wellenförmigen Produktoberfläche exakt nachweisen lässt. Die Studie zeigt ferner, dass durch Computersimulation die Ursache von Qualitätsdefiziten nachweisbar ist. Das Verstehen von Problemursachen ist der wichtigste Schritt bei deren Vermeidung und stellt somit die Basis für eine Steigerung der Produktqualität dar. Zudem zeigt diese Untersuchung erneut, wie wichtig für die finale Qualität eines Produkts das perfekte Zusammenspiel des heißen und des kalten Anlagenteils ist. ■

Die bunte Welt der Kunststoffe.

www.kunststoffe.de



Kunststoffe.de