

Die Kühlung nicht vergessen

Maßnahmen für mehr Energieeffizienz im Dünnwandspritzgießen

Ungeachtet der Ölpreisschwankungen entwickelt sich das Energiepreinsniveau im langfristigen Mittel in eine Richtung: nach oben. Der Blick auf die Energiebilanzen wird für die produzierenden Unternehmen deshalb in Zukunft noch wichtiger werden. Der Spritzgießmaschinenhersteller Engel hat bei seinen Entwicklungen nicht nur die Antriebstechnik im Fokus, sondern z. B. auch die Werkzeugkühlung. Diese birgt vor allem bei der Herstellung von Dünnwandverpackungen noch großes Einsparpotenzial.

Aus dem Wärmeübergang von der Schmelze durch das Werkzeug in das Kühlmedium [1] ergeben sich drei Einflussgrößen, die die Temperatur an der Kavitätenoberfläche bestimmen:

- der Wärmeleitwiderstand im Werkzeug,
- der Wärmeübergangswiderstand vom Werkzeug in das Kühlmittel sowie
- die gewählte Höhe der Kühlmitteltemperatur.

Diese Größen stehen mathematisch in Beziehung zueinander:

$$k = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_M} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{TM}} \right) \quad (1)$$

k: Wärmedurchgangszahl [kJ/m²hK]
 δ: Abstand Kühlkanal zu Formnest [m]
 α_M: Wärmeübergangszahl Masse/Werkzeug [kJ/m²hK]
 λ: Wärmeleitfähigkeit [kJ/mhK]
 α_{TM}: Wärmeübergangszahl Werkzeug/Kühlmedium [kJ/m²hK]

Für den Wärmeleitwiderstand im Werkzeug gilt: Je näher der Kühlkanal an der Kavität angeordnet ist, desto kleiner ist der Durchgangswiderstand. Die sogenannte konturnahe Kühlung lässt sich mit lasergesinterten Formeinsätzen („Lasercusing“ oder vergleichbare Verfahren) auch bei komplexen Werkzeuggeometrien realisieren. Dabei spielt auch die Wärmeleitfähigkeit eine große Rolle. Die Verwendung von Einsätzen aus gut leitenden Werkstoffen wie Bronze oder Kupfer-

Beryllium-Legierung (CuBe) bietet Vorteile, ist aber aufgrund ihrer eingeschränkten Festigkeit nur für exponierte Stellen möglich.

Für den Wärmeübergang vom Werkzeug ins Temperiermedium ist neben der Kühlkanalgeometrie der Durchsatz des Kühlmittels entscheidend. Wie allgemein bekannt, ist für einen optimalen Wärmeübergang eine turbulente Strömung im Kühlkanal notwendig. Diese entwickelt sich bei Reynolds-Zahlen von über 2300; die idealen Werte liegen zwischen 10 000 und 20 000 (**Bild 1**). Bei noch höheren Reynolds-Zahlen verändert sich der Wärmeübergang nur noch marginal und bringt deshalb keine weitere Verbesserung. Aus energetischer Sicht ist daher ein höherer Durchsatz zu vermeiden [2].

Die physikalischen Grundlagen finden in der Praxis zu wenig Beachtung

Auch die Medienvorlauftemperatur beeinflusst den Wärmeübergang – nicht nur über die Temperatur des Kühlkanals, sondern auch über die Wandtemperatur der Kavität. Je größer die Temperaturdifferenz, desto größer ist auch die abgeführte Wärmemenge. Gravierende Ände-



Bei der Herstellung von Dünnwandverpackungen wird das vorhandene Energieeinsparpotenzial oft nicht vollständig ausgenutzt (Bild: Fotolia.com/euthymia)

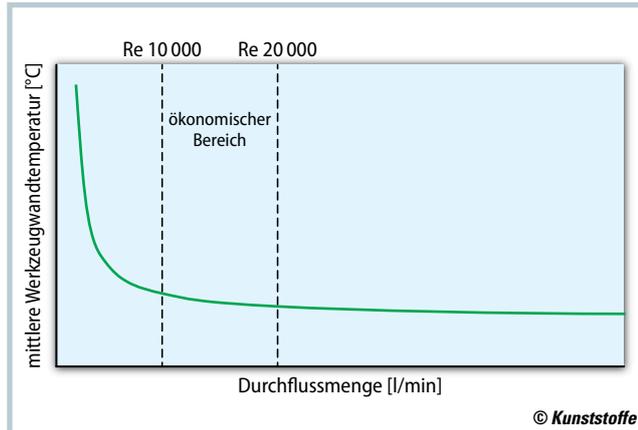
rungen des Wärmefflusses ergeben sich aber nur, wenn die Kühlmitteltemperatur sehr stark verändert wird, was in der Praxis kaum vorkommt.

Beim Spritzgießen technischer Bauteile wird die Kühlmitteltemperatur den Anforderungen des Materials angepasst. Beim Dünnwandspritzgießen ist die Bandbreite zwar größer, die Temperatur bleibt aber auch hier üblicherweise unter 20 °C. Da sich in diesem Bereich die Temperatur der Kühlkanaloberfläche nicht signifikant verändert, spielt die Vorlauftemperatur des Kühlmittels für den Wärmeübergang in der Dünnwandtechnik nur eine untergeordnete Rolle.

In der Praxis finden diese physikalischen Grundlagen in Dünnwandanwen-

Bild 1. Werkzeugwandtemperatur in Abhängigkeit der Durchflussmenge: Idealerweise sollte die Reynolds-Zahl zwischen 10 000 und 20 000 liegen

(Bild: Engel)



dungen in der Verpackungsindustrie bislang zu wenig Beachtung. Exponierte Bereiche im Werkzeug, wie die Kernböden von Becher- oder Eimerwerkzeugen, sind zwar richtigerweise aus gut wärmeleitfähigen Materialien ausgeführt, konturnahe Kühlungen sind dagegen selten zu finden.

Zudem herrscht vielfach die Meinung vor, dass sich mit einem größeren Medien-

durchsatz eine höhere Wärmeabfuhr und damit eine geringere Kühlzeit erzielen lässt. Wie erwähnt, verbessert aber bei einer turbulenten Strömung eine Erhöhung der Reynolds-Zahl auf über 20 000 die Wärmeabfuhr nicht mehr wesentlich. Dies sollte bei der eingesetzten Kühlwassermenge berücksichtigt werden.

Ein noch größeres Sparpotenzial bieten die Kühlkanaldurchmesser. Obwohl

durch den Einsatz von Störelementen [3] auch bei kleineren Reynolds-Zahlen eine turbulente Strömung erreicht werden kann, sind die verwendeten Kühlkanaldurchmesser oft zu groß dimensioniert. Die Gründe hierfür: Nicht selten wollen die Produktionsverantwortlichen den Druckverlust in den zumeist seriell geschalteten Kanälen begrenzen und gehen davon aus, dass eine größere Kühlkanaloberfläche auch eine höhere Kühlleistung erbringt.

Wasserdurchsatz lässt sich bei gleicher Kühlwirkung drastisch reduzieren

Richtig ist hingegen, dass sich die wirksame Kühlkanaloberfläche aus der der Kavität zugewandten Oberfläche ergibt. Wenn nun ein großer Kühlkanal durch zwei Kanäle mit jeweils dem halben Durchmesser ersetzt wird, bleibt die wirksame Kühlkanaloberfläche unverändert. Dabei reicht aber ein wesentlich geringerer Durchsatz aus, um die gleiche Reynolds-Zahl zu erhalten. Gleichzeitig »

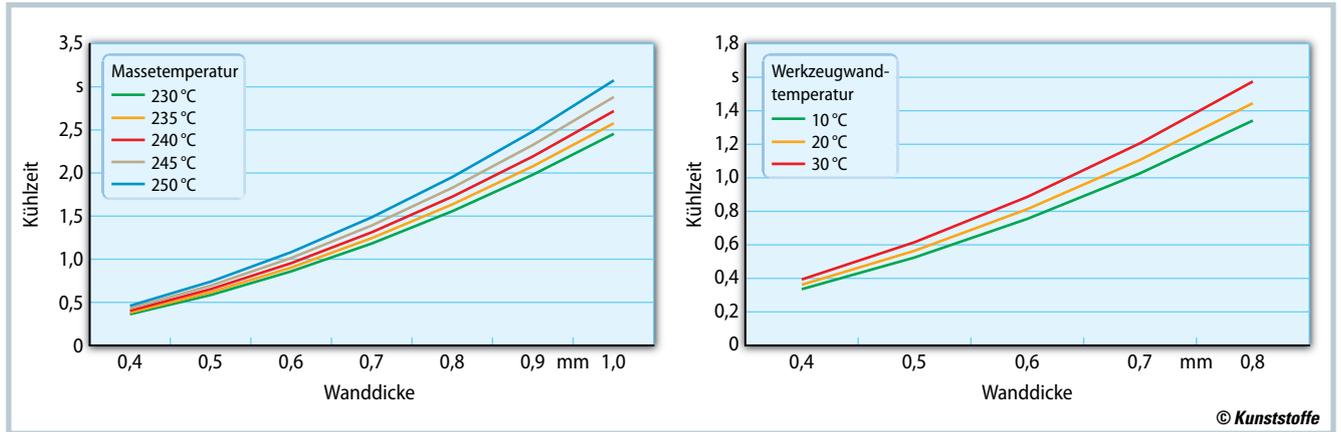


Bild 2. Im Bereich sehr kleiner Wanddicken unter 0,5 mm haben die Massetemperatur und die Werkzeugwandtemperatur keinen signifikanten Einfluss auf die Kühlzeit. Die Grafik links zeigt die Abhängigkeit der Kühlzeit von der Wanddicke und Massetemperatur, die Grafik rechts berücksichtigt statt der Masse die Werkzeugwandtemperatur (Bild: Engel)

lässt sich der Druckverlust durch den Wechsel von einer seriellen auf eine parallele Anordnung der Kühlkanäle ausgleichen. Auf diese Weise kann der Wasserdurchsatz bei gleicher Kühlwirkung drastisch reduziert werden. In Folge sinken der Energiebedarf sowie die Kosten.

Geringerer Energiebedarf trotz höherer Massetemperatur

Neben diesen einfachen Maßnahmen zur Optimierung der Werkzeugkühlung lassen sich weitere, weniger offensichtliche Potenziale ausschöpfen. Das Einhalten der minimalen Kühlzeit ist in der Dünnwandtechnik ein Muss. Im Wanddicken-

bereich unter 0,5 mm verhält sich diese ein wenig anders, als man es im Allgemeinen annimmt. Die minimale Kühlzeit ergibt sich außer aus der Wanddicke und den Materialeigenschaften, wie effektive Temperaturleitfähigkeit und maximal zulässige Entformungstemperatur, nur aus der Masse- bzw. Werkzeugwandtemperatur. Beide Parameter haben bei diesen geringen Wanddicken jedoch keinen nennenswerten Einfluss (**Bild 2**). Das heißt, die Kühlzeit variiert bei einer Veränderung dieser Parameter nur im Bereich von wenigen Hundertstelsekunden und beeinflusst damit die Zykluszeit nur marginal.

Für die Optimierung des Energieverbrauchs resultieren aus dieser Erkenntnis neue Möglichkeiten. Zwar erfordert eine Erhöhung der Massetemperatur aufgrund der größeren Enthalpie-Differenz mehr Energie für das Aufheizen, gleichzeitig reduziert sich aber der für diese kleinen Wanddicken erforderliche Fülldruck (**Bild 3**). Im Endeffekt sinkt der Gesamtenergiebedarf für die Produktion der Verpackungsteile.

Möglichkeiten für den kostensenkenden Einsatz von Freiluftkühlern prüfen

Ein weiterer Ansatz zur Energieeinsparung bei der Kühlmittelversorgung ist die Erhöhung der Werkzeugwandtemperatur. Es macht einen Unterschied, ob man mit Vorlaufemperaturen von 5 oder 20 °C arbeitet. Davon hängt ab, ob die Produktion mit Kühlgeräten arbeiten muss oder Freiluftkühler einsetzen kann.

Für jeden Ort auf der Erde gibt es ein sogenanntes Kühlgrenzdiagramm. Es

zeichnet die klimatische Situation des Ortes im Zehn-Jahres-Mittel auf und gibt für die gewählte Kühlmittelvorlauftemperatur an, wie lange diese Temperatur mit einem Freiluftkühler erreicht werden kann, bzw. nach wie vielen Betriebsstunden ein Kühlgerät benötigt wird.

Das für Oberösterreich und Süddeutschland gültige Diagramm (**Bild 4**) macht deutlich, dass in diesen Breiten eine Kühlmitteltemperatur von über 20 °C zu 100 % von einem Freiluftkühler abgedeckt werden kann. Bei einer Kühlmitteltemperatur von 8 °C (blaue Linie) ist dies nur noch zu 50 % möglich und bei 5 °C – also vornehmlich im Winter – zu 25 %. Für die restliche Kühlleistung ist der Einsatz einer Kältemaschine unumgänglich. Während die Art der Rückkühlung keinen Einfluss auf die Produktion der Formteile hat, ergibt sich in Bezug auf den Energieverbrauch und die Betriebskosten ein großer Unterschied.

Sowohl die verwendete Kühlmittelmenge als auch die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf bestimmen die für die Rückkühlung benötigte Energie, und genau hier liegt der Unterschied zwischen Kältemaschine und Freiluftkühler. Zur Bewertung der energetischen Effizienz der beiden Systeme wird die sogenannte Jahresarbeitszahl (JAZ) herangezogen. Diese gibt das Verhältnis zwischen der abgegebenen und der aufgenommenen elektrischen Energie an.

Für Kältemaschinen liegt die JAZ bei ca. 3 und für Freiluftkühler bei 15. Entsprechend muss man beim Einsatz einer Kältemaschine für die Abkühlung eines Kubikmeters Wasser um 1 K mit einem Ener-

Die Autoren

Dipl.-HTL-Ing. Peter Pokorny ist Leiter der Anwendungstechnik der Engel Austria GmbH, Schwertberg/Österreich; peter.pokorny@engel.at

Dipl. Ing. Florian Raschke war bis März 2015 Mitarbeiter der Prozesstechnologie bei Engel in Schwertberg/Österreich.

Service

Literatur & Digitalversion

- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/1034772

English Version

- Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com

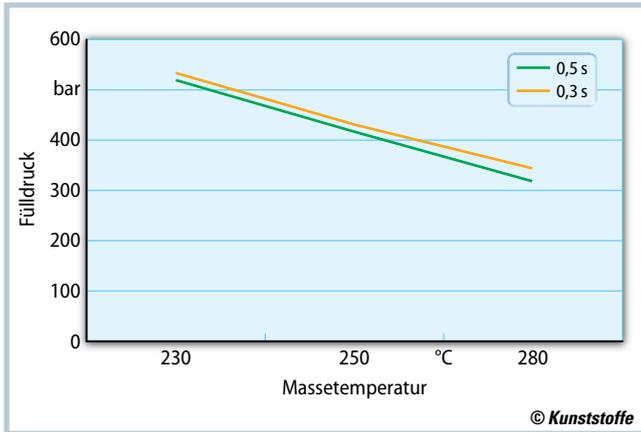


Bild 3. Mit zunehmender Massetemperatur reduziert sich der benötigte Fülldruck. Dies eröffnet weitere Möglichkeiten, die Gesamtenergiebilanz zu verbessern. Das Diagramm zeigt zwei unterschiedliche Füllzeiten (Bild: Engel)

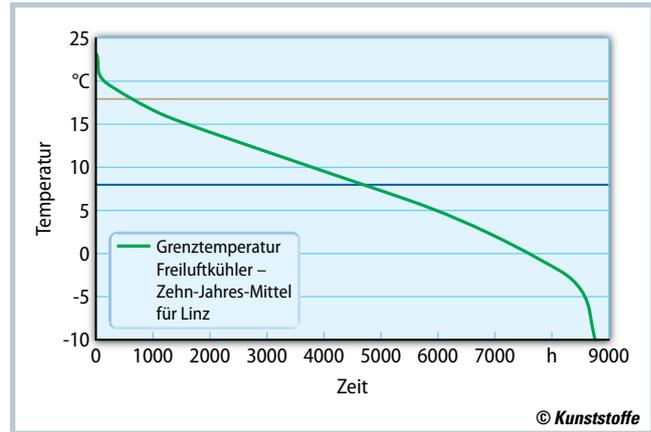


Bild 4. Für jeden Ort auf der Erde lässt sich ein typisches Kühlgrenzdiagramm erstellen. Die Grafik hier zeigt die Werte für Linz in Oberösterreich, die so in etwa auch für Süddeutschland gültig sind (Bild: Engel, Quelle: ZAMG)

giebedarf von 0,40 kWh rechnen, während beim Einsatz eines Freiluftkühlers für die gleiche Aufgabe 0,08 kWh ausreichen. Sofern man für die gegebene Anwendung die Vorlauftemperatur erhöhen kann, stellt die Freiluftkühlung eine sehr wirkungsvolle Maßnahme zur Energieeinsparung dar [4].

Praxisbeispiel Becherproduktion

Das folgende Beispiel verdeutlicht den Unterschied zwischen dem Einsatz einer Kältemaschine sowie dem eines Freiluftkühlers und damit das Potenzial, das Letzterem zur Optimierung des Energieverbrauchs und der Kosten bei der Werkzeugkühlung innewohnt. In einem 4-fach-Werkzeug werden mit einer Zykluszeit von 5 s und einem Schussgewicht von 65 g Becher aus Polypropylen gespritzt. Mit einer Massetemperatur von 230 °C ($H = 680 \text{ kJ/kg}$) und einer Entformungstemperatur von 60 °C ($H = 100 \text{ kJ/kg}$) ergibt sich eine Enthalpie-Differenz ΔH von 580 kJ/kg.

Da der Wärmeaustausch des Werkzeugs mit der Umgebung vernachlässigt werden kann, ergibt sich für die durch das Kühlmedium abzuführende Wärmemenge Q_{TM} ein Wert von 7,54 kW:

$$Q_{TM} = (m \cdot \Delta H) \cdot 3600 / t_z = (0,065 \cdot 580 \cdot 3600 / 5) = 27144 \text{ kJ/h} = 7,54 \text{ kW} \quad (2)$$

m = Massedurchsatz [kg/h]
 t_z = Zykluszeit [s]

Die Leistungsabgabe des Heißkanals ins Kühlwasser (Q_{HK}) wird mit einem Wert von 5 kW angenommen. Daraus resultiert eine abzuführende Gesamtleistung ($Q_{TM} + Q_{HK}$) von 12,54 kW.

Für die Leistungsaufnahme der beiden Systeme für die Rückkühlung ergeben sich somit die folgenden Werte:

- Freiluftkühler (Gesamtleistung/JAZ): 0,84 kW,
- Kältemaschine (Gesamtleistung/JAZ): 4,18 kW.

Es resultiert ein großer Unterschied im Energieverbrauch zwischen dem Einsatz

eines Freiluftkühlers und dem Einsatz einer Kältemaschine. Der Freiluftkühler führt zu einer deutlich besseren Energiebilanz.

Fazit

Im Bereich des Dünnwandspritzgießens und hier speziell in der Verpackungsindustrie bestehen große Einsparpotenziale sowohl hinsichtlich des Wasserverbrauchs als auch des Energiebedarfs. Durch korrekt dimensionierte Kühlkanäle wird nicht nur die Effizienz der Werkzeugkühlung verbessert, sondern auch der Wasserverbrauch reduziert. Da hier auch sehr tiefe Kühlmitteltemperaturen die Kühlzeit nicht signifikant verkürzen, empfiehlt es sich, den Einsatz von Kältemaschinen anhand der jeweiligen örtlichen Gegebenheiten auf den Prüfstand zu stellen. Möglicherweise lassen sich mit dem Einsatz eines Freiluftkühlers für die Kühlmittelrückkühlung signifikante Einsparungen erzielen. ■