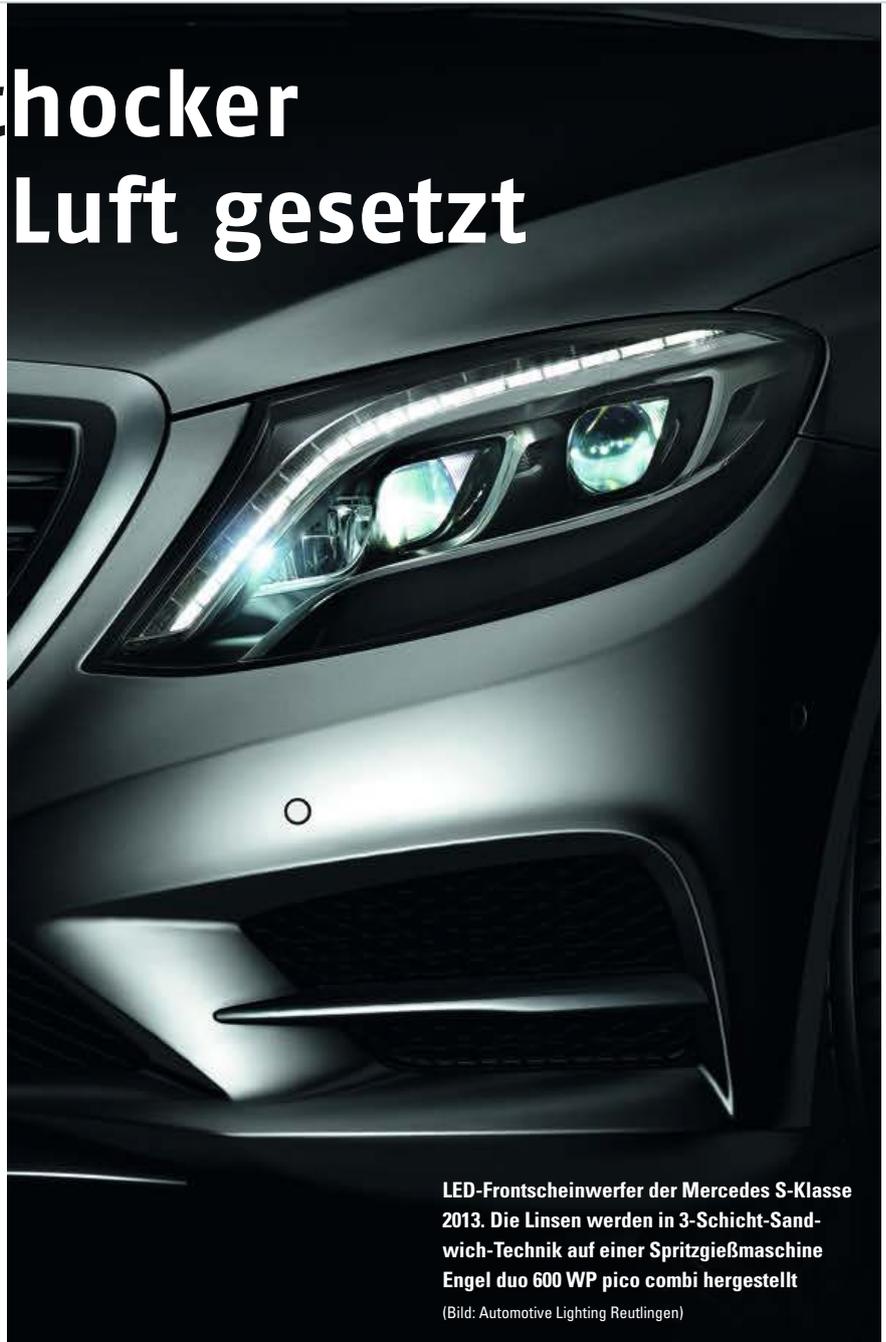


# Dicke Nesthocker an die Luft gesetzt

## Dickwandige Linsen.

Bei der Fertigung anspruchsvoller optischer Kunststoffteile wie LED-Linsen für Automobil-Frontscheinwerfer mit Toleranzen im Mikrometerbereich stellt das Spritzgießen erneut seine Anpassungsfähigkeit unter Beweis. Eine Weiterentwicklung der Mehrschichttechnik erlaubt es, die Produktivität bei der Herstellung dickwandiger Linsen noch einmal deutlich zu steigern.



LED-Frontscheinwerfer der Mercedes S-Klasse 2013. Die Linsen werden in 3-Schicht-Sandwich-Technik auf einer Spritzgießmaschine Engel duo 600 WP pico combi hergestellt

(Bild: Automotive Lighting Reutlingen)

**CHRISTIAN MAIER  
JOSEF GIESSAUF  
GEORG STEINBICHLER**

Die Märkte für Kunststoffoptiken zeigen regional große Unterschiede. Während in Asien abbildende optische Bauteile für mobile Endgeräte dominieren, werden in Europa vor allem dickere Linsen für LED-Beleuchtungen hergestellt. Da die Kühlzeit beim Spritzgießen mit dem Quadrat der Wanddicke zunimmt, besteht die größte Herausforderung darin, wirtschaftliche Prozesse zu

**ARTIKEL ALS PDF** unter [www.kunststoffe.de](http://www.kunststoffe.de)  
Dokumenten-Nummer KU111447

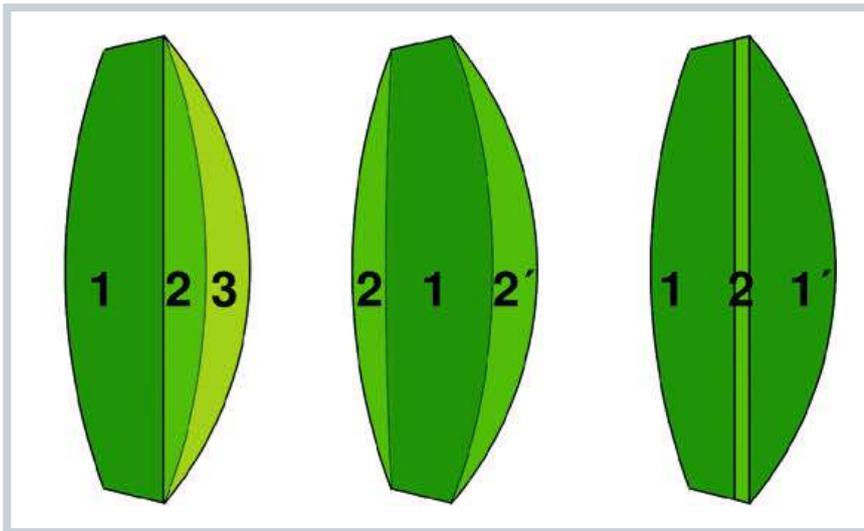
entwickeln. Bei einer für Automobil-Frontscheinwerferlinsen typischen Dicke von 30 mm sind mit herkömmlichen Spritzgießverfahren Zykluszeiten von mindestens 20 min zu erwarten [1].

Eine Möglichkeit zur Zykluszeitreduktion bietet die Mehrschichttechnik, bei der dickwandige Bauteile aus mehreren aufeinander folgenden Schichten gefertigt werden. Der mehrschichtige Aufbau kann entweder durch einseitiges oder beidseitiges Überspritzen einer ersten Schicht erzeugt werden oder durch nachträgliches Verbinden zweier zuvor unabhängig voneinander hergestellter Schichten mit einer Zwischenschicht (Bild 1).

In der Regel werden die einzelnen Schichten allesamt auf derselben Spritzgießmaschine gefertigt. Der Einsatz separater Spritzaggregate für die drei Schichten ist bereits ein erster Schritt in Richtung kurze Zykluszeiten. Damit wird gewährleistet, dass die Prozessschritte Einspritzen, Nachdrücken und Dosieren gleichzeitig und unabhängig voneinander erfolgen.

## Was bringt die Mehrschichttechnik?

Aus theoretischen Überlegungen lassen sich Näherungsformeln für die Kühlzeit und die Produktivität ableiten (siehe **Kasten S. 152**) und die Ergebnisse in Abhängig-



**Bild 1. Mögliche Schichtfolgen am Beispiel einer aus drei Schichten aufgebauten dickwandigen Linse. Links: Vorspritzling 1 nacheinander einseitig überspritzt mit den Schichten 2 und 3; Mitte: Vorspritzling 1 gleichzeitig beidseitig überspritzt mit den Schichten 2 und 2' (Sandwich-Variante); rechts: Vorspritzlinge 1 und 1' verbunden durch Einspritzen einer Zwischenschicht 2 (Bild: Engel)**

spritzlings beim Überspritzen ausgeglichen werden. Somit ist nur die Schwindung der dünneren Außenschichten für die Konturtreue verantwortlich. Dieser Effekt ist beim einseitigen Überspritzen ebenfalls vorhanden, naturgemäß aber nur auf einer Seite. Die Qualität der anderen Oberfläche muss deshalb sofort den Anforderungen entsprechen, da sie keine korrigierende Deckschicht erhält.

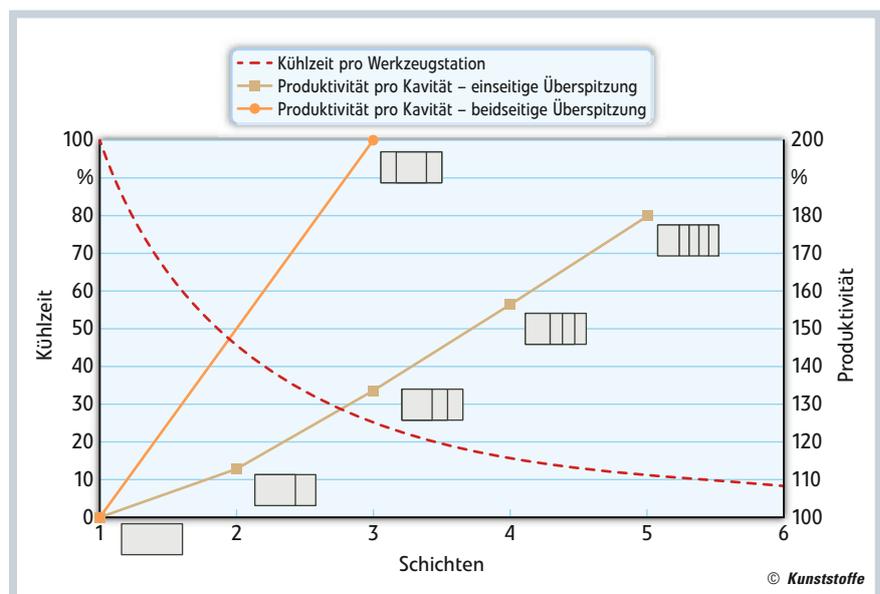
Wo Licht ist, ist auch Schatten: Bei allen Vorteilen der Sandwich-Variante darf nicht übersehen werden, dass sie eine komplexere Werkzeugtechnik beansprucht. Das Halten der Vorspritzlinge in der Kavität und das Transportieren von einer Kavität zur anderen sind mit großem Aufwand verbunden, während beim einseitigen Überspritzen ein Drehtisch genügt. Das gleichzeitige Füllen der Außenschichten will gut balanciert sein – Druckunterschiede zwischen den Deck-

keit der Schichtenanzahl darstellen (Bild 2). Bei der Literaturrecherche [1–3] zeigt sich jedoch, dass diese Faustformeln zur Abschätzung der Kühlzeitersparnis zu optimistische Ergebnisse liefern.

Die Mehrschichttechnik bietet allerdings die Möglichkeit, die Werkzeugbereiche für jene Oberflächen, die später noch einmal überspritzt werden, kälter zu temperieren, denn die Oberflächenqualität von innen liegenden Schichten beeinflusst im Idealfall nicht die Qualität der fertigen Linse. Nutzt man dieses Potenzial für die Herstellung des Vorspritzlings aus, so stimmt die Abschätzung der Kühlzeitersparnis recht gut mit Ergebnissen aus Simulation und Praxis überein. Zur Optimierung der Schichtdickenaufteilung empfiehlt es sich, Simulationsrechnungen durchzuführen.

Aus Bild 2 lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Für die Kühlzeit pro Kavität ist es unerheblich, ob einseitig oder beidseitig überspritzt wird. Sie sinkt mit zunehmender Schichtenanzahl im selben Maße.
- Das einseitige Überspritzen verlangt gegenüber der beidseitigen Variante eine höhere Kavitätenzahl und damit auch mehr Platz im Werkzeug.
- Eine geeignete Kennzahl für einen Wirtschaftlichkeitsvergleich stellt die Produktivität dar, weil sie die Annahme gleicher Kavitätenzahlen beinhaltet.
- Erst bei einer Vielzahl von Schichten erhöht das einseitige Überspritzen die Produktivität in nennenswertem Um-



**Bild 2. Kühlzeit pro Station im Werkzeug in Abhängigkeit der Schichtenanzahl nach Gleichung 4, sowie Produktivität gemäß den Gleichungen 6 und 7 (siehe Kasten auf Seite 152). Als Vergleichsbasis (100%) für die abgebildeten Ergebnisse zum einseitigen und beidseitigen Überspritzen dient jeweils das einschichtige Bauteil (Bild: Engel)**

fang. Allerdings leidet die tatsächlich erzielbare Produktivität durch den hier nicht berücksichtigten Einfluss der Zeiten für Öffnen, Schließen, Umsetzen/Drehen und Einspritzen.

- Hingegen erhöht das beidseitige Überspritzen die Produktivität schon bei einem Dreischicht-Aufbau deutlich. Die Sandwich-Variante ist demzufolge gegenüber der einseitigen Überspritzung im Vorteil. Diese Variante verbessert außerdem die Konturtreue, da schwindungsbedingte Einfallstellen des Vor-

schichten können zum Bruch des Vorspritzlings führen.

Beide Varianten können weitere Pluspunkte anführen. Kaltkanal-Angüsse oder dünnwandige Außenbereiche limitieren die maximal mögliche Nachdruckdauer. Bei sehr dickwandigen Teilen kann den Einfallstellen somit nur noch mit steigender Nachdruckhöhe entgegengewirkt werden. Dafür sind wiederum Maschinen mit höheren Schließkräften erforderlich. Extreme Wanddickenverhältnisse können unter Umständen erst durch die Mehr-

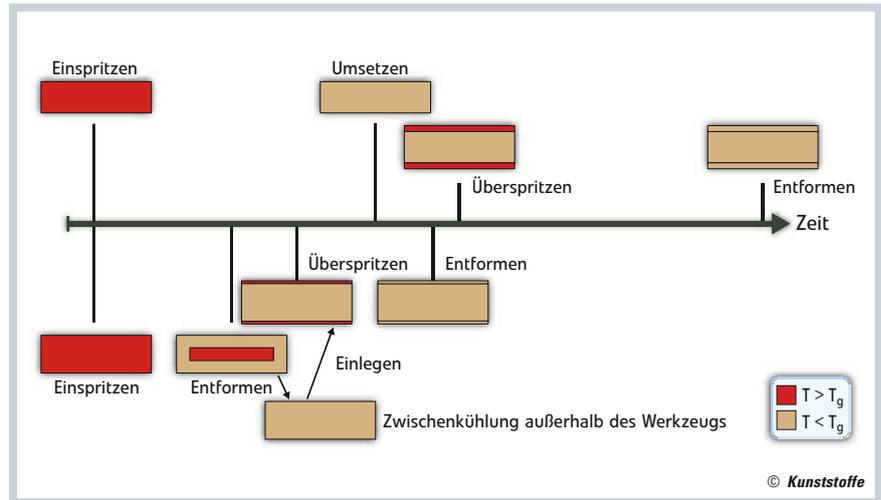
schichttechnik realisiert werden. Die Designfreiheit wird dadurch größer.

Mit der Zykluszeit sinkt auch die Verweilzeit des Materials im Massezylinder und Heißkanal. Die Folge sind geringere Gelbfärbung und damit höhere Transmission. Die von den Materialherstellern empfohlenen maximalen Verweilzeiten können eingehalten werden. Das **Titelbild** zeigt eine Serienanwendung des 3-Schicht-Sandwich-Verfahrens, die Herstellung von LED-Frontscheinwerferlinsen bei der Automotive Lighting Reutlingen GmbH.

### Kürzere Zykluszeit dank längerer Kühlzeit

Untersuchungen haben gezeigt, wie die Mehrschichttechnik die Wirtschaftlichkeit bei der Herstellung dickwandiger Bauteile erhöhen kann. Man macht sich dabei die Tatsache zu Nutze, dass mehrere dünne Schichten in Summe schneller abkühlen als eine dicke Schicht. So kann die Produktivität annähernd um den Faktor 2 gesteigert werden. Die resultierenden Kühlzeiten von mehreren Minuten sind jedoch für die Spritzgießverarbeitung noch immer vergleichsweise lang.

Überlegungen zur Schichtenaufteilung gingen generell davon aus, dass bei einem 3-Schicht-Sandwichaufbau sowohl der Vorspritzling als auch die Deckschichten am Ende der Kühlzeit unter die Glasübergangstemperatur abgekühlt sein müssen. Versuche haben nun jedoch gezeigt, dass der Vorspritzling schon zu einem wesentlich früheren Zeitpunkt entnommen wer-



**Bild 3. Zeitliche Abfolge der Prozessschritte bei der konventionellen 3-Schicht-Sandwichtechnik (oben) und bei der Variante mit externer Zwischenkühlung (unten). Die Darstellung zeigt schematisch, wie sich aus der unterschiedlichen Temperatur bei der Entformung des Vorspritzlings ( $T_g$ : Glasübergangstemperatur) und der unterschiedlichen Schichtenaufteilung die Gesamtzykluszeit deutlich verkürzt (Bild: Engel)**

den kann. Es muss lediglich gewährleistet sein, dass seine eingefrorenen Randschichten ausreichend stark ausgeprägt sind, um dem inneren Druck standzuhalten und eine Deformation während der Entnahme zu verhindern. Würde man den Vorspritzling sofort in der nächsten Station überspritzen, wäre damit kein Zykluszeitgewinn zu erzielen, im Gegenteil: Die noch heißen Bereiche im Inneren wären nun noch weiter von der Werkzeugwand entfernt und die Kühlzeit würde verlängert.

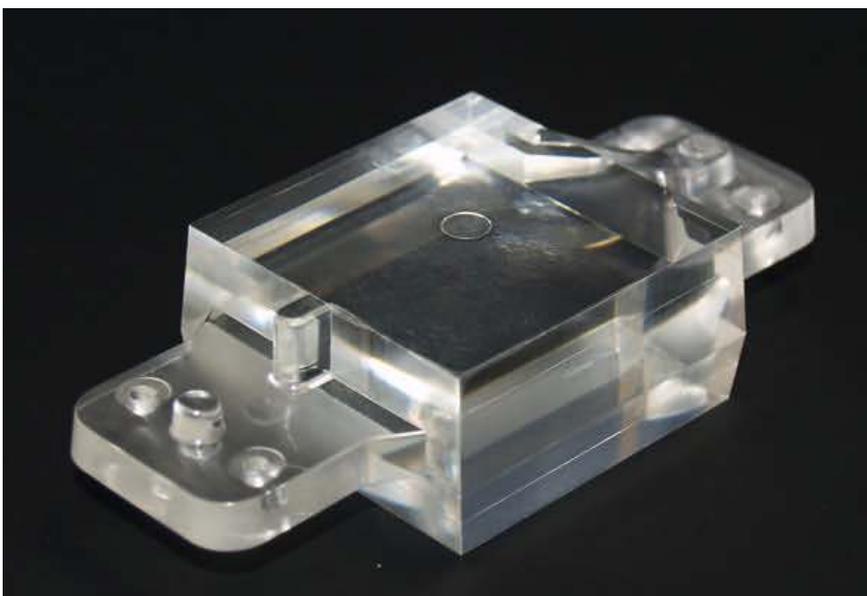
Ein neues Verfahren sieht daher eine Kühltappe zwischen den Spritzvorgän-

gen außerhalb des Werkzeugs vor. Das Abkühlen an der Luft dauert zwar länger als im Werkzeug, beeinflusst aber nicht die Zykluszeit. Je nach Dauer der externen Kühlung kann der Vorspritzling beim Überspritzen eine geringere mittlere Temperatur haben als ein Vorspritzling bei der herkömmlichen Sandwich-Technik. Als Folge entzieht der Vorspritzling den Deckschichten mehr Wärme und reduziert damit zusätzlich die Kühlzeit. Dieser Effekt lässt sich noch verstärken, indem der Vorspritzling dicker und die Deckschichten dünner ausgeführt werden.

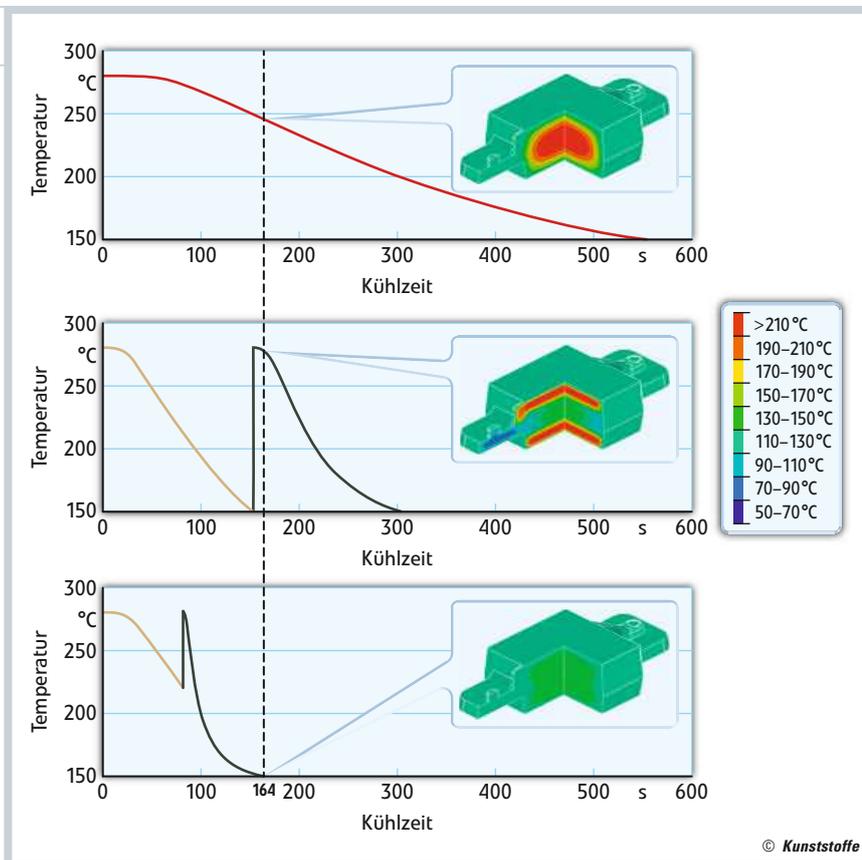
### Verfahrensablauf mit externer Kühlung

Der neue Verfahrensablauf gestaltet sich wie folgt: Ein für einige Zyklen extern auf eine definierte Temperatur abgekühlter Vorspritzling wird wieder in das Werkzeug eingelegt und überspritzt. Dabei wird – je nach Anzahl der Spritzaggregate – gleichzeitig oder danach ein neuer Vorspritzling gefertigt. Nach dem Öffnen des Werkzeugs werden ein fertiges Bauteil sowie ein Vorspritzling entnommen und wieder ein zuvor zwischengekühlter Vorspritzling eingelegt. Der entnommene Vorspritzling wird in einer Kühlstation abgelegt (**Bild 3**).

Um die Zykluszeitersparnis durch die Kühlung außerhalb des Werkzeugs beziffern zu können, hat die Bayer Material Science AG, Leverkusen, für ein 20 mm dickes, quaderförmiges Bauteil aus Polycarbonat (PC) thermische Simulationen durchgeführt (**Bild 4**). Dabei verglichen die



**Bild 4. Für den Vergleich wurde ein quaderförmiges Polycarbonat-Bauteil (40 x 38 x 20 mm) herangezogen (Bild: Bayer MaterialScience)**



**Bild 5. Simulierter zeitlicher Verlauf des Temperaturmaximums im Bauteil für ein Einschichtverfahren (oben), ein 3-Schicht-Sandwich-Verfahren (Mitte) und das neue 3-Schicht-Sandwich-Verfahren mit externer Zwischenkühlung (Massetemperatur: 280 °C, Werkzeugtemperatur Außenschichten und Einschichtvariante: 120 °C, Werkzeugtemperatur Innenschichten: 70 °C). Die Grafiken beinhalten auch die Temperaturverteilung im Bauteilinneren nach 164 s** (Bild: Bayer MaterialScience)

Spezialisten ein 1-Schicht-Verfahren, ein 3-Schicht-Sandwich-Verfahren und ein 3-Schicht-Sandwich-Verfahren mit externer Zwischenkühlung miteinander. Die Schichtdickenverteilung wurde jeweils an das Verfahren angepasst. So benötigen die 4 mm dicken Deckschichten beim 3-Schicht-Sandwich-Verfahren die gleiche Kühlzeit wie der Vorspritzling mit 12 mm Dicke. Bei der Variante mit externer Zwischenkühlung wurde eine Dicke von 12,8 mm für den Vorspritzling angenommen, jene der Deckschichten betrug 3,6 mm. **Bild 5** zeigt den zeitlichen Verlauf der höchsten im Bauteil auftretenden Temperatur. Während bei der Einschicht-Variante die höchste Temperatur immer im Kern des Bauteils anzu-treffen ist, ändert sich der Ort des Maxi-mums bei den beiden Mehrschicht-Ver-fahren.

Das Kriterium für die Berechnung der Kühlzeit des fertigen Teils lautet: Alle Be-reiche des Bauteils müssen bis unter die Glasübergangstemperatur von 150 °C ab-gekühlt sein. Bei der Variante mit exter-ner Zwischenkühlung wird der Vorspritz-ling schon zu einem Zeitpunkt entnom-men, an dem eine 2,4 mm dicke eingefro-rene Randschicht ausgebildet ist, die



**! Zykluszeit und Produktivität – Überlegungen zum Schichtenaufbau**

Welche Schichtfolge ist am sinnvollsten, wie viele Schichten sind erforderlich und welches Einsparpotenzial ist zu erwarten? Diese Fragen lassen sich anhand einfacher Überlegungen beantworten, die für das einseitige und beidseitige Überspritzen, nicht jedoch für das Verbinden zweier Vorspritzlinge (**Bild 1**), gelten. Da die Wärmeabfuhr aus der Verbindungsschicht komplexeren Gesetzmäßigkeiten folgt, wird auf die Betrachtung dieser Variante verzichtet.

Zunächst werden zwei Annahmen getroffen: Erstens kommen bekannte Werkzeugkonzepte (Indexplatte, Drehtisch, Schiebetisch) zur Anwendung. Im Idealfall wird gleichzeitig mit dem Überspritzen eines Vorspritzlings ein weiterer Vorspritzling hergestellt. Daraus folgt die aus dem Mehrkomponenten-Spritzgießen bekannte Forderung, dass die Kühlzeiten aller Schichten gleich sein müssen.

Zweitens ist zu beachten, dass nur die zuerst hergestellte Schicht an beiden Seiten gekühlt wird (**Schicht 1 in Bild 1**). Die nachfolgenden Schichten haben nur an einer Seite Kontakt zur Werkzeugwand, während an die andere Seite der Vorspritzling grenzt, der für eine vereinfachte Betrachtung als idealer Isolator angesehen wird. Um nun in allen Stationen dieselbe Kühlzeit zu erzielen, dürfen die folgenden einseitig gekühlten Schichten nur noch halb so dick sein wie die erste beidseitig gekühlte Schicht.

Aus der Annahme, dass die erste Schicht eines aus n Schichten hergestellten Bauteils doppelt so dick ist wie alle folgenden, können die Schichtdicken  $s_e$  der ersten Schicht und  $s_f$  der folgenden Schichten wie folgt angegeben werden, wobei  $s_{ges}$  die Gesamtdicke des Bauteils beschreibt:

$$s_e(n) = \frac{2}{n+1} \cdot s_{ges} \quad (1)$$

$$s_f(n) = \frac{1}{n+1} \cdot s_{ges} \quad (2)$$

Die Kühlzeit verhält sich proportional zum Quadrat der Wanddicke. Für die Kühlzeit  $t_g(n)$  der beidseitig gekühlten ersten Schicht, die der Kühlzeit  $t_f(n)$  aller weiteren einseitig gekühlten Schichten entspricht, gilt:

$$t(n) := t_e(n) = t_f(n) \propto \left(\frac{2}{n+1}\right)^2 \cdot s_{ges}^2 \quad (3)$$

Beim einseitigen Überspritzen sind n Stationen im Werkzeug erforderlich, also so viele Stationen wie Schichten. Bei der Sandwich-Variante, bei der ähnlich wie in einem Etagenwerkzeug zwei hintereinander liegende Schichten gleichzeitig hergestellt werden, sind nur (n+1)/2 Stationen erforderlich, wobei die Anzahl der Schichten n in diesem Fall ungerade sein muss.

Das beidseitige Überspritzen liefert gegenüber dem einseitigen zunächst keine Kühlzeiterparnis, aber den „Etagen-Vorteil“, d. h. eine Ersparnis an Spannfläche und Schließkraft. Die relative Kühlzeit pro Werkzeugstation, also die Kühlzeit im Vergleich zu der eines einschichtigen Bauteils, beträgt:

$$\frac{t(n)}{t(1)} = \left(\frac{2}{n+1}\right)^2 \quad (4)$$

Die Teileanzahl T(n) pro Zeit entspricht dem Kehrwert aus der Zeit pro Teil, also dem Kehrwert der Zykluszeit. Anstelle der Zykluszeit wird hier die Kühlzeit verwendet, was für sehr dick-

wandige Teile in erster Näherung zulässig ist. Somit erhält man aus dem Kehrwert der Gleichung 4 die relative Teileanzahl:

$$\frac{T(n)}{T(1)} = \frac{t(1)}{t(n)} = \left(\frac{n+1}{2}\right)^2 \quad (5)$$

Kühlzeit oder Teileanzahl allein sind jedoch nur bedingt geeignete Werte für einen Wirtschaftlichkeitsvergleich. Diese Werte berücksichtigen nämlich nicht, dass die Mehrschichtverfahren eine höhere Kavitätanzahl erfordern. Von höheren Kavitätanzahlen darf man aber ohnehin eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit erwarten. Hätte man beim Einschichtverfahren beispielsweise die doppelte Kavitätanzahl zur Verfügung, würde sich die Anzahl der Teile pro Zeiteinheit ebenfalls verdoppeln.

Daher wird zur weiteren Beurteilung die Produktivität herangezogen. Sie ist definiert als das Verhältnis zwischen produzierten Teilen und den dafür notwendigen Produktionsfaktoren, das sind hier die Kavitäten. Um die relative Produktivität der Mehrschichttechnik gegenüber dem Einschichtverfahren zu erhalten, muss nur noch die Gleichung 5 durch die Anzahl der Kavitäten dividiert werden – also durch n bei einseitiger und durch (n+1)/2 bei beidseitiger Überspritzung:

$$\frac{P(n)}{P(1)} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{n+1}{2}\right)^2 \quad (6)$$

für einseitiges Überspritzen

$$\frac{P(n)}{P(1)} = \frac{n+1}{2} \quad (7)$$

für beidseitiges Überspritzen

Kerntemperatur aber noch 220°C beträgt. Auf diese Weise kann das neue Verfahren die Gesamt-Kühlzeit im Werkzeug nochmals fast halbieren. Da die Anzahl der erforderlichen Kavitäten gegenüber dem bekannten Sandwich-Verfahren gleich bleibt, steigt nun die Produktivität um denselben Faktor, um den die Kühlzeit sinkt.

Die schnelle Erstarrungsgeschwindigkeit von Polycarbonat begünstigt kurze Zykluszeiten. Berechnungen für Polyme-

thylmethacrylat (PMMA) mit angepassten Masse- und Werkzeugtemperaturen ergaben eine nahezu doppelt so lange Gesamtkühlzeit von 314 s. **Bild 6** stellt die Zykluszeiten und Produktivität der drei Verfahren bei der Verarbeitung von Polycarbonat einander gegenüber.

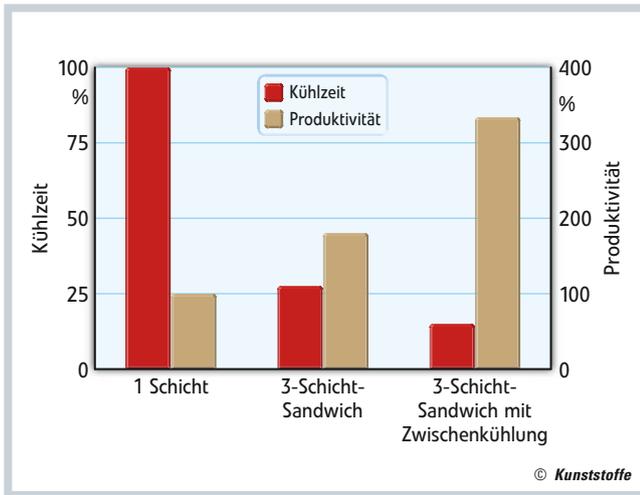
**Rekordverdächtige Zykluszeit**

Versuche und Simulationsrechnungen belegen, dass sich bei der Herstellung

dickwandiger Bauteile mit externer Zwischenkühlung die Kühlzeit im Werkzeug – je nach Geometrie des Bauteils – im Vergleich zur herkömmlichen Mehrschichttechnik um 25 bis 50 % reduzieren lässt. Auf der K 2013 wird der Spritzgießmaschinenhersteller Engel gemeinsam mit seinen Projektpartnern Bayer Material Science und der Krallmann Gruppe das Potenzial dieses Verfahren erstmals live unter Beweis stellen: Gezeigt wird die Produktion einer optischen Linse aus PC (Typ: Makrolon LED 2245) in einer rekordverdächtig kurzen Zykluszeit.

**LITERATUR**

- 1 Pillwein, G.: Maschinen- und Prozesstechnik zur Herstellung optischer Bauteile. IKV-Seminar: Spritzgießen hochwertiger optischer Komponenten, Aachen 2008



**Bild 6. Simulierte Kühlzeit pro Werkzeugstation und daraus errechnete Produktivität für unterschiedliche Herstellungsverfahren (Material: PC). Als Vergleichsbasis (100%) dient das Einschicht-Bauteil** (Bild: Engel)

DIPL.-ING. JOSEF GISSAUF, geb. 1968, leitet die Abteilung Entwicklung Prozesstechnologie bei Engel; josef.giessauf@engel.at

PROF. DR.-ING. GEORG STEINBICHLER, geb. 1955, ist Leiter Forschung und Entwicklung Technologien bei Engel und Vorstand des Instituts für Polymer-Spritzgießtechnik und Prozessautomatisierung an der Johannes Kepler Universität, Linz/Österreich; georg.steinbichler@engel.at

**SUMMARY**  
**EFFICIENT PRODUCTION OF THICK-WALLED PARTS**

INJECTION MOLDING OF THICK-WALLED LENSES. Injection molding is demonstrating its versatility again in the production of optical plastic parts such as LED lenses for automotive headlights with tolerances in the micron range. A development allows productivity for the production of thick-walled lenses to be increased even further.

Read the complete article in our magazine *Kunststoffe international* and on [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)

- Zöllner, O.: Kunststoffoptiken im Mehrschichtspritzguss. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg 2012
- Klinkenberg, C.: Clear benefits of multi-layer. Injection World, Ausgabe Oktober 2012

**DIE AUTOREN**

CHRISTIAN MAIER MSC., geb. 1983, ist Projektleiter in der Abteilung Entwicklung Prozesstechnologie der Engel Austria GmbH, Schwertberg/Österreich; christian.maier@engel.at