

# Präzision im Fokus

**Spritzgießen optischer Formteile.** Mit überdurchschnittlichen Zuwachsraten gelten die optischen Technologien als Schrittmacher für das 21. Jahrhundert. Allerdings unterscheiden sich die Herausforderungen beim Spritzgießen optischer Formteile häufig von denen konventioneller Spritzgießprozesse. Im internationalen Wettbewerb rücken innovative Prozesstechniken zunehmend in den Fokus.

Der Einstieg in die Herstellung optischer Formteile erfordert einen klaren Blick (Foto: Pillwein, Engel)

**MICHAEL STRICKER  
GEORG PILLWEIN  
JOSEF GIESSAUF**

Optische Technologien gelten als zukunftsträchtiges Feld. Die Chance für die Kunststoffbranche liegt dabei in der automatisierten Herstellung hochwertiger optischer Formteile in großer Stückzahl [1, 2]. Das Spritzgießen solcher Teile stellt meist höhere Anforderungen als ein konventioneller Spritzgießprozess, namentlich an die Konturtreue und das Eigenspannungsniveau. Zudem sind die Wanddicken nicht selten um den Faktor zehn größer als beim Spritzgießen üblich (Bild 1). Sollen optische Formteile qualitativ hochwertig und in einem wirtschaftlichen Kostenrahmen gefertigt werden, stößt das herkömmliche Spritzgießverfahren schnell an seine Grenzen. Daher werden bestehende Sonderverfahren konsequent weiterentwickelt und neue Verfahrensansätze realisiert:

- Das Spritzprägen eignet sich sehr gut zum Herstellen von Formteilen mit hoher Konturtreue und niedrigem Eigenspannungsniveau.
- Auch mit dem Mehrschicht-Spritzgießen lässt sich die Konturtreue er-

höhen. Bei dickwandigen Teilen ist zusätzlich eine Reduktion der Zykluszeit möglich [3].

- Die variotherme Werkzeugtemperierung kann nicht nur die Qualität der Abformung mikro- oder nanostrukturierter Oberflächen deutlich verbessern [4].

Tabelle 1 bietet eine Entscheidungshilfe bei der Auswahl des geeigneten Verfahrens. Die einzelnen Verfahren werden im Folgenden näher erläutert.

## Spritzprägen – bewährter Prozess, moderne Maschinenteknik

Der Spritzprägeprozess wird seit einigen Jahrzehnten erfolgreich zur Fertigung optischer Komponenten eingesetzt [5]. Bei diesem Verfahren wird die Kunststoffschmelze in eine vergrößerte Kavität eingespritzt und in der anschließenden Prägephase mit beweglichen Werkzeugelementen komprimiert.

Bei Formteilen mit großem Fließweg/Wanddicken-Verhältnis erfolgt zunächst eine Teilfüllung der stark vergrößerten Kavität. Die Kontur wird in diesem Fall erst durch die Prägebewegung ausgeformt; verringerter Fülldruck und somit niedrige Eigenspannungen sind das Resultat. Für dickwandige Formteile ist es zweckmäßig, die Kavität in der Ein-

spritzphase volumetrisch zu füllen und lediglich den Schwindungsausgleich über den Prägehub zu vollziehen. Im Vergleich zum konventionellen Spritzgießen kann auch hier die Eigenspannung reduziert und die Konturtreue erhöht werden.

Je nach Geometrie des Formteils kann die Prägebewegung auf die Gesamfläche oder nur auf Teilflächen wirken. Um eine Fließbewegung der Kunststoffschmelze in die Trennebene zu vermeiden, kommen häufig Dichtrahmen zum Einsatz, die die Kavität umlaufen. Die erforderliche Dichtkraft können Federelemente oder Hydraulikzylinder aufbringen (Bild 2). Um zu verhindern, dass die



**Bild 1. Dickwandige LED-Linse für eine OP-Leuchte, gefertigt aus PMMA** (Foto: Trumpf Medizin Systeme)

**ARTIKEL ALS PDF** unter [www.kunststoffe.de](http://www.kunststoffe.de)  
Dokumenten-Nummer KU110084

Verfahren	Spritzprägen	Variotherme Temperierung	Mehrschicht-Spritzgießen
Formteil-eigenschaften			
große Wanddicke (> 4 mm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ hohe Konturtreue durch Aufbringen des Nachdrucks über Prägebewegung; kein dicker Anguss notwendig</li> <li>⊕ reduzierte Eigenspannungen durch homogenen Nachdruck</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ Reduktion von Freistrahlmarkierungen</li> <li>⊕ Kühlzeitersparnis möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ Zykluszeitreduktion möglich</li> <li>⊕ verbesserte Konturtreue, da Schwindung durch nachfolgende Schichten ausgeglichen wird</li> <li>⊕ geringere Gefahr der Freistrahlbildung</li> <li>⊖ Spannungen in den Grenzflächen und Verzug möglich</li> </ul>
geringe Wanddicke (< 4 mm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ geringerer Fülldruck beim Einspritzen in vergrößerte Kavität</li> <li>⊕ reduzierte Eigenspannungen durch geringere Druckgradienten während der Füll- und Nachdruckphase</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ geringerer Fülldruck durch verzögertes Abkühlen der Schmelze</li> <li>⊖ Zykluszeitverlängerung zu erwarten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⚠ Vorteile kommen bei geringen Wanddicken nicht zum Tragen</li> </ul>
große Wanddickenunterschiede	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ Prägen auf Teilfläche erhöht Konturtreue</li> <li>⊖ Prägen auf Vollfläche: dünne Bereiche beschränken effektive Prägedauer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⚠ Einschränkungen bei Auswahl der Heizungsart</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ verbesserte Konturtreue, da Schwindung durch nachfolgende Schichten ausgeglichen wird</li> </ul>
hohes Fließweg/Wanddicken-Verhältnis	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ geringerer Fülldruck beim Einspritzen in vergrößerte Kavität</li> <li>⊕ reduzierte Eigenspannungen durch geringere Druckgradienten während der Füll- und Nachdruckphase</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ geringerer Fülldruck durch verzögertes Abkühlen der Schmelze</li> <li>⚠ Verzug bei einseitiger variothermer Temperierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊖ weitere Erhöhung des Fließweg/Wanddicken-Verhältnisses, dadurch erhöhter Fülldruck, höhere Eigenspannungen</li> </ul>
3D-Geometrie	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊖ Prägebewegung hat auf schräge Flächen geringere Wirkung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⚠ Einschränkungen bei Auswahl der Heizungsart</li> </ul>	
Mikrostrukturen Nanostrukturen	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ gleichmäßigere Abformung entlang des Fließwegs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ hohe Abformgenauigkeit durch verzögerte Abkühlung der Schmelze</li> </ul>	
	⊕ Vorteil	⊖ Nachteil	⚠ Einschränkung

**Tabelle 1. Entscheidungshilfe für Verarbeiter: Vor- und Nachteile ausgewählter Prozesstechniken im Vergleich zum konventionellen Spritzgießverfahren**

(Quelle: Engel)

Schmelze in Richtung Plastifiziereinheit zurückfließt, müssen Verschlussdüsen oder Schieber als Absperrmechanismen verbaut werden [6]. Diese sollten möglichst nah an der Kavität positioniert sein, um Massebewegungen und die daraus resultierenden Eigenspannungen zu minimieren.

Neben der Werkzeugtechnik stellen auch Maschine und Steuerung wesentliche Erfolgsfaktoren für die Herstellung optischer Bauteile dar. In der für die voll-elektrische Baureihe e-motion (Hersteller: Engel Austria GmbH, Schwertberg/Österreich) entwickelten Spritzpräge-Software findet sich der Einsteller aufgrund der Analogie zur Einspritz- und Nachdruckphase schnell zurecht. Die Benutzeroberfläche ist in die Schritte

- geschwindigkeitsgeregeltes Prägen,
- Umschalten,
- Werkzeuginnendruck- oder kraftgeregeltes Prägen sowie

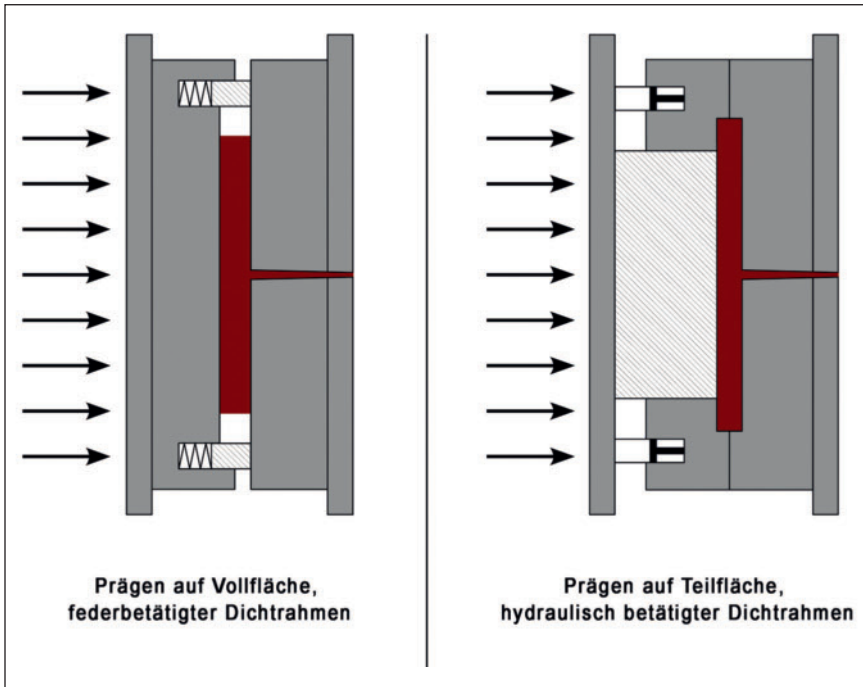
- Positionsregelung (isochore Abkühlung) gegliedert, was dem typischen Prozessverlauf entspricht (Bild 3).

In der geschwindigkeitsgeregelten Prägephase wird die Kavität volumetrisch gefüllt und die Schmelze verdichtet. Der Bediener kann den Umschaltvorgang wahlweise über die Parameter Weg, Zeit, Prägekraft oder Werkzeuginnendruck auslösen, wobei sich das Prägekraft- oder Werkzeuginnendruckprofil im Verlauf flexibel auf die Anwendung abstimmen lässt. Während das Bauteil weiter auf Entformungstemperatur abkühlt, wird das Eigenspannungsniveau maßgeblich durch den vorherrschenden Druckgradienten und das Ausmaß der Materialbewegung bestimmt. Hohe Eigenspannungen verschlechtern u.a. die optischen Eigenschaften von Linsen und können in nachfolgend aufgetragenen Beschichtungen Risse hervorrufen [7, 8].

Eine isochore Abkühlung verhindert Materialbewegungen und trägt dazu bei, die Eigenspannung herabzusetzen [9]. Der Prägespalt – und damit das Volumen der Kavität – wird dabei konstant gehalten. Dazu ist ein Wegaufnehmer am Werkzeug angebracht, der zur Positionsregelung genutzt wird.

### Die Genauigkeit elektrischer Spritzgießmaschinen

Insbesondere bei optischen Formteilen sind die Anforderungen an die Konturtreue hoch. Nicht selten sind Maßtoleranzen von unter  $\pm 20 \mu\text{m}$  gefordert. Aus diesem Grund muss eine hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit aller relevanten Maschinenbewegungen gewährleistet sein [6, 8]. Vollelektrische Spritzgießmaschinen sind für die Fertigung optischer Präzisionsteile besonders geeignet, da die Weggeber der Servomoto-



**Bild 2. Schematische Darstellung möglicher Werkzeugkonzepte, bei denen die Prägebewegung von der Schließeinheit durchgeführt wird** (Bild: Engel)

ren in Verbindung mit der Kinematik des Kniehebels eine hohe Positioniergenauigkeit ermöglichen. Im Rahmen von Reproduzierbarkeitsversuchen wurde der Prägespalt vor Beginn des Einspritzvorgangs mithilfe eines induktiven Wegaufnehmers in der Trennebene betrachtet. Bei vollelektrischen Spritzgießmaschinen der Baureihe e-motion liegt die Schwankungsbreite unterhalb von nur 5 µm.

Neben seiner Wiederholgenauigkeit zeichnet sich dieser Maschinentyp durch die hohe Dynamik der Schließeinheit aus. Diese kann beispielsweise für dünnwandige Formteile mit mikrostrukturierter Oberfläche genutzt werden, um durch einen abrupten Sprung der Prägekraft erst die Strukturen abzuformen und anschließend ein niedriges Eigenspannungsniveau zu erzielen.

**Bessere Abformung durch variotherme Temperierung**

Bei der variothermen Werkzeugtemperierung wird vor jedem Einspritzvorgang zumindest die Oberfläche der Kavität erwärmt und dann wieder gekühlt. Dadurch stellt sich im Vergleich zur konventionellen Temperierung eine höhere Kontakttemperatur zwischen Kunststoff und Werkzeugwand ein, die das Erstarren der Schmelze verzögert. Abhängig von der Geometrie und Oberfläche des Formteils können so unterschiedliche Eigenschaften verbessert werden (Tabelle 1). Zum

Erwärmen der Kavität sind neben der variothermen Fluidtemperierung mit Wasser, Dampf oder Öl weitere Verfahren wie etwa Induktion, Infrarot-Strahlung oder elektrische Widerstandsheizung bekannt [4]. Gekühlt wird im Allgemeinen mit Wasser.

Die variotherme Temperierung erlaubt eine unabhängige, für den jeweiligen Prozessschritt optimierte Temperaturvorgabe. In der Kühlphase kann die Wasservorlauftemperatur deutlich geringer gewählt werden als bei der konventionellen Temperierung. Dadurch ist bei dickwan-

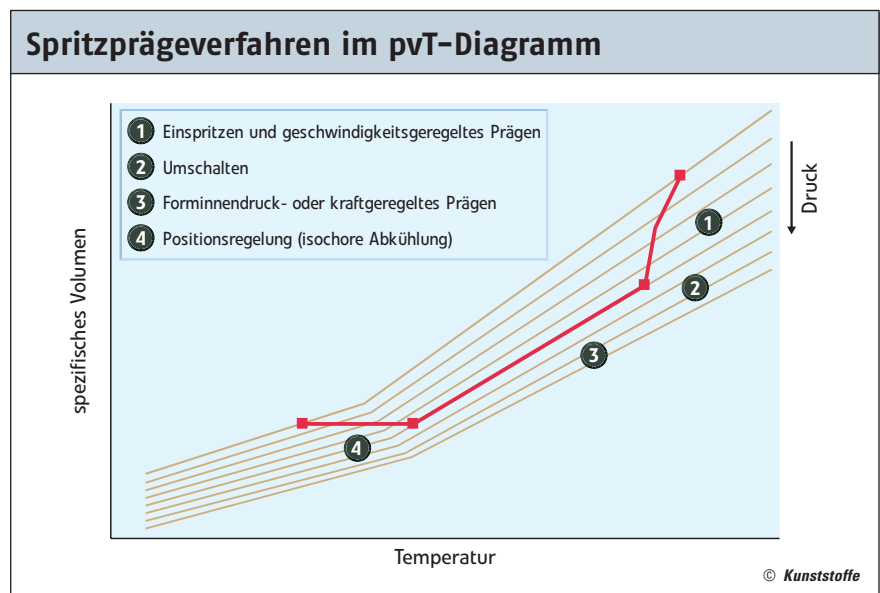
digen optischen Formteilen eine Reduktion der Kühlzeit möglich.

Bei einer Simulation der Temperaturverläufe für eine 11 mm dicke LED-Vorsatzlinse aus PMMA mit konventioneller beziehungsweise variothermer Temperierung wird im einen Fall eine konstante Vorlauftemperatur von 75°C angenommen und diese im anderen Fall zwischen 125 und 25°C variiert. Die Zykluszeitersparnis liegt in diesem Beispiel bei 15 % (Bild 4).

Die Vorteile der variothermen Temperierung liegen auf der Hand: Sie steigert die Formteilqualität und kann – unter bestimmten Voraussetzungen – die Zykluszeit verringern. Als Nachteile sind die, je nach Art der Temperierung, relativ hohen Investitionskosten und der erhöhte Energiebedarf zu nennen.

**Schichtweise Qualitätsverbesserung**

Ein im Bereich des Spritzgießens optischer Teile noch junges Verfahren, das vor allem der Qualitätsverbesserung von dickwandigen Linsen dienen kann, ist das sogenannte Mehrschicht-Spritzgießen, auch als Overmolding oder Multilayertechnik bezeichnet [3]. Dabei werden zunächst Vorspritzlinge erzeugt, die in einem oder mehreren folgenden Schritten mit demselben Material überspritzt werden. Im Allgemeinen ist dazu ein Drehtisch- oder Indexplatten-Werkzeug nötig, auch ein Umsetzverfahren ist denkbar. Der wesentliche Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass das Überspritzen Einfallstellen und andere am Vor-



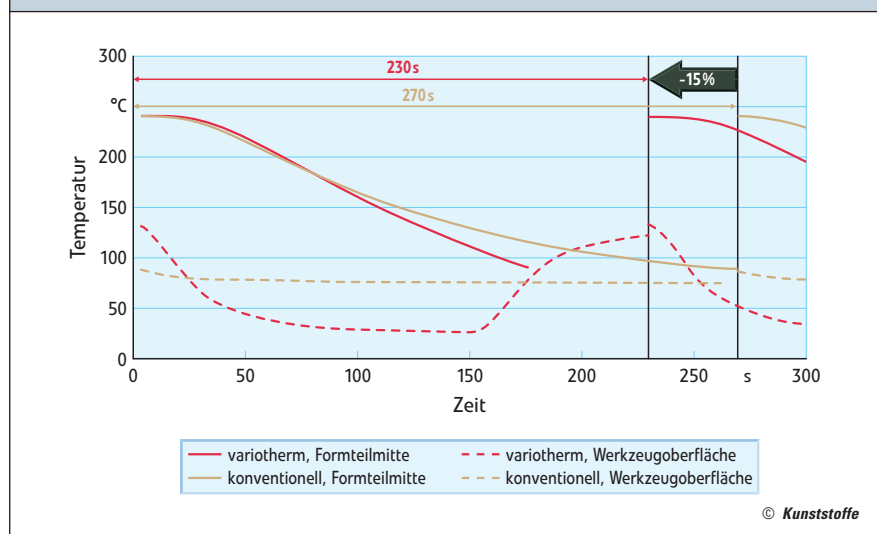
**Bild 3. Die Benutzeroberfläche der Spritzpräge-Software ist in die vier Schritte gegliedert, die dem typischen Prozessverlauf entsprechen** (Bild: Engel)

spritzling entstandene Oberflächendefekte ausgleichen kann. Beispiel dafür ist eine Linse, bei der zu Demonstrationszwecken ein offensichtlicher Oberflächendefekt erzeugt wurde (Bild 5). Diese Linse wird mit einer 2 mm dicken Kunststoffschicht überspritzt. Selbst extreme Beeinträchtigungen der Oberfläche kann dieses Verfahren also beseitigen.

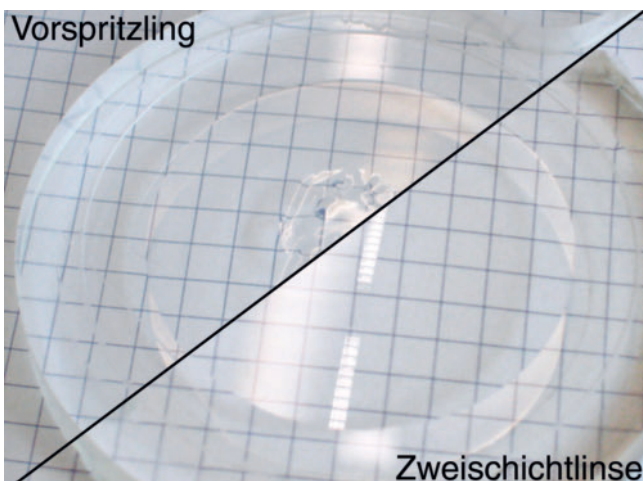
Die oft diskutierte Frage nach einer möglichen Verkürzung der Zykluszeit bei der Verwendung eines Mehrschichtverfahrens lässt sich nicht pauschal beantworten. Das Einsparungspotenzial hängt u.a. stark von der Teilegeometrie, der Schichtdickenaufteilung und den Temperierbedingungen ab.

Bei Verwendung eines Drehtisches lautet die Randbedingung, dass die Dauer der Einzelschritte möglichst gleich sein sollte. Bedenkt man, dass der Vorspritzling beidseitig am Werkzeug anliegt, die

### Variotherme Zykluszeitreduktion



**Bild 4. Berechnete Temperaturverläufe ab dem Zeitpunkt der Formfüllung mit konventioneller bzw. variothermer Temperierung für eine 11 mm dicke LED-Vorsatzlinse aus PMMA. Noch im ersten Zyklus wird bei ca. 150 s wieder mit dem Erwärmen der Kavität begonnen** (Bild: Engel)



**Bild 5. Vorspritzling mit Oberflächen-defekt vor und nach dem Überspritzen mit einer 2 mm dicken Kunststoffschicht**  
(Werkzeug: IKV Aachen)

denkbar sind: Entweder werden die drei Schichten nacheinander gespritzt, oder eine zuvor gefertigte Innenschicht wird auf beiden Seiten gleichzeitig überspritzt. In der Simulation wird davon ausgegangen, dass die innen liegenden Flächen stärker gekühlt werden (60 statt 90°C). Die verschiedenen Schichtabfolgen und Temperierverhältnisse verkürzen die Kühlzeit im Vergleich zur Einschichtlinse entsprechend (Bild 6).

Insgesamt kann das Mehrschichtverfahren also nicht nur die Oberflächenqualität wesentlich verbessern, sondern gleichzeitig auch die Kühlzeit reduzieren. Dies gilt im Besonderen, wenn die innen liegenden Schichten stärker gekühlt werden. Die mögliche Kühlzeitreduktion kann für die betrachtete Linse bis zu 35 % betragen. Zusätzliche Investitionskosten für die komplexere Anlagentechnik (Drehtisch, Indexplatte etc.) muss der Verarbeiter bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung allerdings noch mit einbeziehen.

### Vorteilhafte Verfahrenskombination

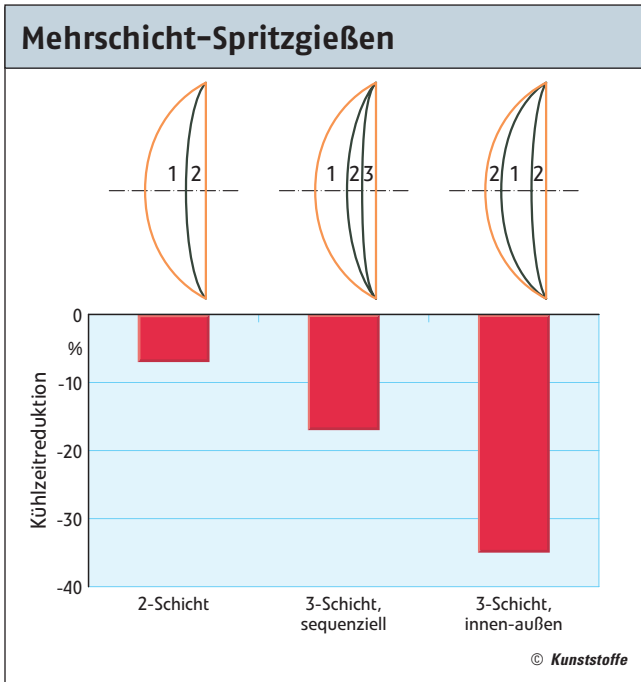
Die vielfältigen Anforderungen an ein optisches Bauteil aus Kunststoff können die Kombination mehrerer Verfahren erfordern. Eine Strukturoptik (Bild 7), die eine blendfreie Bürobeleuchtung ermöglicht, verlangt aufgrund ihres hohen Fließweg/Wanddicken-Verhältnisses einerseits den Einsatz des Spritzprägeverfahrens, andererseits kann die geforderte Winkelpräzision der Mikropyramiden nur mit einer variothermen Werkzeug-

weiteren darüber gespritzten Schichten aber im Wesentlichen nur einseitig gekühlt werden, so ergibt sich daraus, dass die folgenden Schichten etwa halb so dick sein sollten wie die erste Schicht. Im Fall zweier Schichten folgt daraus eine Dickenaufteilung 2/3 zu 1/3, bei drei Schichten 2/4 zu 1/4 zu 1/4 usw. Dies gilt streng genommen nur für eine flache Platte, kann aber für einfache Formteilgeometrien als Faustregel für die Schichtdicke verwendet werden.

Die Temperierung ist im Idealfall für die verschiedenen Stationen des Drehtisches separat ausgeführt. Es ist darauf zu achten, dass die außen liegenden, für die optische Funktion relevanten Flächen den Qualitätsanforderungen entsprechend temperiert werden. Für die innen liegenden Flächen kann die Vorlaufemperatur abgesenkt werden, um die Kühlzeit zu reduzieren.

Um praxisrelevante Aussagen über die Kühlzeit zu erhalten, ist eine thermische Simulation mit der realen Formteilgeometrie erforderlich. Für eine 30 mm dicke, plankonvexe Linse aus Polycarbonat werden Simulationen unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführt. Einander gegenübergestellt werden dabei 1-, 2- und 3-Schichtverfahren, wobei für drei Schichten wiederum zwei Varianten

<b>i</b>	<b>Hersteller</b>
<p><b>Engel Austria GmbH</b>  <b>Ludwig-Engel-Strasse 1</b>  <b>A-4311 Schwertberg</b>  <b>Österreich</b>  <b>Tel. +43 50 620-0</b>  <b>Fax +43 50 620-3009</b>  <b>www.engelglobal.com</b></p>	



**Bild 6. Simulationsergebnisse für verschiedene Schichtfolgen: Das Mehrschichtverfahren reduziert die Kühlzeit gegenüber dem Einschichtverfahren erheblich. Die Werkzeugwandtemperaturen sind farblich (schwarz: 60 °C, rot: 90 °C) markiert**

(Bild: Engel)

Linsen im „Spritz-Präge-Verfahren“ aus Polymethacrylat. *Plastverarbeiter* 18 (1967) 10, S. 707–714

- 6 Menges, G.; Michaeli, W.; Mohren, P.: *Anleitung zum Bau von Spritzgießwerkzeugen*. Carl Hanser Verlag, München, Wien 1999
- 7 Bäumer, S.: *Handbook of Plastic Optics*, Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2005
- 8 Forster, J. D.: *Vergleich der optischen Leistungsfähigkeit spritzgegossener und spritzgeprägter Kunststofflinsen*. Dissertation, RWTH Aachen, 2005
- 9 Johannaber, F.; Michaeli, W.: *Handbuch Spritzgießen*. Carl Hanser Verlag, München 2004

**DIE AUTOREN**

DIPL.-ING. MICHAEL STRICKER, geb. 1979, ist Projektleiter in der Abteilung Entwicklung Prozesstechnologie der Engel Austria GmbH, Schwertberg/Österreich; michael.stricker@engel.at

DR. GEORG PILLWEIN, geb. 1977, ist Projektleiter in der Abteilung Entwicklung Prozesstechnologie bei Engel; georg.pillwein@engel.at

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

**SUMMARY KUNSTSTOFFE INTERNATIONAL**

**Focus on Precision**

**INJECTION MOLDING OPTICAL COMPONENTS.** *With above-average growth rates, optical technologies can be considered as setting the pace for the 21st century. However, the challenges when injection molding optical parts frequently differ from those encountered when injection molding conventional parts. In the face of international competition, the focus is shifting increasingly to innovative processing techniques.*

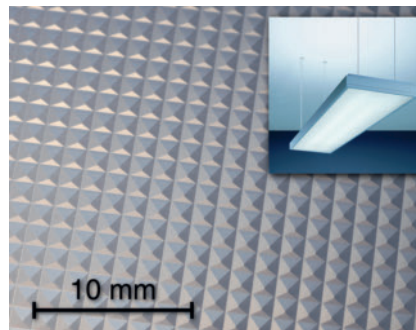
*NOTE: You can read the complete article in our magazine **Kunststoffe international** and on our website by entering the document number **PE110084** at [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)*

temperierung erreicht werden. Diese Verfahrenskombination wurde erfolgreich in die Praxis übertragen.

Das Fazit ist also positiv und sollte ein Anreiz für Spritzgießer sein: Die in diesem Beitrag angeführten Beispiele zeigen, dass bei optischen Formteilen gesteigerte Qualität und Wirtschaftlichkeit durchaus miteinander vereinbar sein können. ■

**LITERATUR**

- 1 Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Optische Technologien – Wirtschaftliche Bedeutung in Deutschland*, 2007
- 2 N.N.: *Deutsche Agenda Optische Technologien für das 21. Jahrhundert*. VDI-Technologiezentrum, Düsseldorf 2002
- 3 Pillwein, G.: *Maschinen- und Prozesstechnik zur Herstellung optischer Bauteile*. IKV-Seminar: Spritzgießen hochwertiger optischer Komponenten, Aachen 2008
- 4 Gießauf, J.; Pillwein, G.; Steinbichler, G.: Die variotherme Temperierung wird produktionsstauglich. *Kunststoffe* 98 (2008) 8, S. 87–92
- 5 Thonemann, O.E.: *Die Herstellung optischer*



**Bild 7. Strukturoptik für blendfreies Licht: Die Mikropyramiden mit einer Grundfläche von 1,5 × 1,5 mm<sup>2</sup> werden im Spritzprägeverfahren mit variothermer Werkzeugtemperierung abgeformt** (Hersteller: Zumtobel Lighting)