

Zeitschrift Kunststofftechnik

Journal of Plastics Technology

archivierte, rezensierte Internetzeitschrift des Wissenschaftlichen Arbeitskreises Kunststofftechnik (WAK)
archival, reviewed online Journal of the Scientific Alliance of Polymer Technology
www.kunststofftech.com; www.plasticseng.com

eingereicht/handed in: 14.03.2007
angenommen/accepted: 23.05.2007

**Prof. Dr.-Ing. Helmut Potente, Dipl.-Ing. Martin Schäfers,
Institut für Kunststofftechnik, Universität Paderborn**

**Dr.-Ing. Helmut Ridder,
3 Pi Consulting & Management GmbH, Paderborn**

Modellgesetze für die Gasinjektionstechnik

In diesem Artikel werden Modellgesetze zur Vorhersage des Gasblasenquerschnittes vorgestellt. Nach kurzen Ausführungen zu den Grundlagen der für die Herleitung genutzten Ähnlichkeitstheorie wird die Vorgehensweise zur Ermittlung des beschreibenden Kennzahlensatzes gezeigt. Die Modellgesetze werden durch Experimente an verschiedenen Maßstäben eines Rechteckstabes verifiziert. Mit Hilfe der Modellgesetze lassen sich Gasblasenquerschnitte sowie GIT-spezifische Verfahrensparameter neuer Formteile bestimmen.

Model Laws for Gas-Assisted Injection Moulding

In this article the authors present model laws for the prediction of the gas-bubble cross-section of molded parts produced by means of gas-assisted injection molding. After a brief introduction to the basics of the similarity theory, the derivation procedure of a set of process-describing dimensionless numbers is presented. The derived model laws are checked by means of experiments with different scales of a rod-shaped rectangular molded part. The use of the model laws allows the prediction of the gas-bubble cross-section as well as GAIM-specific process parameters (e.g. gas pressure, delay time...) of new molded parts.

Autor/author

Prof. Dr.-Ing. Helmut Potente, Dipl.-Ing. Martin Schäfers
Universität Paderborn
Fakultät Maschinenbau, Institut für Kunststofftechnik
Warburger Str. 100
33098 Paderborn

E-Mail-Adresse: martin.schaefers@ktp.upb.de
Webseite: www.ktpweb.de
Tel.: +49(0) 5251 / 60 3935
Fax: +49(0) 5251 / 60 3821

Modellgesetze für die Gasinjektionstechnik

H. Potente¹, H. Ridder², M. Schäfers¹,
Institut für Kunststofftechnik, Universität Paderborn¹
3 Pi Consulting & Management GmbH, Paderborn²

In diesem Artikel werden Modellgesetze zur Vorhersage des Gasblasenquerschnittes vorgestellt. Nach kurzen Ausführungen zu den Grundlagen der für die Herleitung genutzten Ähnlichkeitstheorie wird die Vorgehensweise zur Ermittlung des beschreibenden Kennzahlensatzes gezeigt. Die Modellgesetze werden durch Experimente an verschiedenen Maßstäben eines Rechteckstabes verifiziert. Mit Hilfe der Modellgesetze lassen sich Gasblasenquerschnitte sowie GIT-spezifische Verfahrensparameter neuer Formteile bestimmen.

1 EINLEITUNG

Die Gasinjektionstechnik ist ein Sonderverfahren des Spritzgießens. Mit diesem Verfahren lassen sich Formteile mit Hohlräumen herstellen. Dazu werden sequentiell Schmelze und ein Inertgas (zumeist Stickstoff) in das Spritzgießwerkzeug injiziert, wobei das Gas die Schmelze verdrängt und einen Hohlraum erzeugt.

Da das Verfahren bereits etabliert und in der Literatur ausführlich beschrieben ist, soll hier nicht näher auf Verfahrensdetails eingegangen werden.

Weitere Informationen sind zum Beispiel in folgenden Büchern zu finden [1,2,3,4].

Der Querschnitt der Gasblase wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die später noch genauer beleuchtet werden. Die Vorhersage der Größe der Gasblase – vor allem der sich einstellende Querschnitt – stellt nach wie vor ein Problem dar.

Die Kenntnis des Querschnitts in einem frühen Auslegungsstadium ist nicht nur aus technologischer Sicht (z. B. Festigkeit, Steifigkeit) interessant, sondern auch vor dem wirtschaftlichen Hintergrund (Kostenkalkulation).

Dieser Artikel soll eine Möglichkeit zur Vorhersage des Gasblasenquerschnittes zeigen.

2 HERLEITUNG DES KENNZAHLENSATZES

Zur Vorhersage des Gasblasenquerschnitts soll die Ähnlichkeits- oder Modelltheorie genutzt werden. Die Ähnlichkeitstheorie und die daraus entwickelte Modellübertragung ist ein Verfahren, mit dem ein technisch-physikalischer Prozess von einem Maßstab auf einen anderen (meist größeren) umgerechnet werden kann.

Hierbei werden die Prozessabläufe der so genannten Hauptausführung (d.h. der späteren Originalgröße) durch entsprechende Vorgänge in ähnlichen Modellausführungen nachgebildet.

Anhand der Modellanlagen können Messungen durchgeführt und, wenn nötig, konstruktive Änderungen schneller und kostengünstiger vorgenommen werden [5,6,7].

Die Anwendung der Ähnlichkeitstheorie für die Auslegung des Standardspritzgießprozesses wurde bereits von Menges, Potente et al. [8,9] untersucht und zeigt, dass in einem frühen Auslegungsstadium qualitätsrelevante Parameter sehr gut vorhersagbar sind.

Die Herleitung des Kennzahlensatzes beginnt mit der systematischen Bewertung aller infrage kommenden Einflussgrößen, um die wichtigen Parameter in einer Relevanzliste zusammenzufassen.

Aus dieser Liste werden schließlich die Kennzahlen ermittelt.

2.1 Bewertung der GIT-Verfahrensparameter

Die Diskussion der GIT- Parameter und deren Auswirkungen auf den Formteilbildungsprozess werden anhand einer Literaturrecherche sowie auf Grundlage eigener durchgeführter Versuche erläutert.

Dadurch wird gewährleistet, dass alle aktuellen Ergebnisse und Erkenntnisse bei der Modellerarbeitung berücksichtigt werden.

Grundsätzlich kann eine Vielzahl von Parametern einen Einfluss auf den sich einstellenden Gasblasenquerschnitt haben. Eine Auflistung ist Bild 1 zu entnehmen.

Zur besseren Übersicht wurden die Parameter in fünf Klassen eingeteilt:

Formteil		<u>Werkzeug (Gaskanal)</u> - Form - Höhe, Breite, Länge, - Angebundene dünnwandige Formteilmereiche	<u>Polymer</u> - Viskositätsverlauf - Dichte - Kalorische Größen - Feuchteaufnahme - Füllstoffanteile
Polymereinspritzung und anschließende Stillstandsphase		<u>Wichtige Größen</u> - Vorfüllgrad (Teilfüllverfahren) - Schmelztemperatur - Werkzeugwandtemperatur - Verzögerungszeit	
Start der Gasinjektion		<u>Gasregelmodul</u> - Gasdruck - Injektorcharakteristik	<u>Gas</u> - Viskosität - Dichte - Temperatur
Gasausbreitung/ Dynamik		<u>Wichtige Größen</u> - Scherviskosität - Dehnviskosität - Gasvolumenstrom	<u>Wichtige Größen</u> - Eingefrorene Randschicht - Gasvorlaufgeschwindigkeit - Resultierende Schmelze- vorlaufgeschwindigkeit
Abkühlphase => quasi Stillstandsphase wegen der Schwindung		<u>Eingestellte Parameter</u> - Gasdruck - Gashaltezeit -	<u>Resultierende Größen</u> - Querschnittsfläche bzw. Restwanddicke - Gasblasenlänge - Gasblasenvolumen

Bild 1: Parameter des Gasinjektionstechnik-Prozesses, die einen direkten Einfluss auf die Gasblasenausbreitung haben

Für die Ähnlichkeitstheroretischen Betrachtungen werden nur die Gasführungsbereiche betrachtet. Dünnwandige Bereiche, die mit der Ausbreitung der Gasblase nicht in Zusammenhang stehen, werden analog zu Bild 2 vom Bauteil „abgetrennt“, man erhält den charakteristischen Gasführungsquerschnitt.

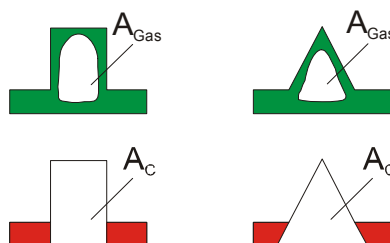


Bild 2: Definition des charakteristischen Gasführungsbereichs

Ferner werden zunächst nur rechteckige Gasführungs Kanäle betrachtet. Man kann allerdings die Kennzahlen analog zu der hier vorgestellten Vorgehenswei-

se auch für andere Geometrien definieren. Hier werden also die Größen Höhe H, Breite B sowie der Radius R in die Relevanzliste aufgenommen, Bild 3.

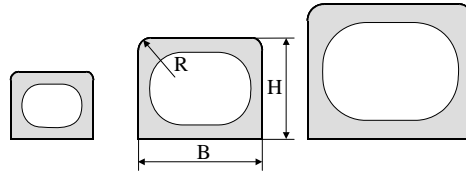


Bild 3: Schnitt durch die untersuchten Probegeometrien (schematisch)

In Tab. 1 werden alle weiteren Parameter erläutert. Eine ausführliche Diskussion aller Parameter findet sich in [10]. Parameter, die zur Herleitung der dimensionslosen Kennzahlen nicht genutzt werden, sind grau hinterlegt.

	Parameter		Erläuterung	Größe	SI-Einheit
Polymer und Formteil	Geometrie	Breite	bereits erläutert	B	m
		Höhe		H	m
		Radius		R	m
	Viskosität η	Konsistenzfaktor	direkter Einfluss auf den Gasblasenquerschnitt	K	$\text{kg}\cdot\text{s}^{n-2}\cdot\text{m}^{-1}$
		Fließindex		n	-
	Wärmeleitfähigkeit λ	zusammengefasst zur eff. Temp.-leitfähigkeit	beeinflussen die Abkühlung sowie den Viskositätsverlauf	a_{eff}	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
Dichte ρ					
spez. Wärmekap. c_p					
Polymerinjektion & Stillstandsphase	Vorfüllgrad		hat Einfluss auf die Länge, nicht aber auf den Querschnitt der Gasblase		
	Massetemperatur		Einfluss auf Viskositätsverlauf	T_M	K
	Werkzeugtemperatur		Einfluss auf die eingefrorene Randschicht und damit auf den Gasblasenquerschnitt	T_W	K
	Verzögerungszeit		Einfluss auf die eingefrorene Randschicht und damit auf den Gasblasenquerschnitt	t_v	s
Gasinjektion	Gasdruck		direkter Einfluss auf den Gasblasenquerschnitt	p_{Gas}	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$
	Injektorquerschnitt		laut Vorversuchen mit versch. Injektoren kein Einfluss vorhanden		
	Gasviskosität		kein Einfluss		
	Gastemperatur		kein Einfluss		
	Gas- und Schmelzevorlaufgeschwindigkeit		wird durch Gasdruck und Schmelzeviskosität beeinflusst		
Abkühlphase	Gashaltezeit		geringer Einfluss		

nicht in Relevanzliste

Tab. 1: Erläuterung der Einflussparameter

Alle Größen, die in der Modellübertragung berücksichtigt werden, sind in Bild 4 zusammengefasst. Aus diesen Größen werden die dimensionslosen Kenngrößen ermittelt. Zur Ermittlung der Größen wird eine Dimensionsanalyse durchgeführt. Dazu sind in Tab. 1 die SI-Basiseinheiten enthalten.

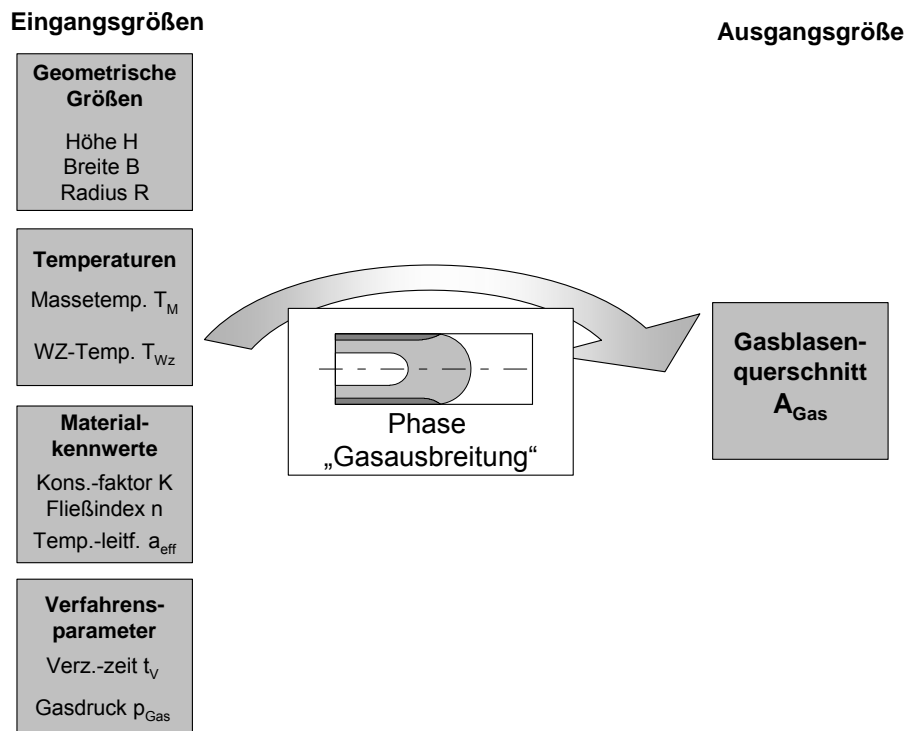


Bild 4: Zusammenfassung der prozessrelevanten Größen

2.2 Dimensionslose Kenngrößen

Nach dem π -Theorem [7] reduziert sich bei der dimensionslosen Betrachtung die Anzahl der Einflussparameter n um die Anzahl der physikalischen Grundeinheiten r auf die Anzahl der dimensionslosen π -Größen m . Es gilt also:

$$m = n - r$$

In diesem Fall (mit $n = 11$ und $r = 4$) ergeben sich sieben dimensionslose Kennzahlen, die nach Aufstellen und Umformen einer sog. Dimensionsmatrix [11] bestimmt werden können.

$$\pi_1 = \frac{H}{B}$$

$$\pi_2 = \frac{R}{B}$$

$$\pi_3 = n$$

$$\pi_4 = \frac{K}{p_{Gas} \cdot t_V^n}$$

$$\pi_5 = \frac{T_{Wz}}{T_M}$$

$$\pi_6 = \frac{A_{Gas}}{B^2}$$

$$\pi_7 = \frac{a_{eff} \cdot t_V}{B^2}$$

Die Erarbeitung dieser Kennzahlen wird in [10] ausführlich beschrieben.

2.3 Formale Herleitung der Modellgesetze

Mit diesen Kennzahlen können von einer vorhandenen Modellausführung Aussagen über eine Hauptausführung (auszulegender Gasführungskanal) getroffen werden. Der Prozess verhält sich ähnlich, wenn für die Modellausführung und für die Hauptausführung die Zahlenwerte der problemrelevanten Kennzahlen jeweils identisch („idem“) sind.

Die Kennzahlen werden zum Hochrechnen der Prozessparameter bzw. der Zielgröße verwendet.

Da die dimensionslosen Kenngrößen für die verschiedenen Ausführungen idem sein müssen, können die Prozessparameter hochgerechnet werden. Auch die Zielgröße kann so ermittelt werden. Unter der Annahme, dass die Massetemperatur für Modell- und Hauptausführung gleich sein soll ($\pi_5 = \text{idem}$), werden die Zusammenhänge wie folgt ermittelt:

$$\pi_{7,M} = \pi_{7,H} \Leftrightarrow t_{V,H} = t_{V,M} \left(\frac{B_H}{B_M} \right)^2 \quad (\text{mit } a_{eff} = \text{const.})$$

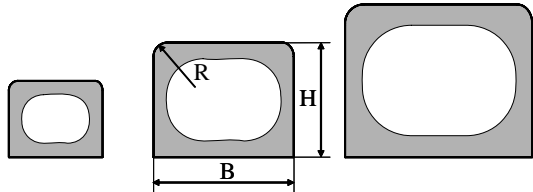
$$\pi_{4,M} = \pi_{4,H} \Leftrightarrow p_{Gas,H} = p_{Gas,M} \cdot \left(\frac{t_{V,M}}{t_{V,H}} \right)^n = p_{Gas,M} \cdot \left(\frac{B_M}{B_H} \right)^{2n} \quad \text{mit } K = \text{const.}$$

$$\pi_{6,M} = \pi_{6,H} \Leftrightarrow A_{Gas,H} = A_{Gas,M} \left(\frac{B_H}{B_M} \right)^2$$

In den Formeln bedeuten die Indizes „M“ und „H“ jeweils „Modellausführung“ bzw. Hauptausführung.

3 EXPERIMENTELLE ÜBERPRÜFUNG

Die Anwendbarkeit der Modelltheorie sowie der Zusammenhang der dimensionslosen Größen werden anhand von Experimenten gezeigt, die mit einem speziellen Versuchswerkzeug durchgeführt wurden. Mit diesem Werkzeug können 3 unterschiedliche stabförmige Formteile mit folgenden Querschnittsgrößen realisiert werden:



	Breite [mm]	Höhe [mm]	Radius [mm]	π_1 [-]	π_2 [-]
Kav. 1	10	8	1	0,8	0,1
Kav. 2	15	12	1,5	0,8	0,1
Kav. 3	20	16	2	0,8	0,1

Tab. 2: Charakteristische Größen der untersuchten Geometrien

In den folgenden Ausführungen wird die kleine Geometrie (Kav. 1) als „Modellausführung“ bezeichnet, die mittlere (Kav. 2) und die große (Kav. 3) jeweils als „Hauptausführung 1“ und „Hauptausführung 2“. Aus den Abmessungen der drei Kavitäten (Tab. 2) folgt, dass die geometriebeschreibenden Kennzahlen π_1 und π_2 für alle Versuche „idem“ sind. Alle 3 Kavitäten weisen die gleiche Länge von 215 mm auf. Eine Skizze des Werkzeuges ist in Bild 5 zu sehen, Fotos der Formteile in Bild 6.

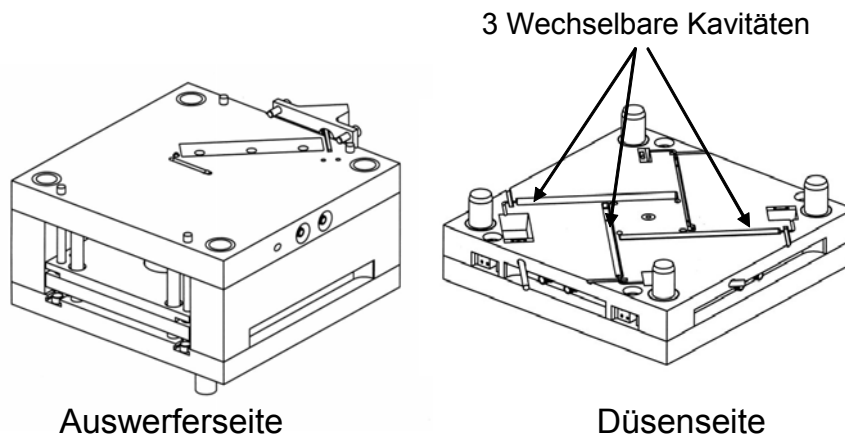


Bild 5: Skizze des Versuchswerkzeuges

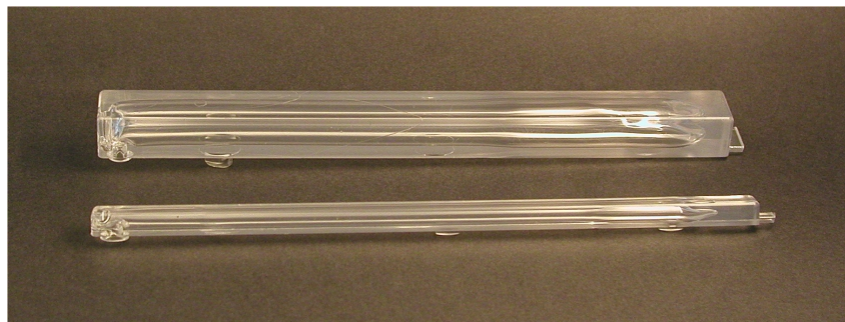


Bild 6: *Probekörper aus glasklarem Styrolux 656C*

vorne: Modellausführung

hinten: Hauptausführung 2

Zunächst wird die Anwendung der in Abschnitt 2.3 hergeleiteten Modellgesetze (Übertragungsregeln) anhand eines einzelnen Versuchspunktes verdeutlicht. Daran anschließend wird ein Versuchsplan, der für die Modellausführung aufgestellt wurde, auf die Hauptausführung 1 hochgerechnet. Die Ergebnisse aus den Versuchen an den verschiedenen Geometrieversionen werden verglichen.

3.1 Überprüfung der Modellgesetze an einem einzelnen Betriebspunkt

Von einer bekannten Modellgeometrie sollen Betriebspunkte auf eine „neue“, größere Hauptausführung hochgerechnet werden. Dazu werden die Kennzahlen π_4 , π_6 und π_7 herangezogen. Die Vorgehensweise wird exemplarisch an einem Betriebspunkt erläutert, Bild 7.

Der Gasblasenquerschnitt der Modellausführung wurde dabei mittels Versuch am vorhandenen Spritzgießwerkzeug mit dem Material Polystyrol 495F der Firma BASF, Ludwigshafen, ermittelt.

Modellgeometrie $B_M = 10 \text{ mm}$ $t_{V,M} = 1 \text{ s}$ $p_{\text{Gas},M} = 150 \text{ bar}$ $A_{\text{Gas},M} = 32,09 \text{ mm}^2$		Hauptausführung $B_H = 15 \text{ mm}$ $t_{V,H} = ?$ $p_{\text{Gas},H} = ?$ $A_{\text{Gas},H} = ?$
Einsatz der Modellgesetze		
$\frac{B_H}{B_M} = 1,5$		
$\pi_{7,M} = \pi_{7,H} \Leftrightarrow \frac{a_{\text{eff}} \cdot t_{V,M}}{B_M^2} = \frac{a_{\text{eff}} \cdot t_{V,H}}{B_H^2}$		
$\Leftrightarrow t_{V,H} = t_{V,M} \cdot \left(\frac{B_H}{B_M}\right)^2$		
$\Rightarrow t_{V,H} = 2,25 \text{ s}$		
$\pi_{4,M} = \pi_{4,H} \Leftrightarrow \frac{K}{p_{\text{Gas},M} \cdot t_{V,M}^n} = \frac{K}{p_{\text{Gas},H} \cdot t_{V,H}^n}$		
$\Leftrightarrow p_{\text{Gas},H} = p_{\text{Gas},M} \cdot \left(\frac{t_{V,M}}{t_{V,H}}\right)^n = p_{\text{Gas},M} \cdot \left(\frac{B_M}{B_H}\right)^{2n}$		
mit $n(210^\circ\text{C}) = 0,31$		
$\Rightarrow p_{\text{Gas},H} \approx 116 \text{ bar}$		
$\pi_{6,M} = \pi_{6,H} \Leftrightarrow \frac{A_{\text{Gas},M}}{B_M^2} = \frac{A_{\text{Gas},H}}{B_H^2}$		
$\Rightarrow A_{\text{Gas},H} = 2,25 \cdot A_{\text{Gas},M} = 72,2 \text{ mm}^2$		

Bild 7: Hochrechnen eines Betriebspunktes

Mit diesen hochgerechneten Versuchseinstellungen wurde ein Versuch durchgeführt. Die Gaskanalquerschnitte wurden an drei Proben der Hauptausführung 1 ermittelt, es ergaben sich Werte von 71,32 mm², 72,01 mm² und 74,3 mm². Der Mittelwert beträgt 72,54 mm². Damit beträgt die Abweichung zum hochgerechneten Gasblasenquerschnitt aus Bild 7 lediglich 0,47%.

An diesem Beispiel wird bereits die Anwendbarkeit der Ähnlichkeitstheorie auf das Problem „GIT“ verdeutlicht. Zur Überprüfung wurde neben diesem Betriebspunkt ein vollständiger Versuchsplan auf die Hauptausführung 1 hochgerechnet.

3.2 Überprüfung der Modellgesetze anhand eines Versuchsplans

Für die Versuchsreihe 1 wurde das Material Polystyrol 495F der Firma BASF ausgewählt.

Zunächst wurden für die Modellausführung jeweils drei Verzögerungszeiten und sieben Druckstufen für drei Temperaturstufen ausgewählt. Aus diesen Parametern wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan erstellt. Um die Prozessparameter auf die Hauptausführung 1 hochzurechnen, wurden die dimensionslosen Kenngrößen herangezogen.

Alle Teile des Versuchsplans wurden produziert und gemessen.

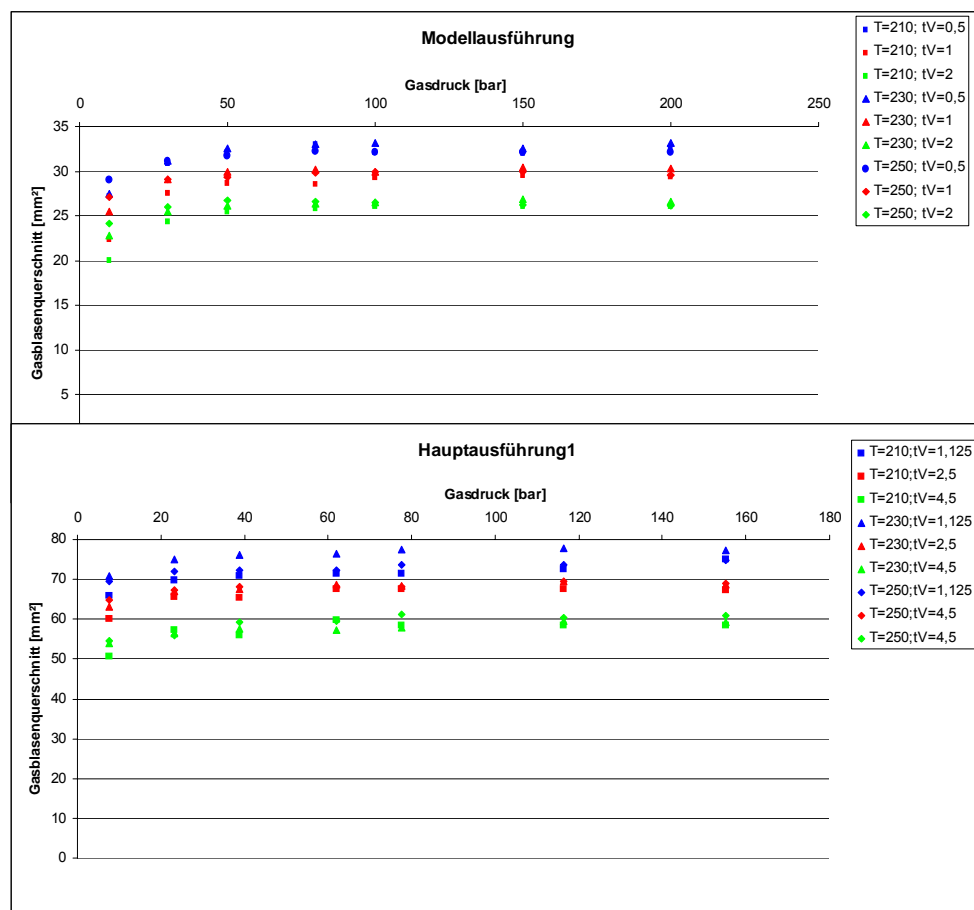


Bild 8: Erzielte Gasblasenquerschnitte der zwei untersuchten Geometrien über dem Gasdruck

Bild 8 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen. Für beide Versionen (oberes und unteres Diagramm) ist ein deutlicher Einfluss der Verzögerungszeit sowie ein leichter Temperatureinfluss sichtbar.

Die Vorhersagegenauigkeit der Modellübertragung lässt sich am Besten durch eine direkte Gegenüberstellung von berechneten und gemessenen Zielgrößen visualisieren, Bild 9.

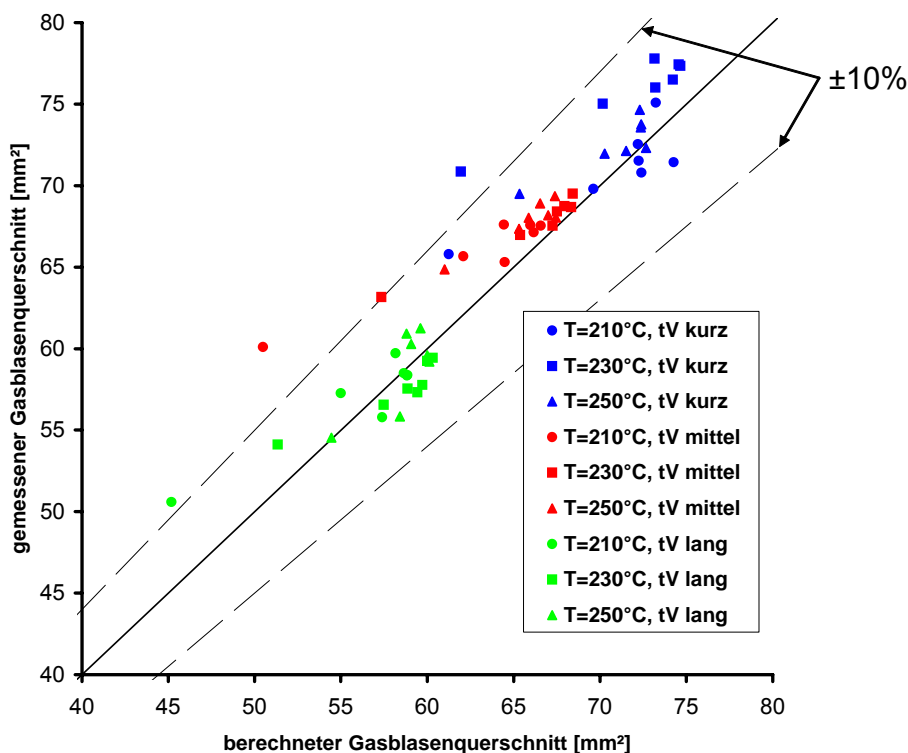


Bild 9: Vergleich von gemessenen und berechneten Gasblasenquerschnitten für Hauptausführung 1

Man erkennt, dass die meisten Werte relativ nahe an der 45°-Linie liegen und damit berechnete und gemessene Werte gut übereinstimmen. Die vier Werte, die außerhalb der 10%-Eingrenzung liegen, sind alle Werte der niedrigsten Druckstufen (d.h. $p_{\text{Gas}} < 10$ bar). In realen GIT-Prozessen werden derart geringe Drücke nicht verwendet. Dieses Diagramm lässt den Schluss zu, dass die Anwendung der Ähnlichkeitstheorie für die Gasinjektionstechnik sinnvoll ist.

3.3 Ermittlung der Zusammenhänge verschiedener π -Größen

Ein weiterer Vorteil der Ähnlichkeitstheorie ist die Reduzierung der Anzahl der Einflussparameter. Man kann Zusammenhänge zwischen den Einfluss- und Zielgrößen einfacher ermitteln. Dazu ist in erster Linie der Bereich höherer Drücke betrachtet worden.

Aus drei Gründen ist dieser Bereich relevant für die Praxis:

- Für den Anwender ist der Bereich des hohen Druckes interessant, weil der Gasblasengrenzquerschnitt (also die maximal erreichbare Gasblasengröße) in fast allen Fällen erwünscht ist. Ziel der meisten Anwendungen ist eine möglichst große Gasblase. Diese größte Gasblase wird mit dem Gasblasengrenzquerschnitt erreicht.
- Mit steigendem Gasdruck steigt auch der Querschnitt der Gasblase, allerdings nur bis zu einem so genannten Gasgrenzdruck (siehe Bild 10). Nur mit Drücken, die über dem Gasgrenzbereich liegen, lassen sich reproduzierbare Ergebnisse erzielen [12]. Unterhalb des Gasgrenzdrucks wird die Schmelze unregelmäßig verdrängt. Aufgrund dieser Unregelmäßigkeiten kommt es neben verschiedenen großen Gasblasenquerschnitten zu stark unregelmäßigen Gasblasenlängen.

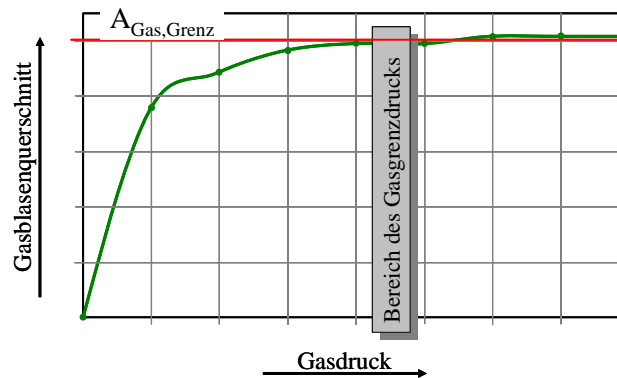


Bild 10: Einfluss des Gasdruckes auf den Gasblasenquerschnitt

- Mit der mathematischen Beschreibung dieses Teils des Druckspektrums ist der weitaus größte Teil des Druckbereichs beschrieben worden. Im Bild 8 ist der Gasblasenquerschnitt über dem Gasdruck für unterschiedliche Verzögerungszeiten dargestellt. Aus dem Diagramm sind folgende Auswirkungen erkennbar:
 - Die Verzögerungszeit t_v hat einen Einfluss auf die Ausbreitung der Gasblase im Formteil. Je größer die Verzögerungszeit, desto kleiner ist der Gasblasen(grenz)querschnitt. Dies gilt für beide Geometrien. Der Einfluss lässt sich dadurch erklären, dass sich mit zunehmender Gasverzögerungszeit ein verändertes Viskositätsprofil über die Formteildicke ergibt, was eine kleinere Gasblase zur Folge hat.
 - Für die unterschiedlichen Geometrien und Verzögerungszeiten liegen unterschiedliche Bereiche des Gasgrenzdruckes vor. Es ist aber zu erkennen, dass der Bereich des Gasgrenzdruckes für alle Geometrien weit unter 100 bar liegt. Der Bereich unterhalb des Gasgrenzdrucks ist sehr viel kleiner als der Bereich darüber. Damit wird mit der mathematischen Beschreibung des Grenzbe-

reichs für diese Probegeometrien der größte Teil des Druckspektrums erfasst.

Für diesen Druckbereich ist der Gasblasenquerschnitt nicht abhängig vom Gasdruck

(d.h. $\pi_6 \neq f(\pi_4)$). Er kann also als Funktion von π_7 dargestellt werden. Versuchsergebnisse, die mit dem Material Novolen 1100H erzielt wurden, lassen sich als Gerade im doppelt-logarithmischen Diagramm darstellen:

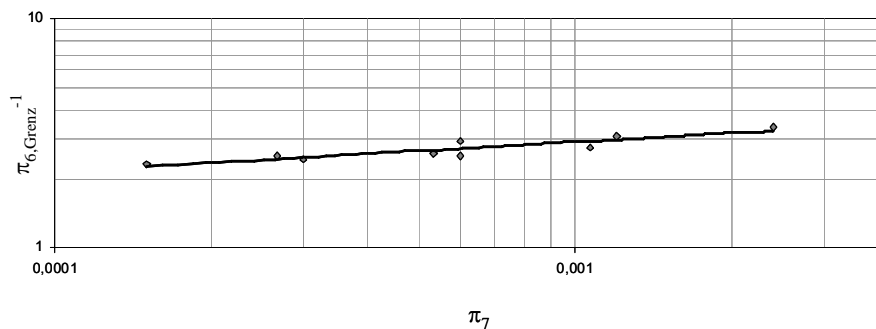


Bild 11: Dimensionsloser Gasblasengrenzquerschnitt π_6 über dimensionsloser Verzögerungszeit π_7

Die Gerade kann durch eine Potenzfunktion approximiert werden:

$$\pi_{6,Grenz}^{-1} = b \cdot \pi_7^m$$

$$b = 7,11$$

$$m = 0,1296$$

Die Gasblase kann nun durch Resubstituieren der π -Größen und unter den folgenden Bedingungen berechnet werden:

- Rechteckige Geometrie mit konstanten Geometrieverhältnissen ($H/B = \text{const.} = 0,8$; $R/B = \text{const.} = 0,1$)
- Konstante Werkzeugtemperatur (mit $T_M = \text{const.} \Rightarrow T_{WZ}/T_M = \text{const.}$)
- Materialparameter konstant ($K = \text{const.}$; $n = \text{const.}$, $a_{\text{eff}} = \text{const.}$)

Der Gasblasengrenzquerschnitt ergibt sich formal zu:

$$A_{\text{Gas,Grenz}} = \frac{1}{b} \cdot (a_{\text{eff}} \cdot t_V)^{-m} \cdot B^{2+2m}$$

Zur Überprüfung der Vorhersagegenauigkeit wurden die berechneten über den experimentell ermittelten Werten im Bild 12 aufgetragen.

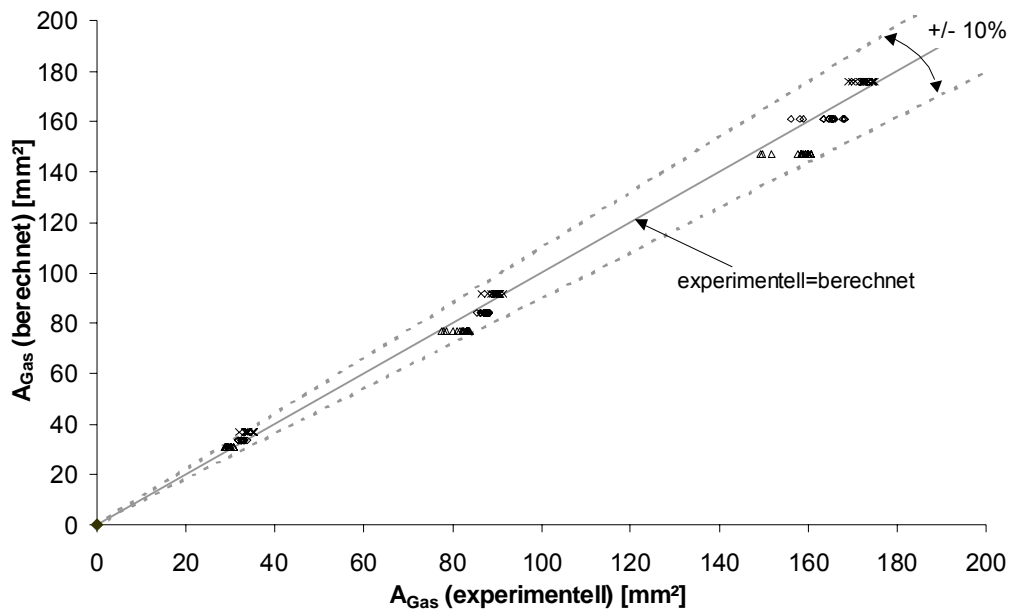


Bild 12: Vergleich der experimentellen und berechneten Gasblasenquerschnitte

Man erkennt, dass die Werte nur geringfügig von der Ideallinie (45°-Linie) abweichen. Das erstellte Regressionsmodell (vgl. S 13) beschreibt die tatsächlichen Werte mit einer Genauigkeit von $\pm 10\%$, womit eine gute Vorhersagegenauigkeit erreicht wurde.

3.4 Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen

Die hier vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass die Anwendung der Ähnlichkeitstheorie für die Gasinjektionstechnik sehr gute Ergebnisse liefert. So lässt sich der Gasblasengrenzquerschnitt in Abhängigkeit von dem charakteristischen Querschnitt und der Verzögerungszeit bestimmen. Es besteht aber auch die Möglichkeit, die an der Spritzgießmaschine einzustellende Verzögerungszeit und den notwendigen Gasdruck für einen gewünschten Gasblasengrenzquerschnitt für eine vorliegende Hauptausführung frühzeitig festzulegen. Diese Abschätzungen können zum einen durch die Verwendung des Regressionsmodells sowie zum anderen durch die direkte Verwendung der Modellgesetze (d.h. durch Gleichsetzen der π -Größen verschiedener Geometrieversionen) erfolgen. Beide Ansätze liefern sehr gute Ergebnisse für die jeweils definierte Zielgröße. Durch diesen Ansatz ist für den Designer oder Konstrukteur eines Formteils ein Hilfsmittel in Form von mathematischen Gleichungen geschaffen worden, mit dem man während der Bauteilauslegung erste Aussagen über den späteren Prozess machen kann. So ist es z.B. möglich, die Teilfüllung einer Kavität mit Schmelze vor der Gasausbreitung exakt zu bestimmen. Weiterhin kann man Angaben über Materialersparnis im Vergleich zur Anwendung

des Standardspritzgusses machen. Auch für die Berechnung der späteren Bauteilfestigkeit ist die Kenntnis über den Gasblasenquerschnitt von entscheidender Bedeutung und wird dazu beitragen, im frühen Auslegungsstadium eindeutige Angaben über die Lebensdauer eines Bauteils treffen zu können.

4 ANWENDUNG DER ERGEBNISSE

In diesem Abschnitt wird dem Anwender die Vorgehensweise vorgestellt, mit der für verschiedene Geometrien entweder ausgehend von einem Laborwerkzeug oder von bereits vorhandenen Werkzeugen der Gasblasenquerschnitt oder die Prozessparameter für ein neues Formteil ermittelt werden können.

Zur Untersuchung der Ausbreitung der Gasblase ist ein relativ einfaches Laborwerkzeug notwendig, das in einem kleinen Maßstab ausgelegt wird. Es ist dabei nicht notwendig das gesamte Bauteil nachzubilden, sondern lediglich den Bereich, in den sich der Gaskanal ausbilden soll. Dünnwandige Bereiche, die nicht mit Gas gefüllt werden, können analog zu [13] „abgetrennt“ werden, so dass nur die Gasführungsgeometrie betrachtet werden muss.

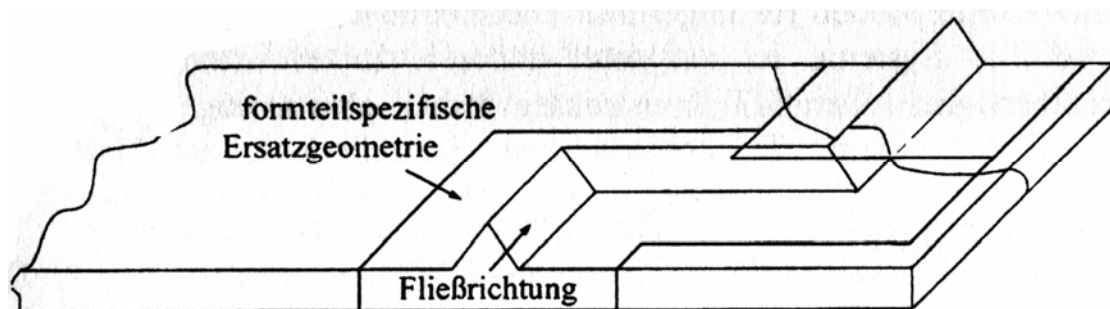


Bild 13: Abtrennung des dünnwandigen Bereiches [13]

Der Gasführungsbereich des Laborwerkzeuges sollte mit dem des neu zu entwickelnden Werkzeuges geometrisch ähnlich sein, um optimale Vorhersagegenauigkeit zu erzielen. Die Versuche an diesem Werkzeug können dazu genutzt werden, um beispielsweise das passende Material und die nötigen Prozesseinstellungen (Verzögerungszeit und Gasdruck) auszuwählen, die zu einer gewünschten Gasblasengröße (oder besser: einer gewünschten dimensionslosen Gasblasengröße π_6) führen.

Die ermittelten Parameter können dann mit Hilfe der Modellgesetze hochgerechnet werden:

$$t_{v,H} = t_{v,M} \cdot \left(\frac{B_H}{B_M} \right)^2$$

$$p_{Gas,H} = p_{Gas,M} \cdot \left(\frac{B_M}{B_H} \right)^{2n}$$

$$A_{Gas,H} = A_{Gas,M} \cdot \left(\frac{B_H}{B_M} \right)^2$$

mit t_V = Verzögerungszeit, B = Breite der Gasführungsgeometrie, p_{Gas} = Gasdruck

A_{Gas} = Gasblasenquerschnitt, n = Fließindex,

Index "M" = Modellausführung, Index "H" = Hauptausführung

Mit Hilfe dieser Gleichungen sind also wichtige GIT-Prozessparameter sowie der Gasblasenquerschnitt bereits vor dem Bau eines neuen GIT-Werkzeuges möglich.

Es können auch bereits vorhandene Serienwerkzeuge verwendet werden, die über einen geometrisch ähnlichen Gasführungs kanal verfügen. Dünnwandige (bzw. allgemeiner: nicht gasgefüllte) Bereiche können wiederum abgetrennt werden.

Falls eine genau definierte Gasblasengröße (also nicht die maximal mögliche) gewünscht ist, kann mit Hilfe der Modellgesetze die entsprechende Gasverzögerungszeit berechnet werden, um bei der größeren „Hauptausführung“ die gewünschte Gasblasengröße zu erhalten.

5 DANK

Die Forschungsarbeit für diesen Artikel wurde unter der Fördernummer 13752N aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert. Dafür sei den genannten Organisationen herzlich gedankt.

6 LITERATUR

- [1] Eyerer, P. Gasinjektionstechnik
Karl-Hanser-Verlag, München, 2003
- [2] Avery, J. Gas Assisted Injection Molding
Karl-Hanser-Verlag, München, 2001
- [3] Heim, H.-P. Qualitätsorientierte Betrachtung der Gasinjektions-
technik beim Spritzgießen
Dissertation Universität Paderborn, Shaker Verlag,
Aachen, 2001
- [4] Schröder, T. Neue Aspekte bei der Herstellung von Kunststoffform-
teilen mit der Gasinjektionstechnik
Dissertation RWTH Aachen, 1996
- [5] Görtler, H. Dimensionsanalyse, Theorie der physikalischen
Dimensionen mit Anwendungen
Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, 1975
- [6] Pawlowski, J. Die Ähnlichkeitstheorie in der physikalisch-techni-
schen Forschung
Grundlagen und Anwendung, Springer-Verlag Berlin,
1971
- [7] Zlokarnik, M. Scale-up, Modellübertragung in der Verfahrenstechnik
Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2000
- [8] Menges et al. Modelltheorie als Einstellhilfe für die Spritzgießsteue-
rung
Maschinen Markt, Kunststoffverarbeitungstechnik,
1978, S. 1537 - 1539
- [9] Potente et al. Eine einfache Darstellung von Fließvorgängen im
Werkzeug mit Hilfe ähnlichkeitstheoretischer
Methoden
Rheologica Acta 18 (1979), S. 268 – 274
- [10] Ridder, H. Durchgängiges Konzept für die Auslegung von Spritz-
gießsonderverfahren am Beispiel der Gasinjektions-
technik
Dissertation Universität Paderborn, Shaker Verlag,
Aachen, 2005
- [11] Stichelmeir, J. Kennzahlen und Ähnlichkeitsgesetze im Ingenieur-
wesen, Altos-Verlag Doris Stichelmeir, Essen, 1990
- [12] N.N. Spritzgießen von Qualitätsformteilen
Anwendungstechnische Information der Bayer AG,
Leverkusen, online in Internet:
<http://plastics.bayer.com/plastics/emea/de/docguard/A1147.pdf?docId=1276>

- [13] Moritzer, E. Phänomenorientierte Prozess- und Formteiloptimierung von thermoplastischen Gasinjektions-(GIT)-Spritzgießartikeln
Dissertation Universität Paderborn, Shaker Verlag, Aachen ,1997

Stichworte:

deutsch:

Spritzgießen, Gasinjektionstechnik, Modellgesetze, Ähnlichkeitstheorie, Scale-Up

englisch:

Injection Molding, Gas-Assisted Injection Molding, Model Laws, Similarity Theory, Scale-Up

Kontakt:

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Helmut Potente,
Dipl.-Ing. Martin Schäfers,
Dr.-Ing. Helmut Ridder

Herausgeber: Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein,
Prof. Dr. Tim Osswald

Erscheinungsdatum: Juli/August 2007

Herausgeber/Editor:

Europa/Europe
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. G. W. Ehrenstein, verantwortlich
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Phone: +49/(0)9131/85 - 29703
Fax.: +49/(0)9131/85 - 29709
E-Mail-Adresse: ehrenstein@lkt.uni-erlangen.de

Amerika/The Americas
Prof. Dr. Tim A. Osswald, responsible
Polymer Engineering Center, Director
University of Wisconsin-Madison
1513 University Avenue
Madison, WI 53706
USA
Phone: +1/608 263 9538
Fax.: +1/608 265 2316
E-Mail-Adresse: osswald@enr.wisc.edu

Verlag/Publisher:

Carl-Hanser-Verlag
Jürgen Harth
Ltq. Online-Services & E-Commerce,
Fachbuchanzeigen und Elektronische Lizenzen
Kolbergerstrasse 22
81679 Muenchen
Tel.: 089/99 830 - 300
Fax: 089/99 830 - 156
E-mail: harth@hanser.de

Beirat/Editorial Board:

Professoren des Wissenschaftlichen Arbeitskreises Kunststofftechnik/
Professors of the Scientific Alliance of Polymer Technology