

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: 21.02.2006
angenommen/accepted: 19.06.2006

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. W. Michaeli, Dipl.-Ing. K. Skrodolies;
Institut für Kunststoffverarbeitung, Aachen

Verbesserung der Oberflächeneigenschaften von SMC-Bauteilen mit Hilfe der Prozesssimulation

In diesem Artikel wird ein Modell zur Vorhersage der relativen Geschwindigkeit von Lufteinschlüssen in der Formmasse während des Fließpressens von SMC (Sheet Moulding Compound) vorgestellt. Das Modell wird in ein Prozesssimulationsprogramm implementiert, mit dem das Auftreten von Poren an der Oberfläche von SMC-Bauteilen analysiert werden kann. Die Modellvorstellung wird mit einer statistischen Prozessanalyse verifiziert.

Autor/author

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. W. Michaeli
Dipl.-Ing. K. Skrodolies
Institut für Kunststoffverarbeitung Aachen
Pontstr. 49
52062 Aachen
Tel.: 0 241/80 23 811
Fax: 0241/80 22 316
E-Mail: skrodolies@ikv.rwth-aachen.de
www.ikv.rwth-aachen.de

Verlag/Publisher:

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

Herausgeber/Editor:

Europa/Europe
Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. G. W. Ehrenstein, verantwortlich
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
D-91058 Erlangen
Deutschland
Phone: +49/(0)9131/85-29700
Fax.: +49/(0)9131/85-29709
E-Mail-Adresse: ehrenstein@ikt.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

Beirat/Editorial Board:

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

VERBESSERUNG DER OBERFLÄCHENEIGENSCHAFTEN VON SMC-BAUTEILEN MIT HILFE DER PROZESSSIMULATION

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. W. Michaeli, Dipl.-Ing. K. Skrodolies

Institut für Kunststoffverarbeitung, Aachen

In diesem Artikel wird ein Modell zur Vorhersage der relativen Geschwindigkeit von Lufteinschlüssen in der Formmasse während des Fließpressens von SMC (Sheet Moulding Compound) vorgestellt. Das Modell wird in ein Prozesssimulationsprogramm implementiert, mit dem das Auftreten von Poren an der Oberfläche von SMC-Bauteilen analysiert werden kann. Die Modellvorstellung wird mit einer statistischen Prozessanalyse verifiziert.

This article presents a theoretical model that is able to describe the relative velocity of enclosed gas bubbles during compression moulding of sheet moulding compound (SMC). The model is implemented into a process simulation program to analyse the appearance of surface porosity on SMC-parts. The model is verified by practical experiments using design of experiments (DoE).

1 ZUSAMMENFASSUNG / ABSTRACT

1.1 Zusammenfassung

Das Fließpressverfahren langfaserverstärkter Kunststoffe mit duroplastischer Matrix (sog. Sheet Moulding Compound - SMC) eignet sich zur Herstellung von faserverstärkten Bauteilen mit guten Oberflächeneigenschaften z.B. für Anwendungen im Automobilbereich. Hierbei existieren jedoch hohe Qualitätsansprüche in Bezug auf reproduzierbar gute Oberflächeneigenschaften. Trotz deutlicher Verbesserungen von Material und Prozess besteht jedoch weiterhin Verbesserungspotenzial bei der Erreichung der geforderten Class A-Oberfläche, insbesondere in Bezug auf Poren an der Oberfläche.

In diesem Artikel wird ein Modell zur Vorhersage von Oberflächenporen an SMC-Bauteilen vorgestellt, das auch in ein Prozesssimulationsprogramm implementiert wurde.

Dieses Modell wird mit Hilfe von Laboruntersuchungen zu den Prozesseinflüssen auf das Auftreten von Oberflächenporen überprüft. Bei diesen Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass herstellungsbedingt im SMC-Halbzeug Gaseinschlüsse vorhanden sind, die während des Fließpressprozesses von der Werkzeugwand weg zur Fließkanalmitte strömen. Dieser Effekt wird durch eine geringe Materialviskosität sowie eine geringe Fließgeschwindigkeit des SMC bei großem Blasendurchmesser begünstigt, was im Einklang zur Modellvorstellung steht.

1.2 Abstract

Compression moulding of long fibre reinforced thermoset plastics (sheet moulding compound – SMC) is used to produce parts with a high quality surface e.g. for automotive applications. Hence there are high requirements on a reproducible class-A surface quality. Despite lots of improvements of the material and process there is still room for improvement concerning surface voids.

In this article a theoretical model that is able to predict the appearance of surface voids is presented.

The model is verified by practical experiments analysing the process-influences on the appearance of surface voids by using design of experiments (DoE). The results of the experiments show that voids are included in the semi-finished SMC as a condition of the manufacturing process. These voids flow towards the centre of the parts cross section during the moulding process. This effect is supported by a low material viscosity, a low flow velocity and a high diameter of the voids. This all is consistent with the model.

2 EINLEITUNG

Aus der Vielzahl der Fertigungsverfahren im Bereich der faserverstärkten Kunststoffe (FVK) wird besonders das Fließpressen von Sheet Moulding Compound (SMC) in den verschiedensten Bereichen des Maschinenbaus eingesetzt. Dabei stehen gerade die guten spezifischen mechanischen Eigenschaften, die guten Oberflächenqualitäten (sog. Class A-Oberflächen), die Möglichkeiten zur freien Formgebung aber auch Attribute wie Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit im Vordergrund [1]. Außerdem sind die Investitionskosten für die Verarbeitung von SMC-Halbzeugen im Vergleich zu den von metallischen Werkstoffen gering [2]. Erste Anwendungen sind vornehmlich im Bereich der Automobilindustrie Anfang der 60er Jahre zu finden [3].

Gerade die extrem hohen Qualitätsansprüche der Automobilhersteller und der Kunden an Bauteile im Außenbereich haben in der Vergangenheit zu einer deutlichen Verbesserung der Oberflächeneigenschaften von SMC-Bauteilen geführt [4]. Aus einer unmittelbaren Konkurrenzsituation zu den Werkstoffen Stahl und Aluminium ergeben sich die hohen Anforderungen an die Bauteile. Der zukünftige Einsatz von SMC-Bauteilen geht somit mit der Forderung einher, dass die verlangten Oberflächenqualitäten prozesssicher in stabilen Fertigungsprozessen reproduzierbar erzielt werden können [5, 6].

Charakteristische Oberflächenfehler von SMC-Bauteilen lassen sich in folgende Fehlertypen einteilen [7-10]:

- Lang- und Kurzwelligkeit,
- Einfallstellen,
- Kleberabzeichnungen,
- Kantenausgasungen
- Porosität.

Unter Porositäten werden im Weiteren Gaseinschlüsse im gepressten Bauteil verstanden, die entweder in Form von Hohlräumen unmittelbar an der Bauteiloberfläche liegen oder in Form von geöffneten Poren als Oberflächenfehler unmittelbar sichtbar sind, Bild 1.

Während des Lackierprozesses werden die offenen Poren vom Lack bedeckt, jedoch nicht komplett ausgefüllt. Prozesstemperaturen von zum Teil über 200 °C, wie sie bei der Online-Lackierung auftreten, führen beim Einbrennen des Lacks zur Erwärmung des Gasgemischs, so dass oberhalb einer kritischen Volumenausdehnung die Gaseinschlüsse aufplatzen und sich sogenannte Pinholes in der lackierten Oberfläche bilden [10, 11]. Gerade bei der Online-Lackierung entstehen hierdurch erhebliche Kosten, da schadhafte Bauteile nachbearbeitet bzw. ausgetauscht werden müssen.

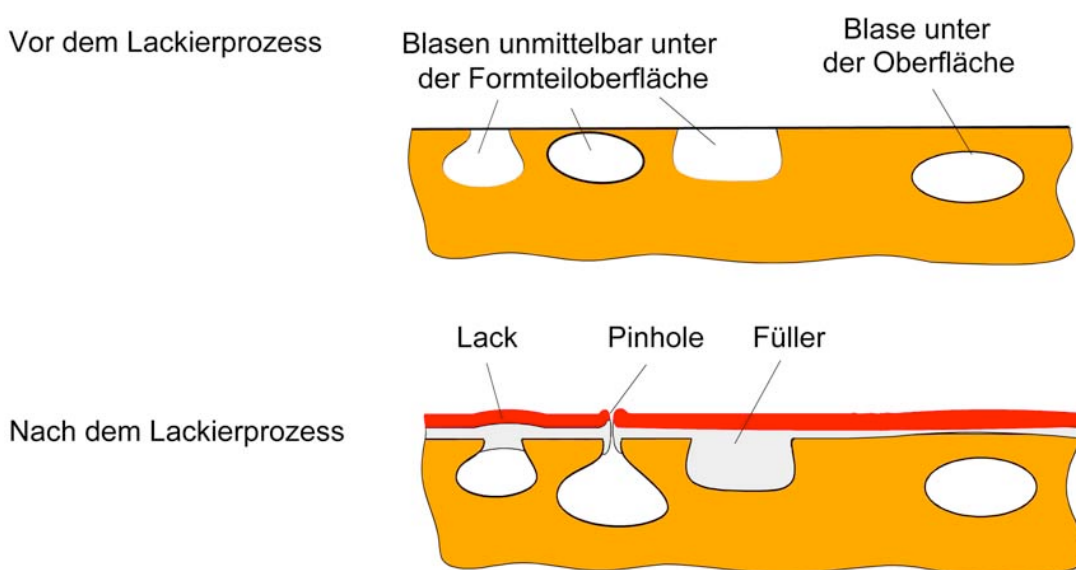


Bild 1: Einteilung von Porositäten [12]

Die Einflussparameter auf die Porosität von SMC-Bauteilen liegen in den Prozessparametern, der Bauteilgeometrie und den Materialparametern des SMC-Halbzeugs. Zudem gibt es Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Einflüssen, weshalb für jedes Bauteil im Einfahrprozess optimierte Prozess- und Materialparameter gefunden werden müssen, um hochwertige Bauteile prozesssicher herstellen zu können. Des Weiteren muss auf eine konstante Materialqualität und konstante Prozessbedingungen bei der Fertigung geachtet werden. Diese trivialen Hinweise führen bereits zu einer deutlichen Verbesserung der Bauteilqualität. Zudem sind von Seiten der Materialhersteller, der Verarbeiter sowie von Forschungseinrichtungen in den letzten Jahren große Anstrengungen unternommen worden, die Konstanz von Material- und Bauteilherstellung zu überwachen und zu verbessern [13-17].

Ein tieferes Verständnis über die Mechanismen der Bildung der Porosität von SMC-Bauteilen und eine Modellbildung der Zusammenhänge kann den Verarbeitern und Halbzeugherstellern von SMC helfen, Poren an der Bauteiloberfläche zu vermeiden. Damit könnte durch die gezielte Wahl von Material- und Prozessparametern auf den Einsatz zusätzlicher teurer Prozessschritte bei der Herstellung von Bauteilen mit Class-A Oberflächenanforderungen verzichtet werden.

3 VORUNTERSUCHUNGEN

Um die Mechanismen bei der Entstehung von Oberflächenporen genauer zu verstehen, werden zunächst Untersuchungen des SMC-Halbzeugs sowie des Pressprozesses durchgeführt. Mit Hilfe von grundlegenden Fließanalysen wird dabei die Entstehung von Poren an der Bauteiloberfläche genauer analysiert. Das Ergebnis der Materialuntersuchung zeigt, dass im SMC-Halbzeug bereits herstellungsbedingt zahlreiche Gaseinschlüsse vorhanden sind, die mittels Schnittbildern sowie Durchlichtaufnahmen sichtbar gemacht werden können, Bild 2 [18]:

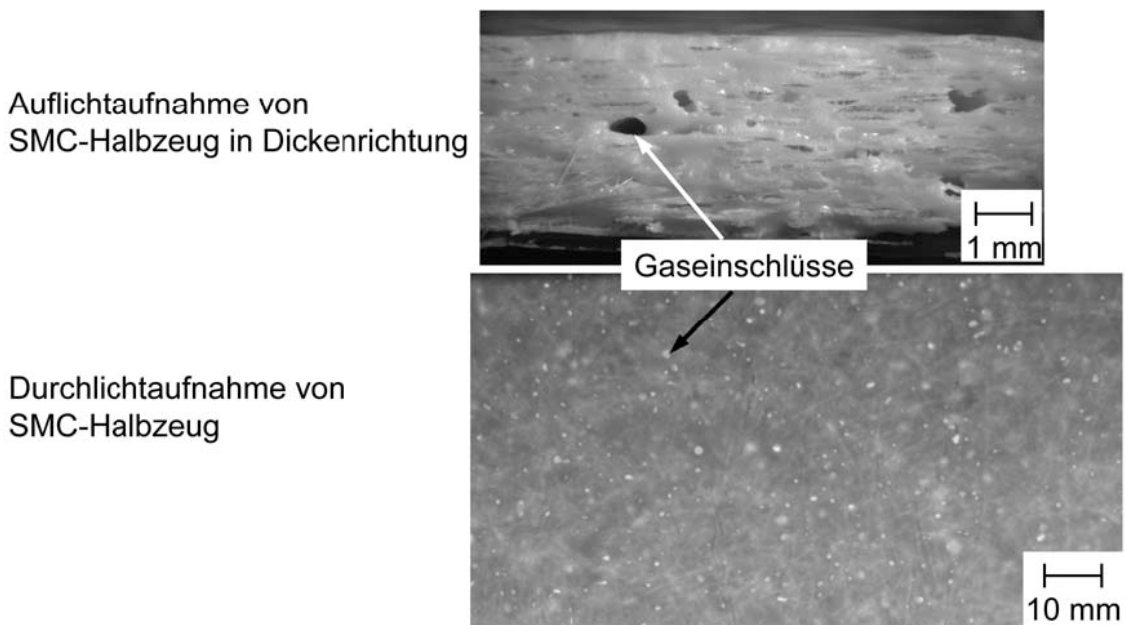


Bild 2: Gaseinschlüsse im unausgehärteten SMC-Halbzeug

Darüber hinaus treten beim Fließpressen dreidimensionale Strömungseffekte auf, die zu Lufteinschlüssen führen. Dazu zählen unter anderem das Voreilen von niedrigviskosen Randschichten sowie Welligkeiten bei Rückströmungen, wenn die Fließfront vor der vollständigen Füllung der Kavität an eine Tauchkante stößt. Diese Effekte lassen sich jedoch teilweise durch ein Vorheizen der SMC-Zuschnitte vermeiden, Bild 3 [18].

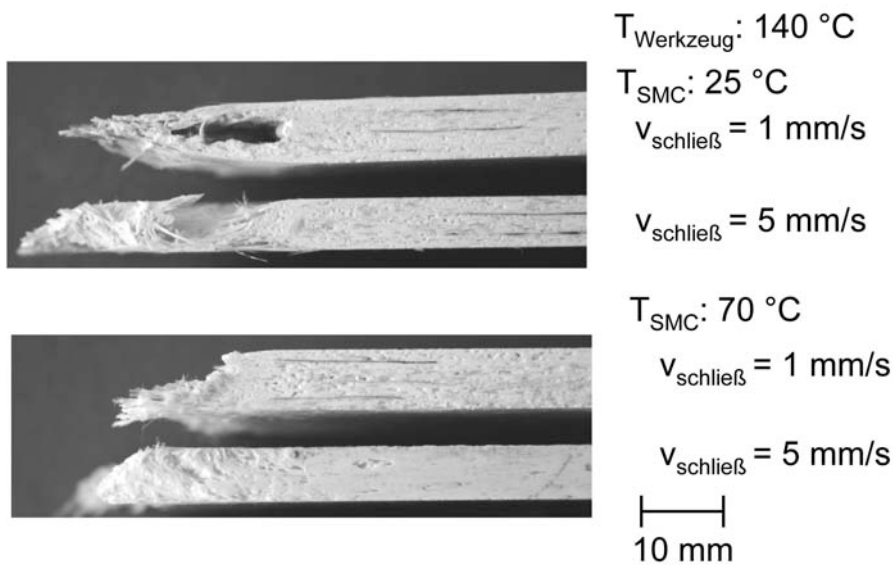


Bild 3: Fließeffekte bei unterschiedlicher Halbzeugtemperatur

4 MODELLBILDUNG ZUR VORHERSAGE VON OBERFLÄCHENPoren AN SMC-BAUTEILEN

Um die Entstehung von Poren an der Bauteiloberfläche vorhersagen zu können, wird ein Modell entwickelt, mit dem die Strömung von Gasblasen, die sich im SMC befinden, berechnet werden kann. Dabei werden folgende Vereinfachungen angenommen:

- Das SMC ist ein Kontinuum mit konstanten Viskositätsparametern.
- Die Strömung ist stationär.
- Füllstoffe, wie Glasfasern oder Kalziumkarbonat, haben keinen Einfluss auf die Blasengeschwindigkeit.
- Wandeffekte sowie Interaktionen von Blasen untereinander werden vernachlässigt.
- Das Gas in den Blasen verhält sich ideal.
- Die Blasen weisen eine Kugelform auf.

Mit diesen Annahmen kann die Blasengeschwindigkeit durch das Kräftegleichgewicht von Druck- und Widerstandskräften berechnet werden. Die Druckkraft F_D auf eine Blase mit einer Dichte ρ_B , die in einem Fluid mit der Dichte ρ_F mitbewegt wird, ergibt sich durch den Druck p auf die Blasenoberfläche O_B [19, 20]:

$$F_D = \frac{\rho_F - \rho_B}{\rho_B} \int_O p dO_B \quad (\text{Gl. 1})$$

Die Widerstandskraft F_W auf die frei bewegliche kugelförmige Blase mit dem Durchmesser D_B kann mit einem Widerstandsgesetz und einem Widerstandsbeiwert c_W abgeschätzt werden [20]:

$$F_W = c_W \frac{\pi}{4} D_B^2 \frac{\rho_F^2}{2} (u_B^2 - u_F^2) \quad (Gl. 2)$$

Hierbei ist u_B die Blasengeschwindigkeit und u_F die lokale Fluidgeschwindigkeit an der Blase. Der Widerstandsbeiwert ist dabei eine Funktion der Reynoldszahl Re [20]:

$$c_W = \frac{24}{Re} \quad (Gl. 3)$$

mit

$$Re = \frac{D_B \rho_F (u_B - u_F)}{\eta_F} \quad (Gl. 4)$$

Aus Gleichung 1 bis 4 kann dann die Blasengeschwindigkeit abgeschätzt werden:

$$u_B = \sqrt{u_F^2 + \frac{\rho_B - \rho_F}{\rho_F^2} \frac{4}{c_W \pi D_B^2} \int_0 p dO_B} \quad (Gl. 5)$$

Die lokale Viskosität des Fluids wird mit Hilfe eines Viskositätsgesetzes, wie z.B. der Carreau-WLF Gleichung [21, 22] in Abhängigkeit von der lokalen Temperatur und der Schergeschwindigkeit berechnet. Der Durchmesser der Blase ist auch von der Temperatur T und dem Druck abhängig. Er kann näherungsweise mit dem Gesetz für ideale Gase berechnet werden:

$$p^* \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_B}{2} \right)^3 = RT \quad (Gl. 6)$$

R: Boltzmann -Konstante

Aus Gl. 5 ergibt sich, dass der Schlupf der Blase, d.h. die Blasengeschwindigkeit relativ zur Fluidgeschwindigkeit, bei gegebenen Dichten des Fluids und des Gases in der Blase von dem Blasendurchmesser, der Druckdifferenz über der Blase, der lokalen Fluidviskosität und der lokalen Fluidgeschwindigkeit abhängt. Bei relativ kleinen Reynoldszahlen, d.h. geringem Blasendurchmesser oder hoher Fluidviskosität können dem Modell nach die Widerstandskräfte der Blase so hoch werden, dass ein Schlupf der Blase erst bei sehr hohem Druckgradienten auftritt. Im Bild 4 ist der berechnete Blasenschlupf für unterschiedliche Blasendurchmesser und Fluidviskositäten bei konstanten Dichten und Fluidgeschwindigkeit dargestellt. Aus den Verläufen wird deutlich, dass bei geringen Blasendurchmessern, die während des Fließens unter 0,5 mm liegen, erst bei geringer Fluidviskosität ein nennenswerter Schlupf der Blasen bei einem prozessüblichen Druckgradienten von 0,35 bar/mm vorhergesagt wird.

Um dieses Verhalten weiter zu verdeutlichen, ist im Bild 5 der mit dem Modell berechnete minimale Druckgradient für verschiedene Blasendurchmesser und Fluidviskositäten dargestellt. Es wird auch aus diesem Verläufen deutlich, dass ein Schlupf erst bei hohen Druckgradienten bzw. sehr niedrigen Viskositäten auftritt.

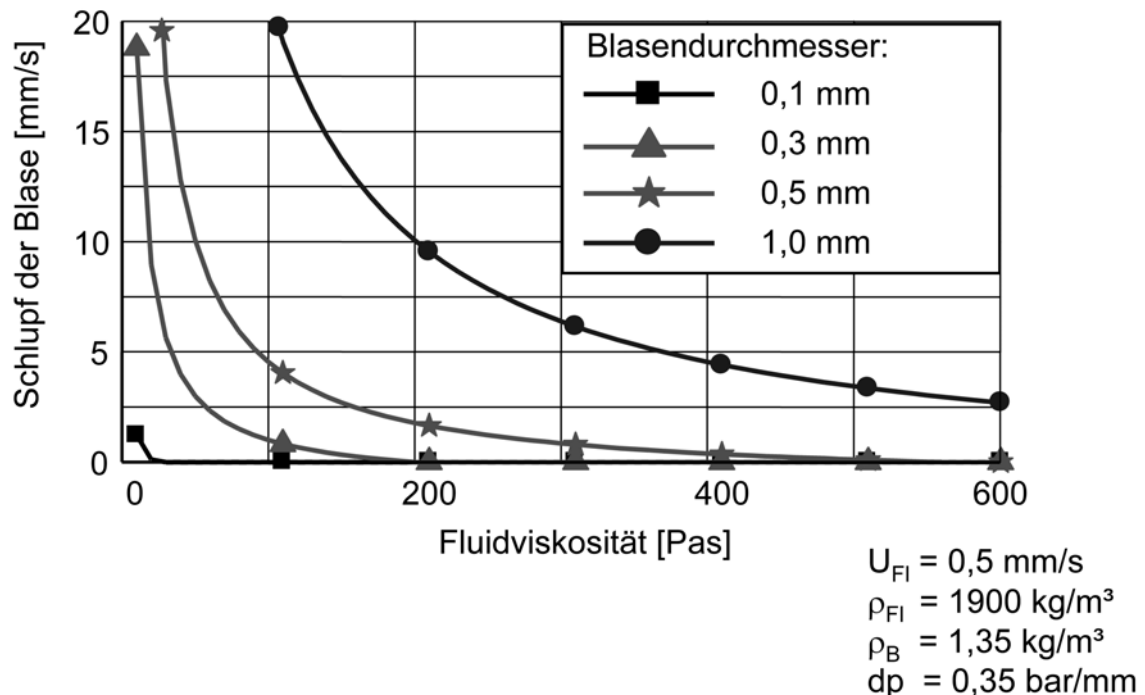


Bild 4: Berechneter Blasenschlupf in Abhängigkeit von Blasendurchmesser und Fluidviskosität

Es ergeben sich demnach Einflüsse von Prozessgrößen wie z.B. der Werkzeug- und Formmassentemperatur auf den Schlupf der Blasen. Diese werden im Folgenden kurz diskutiert:

Temperatur: Die lokale Fluidtemperatur, die in dem Modell mit der Blasentemperatur gleichgesetzt wird, hat einen hohen Einfluss auf den Schlupf der Blasen. Eine höhere Temperatur senkt die Fluidviskosität, die dem Modell nach die Widerstandskraft des Fluid gegenüber der Relativbewegung der Blase verringert. Zudem führt eine höhere Temperatur zu einer Expansion der Blase. Ein höherer Blasendurchmesser begünstigt dem Modell nach wiederum den Blasenschlupf, Bild 5, so dass hier zwei Effekte mit der gleichen Auswirkung überlagert werden.

Werkzeuginnendruck: Ein hoher Werkzeuginnendruck führt beim Fließpressen zu einem hohen Druckgradienten in Fließrichtung des Materials, da an der Fließfront Umgebungsdruck bzw. ein geringerer Druck bei einem Verpressen mit Einsatz von Vakuum herrscht. Ein hoher Druckgradient begünstigt, wie im Bild 5 dargestellt, den Blasenschlupf. Zudem führt ein höherer Druckgradient aufgrund der Impulserhaltung (Gl. 8 - 10) prinzipiell zu einer höheren Scherrate,

die wiederum die Viskosität des strukturviskosen Fluids verringert. Eine höhere Scherung des Materials erhöht zudem die Fluidtemperatur durch Dissipation (Gl. 11). Demgegenüber verringert ein hoher Druck jedoch den Blasendurchmesser, und damit auch den Schlupf dieser Blasen, Bild 5. Somit existieren hier zwei gegenläufige Effekte.

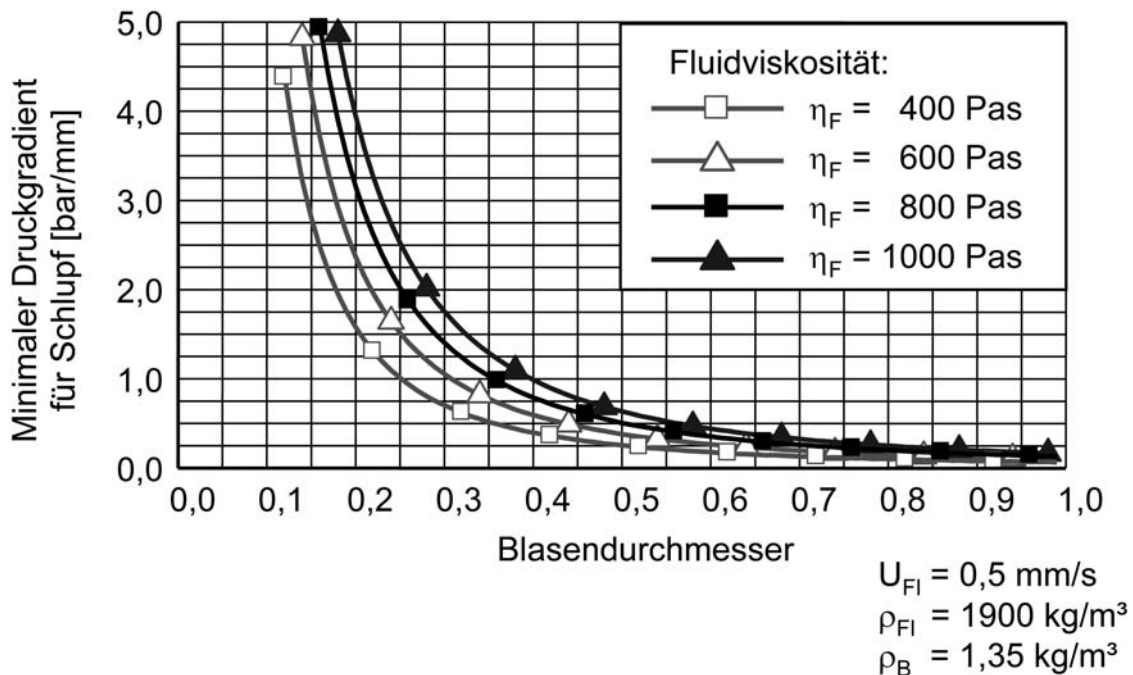


Bild 5: Berechneter minimaler Druckgradient zum Blasenschlupf in Abhängigkeit von Blasendurchmesser und Fluidviskosität

Mit Hilfe des Modells kann die lokale Blasengeschwindigkeit in Abhängigkeit von den lokalen Druck- und Strömungsgeschwindigkeiten vorhergesagt werden.

Die Druck und Strömungsgeschwindigkeiten von SMC-Formmassen im Fließspalt während des Fließpressvorgangs können mit Hilfe der Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls berechnet werden. Dafür werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen [23]:

- Gravitationskräfte werden vernachlässigt,
- Trägheitskräfte werden vernachlässigt,
- Das Material ist inkompressibel,
- Relaxationseigenschaften des Materials werden vernachlässigt,
- Die Strömung ist laminar,
- Die Strömung ist quasistationär.

Die Annahme einer quasistationären Strömung bedeutet, dass die Strömung der Formmasse in diskrete Zeitschritte unterteilt wird, innerhalb derer die Strömung zu jedem Zeitpunkt lokal stationär und hydrodynamisch ausgebildet ist.

Zudem wird davon ausgegangen, dass die Viskosität innerhalb eines Zeitschrittes konstant bleibt.

Die Erhaltungsgleichungen vereinfachen sich somit für jeden Zeitschritt zu [24, 25]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{Gl. 7})$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\eta_D \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta_s \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta_s \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] = 0 \quad (\text{Gl. 8})$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\eta_D \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\eta_s \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta_s \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] = 0 \quad (\text{Gl. 9})$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(2\eta_D \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\eta_s \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta_s \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] = 0 \quad (\text{Gl. 10})$$

Hierbei ist p der lokale Druck, x , y , und z sind die Koordinaten eines kartesischen Koordinatensystems und u , v , und w die lokalen Fließgeschwindigkeiten in x -, y -, z -Richtung. Zudem wird zwischen der Scherviskosität η_s und der Dehnviskosität η_D unterschieden.

Des Weiteren müssen zur Beschreibung der Fließvorgänge im Pressspalt noch die Aufheizvorgänge mit berücksichtigt werden, da die Materialviskosität stark temperaturabhängig ist. Die zeitlich und lokal unterschiedliche Temperatur ϑ in der Formmasse kann mit Hilfe des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik berechnet werden. Dies geschieht wiederum in zeitdiskreten Schritten innerhalb derer von konstanten Stoffwerten ausgegangen wird:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} + u \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + v \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + w \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + \frac{a}{\lambda} * \Phi \quad (\text{Gl. 11})$$

Mit:

a : Temperaturleitfähigkeit

λ : Wärmeleitfähigkeit

Hierbei ist Φ ein Dissipationsterm:

$$\Phi = 2\eta_D \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \eta_s \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \eta_s \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \dot{Q} \quad (\text{Gl. 12})$$

Bei der Berechnung des konvektiven Wärmetransports dürfen nur die tatsächlich auftretenden Wärmeströme in der Energiegleichung berücksichtigt werden und nicht ein künstlich aufgebrachtener Transport durch die Materialdeformation aufgrund der Schließbewegung der Presse [26]. In dem Dissipationsterm wird zudem die exotherme Härtingsreaktion des Materials durch einen Quelltherm \dot{Q} berücksichtigt.

Zur Berechnung der lokalen Drücke und Temperaturen wurden am IKV mehrere Simulationsprogramme entwickelt. Neben dem bereits kommerziell erhältlichen Programm EXPRESS, das die Geometrie mit Schalenelementen annähert (sog. 2½-dimensionale Simulation), wurden für wissenschaftliche Zwecke auch zweidimensionale Programme entwickelt, die das Fließen der Formmasse über dem Fließquerschnitt berechnen. Hierbei handelt es sich die Programme ViFIAnT (Viscous Flow Analysis Tool) und MiniPRESS [14, 26, 27]. Insbesondere das Programm MiniPRESS verwendet bis auf die zweidimensionale Betrachtung der Strömung keine weiteren Vereinfachungen der Gleichungen 7 bis 11 [26]. Der Unterschied zwischen den Betrachtungsweisen des Bauteils ist im Bild 6 dargestellt.

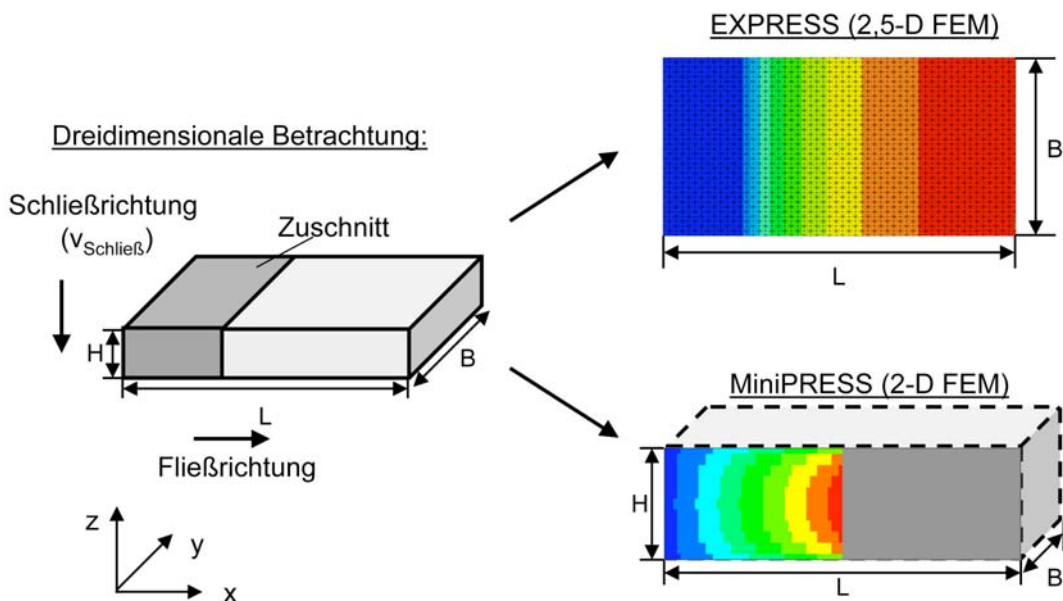


Bild 6: Berechnungsmöglichkeiten für den Fließpressprozess

Das im Bild 6 gewählte Koordinatensystem mit x für die Hauptfließrichtung und z für die Schließrichtung der Presse wird in den folgenden Ergebnisdarstellungen im Bild 7 beibehalten.

Das Modell zur Berechnung des Blasenschlupfs nach Gleichung 5 wird in MiniPRESS implementiert, um abzuschätzen, ob dem Modell nach unter Prozessbedingungen ein Schlupf der Blase während des Fließvorgangs überhaupt auftritt. Vorteil von MiniPRESS gegenüber EXPRESS ist in diesem Fall, dass auch der Druckgradient über dem Fließquerschnitt mit berechnet werden kann. Somit

ist eine Vorhersage der Blasengeschwindigkeit sowohl in Fließrichtung als auch in Bauteildickenrichtung (z-Richtung) möglich.

Als Material- und Prozessdaten werden Erfahrungswerte verwendet, die in Tabelle 1 dokumentiert sind [14]. Bei den Berechnungen wird von einem Ausgangsdurchmesser der Blasen von 1 mm bei 25 °C ausgegangen.

Prozessdaten	Abkürzung	Einstellwert
Schließgeschwindigkeit	u_{\max}	3 mm/s
Carreau - Parameter	$P_1(\eta_0)$ $P_2(B)$ $P_3(C)$	36614 Pas 1 s^{-1} 0,69716
Wärmeleitfähigkeit	λ	0,8 W/mK
Temperaturleitfähigkeit	a_{eff}	0,3 m ² /s
Bezugstemperatur	T_B	70 °C
Standardtemperatur	T_S	5 °C
Mittlere Massetemperatur	T_M	20 °C
Werkzeugtemperatur	T_{WKZ}	145 °C

Tabelle 1: Grundeinstellungen und Prozessdaten

Die Berechnungsergebnisse mit MiniPRESS zeigen, dass bei einem Plattenbauteil in Fließrichtung kein Schlupf der Blasen auftritt. Quer zur Fließrichtung tritt jedoch laut Berechnung ein Schlupf der Blasen auf, so dass diese aufgrund des Druckgradienten zum Bauteilinneren fließen, Bild 7.

Schlupf in x- Richtung:



Schlupf in z- Richtung:

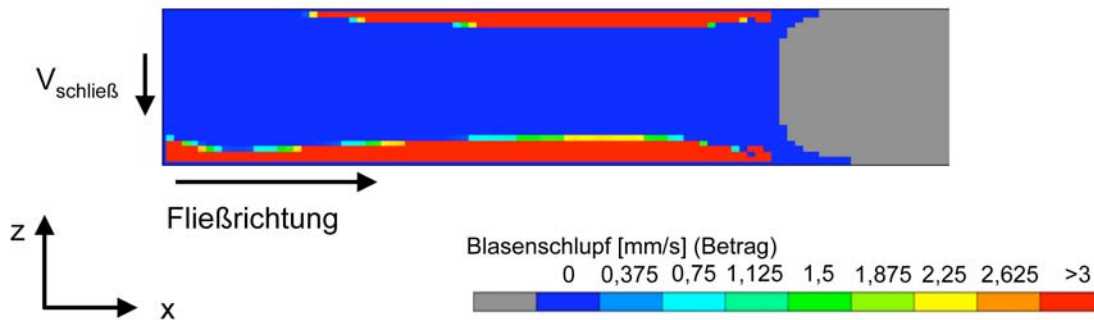


Bild 7: Berechneter Blasenschlupf

Diese Beobachtung findet sich auch in Schnittbildern von Plattenbauteilen wieder, Bild 8. Im Bild 8 ist ein Ausschnitt eines Schnittbildes aus dem mittleren Bereich (in Längsrichtung) des Bauteils abgebildet. Diese Bauteile haben Abmaße von ca. 80 x 130 mm² und wurden in einem kleinen Plattenwerkzeug an einer Zug-/Druck-Prüfmaschine unter nichtisothermen Bedingungen hergestellt. In das auf 145 °C vorgeheizte Werkzeug wird das Material mit Raumtemperatur eingelegt und mit einer Schließgeschwindigkeit von 3 mm/s verpresst. Der Belegungsgrad beträgt ca. 50 %, was einer Zuschnittshöhe von ca. 11 mm entspricht. Um sicherzugehen, dass während des Pressvorgangs ein Schichtenfließen vorherrscht, werden zwischen den SMC-Lagen Filamente von Kohlenstofffasern lose eingelegt, die im Bild als dunkle Striche erkennbar sind. Mögliche Verwirbellungen würden durch wellig vorliegende Fäden im Bauteil sichtbar, was bei diesen Versuchen nicht zu beobachten ist.

Es ist in dem Schnittbild jedoch deutlich zu sehen, dass über der ganzen Bauteillänge noch Gasblasen im Bauteil vorhanden sind. Demnach tritt beim Fließen des SMC in einem einfachen Fließspalt unter Prozessbedingungen kein Blasenschlupf in Fließrichtung auf, was der Modellvorstellung und dem Simulationsergebnis entspricht. In diesem Bild können deutlich die eingelegten Filamente erkannt werden, sowie die Porenverteilung über der Bauteildicke. Es fällt auf, dass das Bauteil in den Randbereichen an der Werkzeugwand nur wenig Poren aufweist. Dieser Effekt deckt sich mit den Ergebnissen des Modells, da ein Schlupf in Dickenrichtung auch in der Simulation auftritt.

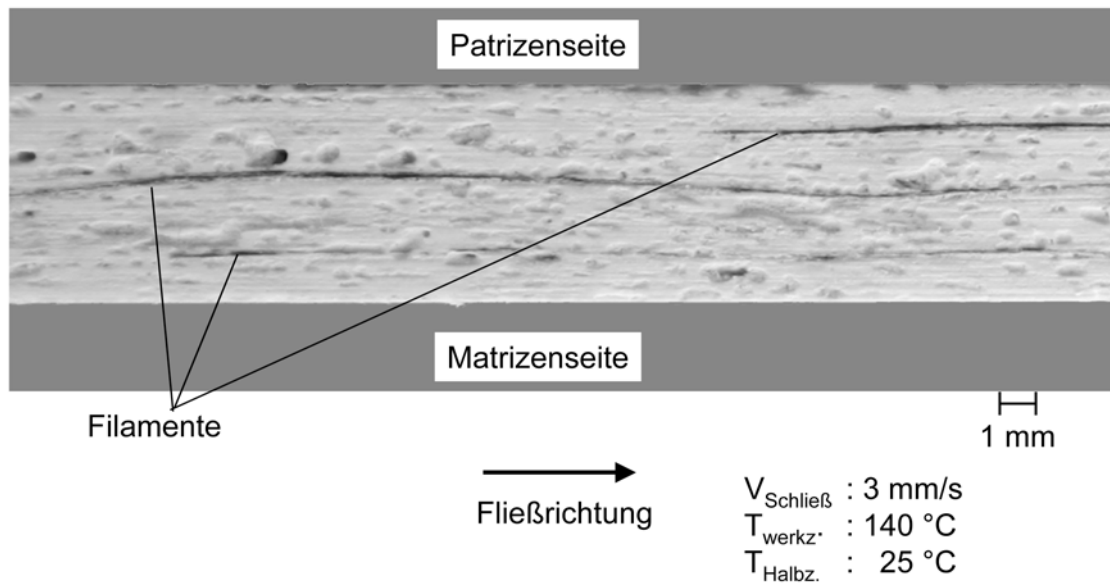


Bild 8: Schnittbild einer SMC-Platte (Teilfüllung)

Aufgrund der Untersuchungen im Labormaßstab scheint das erarbeitete Modell zur Vorhersage des Blasen schlupfs geeignet. Damit ist auch eine Vorhersage über das Auftreten von Oberflächenporen an den Bereichen mit geringem Blasen schlupf möglich.

Um das Modell genauer zu prüfen und weitere Einflüsse auf die Entstehung von Oberflächenporen an SMC-Bauteilen zu untersuchen, werden im Folgenden statistische Prozessanalysen vorgestellt und mit der Modellvorstellung verglichen.

5 PROZESSANALYSEN

Aufgrund der großen Vielzahl von Prozessparametern, die einen Einfluss auf die Entstehung von Oberflächenporen an SMC-Bauteilen haben können, wird mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung der Einfluss der einzelnen Parameter genauer untersucht. Da zwischen den Prozessparametern und dem Auftreten von Poren an der Bauteiloberfläche sowohl nichtlineare als auch quadratische Einflüsse erwartet werden, wird ein dreistufiger Versuchsplan aufgestellt. Innerhalb dieser Analyse werden die Parameter Schließgeschwindigkeit, Werkzeugtemperatur, Belegungsgrad und die Höhe des angelegten Vakuums variiert. Die Grenzen des Versuchsraums sind in Tabelle 2 angegeben. Um eine statistische Absicherung der Versuche zu bekommen, wird jeder Versuchspunkt 10 mal wiederholt. Es werden demnach 810 ($=3^4 \cdot 10$) Versuchsplatten hergestellt und ausgewertet. Mit Hilfe dieses Versuchsplans ist es möglich, lineare und quadratische Haupt- und Wechselwirkungseffekte der einzelnen Parameter auf die Zielgröße Porenanzahl zu bestimmen.

Bei der Durchführung der Versuche ist es wichtig, dass möglichst alle Bauteile unter gleichen Randbedingungen gefertigt werden, um mögliche Fehlinterpretationen zu vermeiden. Dies führt jedoch zwangsläufig zu einem Kompromiss zwischen den Forderungen alle Versuchsplatten mit SMC aus einer Charge herzustellen und dass das Material bei den Versuchen noch innerhalb der Herstellerspezifikation liegt, d.h. nicht zu lange lagert. Bei Verwendung von Material aus einer Charge können Chargenschwankungen bei der Herstellung weitgehend ausgeschlossen werden. Eine Verwendung von Material außerhalb der Herstellerspezifikation würde das Versuchsergebnis jedoch auch beeinflussen.

Der vom Hersteller angegebene Verarbeitungszeitraum für das verwendete Class-A SMC liegt bei 14 Tagen, weshalb bei dem hohen Versuchsaufwand unterschiedliche SMC-Chargen bei der Versuchsdurchführung eingesetzt werden müssen.

Prozessdaten	Unterer Wert	Mittlerer Wert	Oberer Wert
Schließgeschwindigkeit (SG) [mm/s]	1	5,5	10
Belegungsgrad (Bel.) [%]	30	55	80
Luftdruck in der Kavität (LK) [mbar]	50	525	1000
Werkzeugtemperatur (Temp.)[°C]	120	140	160

Tabelle 2: Grundeinstellungen und Prozessdaten

5.1 Auswertung der Versuche

Bei der Versuchsauswertung wird die Anzahl der Poren an der Bauteiloberfläche bestimmt und als quantitatives Ergebnis in die Auswertung mit einbezogen. Die Ermittlung der Porenanzahl an der Oberfläche der Versuchsplatten geschieht durch manuelles Auszählen. Um Schwankungen dabei möglichst gering zu halten, wird sowohl die Herstellung der Platten als auch die Versuchsauswertung von einer Person durchgeführt. Gerade beim manuellen Auszählen kann es während der Auswertearbeiten zu großen Schwankungen kommen, weshalb einzelne Platten immer wieder als Referenz zu Hilfe genommen werden. Das manuelle Auszählen hat den Vorteil, dass bei der genauen Analyse der Versuchsbauteile neben der Porenanzahl auch noch andere Auffälligkeiten bei der späteren Interpretation der Versuchsergebnisse mit berücksichtigt werden können.

In Vorversuchen wurde auch untersucht, ob ein Aufheizen der Platten zusätzliche Poren, z.B. durch ein Aufplatzen von knapp unter der Oberfläche liegenden Gaseinschlüssen, hervorbringt. Da dieser Effekt nicht beobachtet werden konnte, wurden die Platten vor der Analyse der Porenanzahl nicht aufgeheizt.

Die statistische Analyse der Versuche wird in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst werden in einer Signifikanzanalyse die Prozessparameter mit signifikantem Einfluss auf die Poren bestimmt. Deren Einfluss kann in einer weiteren Analyse dann genauer dargestellt werden und mit den Ergebnissen der analytischen Überlegungen sowie der Simulation auf Plausibilität untersucht werden.

In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass diese Versuchsergebnisse nur in dem Versuchsraum gültig sind. Extrapolationen aus dem Versuchsraum hinaus sind nicht zulässig [28]. Daher können die Ergebnisse dieser statistischen Analyse nicht ohne weiteres auf andere Bauteile übertragen werden, da z.B. andere geometrische Eigenschaften wie Rippen oder Dicken-sprünge den Einfluss der Parameter überlagern können. Außerdem kann auch eine andere SMC-Formulierung anders auf die Prozessparameter reagieren und somit zu einem anderen Ergebnis führen. Dennoch ist die Kenntnis der Effekte aufgrund der durchgeführten statistischen Analyse wichtig, da dieser Versuchsplan zur Verifikation und Verfeinerung der Modellbildung dient. Mit einem physikalischen Modell und der Prozesssimulation ist eine Vorhersage der Oberflächendefekte an verschiedenen Bauteilen möglich, die mit unterschiedlichen SMC-Formulierungen hergestellt wurden.

5.2 Interpretation der Versuchsergebnisse mit Hilfe der Simulation

Bild 9 zeigt das Ergebnis einer Varianzanalyse. In diesem Bild sind die einzelnen standardisierten Effekte der Parameter, d.h. die Effekte dividiert durch die jeweilige Standardabweichung, auf die Anzahl der Poren dargestellt. Die Effekte, die weit unterhalb der Signifikanzgrenze liegen, wurden in dieser Darstellung weggelassen. Die Signifikanzgrenze gibt an, ob ein beobachteter Effekt nur zufällig auftritt oder einen wirklichen Einfluss auf das Versuchsergebnis hat. Je höher die Signifikanz, desto wahrscheinlicher ist es, dass es einen wirklichen Einfluss gibt. Bei einer Signifikanzgrenze von 99 % kann von einem signifikanten Einfluss ausgegangen werden [28].

Die dargestellten Balken in dem Diagramm zeigen zunächst nur die Höhe des Einflusses und ob er signifikant ist oder nicht. Die Zahlen hinter dem Balken geben einerseits detaillierte Informationen über die Einflusshöhe und andererseits zeigen sie auch, ob ein positiver oder negativer Einfluss gegeben ist. Ein positiver Einfluss bedeutet, dass sich durch Erhöhung des Parameters auch die Zielgröße erhöht. Bei einem negativen Einfluss verringert sich die Zielgröße bei Erhöhung des Parameters.

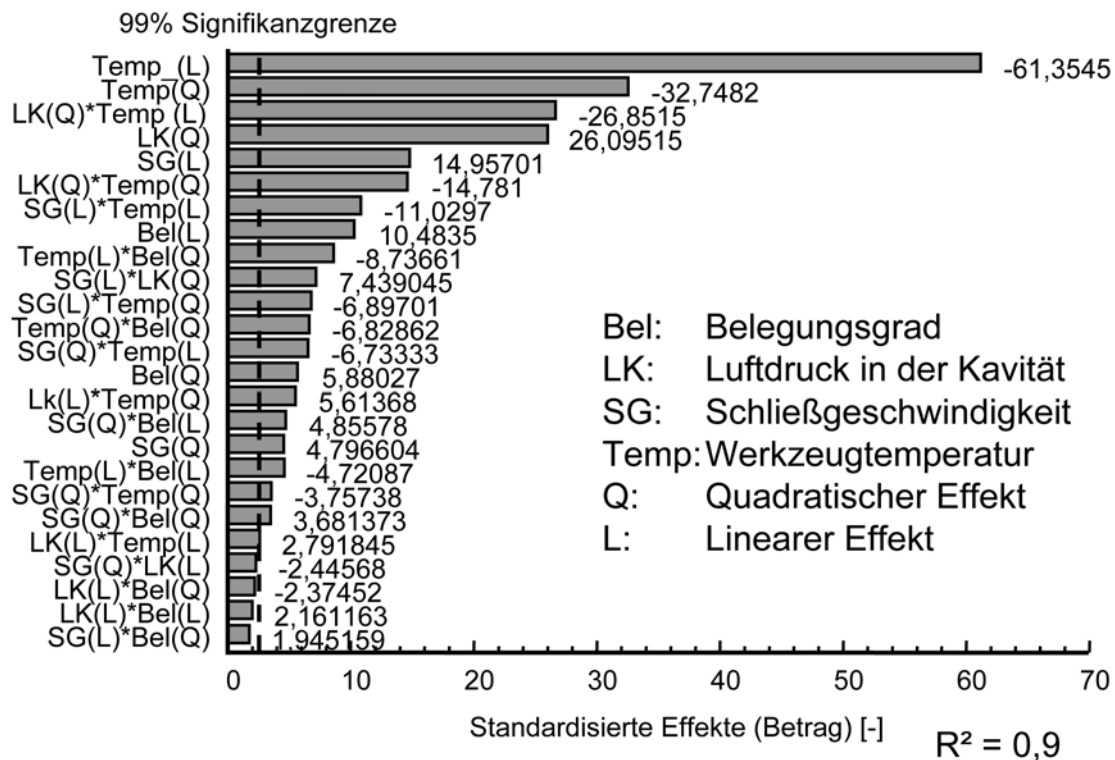


Bild 9: Pareto Diagramm der Effekte

5.2.1 Diskussion der einzelnen Effekte

Den Einfluss der einzelnen Effekte aus dem statistischen Versuchsplan kann mit Hilfe von kategorisierten 3D-Plots dargestellt und auf Plausibilität überprüft werden.

Temperatur und Luftdruck in der Kavität:

In Bild 10 sind die berechneten Einflüsse von Temperatur und Luftdruck in der Kavität auf die Porenhäufigkeit dargestellt. Bei dieser Darstellung werden die beiden anderen Parameter Belegungsgrad und Schließgeschwindigkeit konstant gehalten.

Die starke Krümmung der Fläche zeigt die ausgeprägten nichtlinearen Effekte dieser Parameter auf die Porenhäufigkeit. Es wird aus dem Diagramm deutlich, dass bei geringer Temperatur mehr Poren auftreten. Dies kann aufgrund der vorangegangenen Untersuchungen damit erklärt werden, dass eine geringere Werkzeugtemperatur während des Fließens die Randschichten des SMC weniger aufheizen. Damit ist nach dem theoretischen Ansatz aus Kapitel 4 die Widerstandskraft des SMC gegenüber Blasenschlupf höher, so dass die im SMC eingeschlossenen Gasblasen nicht in die Mitte des Bauteils fließen können. Eine höhere Werkzeugtemperatur führt demnach auch in den praktischen Versuchen zu weniger Blasen an der Bauteiloberfläche. Wird die Temperatur des Werkzeugs jedoch zu hoch, erhöht sich die Anzahl der Poren, da die Dampf-

drücke von Styrol und Wasser bei höheren Temperaturen stark steigen [29]. Demnach liegt die Vermutung nahe, dass die Poren bei höheren Temperaturen vermehrt durch Ausgasen der flüssigen Bestandteile des SMC am Ende des Fließvorgangs verursacht werden. Dies könnte auch der Grund sein, warum ein Anlegen von Vakuum nur einen sehr geringen Effekt auf die Porenanzahl bei höheren Temperaturen hat. Entstehen die Poren erst gegen Ende des Fließvorgangs bzw. während der Härtingsreaktion kann im Bauteil entstehendes Gas nur schwer entweichen. Da der Stempel zu diesem Zeitpunkt auf dem Material aufliegt und die Tauchkante bereits gegriffen hat, ist der Spalt, durch den das Gas entweichen könnte, weitgehend geschlossen.

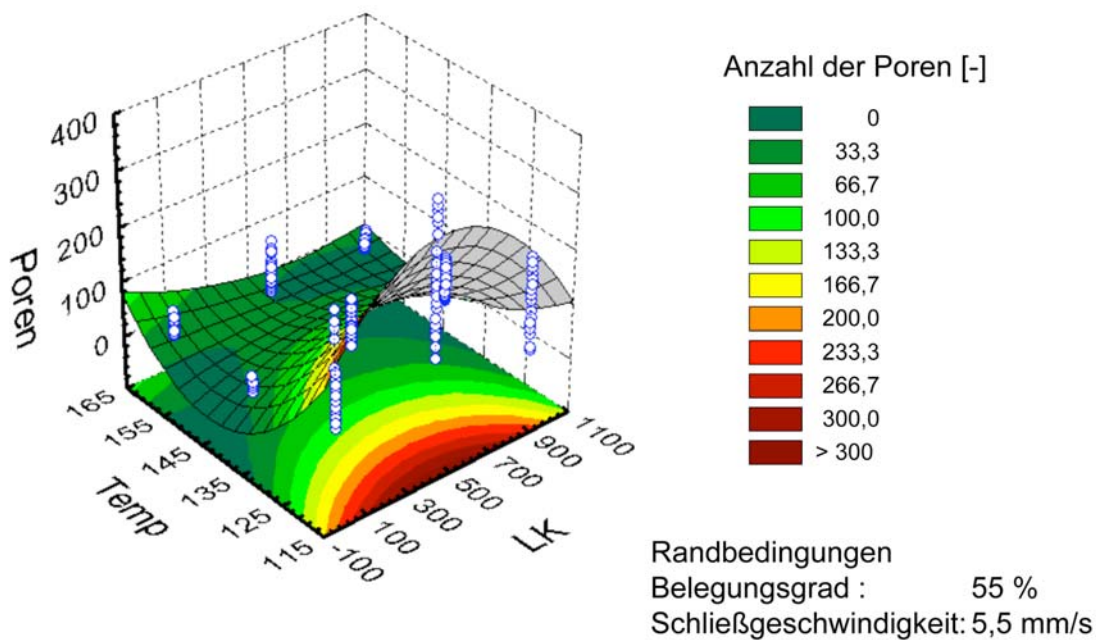


Bild 10: Einfluss von Temperatur und Luftdruck in der Kavität auf das Auftreten von Oberflächenporen

Bei geringer Temperatur hat die Verringerung des Luftdrucks in der Kavität den größten Einfluss auf das Auftreten von Poren an der Bauteiloberfläche. Im Bild 10 ist zu sehen, dass eine Verringerung des Luftdrucks in der Kavität die Anzahl der Poren an der Oberfläche bei geringer Werkzeugtemperatur zunächst erhöht. Dieses Ergebnis ist auch bei Veränderung der in dieser Darstellung konstant gehaltenen Prozessparameter zu sehen. Eine Erklärung dafür ist, dass aufgrund des Unterdrucks in der Kavität im SMC gelöstes Styrol ausgast und dadurch mehr Poren an der Oberfläche entstehen. Bei steigender Temperatur ist der Effekt geringer, da einerseits die Blasen aufgrund der geringeren Materialviskosität besser ins Innere des Bauteils fließen können und andererseits auch eher an der Oberfläche aufplatzen können. Bei einer vollständigen Evakuierung der Kavität platzen die Blasen an der Oberfläche auch auf, weshalb bei niedrigerem Druck in der Kavität die Porenanzahl an der Plattenoberfläche wieder zurückgeht.

Schließgeschwindigkeit und Belegungsgrad

Der Einfluss von Schließgeschwindigkeit und Belegungsgrad auf das Auftreten von Oberflächenporen kann wiederum durch das Modell erklärt werden. Ein geringer Belegungsgrad führt zu weniger Poren an der Bauteiloberfläche, da der Fließweg und die Fließzeit zunehmen. Insbesondere die Fließzeit hat dem Diagramm nach einen großen Einfluss auf das Auftreten von Poren:

Je länger das Material sich während des Fließens aufheizt desto geringer wird die Materialviskosität gegen Ende des Fließvorgangs. Eine geringe Viskosität führt zu einem höheren Blasenschlupf und damit zu weniger Oberflächenporen.

Zudem ist bei einem geringeren Belegungsgrad die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und der welligen Oberfläche des SMC-Zuschnitts geringer, so dass Lufteinschlüsse zwischen SMC-Zuschnitt und Werkzeugwand minimiert werden.

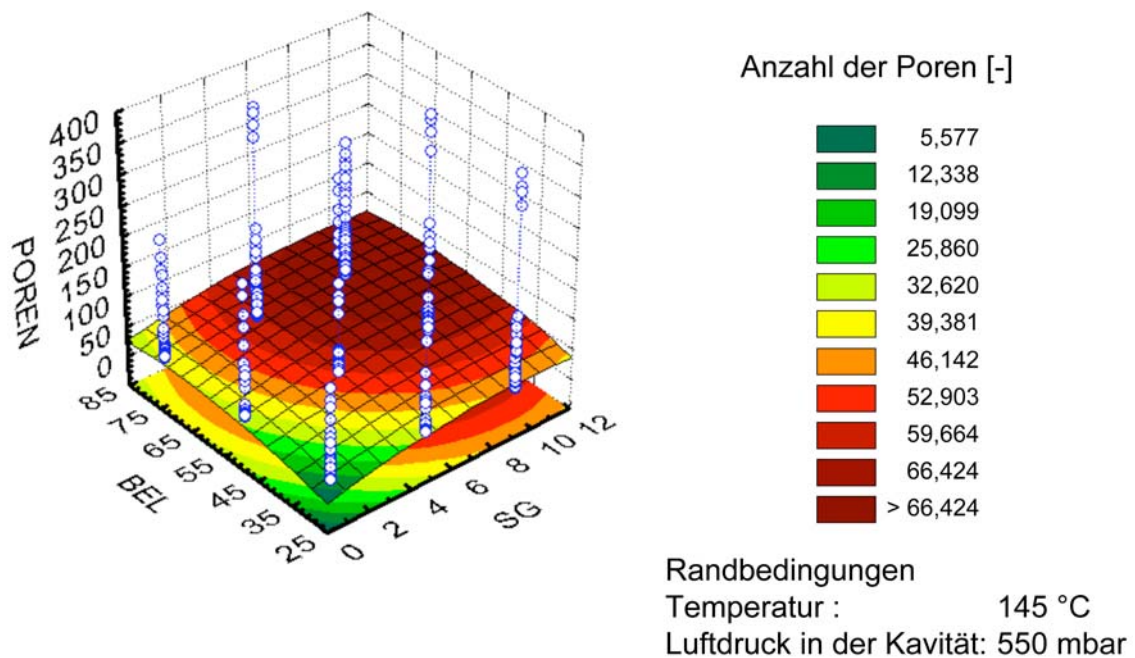


Bild 11: Einfluss von Schließgeschwindigkeit und Belegungsgrad auf das Auftreten von Oberflächenporen

Bei der Auswertung des statistischen Versuchsplans können demnach fast alle Effekte plausibel mit der Modellvorstellung erklärt werden. Lediglich der gefundene signifikante Einfluss des Luftdrucks in der Kavität bei geringer Werkzeugtemperatur sollte in weiteren Analysen näher untersucht werden. Hierfür ist neben einer Auswertung der Anzahl von auftretenden Oberflächenporen auch eine Analyse der Porengeometrie sinnvoll. Flachere Poren könnten durch die Decklackierung der Bauteile völlig geschlossen werden, so dass diese in der Praxis nicht nachteilig sein müssen.

Die optimale Prozesseinstellung wären der statistischen Analyse nach eine Temperatur von 150°C, ein geringer Belegungsgrad (30 %), ein geringer Luftdruck in der Kavität sowie eine geringe Schließgeschwindigkeit.

Die mit der statistischen Versuchsplanung gefundenen Auswirkungen der Effekte auf das Auftreten von Oberflächenporen an SMC-Bauteilen können plausibel physikalisch erklärt werden. Dabei können die meisten der Effekte mit Hilfe der Prozesssimulation, die mit dem erarbeiteten Modell erweitert wurde, vorhergesagt werden. Somit geben numerische Hilfsmittel dem Verarbeiter wichtige Informationen zur Prozessoptimierung im Hinblick auf die Oberflächeneigenschaften von SMC-Bauteilen.

6 FAZIT

Die hier dargestellten Untersuchungen haben gezeigt, dass Poren an der Oberfläche von SMC-Bauteilen gezielt reduziert werden können.

Da zur Zeit Gaseinschlüsse im SMC-Halbzeug herstellungsbedingt vorhanden sind, müssen vom Verarbeiter Strategien entwickelt werden, wie diese Gaseinschlüsse durch den Fließpressprozess von der Bauteiloberfläche weg fließen. Durch eine statistische Prozessanalyse wurde der Einfluss von Prozessgrößen wie Schließgeschwindigkeit, Werkzeugtemperatur, Belegungsgrad und dem Luftdruck in der Kavität auf das Auftreten von Oberflächenporen untersucht. Das beste Ergebnis im Hinblick auf Poren ist ein geringer Belegungsgrad bei (30 %) bei geringem Luftdruck und geringer Schließgeschwindigkeit und einer Werkzeugtemperatur von 150 ° C.

Bei der Prozessoptimierung muss der Einfluss der Prozessparameter jedoch auch im Hinblick auf weitere Bauteileigenschaften berücksichtigt werden, die innerhalb dieser Analyse nicht betrachtet wurden, wie z.B. mechanische Eigenschaften und Oberflächenwelligkeit.

Dabei liefert der Einsatz von Simulationsprogrammen wertvolle Informationen. Einerseits kann mit dem Simulationsprogramm MiniPRESS in Kombination mit dem erarbeiteten Modell der lokale Blasenschlupf in Abhängigkeit von Material und Prozessbedingungen vorhergesagt werden. Kommende Erweiterungen an MiniPRESS, insbesondere im Hinblick auf die Druckberechnung an der Fließfront und der Erweiterung der Berechnung auf komplexere Geometrien werden dieses Hilfsmittel noch weiter verbessern. Zudem kann eine Bauteilauslegung mit Hilfe des Simulationsprogramms EXPRESS eine Zuschnittsoptimierung sowie eine Vorhersage der lokalen Anisotropien und Eigenspannungen im Bauteil erfolgen. Damit ist der Verarbeiter in der Lage, bereits in der Konstruktionsphase des Bauteils mit der Optimierung des Fertigungsprozesses zu beginnen und spätere langwierige und teure Einfahrprozesse zu verkürzen.

Bei der Prozessanalyse haben die Eingangsdaten für die Prozesssimulation einen großen Einfluss auf das Simulationsergebnis. Insbesondere die Materialparameter müssen sehr sorgfältig und prozessnah charakterisiert werden. Hierbei stellt z.B. das am IKV entwickelte Pressrheometer eine technologisch handhabbare Möglichkeit zur Viskositätsdatenermittlung dar [14].

7 DANK

Die in diesem Bericht vorgestellten Untersuchungen wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) unter der Fördernummer 13944N finanziell gefördert. Der Firma Menzolit-Fibron GmbH, Bretten, danken wir für die Überlassung von Versuchsmaterial. Wertvolle Anregungen und Hinweise erhielten wir dankenswerterweise durch Gespräche mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses sowie der IKV Fachbeiratsgruppe „Verstärken“ und den Mitgliedern der Fördervereinigung des IKV.

8 LITERATUR

- [1] N. N. SMC/BMC: Design for Success, European Alliance for SMC, Frankfurt, 1997
- [2] Reimer, U.;
Esswein, G.;
Derek, H. Quo Vadis – SMC im Automobilbau
Kunststoffe 90 (2000) 7, S. 86 – 90
- [3] Hazen, R.J. Automotive Composites, Ray Publishing, Wheat Ridge
USA, 1997, S. 19-22
- [4] Zeiler, J. Pkw-Außenteile in SMC für Online Lackierung
Tagungshandbuch zur 2. AVK-TV-Tagung,
Baden-Baden, Oktober 1999, S. B 2 – 6
- [5] Hörsting, K.;
Recktenwald, K. Qualitätsicherung für Class A - Prozesskontrolle im
SMC-Prozess
Kunststoffe 91 (2001) 3, S. 41 – 43
- [6] Chen, A.C.;
Clark, J.P.;
Field, F.R. Economic aspects achieving class-A surface finish
in SMC body panels
Conference Proceedings Advanced Composite
Materials, Detroit, Michigan, 30. September, 1991,
S. 637 – 643
- [7] Rogal, S. SMC-Außenhautbauteile mit Class A-Oberflächen-
qualität - Am Beispiel des Heckdeckels des Mer-
cedes Benz CL Coupé
Tagungsunterlagen Kunststoffe im Automobil,
Mannheim, 5.-6. April, 2000, S. 131 – 140
- [8] Neitzel, M.;
Blinzler, M.;
Edelmann, K.;
Hoecker, F. Surface quality characterization of textile-
reinforced thermoplastics
Polymer Composites 21 (2000) 4, S. 630 – 635

- [9] Seefried, J. Class A Außenhautteile
Tagungsunterlagen Automotive Seminar,
18.-19. November, 1998, Beitrag 1-E
- [10] N. N. SMC paint manual - exterior body panels
SMC Automotive Alliance, Southfield, Michigan,
USA, 1994
- [11] Bledzki, A.K.;
Hermann, A. Einfluß von Verarbeitungsparametern auf die
Oberflächenqualität bei lackierten SMC-Bauteilen
Plastverarbeiter 46 (1995) 1, S. 26 – 29
- [12] Dyckhoff, J.H Resin Transfer Moulding: Beitrag zur Verbesse-
rung der Formteilerflächenqualität
Technisch Wissenschaftlicher Bericht, Verlag
Mainz, Aachen, 1995, ISBN 3-86073-444-X
- [13] Stachel, P. Standortbestimmung SMC Technologie
Tagungsumdruck zur 7. Internationalen AVK-TV
Tagung, Baden-Baden, 2004
- [14] Ritter, M. Materialcharakterisierung von langfaserverstärkten
Pressmassen und Beschreibung des Presspro-
zesses durch Simulation und Messung des Kraft-
schwerpunktverlaufs
Technisch wissenschaftlicher Bericht, Verlag
Mainz, Aachen, 2003, ISBN: 3-86130-482-1
- [15] Michaeli, W.;
Ritter, M. Quality assurance in GMT processing
Macromolecular Materials and Engineering
284/285, Wiley-VCH, 2000
- [16] Michaeli, W.;
Ritter, M. Qualitätsüberwachung bei der Pressverarbeitung
Tagungsband zur 3. AVK-TV Tagung, Baden-
Baden, 2001, S.: 1 – 9
- [17] Michaeli, W.;
Ritter, M. Quality assurance system based on the process
simulation for the compression molding process,
Tagungsband SAMPE 2002, SPE, Long Beach,
Californien, USA, S.: 1330 – 1338
- [18] Schmachtenberg, E.;
Skrodolies, K. Vermeidung von Oberflächenporen an SMC-
Bauteilen
Tagungsunterlagen zur 8. Internationalen AVK-TV
Tagung, Baden-Baden, 2005
- [19] Körner, S. Theoretische und experimentelle Untersuchung
der fluiddynamischen und thermodynamischen
Ungleichgewichte reibungsbehafteter Flüssig-
keit/Gas-Strömungen durch enge Spalte
Technisch wissenschaftlicher Bericht, Kopie &
Druck Oppermann, Hildesheim, 2003

- [20] Bird, R., B. Transport Phenomena
John Wiley & Sons, New-York, USA, 1960
- [21] Carreau, P.J. Rheological Equations from Molecular Network
Theories
Dissertation an der University of Wisconsin,
Madison, 1968
- [22] Williams, M.L.;
Landel, R.F.;
Fery, J.D. The Temperature Dependence of Relaxation
Mechanisms in Amorphous Liquids
Journal of the American Chemical Society, 77
(1955) 7, S.: 3701-3706
- [23] Osswald, T. Numerical methods for compression mold filling
simulation
Dissertation an der University of Illinois at
Urbana-Champaign, 1987
- [24] Schröder, W. Fluidmechanik
Verlag Mainz, Aachen, 1999 ISBN: 3-86073-803-3
- [25] Baehr, H.D.;
Stephan, K. Wärme- und Stoffübertragung
Springer Verlag, Berlin, 1998
- [26] Brandt, M. Entwicklung eines nichtisothermen Simulations-
moduls für das FDM-Programm MiniPRESS
Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen,
unveröffentlichte Diplomarbeit, 2001. – Betreuer:
M. Ritter
- [27] Nölke, M. Experimentelle und rechnerische Untersuchung
des Kraftbedarfs beim Pressen faserverstärkter
thermoplastischer Formmassen
Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen,
unveröffentlichte Studienarbeit, 1996. – Betreuer:
Starke, Heber, Oelgarth, Semmler
- [28] Klepper, W. Taschenbuch Versuchsplanung
Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [29] Wypych, G. Knovel Solvents - A Properties Database
ChemTec Publishing, Toronto, Kanada. 2000

Schlagworte:

Fließpressen, Fließverhalten, Langfaserverstärkte Kunststoffe Lunker, Oberflächeneigenschaften, Poren, Prozesssimulation, Sheet Moulding Compound (SMC)

Kontakt:

Institut für Kunststoffverarbeitung Aachen
Pontstr. 49
52062 Aachen

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. W. Michaeli
Dipl.-Ing. K. Skrodolies

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. G.W. Ehrenstein
Prof. Dr. T. Osswald

Erscheinungsdatum: Juli 2006