

Theoretische Untersuchung des Kalandrierens von Polymeren

Theoretical examination of the calendering of polymers

U. Gruber, D. Mewes,
Hannover/Germany



Für das Kalandrieren unvernetzter Polymere wird die Beeinflussung der Geschwindigkeits- und Temperaturfelder durch die Temperierung der Walzen und deren Friktion untersucht. Das Fließgesetz wird durch die Gleichung von Vinogradov und Malkin angenähert und die dissipative Erwärmung der Schmelze wird berücksichtigt. Hierzu werden die differentiellen Bilanzgleichungen mit Hilfe eines implizierten Differenzenverfahrens gelöst. Für den Kalander- spalt ergeben sich der maximale Druck und die dissipierte Leistung als Funktionen der wesentlichen Betriebsparameter. Die berechneten Zu- sammenhänge lassen sich mit Hilfe einfacher empirischer Gleichungen für den Gebrauch des projektierenden Ingenieurs darstellen.

1 Einleitung

Unvernetzte Polymere, wie z.B. Kautschuk oder Kunststoffe in geschmolzener oder gelöster Form, besitzen Fließeigenschaften, die sich von denen newtonscher Fluide unterscheiden. Beim Kalandrieren werden sie zwischen zwei Walzen gefördert, gemischt und zu dünnen Schichten ausgeformt. Die Walzen besitzen parallele Achsen und rotieren in entgegengesetzter Richtung. Wegen der hohen Viskosität erwärmen sich die Polymere während des Kalandrierens durch innere Reibung. Durch Temperieren der Walzen kann Wärme zu- oder abgeführt werden. Unterschiedliche Umfangsgeschwindigkeiten der Walzen führen zur Friktion der Fluide im Walzspalt und bedingen deren zusätzliche dissipative Erwärmung. Da die Viskosität von Polymeren von der Temperatur abhängt, wird das Geschwindigkeitsfeld im Kalanderspalt vom Temperaturfeld stark beeinflusst.

Die Geschwindigkeits- und Temperaturfelder lassen sich im Kalanderspalt aus den differentiellen Bilanzgleichungen für die Masse, den Impuls und die Energie ermitteln. Da die Geschwindigkeits- und Temperaturprofile im Kalanderspalt bisher nicht experimentell ermittelt wurden, hat Gruber [1] die bekannten theoretischen Untersuchun-

The authors examine the effect of roll temperature and friction ratio on the speed and temperature profiles which occur when un-crosslinked polymers are calendered. The flow law is approximated by the Vinogradov and Malkin equation and the dissipative heating of the melt taken into consideration. Here, the differential balance equations are solved with the help of an implicit differential method. The maximum pressure and the dissipated energy for the calender nip are obtained as a function of the important operating parameters. The calculated relationships can be represented by simple, empirical equations for use by the planning engineer.

1 Introduction

Un-crosslinked polymers such as rubber or polymers in the melted or dissolved state exhibit non-Newtonian flow. When these materials are passed through a calender two calender rolls mix them and squeeze them out into thin layers. Calender rolls have parallel axes and rotate in opposite directions. Because of their high viscosity, the polymers are heated up during calendering through internal friction. Calender rolls can be heated as well as cooled. Different roll speeds cause the melt in the calender nip to be subjected to friction and to experience additional dissipative heating. Since the viscosity of polymers depends on the temperature, the velocity profile in the calender nip is influenced by the overall temperature conditions.



Prof. Dr.-Ing. Dieter Mewes

Jahrgang 1940, leitet seit 1982 das Institut für Verfahrenstechnik der Universität Hannover. Er studierte an der TU Berlin Maschinenbau/Verfahrenstechnik und promovierte im Jahre 1970. Nach beendeter Habilitation für Verfahrenstechnik war er von 1973 bis 1982 für die Firma Degussa in leitenden Positionen im In- und Ausland tätig.

has been head of the Institute of Process Technology at the University of Hannover since 1982. He graduated from the Technical University of Berlin with the degree of Diplomingenieur in Mechanical Engineering in 1966. In 1970 he completed his Dr.-Ing. Examination in Chemical Engineering. After his habilitation for "Verfahrenstechnik" in 1972 he started at Degussa AG in Frankfurt.

Velocity and temperature profiles in the calender nip can be determined from the differential balance equation for mass, impulse and energy. Since the velocity and temperature profiles in the calender nip have not, so far, been determined experimentally, Gruber [1] summarised the known theoretical investigations in Table 1, with critical comments. In many published results a viscosity that is independent of temperature is

gleichungen vorgestellt, mit denen der maximale Druck im Kalanderspalt und die Antriebsleistung der Walzen berechnet werden kann. Diese Gleichungen wurden durch Korrelation der numerischen Lösungen ermittelt. Damit berechnet sich der maximale Druck im Walzenspalt zu:

$$\frac{P_{\max} h_0^{1.5-2\alpha} A_2}{r_1^{0.8} (\eta_0 \Omega r_1)^{1.2\alpha}} = 6.65 \left(\frac{\eta_w}{\eta_0} \right)^{1.2\alpha} (h_a^* - 1)^{0.75} \left(\frac{5}{3} h_a^* \right)^{0.5} \left(\frac{r_2/r_1 - 1}{2} \right)^{0.5} \left(\frac{1-f}{2} \right)^{0.5}$$

Die Genauigkeit dieser Näherungsgleichung ist in Abb. 8 dargestellt.

Die im Kalanderspalt dissipierte Leistung ist gleich der Antriebsleistung der Kalanderwalzen. Diese lässt sich näherungsweise durch die Gleichung

$$\frac{A_2 P_{\text{diss}}}{br^2 \eta_0^{1.5-2\alpha} \Omega^{1.2\alpha}} = 21.7 \left(\frac{\eta_w}{\eta_0} \right)^{1.2\alpha} h_a^* (h_a^* - 1)^{0.75} \left(\frac{r_2/r_1 - 1}{2} \right)^{0.5} Ge^{0.5-2\alpha}$$

berechnen. Die Genauigkeit dieser Näherungsgleichung ist in Abb. 9 dargestellt.

■ Rh

parameters are the maximum pressure in the calender nip and the drive power of the rolls. Analytical equations can be given for the flow of Newtonian liquids in the calender nip, but this is not possible for non-Newtonian liquids. Here, we introduce two approximation equations which enable the maximum nip pressure and the drive power of the rolls to be calculated. These equations were formulated by correlating the numeric solutions. With these one can calculate the maximum nip pressure:

$$\frac{P_{\max} h_0^{1.5-2\alpha} A_2}{r_1^{0.8} (\eta_0 \Omega r_1)^{1.2\alpha}} = 6.65 \left(\frac{\eta_w}{\eta_0} \right)^{1.2\alpha} (h_a^* - 1)^{0.75} \left(\frac{5}{3} h_a^* \right)^{0.5} \left(\frac{r_2/r_1 - 1}{2} \right)^{0.5} \left(\frac{1-f}{2} \right)^{0.5}$$

The energy dissipated in the calender nip equals the drive power of the calender rolls. This can be calculated approximately:

$$\frac{A_2 P_{\text{diss}}}{br^2 \eta_0^{1.5-2\alpha} \Omega^{1.2\alpha}} = 21.7 \left(\frac{\eta_w}{\eta_0} \right)^{1.2\alpha} h_a^* (h_a^* - 1)^{0.75} \left(\frac{r_2/r_1 - 1}{2} \right)^{0.5} Ge^{0.5-2\alpha}$$

The accuracy of this equation is shown in Fig. 9. ■ Rh

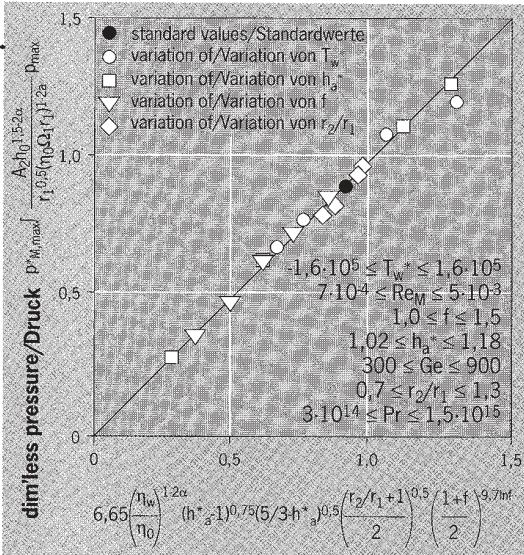


Abb. 8: Vergleich des mit der Näherungsgleichung (erste auf dieser Seite) berechneten maximalen Drucks im Kalanderspalt mit den Ergebnissen der numerischen Untersuchungen

Fig. 8: Comparison between the maximum pressure in the calender annulus calculated in approximation with equation (first on this page) and the numerical results

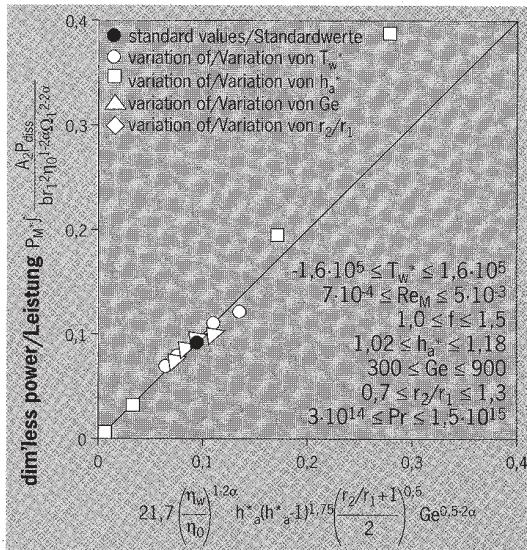


Abb. 9: Vergleich der mit der Näherungsgleichung (zweite auf dieser Seite) berechneten dissipierten Leistung mit den Ergebnissen der numerischen Untersuchungen

Fig. 9: Comparison between the dissipation calculated with equation (second on this page) and the numerical results

Tabelle 2: Symbole, Indizes
Table 2: Symbols, Indices

Symbole/Symbols, Einheit/Dimension, Bedeutung/Signification		
$A_{1,2}$	Pa [*]	Konstante
a_t		Temperaturverschiebungsfaktor
b	m	Breite der kalandrierten Folie
c	Jkg ⁻¹ K ⁻¹	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
F		allgemeine Funktion
h	m	Höhe des Spalts zwischen den Walzen
h_0	m	Höhe des Kalanderspalts an der engsten Stelle
h^*		dimensionslose Höhe des Spalts zwischen den Walzen
n		Fließindex
$n_{1,2}$	s ⁻¹	Drehzahl einer Walze
p	Pa	Druck
P	W	Leistung
r	m	Radius einer Kalanderwalze
s	m	Abstand zwischen einer Walze und der Symmetrieachse
T	K	Temperatur
T_g	K	Glastemperatur
T_s	K	Standardtemperatur
T_0	K	Temperatur der dem Kalanderspalt zugeführten Polymerschmelze
T^*		dimensionslose Temperatur
α		Konstante
γ	s ⁻¹	Schergeschwindigkeit
w_x, w_y	m s ⁻¹	Komponente der Geschw. in Richtung der x- bzw. y-Koordinaten
x	m	horizontale Koordinate
y	m	vertikale Koordinate
η	Pa s	dynamische Viskosität
$\eta_0(n)$	Pa s	dynamische Viskosität bei T_0 und Schergeschwindigkeit Null
λ	W(mK) ⁻¹	Wärmeleitfähigkeit
ρ	kg m ⁻³	Dichte
φ	Rad	Winkel
Ω	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit der Kalanderwalzen
Indizes/Indices, Bedeutung/Significance		
a		Austritt aus dem Kalanderspalt
diss		dissipiert
e		Eintritt in den Kalanderspalt
w		an der Walzenoberfläche
x, y		in x-, y-Richtung
0		Zustand am Eintritt in den Kalander
1		untere Walze
2		obere Walze

This is an extract of the complete reprint-pdf, available at the Applied Rheology website
<http://www.appliedrheology.org>

This is an extract of the complete reprint-pdf, available at the Applied Rheology website
<http://www.appliedrheology.org>