

ANWENDUNG EINER ALLGEMEINEN VISKOSITÄTS- GLEICHUNG ZUR BESTIMMUNG DER VOM GERÄT UNABHÄNGIGEN RHEOLOGISCHEN PARAMETER, II

Von

L. HALÁSZ und I. MONDVAI

Lehrstuhl für Kunststoff- und Gummiindustrie, Technische Universität, Budapest
(Eingegangen am 25. Februar 1969)

Vorgelegt von Prof. Dr. GY. HARDY

Versuchsmaterial

Zu den Untersuchungen wurden Hochdruckpolyäthylene verwendet, und zwar die tschechischen Erzeugnisse Bralen FA 7-16 und Bralen FB 4-18, sowie die sowjetischen Erzeugnisse P 2010 V und P 2020 T. Die Eigenschaften dieser Produkte sind in Tabelle I zusammengefaßt.

Tabelle I

Eigenschaften der verwendeten Polyäthylene

Produkt	Dichte g/ml					Melt-Index g/10 Min.
	20 °C	150 °C	165 °C	180 °C	200 °C	
Bralen FA 7-16	0,918	0,797	0,783	0,772	0,753	5,00
Bralen FB 4-18		0,829	0,817	0,809	0,779	2,32
P 2010 V	0,920	0,803	0,786	0,775	0,756	0,68
P 2020 T		0,834	0,827	0,823	0,817	0,76

Plastometrische Messungen

Die Kolbendüsen-Plastometer sind Kapillarviskosimeter, in denen die Schmelze des Polymeren aus dem erhitzten Behälter durch einen Kolben unter einem bestimmten Druck durch eine Kapillare mit dem Radius r und der Länge L gedrückt wird. In der Regel wird der Druckabfall in der Kapillare und die Ausflußgeschwindigkeit (die während der Messung ausgeflossene Stoffmenge) bestimmt. Bei der Beschreibung des Fließprozesses in der Kapillare [1] wird folgendes vorausgesetzt: Die Strömung ist stationär; die Geschwindigkeit hat nur eine axiale Komponente, die von der Entfernung von der Achse abhängt; das Material gleitet nicht an der Kapillarenwand; die Kapillare ist genügend lang und die Endwirkungen können vernachlässigt werden; die Schmelze des Polymeren ist nicht kompressibel; im System herrschen isotherme

Bedingungen und der Druckabfall nimmt keinen merklichen Einfluß auf die Viskosität.

Im allgemeinen Fall erhält man die Schubspannung in der Kapillare aus der in einem zylindrischen Koordinatensystem aufgeschriebenen z -gerichteten Komponente der Impuls- oder Bewegungsgleichung:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{r,z}). \quad (1)$$

Wird diese Gleichung unter Berücksichtigung des Umstandes integriert, daß aus Symmetriegründen $\tau(0) = 0$ ist, so gelangt man zum Ausdruck

$$\tau_{r,z} = \frac{r}{2} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right). \quad (2)$$

Dieser allgemeine Ausdruck ist von der stofflichen Beschaffenheit der Flüssigkeit unabhängig. Werden die Indexe weggelassen und wird an Stelle des partialen Differentialis die Differenz eingesetzt, so ergibt sich der Zusammenhang

$$\tau = \frac{r}{2} \frac{\Delta P}{L}. \quad (3)$$

Zur Konstruktion der Fließkurven ist die Kenntnis der zusammenhängenden τ - $\dot{\gamma}$ -Werte notwendig. Auf Grund der Gleichung (2) ergibt sich für die Schubspannung an der Kapillarenwand:

$$\tau_f = \frac{R}{2L} \Delta P. \quad (4)$$

Die zu diesen Schubspannungen gehörenden Schergeschwindigkeiten können im allgemeinen Fall mit der RABINOWITSCH-Gleichung [2] bestimmt werden:

$$\dot{\gamma}_f = \frac{1}{\pi R^3} \left[3Q + \Delta P \frac{dQ}{d(\Delta P)} \right]. \quad (5)$$

Beim Strömen von Polymerschmelzen durch Kapillaren sind die oben angeführten Bedingungen nicht vollständig gültig. Folgendes muß berücksichtigt werden:

a) *Eintritts- und Endwirkungen.* Beim Eintritt in die Kapillare konvergieren die Strömungslinien, beim Austritt divergieren sie. Diese Prozesse gehen mit Energieverlusten einher, was auch bei nicht elastischen NEWTONSchen Flüssigkeiten üblicherweise berücksichtigt wird. Im Falle nicht-NEWTONScher

Flüssigkeiten können als Ergebnis der Relaxationsvorgänge des viskoelastischen Stoffes weitere Energieverluste auftreten. Man berücksichtigt diese Effekte meistens mit der Einführung solcher Korrekturfaktoren, durch die die tatsächliche Rohrlänge auf eine äquivalente Rohrlänge ergänzt wird.

BAGLEY [3] berücksichtigte die Endwirkung durch Einführung des Faktors N in die Gleichung (4):

$$\tau_f = \frac{\Delta P}{2[(L/R) + N]}. \quad (6)$$

PHILIPPOFF und GASKINS [4] faßten die Endkorrektur N als Summe eines viskosen und eines elastischen Gliedes auf:

$$N = m_v + m_r. \quad (7)$$

Die meisten Autoren betrachten den Wert von m_v als Konstant, während m_r , die reversible Deformation, von der Schergeschwindigkeit abhängt. Aus diesem Grund hängt auch der Wert N von der Deformation ab [5]. SCHOTT [6] ergänzt die rechte Seite der Gleichung (7) mit einem, vom Eintrittswinkel in die Kapillare und von der Temperatur abhängigen weiteren Glied m_b .

Zur Beseitigung der Eintritts- und Endwirkungen wandten METZGER und BRODKEY [7] einen Differentialzusammenhang an:

$$\tau_f = \frac{1}{2} \left[\frac{d(\Delta P)}{d(L/R)} \right]. \quad (8)$$

Auf Grund dieser Gleichung kann man bei der graphischen Darstellung des Zusammenhanges $\Delta P - L/R$ aus dem Anstieg der erhaltenen Geraden die mit den Endwirkungen korrigierte Schubspannung berechnen.

b) *Wirkung des Gleitens.* BENBOW und Mitarb. [8] haben nachgewiesen, daß die Annahme der Gleitfreiheit ungerechtfertigt ist. Wird die Schergeschwindigkeit aus den in zwei Kapillaren von unterschiedlichem Durchmesser und gleicher Länge bei gleichen Schubspannungen gemessenen Daten ermittelt, so kann der Gleiteffekt ausgeschaltet werden.

c) *Druckverluste vor der Kapillare.* Aus dem Behälter des Plastometers wird die Schmelze durch einen Kolben durch die Kapillare gedrückt. Druckverluste treten auch im Behälter sowie im Spalt zwischen dem Kolben und der Behälterwand auf. HARHAN und MC. GLAMERY [9] haben die Abhängigkeit dieser Verluste von den Abmessungen des Behälters, der Kapillare sowie der Schergeschwindigkeit eingehend untersucht und bei Polyolefinen gefunden, daß sie dem Verhältnis zwischen dem Durchmesser der Kapillare (D_k) und des Behälters (D_t) proportional sind. Bei einem Quotienten von $D_t/D_k > 5$ liegen die Verluste unter 10%, nehmen bei Werten von $D_t/D_k < 3$ jedoch rapid zu.

Bei normmäßigen Meltindex-Bestimmungsgeräten liegen die Verluste bei etwa 13%. Der so entstehende kleine Fehler kann mit der Anwendung enger Kapillaren und des Differentialverfahrens wesentlich herabgesetzt werden.

d) *Nichtstationäre Strömung.* Den Fließvorgang in Plastometern als Funktion der Zeit haben mehrere Autoren untersucht [10–13]. Wie die Ergebnisse zeigten, nimmt die Ausflußgeschwindigkeit vom Augenblick der Belastung an etwa 5 Minuten lang ab, um dann 20 Minuten lang allmählich zuzunehmen; dann stellt sich der stationäre Zustand ein. Die Erscheinung wird durch die elastischen Eigenschaften des Polymeren und durch die Abnahme der Menge der Schmelze erklärt. Mit entsprechend konstruierten Geräten lassen sich die auf diese Erscheinung zurückführbaren Fehler reduzieren.

Andere Faktoren, wie z. B. die nicht-isothermen Bedingungen, die Wirkung der kinetischen Energie und der Turbulenz, die Kompressibilität der Schmelze sowie die Druckabhängigkeit der Viskosität verursachen in entsprechend konstruierten Plastometern keine wesentlichen Fehler.

Bei unseren Berechnungen haben wir die Schergeschwindigkeiten auf Grund der Gleichung (5) und die tatsächlichen Schubspannungen mit Hilfe der Gleichung (8) bestimmt. Der zur Berechnung der reduzierten Variablen notwendige η_0 -Wert kann nach der Methode von WINOGRADOW und PROSOROWSKAJA [14], durch Extrapolieren der $\log 1/\eta - \tau$ Geraden auf $\tau = 0$ bestimmt werden.

Die Messungen wurden mit einem Kolbendüsen-Plastometer der Firma Irodagépipari és Finommechanikai Vállalat durchgeführt. Der Kolben wurde außer der normmäßigen Belastung im Bereich von 0,2–50 kp mit verschiedenen Gewichten belastet. Zu den Messungen wurden zwei Kapillaren verwendet:

$$\begin{array}{ll} L_1 = 7,8 \text{ mm} & L_2 = 7,8 \text{ mm} \\ D_1 = 2,024 \text{ mm} & D_2 = 1,150 \text{ mm} \end{array}$$

Unter gleichen Bedingungen wurden 5 parallele Bestimmungen durchgeführt. Gerechnet wurde nach Weglassen des größten und kleinsten Wertes mit dem arithmetischen Mittel der erhaltenen 3 Werte.

Messungen mit dem Höpplerschen Konsistometer

Zur Aufnahme der Fließkurven von Polymer-Schmelzen wird die Meßeinrichtung II verwendet. Während der Messung wird die in einem temperierten Gefäß befindliche Schmelze mit einem konischen Kolben durch den ringförmigen Spalt zwischen dem Kolben und der Gefäßwand gedrückt. Zur Vorrichtung wird der folgende Zusammenhang angegeben [15]:

$$\eta = \frac{Gt}{s} K, \quad (9)$$

worm η die Viskosität (cP), G die Belastung (p), t die Zeit (sec), s die Weglänge (cm) und $K = 100$ (cP cm p⁻¹ sec⁻¹) bedeuten.

Zur Bestimmung der reduzierten Viskosität—reduzierten Schergeschwindigkeit ist dieser Zusammenhang nicht geeignet, da er nicht die Schubspannung und Schergeschwindigkeit, sondern diesen proportionale Größen enthält. Die Schubspannung und Schergeschwindigkeit ändern sich im Spalt zwischen Gefäßwand und Kolben mit der Änderung des Querschnittes des Ringspaltes, können jedoch im Abschnitt mit konstantem Querschnitt als konstant betrachtet werden. Wie aus Abb. 1 hervorgeht, ist bei der Bestimmung in der Schub-

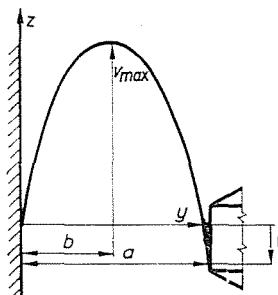


Abb. 1. Geschwindigkeitsverteilung im Höpplerschen Konsistometer

spannung die Geschwindigkeitsverteilung im Spalt mit konstantem Querschnitt in erster Näherung parabolisch. Der ruhende viskoelastische Stoff wird durch den Kegel durch den konischen ringförmigen Spalt gedrückt. Dabei liegt die Spitze des Geschwindigkeitsprofils gefäßseitig, da die Geschwindigkeit des Kegels auf die Geschwindigkeit des viskoelastischen Stoffes wirkt.

Die Schergeschwindigkeit kann ähnlich berechnet werden, wie die von SELBY und HUNSTAND angegebene Methode [16]. Die Gleichung der Parabel ist wie folgt:

$$(y - b)^2 = -(b^2/v_{\max})(v_z - v_{\max}): \quad (10)$$

$$v_z = V \text{ wenn } y = a$$

$$v_z = 0 \text{ wenn } y = 0$$

$$v_z = 0 \text{ wenn } y = 2b$$

$a = R_1 - R_2$, V = Geschwindigkeit des Meßkegels, R_1 = Radius des Gefäßes, R_2 = Radius des Meßkegels.

Aus der Gleichung (10) ergibt sich für v_z :

$$v_z = v_{\max} \{1 - [(y - b)^2/b^2]\}. \quad (11)$$

Verwendet man die Gleichung (11) für die Stelle $y = a$, so ergibt sich:

$$V = v_{\max} \{1 - [(a - b)^2/b^2]\}. \quad (12)$$

Wird aus diesem Zusammenhang der Wert von v_{\max} ausgedrückt und in die Gleichung (11) eingesetzt, so ergibt sich:

$$v_z = V \left[1 - \frac{(y-b)^2}{b^2} \right] / \left[1 - \frac{(a-b)^2}{b^2} \right]. \quad (13)$$

Die Schergeschwindigkeit erhält man aus dem Geschwindigkeitsgradienten:

$$\frac{dv_z}{dy} = \dot{\gamma} = \frac{2V(y-b)}{a(a-2b)}. \quad (14)$$

Die Schergeschwindigkeit auf der Oberfläche des Meßkegels (maximale Schergeschwindigkeit) ist:

$$\dot{\gamma}_f = \frac{2V(a-b)}{a(a-2b)}. \quad (15)$$

Die Bestimmung von b kann auf Grund des Kontinuitätsprinzips erfolgen:

$$Q = VR_2^2 \pi \quad (16)$$

$$Q = 2\pi \int_0^a (R_1 - y) v_z dy, \quad (17)$$

Q = Volumenstrom. Setzt man die rechten Seiten der beiden Gleichungen gleich, so ergibt sich:

$$-VR_2^2 = 2 \int_0^a (R_1 - y) v_z dy. \quad (18)$$

Die Durchführung der Integration führt — unter Berücksichtigung der Gleichung (13) — zu dem Zusammenhang

$$-VR_2^2 = \frac{2V}{12b^2 \left[1 - \frac{(a-b)^2}{b^2} \right]} (12bR_1a^2 - 4R_1a^3 - 8a^3b + 3a^4). \quad (19)$$

Wird für R_1 der Ausdruck $(R_2 + a)$ eingesetzt und die erhaltene Gleichung nach b aufgelöst, so ergibt sich

$$b = \frac{a(a^2 + 4aR_2 + 6R_2^2)}{4(a^2 + 3aR_2 + 3R_2^2)}. \quad (20)$$

Das Einsetzen von Gleichung (20) in Gleichung (15) führt zu dem Zusammenhang

$$\dot{\gamma}_f = V \frac{3R_1(R_1 + R_2) - (R_1 - R_2)R_2}{(R_1 - R_2)^2(R_1 + R_2)} \quad (21)$$

und mit den entsprechenden Zahlenwerten zu dem Ergebnis

$$\dot{\gamma}_f = 295 V, \quad (22)$$

wobei man $\dot{\gamma}_f$ in sec^{-1} erhält, wenn V in cm sec^{-1} eingesetzt wird.

Die Schubspannung kann auf Grund des Kräftegleichgewichtes bestimmt werden. Das Gleichgewicht besteht zwischen den Kräften (Reibungskraft auf der Oberfläche des Meßkörpers, hydrostatischer Druck und Belastung), die auf den sich gleichmäßig bewegendenden Meßkörper wirken:

$$G = 2\pi R_2 L \tau_f + \pi R_2^2 p, \quad (23)$$

wobei τ_f die Schubspannung auf der Oberfläche des konischen Meßkörpers, L die Länge des ringförmigen Spalts und p den hydrostatischen Druck bedeuten. Für den hydrostatischen Druck gilt nach BIRKEMANN [17]:

$$p = \frac{4L \eta V}{(R_1^2 + R_2^2) \ln R_1/R_2 - (R_1^2 - R_2^2)}. \quad (24)$$

Wird V aus Gleichung (21) ausgedrückt und in Gleichung (24) eingesetzt und an Stelle von $\eta \dot{\gamma}_f$ der entsprechende τ_f -Wert geschrieben, so erhält man für p :

$$p = \frac{4L \tau_f (R_1 - R_2)^2}{3R_1 (R_1 + R_2) \ln R_1/R_2 - (R_1^2 - R_2^2)}. \quad (25)$$

In der Praxis ist $3R_1(R_1 + R_2) \gg (R_1 - R_2)R_2$, daher wurde der letztere Wert bei der Ableitung aus Gleichung (21) weggelassen.

Die Substitution von Gleichung (25) in Gleichung (23) führt zum Zusammenhang

$$\tau_f = \frac{G}{2\pi R_2 L} \left\{ \frac{3R_1 \left[(R_1^2 + R_2^2) \ln \frac{R_1}{R_2} - (R_1^2 - R_2^2) \right]}{3R_1 \left[(R_1^2 + R_2^2) \ln \frac{R_1}{R_2} - (R_1^2 - R_2^2) \right] + 2R_2 (R_1 - R_2)^2} \right\} \quad (26)$$

und mit den entsprechenden numerischen Werten zum Ergebnis

$$\tau_f = 0,248 G, \quad (27)$$

wobei die Dimension von τ_f kp cm^{-2} ist, wenn G in kp eingesetzt wird.

Versuchsergebnisse

Die auf Grund des Zusammenhangs (9) aus den mit dem HÖPPLERSCHEN Konsistometer erhaltenen Meßdaten berechneten Fließkurven sind in Abb. 2 gezeigt. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die mit dem Plastometer erhaltenen

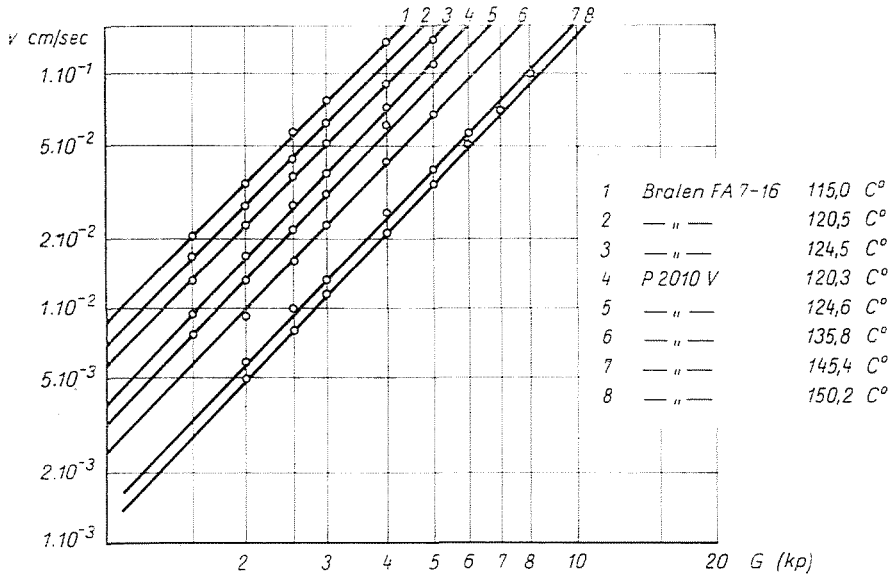


Abb. 2. Mit dem Höpplerschen Konsistometer erhaltene Fließkurven

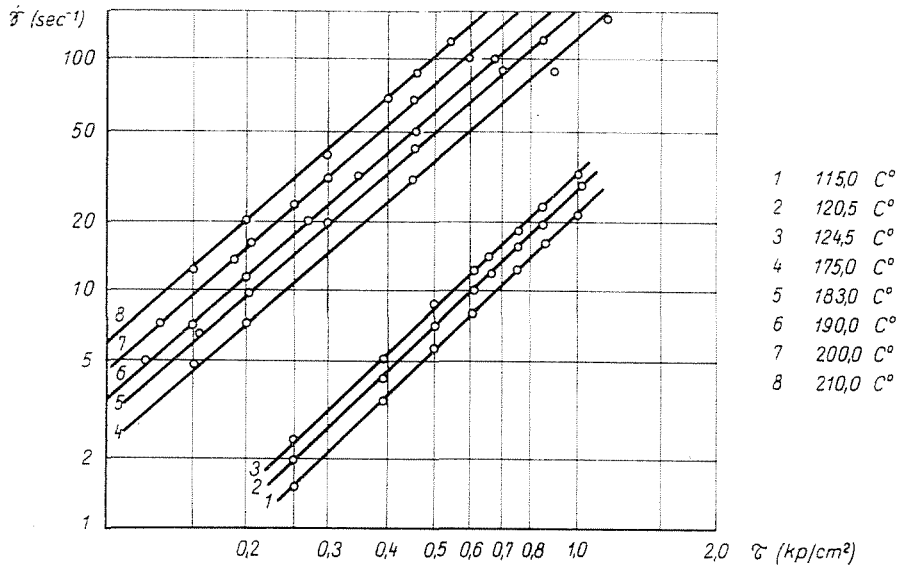


Abb. 3. Fließkurven von Bralen FA 7-16 Polyäthylen

sowie die mit dem HÖPPLERSchen Konsistometer gemessenen und die mit den Gleichungen (22) sowie (27) berechneten Fließkurven. Die Daten in den Abbildungen 2, 3 und 4 wurden aus den mit Bralen FA 7-16 und P 210 V erhaltenen Meßwerten berechnet. Die mit dem Plastometer aufgenommenen Fließkurven

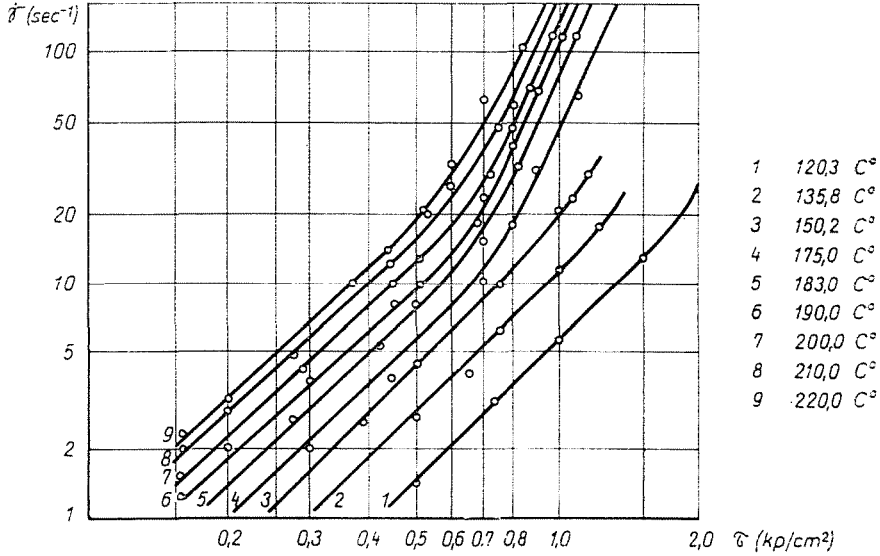


Abb. 4. Fließkurven von P 210 V Polyäthylen

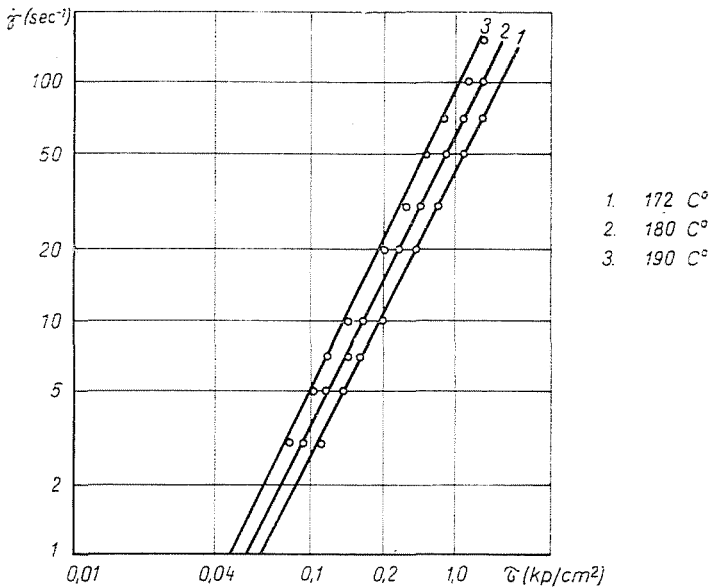


Abb. 5. Fließkurven von Bralen FB 4-18 Polyäthylen

der Produkte Bralen FB 4-18 und P 2020 T sind in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt.

Zur Bestimmung der maximalen Viskositätswerte wurden die Logarithmen der reziproken Viskositäten als Funktion der Schubspannung dargestellt und die erhaltenen Geraden auf den Spannungswert $\tau = 0$ extrapoliert. Die so erhaltenen η_0 -Werte sind in Tabelle 2 zusammengefaßt.

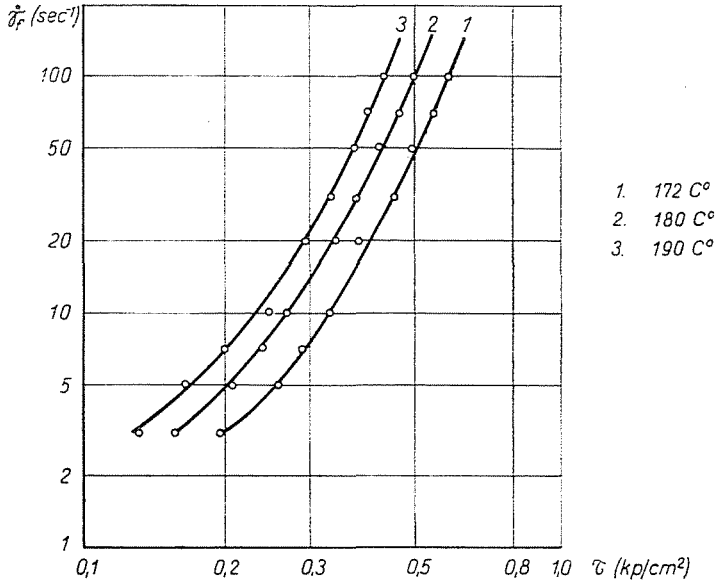


Abb. 6. Fließkurven von P 2020 T Polyäthylen

Tabelle II

Berechnete Werte der maximalen Viskosität

Produkt	$\eta_0 \cdot 10^{-5}$ Poise											
	115	120	130	150	165	172	175	180	190	200	210	220
Bralen FA 7-16	25	20,6	—	—	4,0	—	2,5	—	1,5	1,24	1,0	—
Bralen FB 4-18	—	—	—	—	—	1,78	—	1,43	1,09	—	—	—
P 2010 V	—	130	76	40	—	—	15	13	8,2	6,4	5,1	3,5
P 2020 T	—	—	—	—	—	3,9	—	2,9	2,1	—	—	—

Die Abbildungen 7 und 8 bzw. 9 und 10 zeigen die Zusammenhänge zwischen der reduzierten Viskosität und der reduzierten Schergeschwindigkeit bzw. zwischen der reduzierten Viskosität und der Schubspannung. Abbildungen 7 und 8 zeigen außerdem — mit ausgezogener Linie — auch die aus der WINOGRADOW—MALKINSchen Gleichung berechneten Werte.

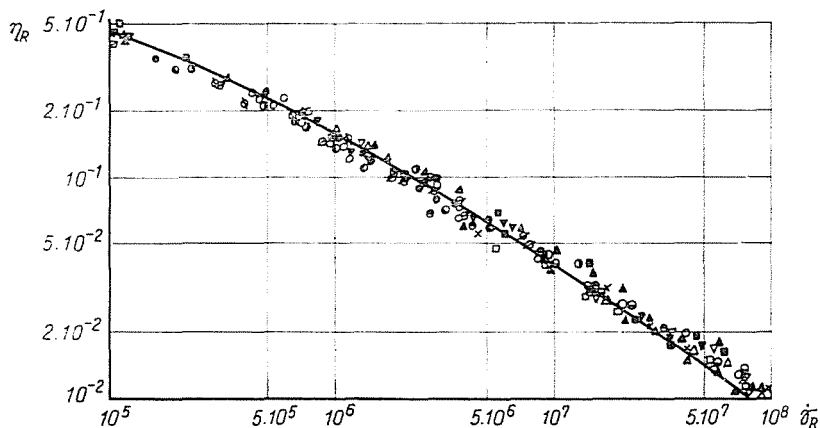


Abb. 7. Zusammenhänge zwischen reduzierter Viskosität und reduzierter Schergeschwindigkeit
 Konsistometrische Messungen mit Bralen FA 7-16 bei 115 °C: O; bei 120,5 °C: ⊖; bei 124,5 °C:
 ⊙; Plastometrische Messungen bei 175 °C: ⊙; bei 183 °C: ⊙; bei 190 °C: ⊙; bei 200 °C: ∅; bei
 210 °C: ∅. Konsistometrische Messungen mit P 2010 V bei 120,3 °C: Δ; bei 124,5 °C: ∇; bei
 130,5 °C: □; bei 135,8 °C: ×; bei 145 °C: ▲; bei 150 °C: ▽; Plastometrische Messungen bei
 175 °C: □; bei 183 °C: ▣; bei 190 °C: ▽; bei 200 °C: ▽; bei 210 °C: ▲; bei 220 °C: ▲

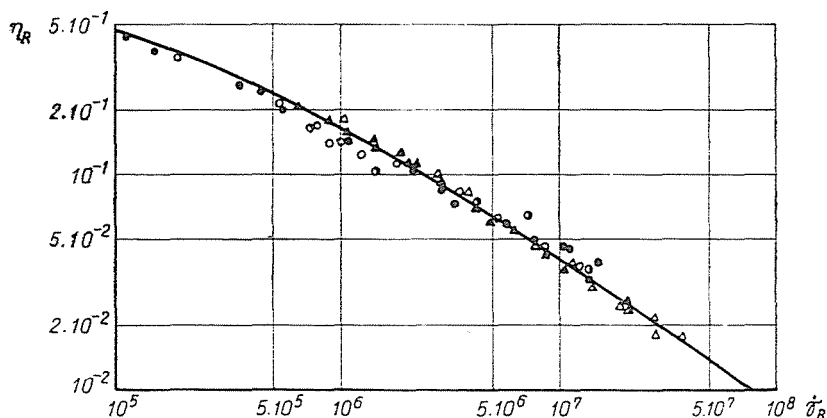


Abb. 8. Zusammenhänge zwischen reduzierter Viskosität und reduzierter Schergeschwindigkeit
 Plastometrische Messungen mit Bralen FB 4-18 bei 172 °C: O; bei 180 °C: ⊙; bei 190 °C: ⊙.
 Plastometrische Messungen P 2020 T bei 172 °C: Δ; bei 180 °C: ▲; bei 190 °C: ▲

Für die Schubspannung ausgedrückt ergibt die WINOGRADOW—MALKIN-
 sche Gleichung den Zusammenhang

$$1/\eta_R = 1 + 1,72 \cdot 10^{-4} \tau^{0,71} + 1,90 \cdot 10^{-7} \tau^{1,42} + 8,3 \cdot 10^{-16} \tau^{2,84},$$

in welchem τ in der Dimension din cm^{-2} einzusetzen ist. Die ausgezogene Linie
 in den Abbildungen 9 und 10 gibt die aus dem obigen Zusammenhang berech-
 neten Werte an.

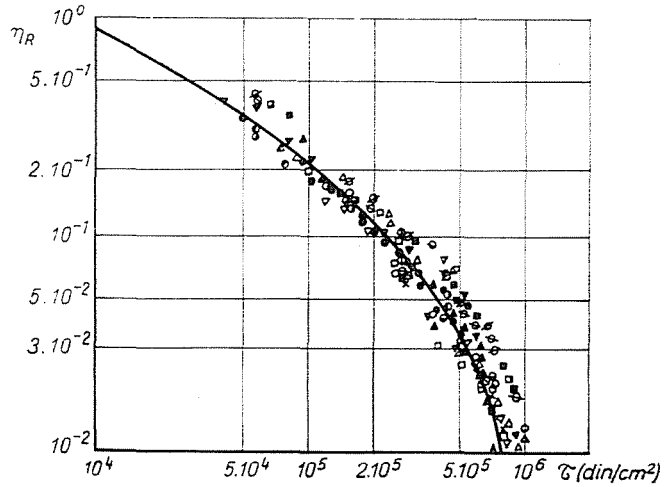


Abb. 9. Zusammenhänge zwischen reduzierter Viskosität und Schubspannung. Die Bezeichnungen sind die gleichen wie in Abb. 7

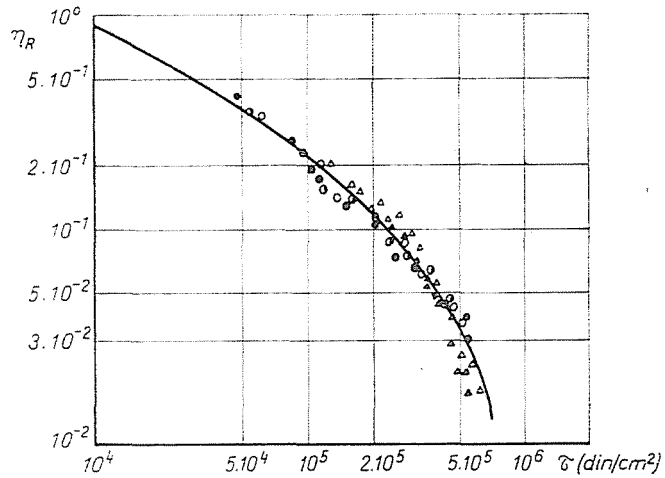


Abb. 10. Zusammenhänge zwischen reduzierter Viskosität und Schubspannung. Die Bezeichnungen sind die gleichen wie in Abb. 8

Diskussion der Versuchsergebnisse

Wie aus den Abbildungen 7, 8, 9 und 10 zu ersehen ist, stehen die Versuchsergebnisse in guter Übereinstimmung mit den Kurven, die den mathematischen Formen der von WINOGRADOW und MALKIN abgeleiteten allgemeinen, temperaturunabhängigen Viskositätsgleichung entsprechen. Die gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Werten besteht unabhängig von der angewandten Meßvorrichtung.

Die Anwendung der allgemeinen Viskositätsgleichung ermöglicht die Kennzeichnung des Fließverhaltens der Polymere durch eine charakteristische (vom Molekulargewicht und von der Temperatur unabhängige) Konstante, die maximale Viskosität, während der Schubzustand durch die für den jeweiligen Prozeß kennzeichnende Schergeschwindigkeit oder Schubspannung bzw. durch die von der Geometrie der Vorrichtung und von der angewandten Schubkraft abhängige Schergeschwindigkeits- oder Schubspannungs-Funktion gekennzeichnet werden kann.

In Kenntnis der maximalen Viskosität (η_0) läßt sich auf diese Weise aus den mit rheologischen Meßvorrichtungen verschiedener Typen erhaltenen Daten die allgemeine Viskositätskurve konstruieren bzw. kann die Viskosität im Besitz der bekannten mathematischen Zusammenhänge, des η_0 -Wertes und des Schubzustandes für gegebene Vorrichtungen und Prozesse bestimmt werden.

Auf Grund der obigen Ausführungen können die zusammenhängenden $\eta_R - \dot{\gamma}_R$ -Werte bzw. die $\eta_R - \tau$ -Werte als Viskositätskennwerte der Polymeren betrachtet werden, die von der angewandten Meßvorrichtung unabhängig sind.

Zusammenfassung

Die Fließkurven von Hochdruckpolyäthylenen wurden mit Kolbendüsen-Plastometer und HÖPPLERSchem Konsistometer untersucht. Die Anwendung der allgemeinen Viskositätsgleichung ermöglicht die Kennzeichnung des Fließverhaltens der Polymere durch eine charakteristische Konstante, die maximale Viskosität, während der Schubzustand durch für den jeweiligen Prozeß kennzeichnende Schergeschwindigkeit oder Schubspannung bzw. durch die von der Geometrie der Vorrichtung und von der angewandten Schubkraft abhängige Schergeschwindigkeits- oder Schubspannungs-Funktion gekennzeichnet werden kann.

Literatur

1. VAN WAZER, J. R., LYONS, J. W., KIM, K. Y., COLWELL, R. E.: A Laboratory Handbook of Rheology, John Wiley and Sons., New York—London, 1963.
2. RABINOWITSCH, B.: Z. Physik. Chem. **A145**, 1 (1929)
3. BAGLEY, E. B.: J. Appl. Phys. **28**, 624 (1957)
4. PHILIPPOFF, W., GASKINS, F. M.: Trans. Soc. Rheol. **2**, 263 (1958)
5. RAM, A., NARKIS, M.: J. Appl. Polymer Sci. **10**, 361 (1966)
6. SCHOTT, H.: J. Polymer Sci. **A2**, 3791 (1964)
7. METZGER, A. P., BRODKEY, R. S.: J. Appl. Polymer Sci. **7**, 399 (1963)
8. BENBOW, J. J., CHARLEY, R. V., LAMB, P.: Nature **192**, 233 (1961)
9. HARHAN, A. A., Mc. GLAMERY, R. M.: Material Res. Stand. **3**, 906 (1963)
10. SCHREIBER, H. P., RUDIN, A.: J. Appl. Polymer Sci. **6**, 545 (1962)
11. PRICE, E. E.: J. Appl. Polymer Sci. **7**, No. 5, 843 (1963)
12. SKINNER, S. J.: J. Appl. Polymer Sci. **5**, S5 (1961)
13. CHARLEY, R. V.: J. Appl. Polymer Sci. **6**, S19 (1962)
14. WINOGRADOW, G. W., PROSOROWSKAJA, N. W.: Rheol. Acta **3**, 156 (1964)
15. Höppler-Konsistometer. Beschreibung und Gebrauchsanweisung. VEB Prüfgeräte-Werk, Medingen, Sitz Freitel.
16. SELBY, W., HUNSTAND, K. A.: Symposium on non-newtonian viscometry. ASTM Special Technical Publication No. 299, 98. Washington 1960.
17. BIKERMANN, I. I.: J. Colloid. Sci. **3**, 75 (1946)

László HALÁSZ }
Dr. Imre MONDVAI }

Budapest, XI. Műegyetem rkp. 3. Ungarn