

Zur Bestimmung und Bewertung von Kennwerten für die Beurteilung der Zähigkeitseigenschaften von Polymerwerkstoffen bei schlag- und stoßartiger Beanspruchung

H. Hoffmann, W. Grellmann

1. Einleitung

Der Einsatz von Polymerwerkstoffen wird positiv beeinflusst durch ihre geringe Dichte, ihre gute Beständigkeit gegenüber korrosiver Beanspruchung und ihre im Vergleich zu anderen Werkstoffen günstigen Verarbeitungseigenschaften. Damit gewinnen die Polymerwerkstoffe, neben ihrer Anwendung als Isolatorwerkstoffe in der Elektrotechnik/Elektronik für die Verbesserung des Masse-Leistungs-Verhältnisses zahlreicher Erzeugnisse des Maschinen- und Anlagenbaus, der Konsumgüterindustrie, insbesondere aber der Fahrzeugindustrie international wachsendes Interesse.

Die Entwicklung eines den vielfältigen Anforderungen entsprechenden Werkstoffsortiments erfolgt vorwiegend durch Werkstoffveredlung. Hierbei stehen neben Block-, Pfropf- und Copolymerisation, ein dem Legieren vergleichbares Mischen verschiedener Polymerer und die Kombination des polymeren Werkstoffs mit anorganischen Füll- und Verstärkungskomponenten im Vordergrund. Wesentliche Ziele sind dabei u. a. die Erhöhung der Steifigkeit und Festigkeit sowie die Steigerung der Zähigkeit, insbesondere gegenüber schlag- und stoßartiger Beanspruchung. Die Optimierung der prüftechnischen Aspekte der Zähigkeitsbestimmung und die Erfassung der durch das Füllen bzw. Verstärken der Polymermatrix hervorgerufenen Veränderungen der Zähigkeitseigenschaften sollen im folgenden näher betrachtet werden, wobei die Wirkung des Füllstoffvolumenanteils im Vordergrund steht.

2. Bestimmung dynamischer Zähigkeitskennwerte

Zur Beurteilung der Zähigkeitseigenschaften von Polymerwerkstoffen bei schlag- oder stoßartiger Beanspruchung werden der instrumentierte Kerbschlagbiegeversuch [1] bis [3] und der instrumentierte Fallversuch [4] herangezogen, wobei eine Auswertung der elektronisch registrierten Kraft-Verformungs-Zusammenhänge auf der Basis bruchmechanischer Konzepte [5 bis 9] erfolgt. Die Vorrangstellung, die der instrumentierte Kerbschlagbiegeversuch hier einnimmt, resultiert aus der Tatsache, daß er den Anschluß an den standardisierten konventionellen Kerbschlagbiegeversuch herstellt [10, 11]. Das Meßprinzip eines solchen Versuchsaufbaus zeigt Bild 1.

Die Auswahl der Sensoren zur Schlagkraft- und Verformungsmessung und die Optimierung der elektronischen Meßbedingungen ist in [1], [2] bereits ausführlich dargestellt. Im folgenden wird die Wirkung einer veränderten Hammergeschwindigkeit und eines veränderten Restquerschnittes, hervorgerufen durch Variation der Kerbtiefe a bei gleichbleibender Probenbreite W , der verwendeten Dreipunktbiegeproben mit den Abmessungen $4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ betrachtet.

Der Einfluß der Pendelhammergeschwindigkeit und des a/W -Verhältnisses auf die Gestalt und Auswertbarkeit der registrierten Schlagkraft-Durchbiegungs-Diagramme ist im Bild 2 dargestellt. Bild 2 gestattet die Aussage, daß zur Registrierung auswertbarer Diagramme mit niedrigen

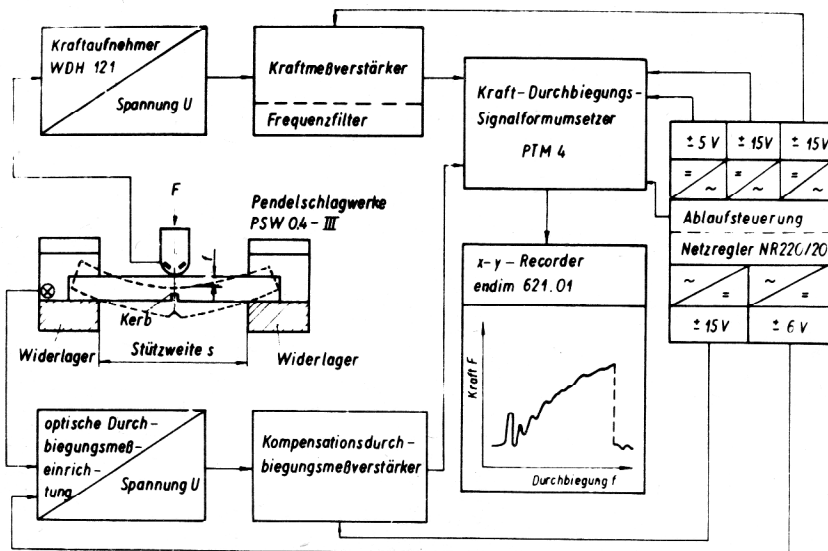


Bild 1
 Blockschaltbild des instrumentierten
 Kerbschlagbiegeversuchs

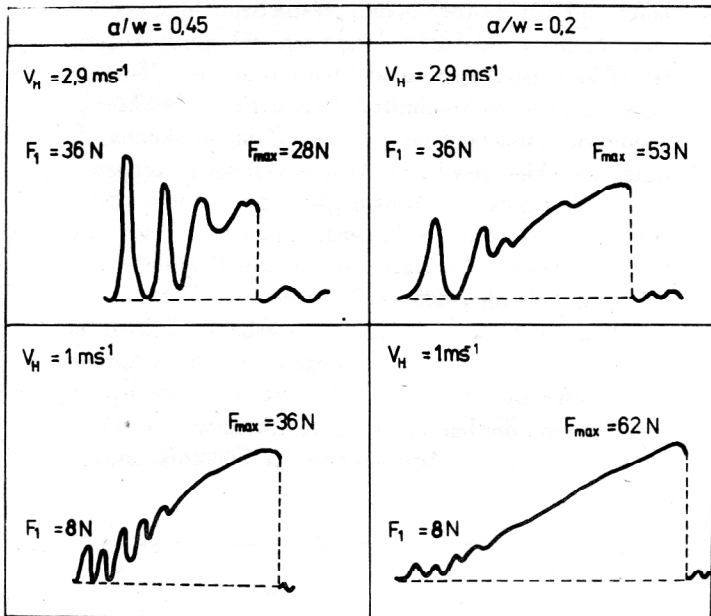


Bild 2
 Einfluß von Pendelhammargeschwindigkeit v_H und a/w -Verhältnis auf die Form des Schlagkraft-Durchbiegungs-Diagramms von PP 52512

Pendelhammargeschwindigkeiten und kleinen Kerbtiefen gearbeitet werden muß. Wie eingehende Untersuchungen zum Einfluß der Hammargeschwindigkeit [13] gezeigt haben, liefern Hammargeschwindigkeiten $v_H \leq 1,5 \text{ ms}^{-1}$ noch auswertbare Diagramme.

Die Auswertung der registrierten Schlagkraft-Durchbiegungs-Diagramme erfolgte entsprechend dem jeweiligen Werkstoffverhalten sowohl nach Konzepten der LEBM als auch nach dem COD- und dem J-Integralkonzept der Fließbruchmechanik. Um eine Aussage zur Genauigkeit der einzelnen J-Integralauswerteverfahren [14] bis [18] zu erhalten, wurde ein Vergleich der experimentellen Daten mit den aus FEM-Rechnungen bestimmten J-Integralwerten im Intervall $0,1 < a/w < 0,7$ durchgeführt [19]. Die nach den einzelnen Auswerteverfahren bestimmten J-Integralwerte sind im Bild 3 auf die J-Integralwerte der FEM-Rechnung bezogen worden. Bild 3 macht deutlich, daß die Auswerteverfahren nach Sumpter und Turner [16] sowie nach Merkle und Corton [17] die beste Übereinstimmung mit den J^{FEM} -Werten zeigen, so daß bei den weiteren Arbeiten nach diesen Auswerteverfahren gearbeitet wurde. Der Einfluß der Probendicke B auf die J-Integralwerte ist für Probendicken B im Intervall $1,5 \text{ mm} \leq B \leq 10 \text{ mm}$ an verschiedenen Polymerwerkstoffen untersucht worden [20] bis [22].

Wie die im Bild 4 für ausgewählte Werkstoffe dargestellte Abhängigkeit der J-Integralwerte von der Probendicke zeigt, sind die experimentell bestimmten J-Integralwerte im betrachteten Dickenbereich unabhängig von der Probendicke.

Nachdem die Unabhängigkeit der J-Integralwerte vom a/w -Verhältnis und der Prüfkörperdicke nachgewiesen werden konnte, sind unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Gewinnung gut auswertbarer Diagrammformen, die weitere Untersuchungen an Probekörpern mit den Abmessungen $4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ und einem 2 mm tiefen Kerb durchgeführt worden.

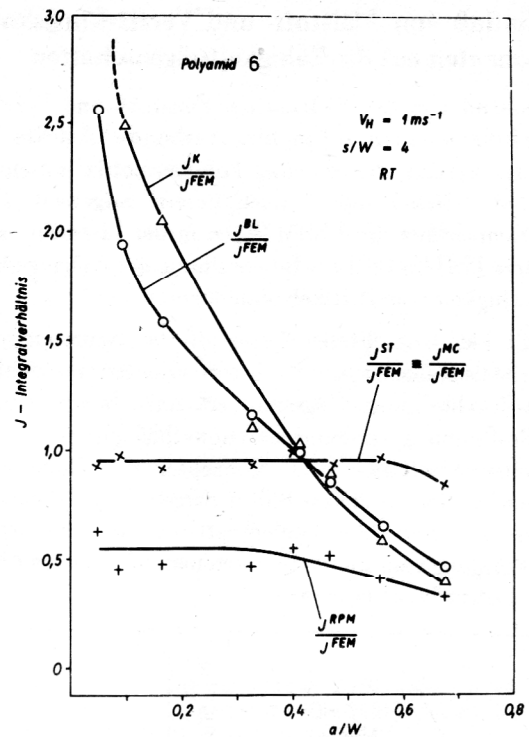


Bild 3
 Auf die Ergebnisse der FEM-Rechnung J^{FEM} bezogene experimentelle J-Integralwerte nach Auswerteverfahren von J^{BL}-Begley und Landes [14], J^{RPM}-Rice, Paris und Merkle [15], JST-Sumpter und Turner [16], J^{MC}-Merkle und Corton [17], J^K-Kanazawa [18].
 Parameters: $V_H = 1 \text{ ms}^{-1}$, $s/W = 4$, RT

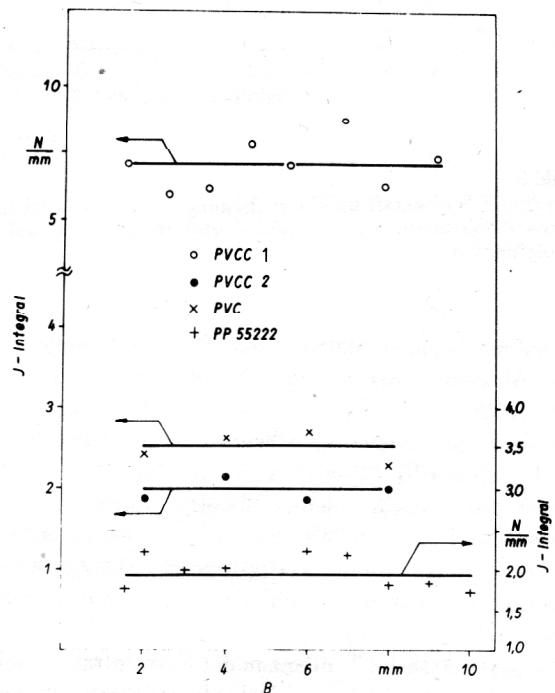


Bild 4
 Experimentelle J-Integralwerte für verschiedene Polymerwerkstoffe im Dickenintervall $1,5 \text{ mm} \leq B \leq 10 \text{ mm}$

3. Einfluß von Füllstoff- und Verstärkungskomponenten auf die Zähigkeitseigenschaften

Ausgehend von der Vielzahl der Füllstoff- und Verstärkungskomponenten sollen hier Verbundwerkstoffe betrachtet werden, die aus einer Polymermatrix mit eingelagerten Teilchen oder kurzen Fasern aufgebaut sind. Für Kenngrößen der LEBM liegen in der Literatur erste Ansätze [23] bis [26] zur Beschreibung der Abhängigkeit der Zähigkeit vom Partikelvolumenanteil vor.

Da die hier betrachteten Werkstoffe bei Raumtemperatur elastisch-plastisches Werkstoffverhalten im Schlagkraft-Durchbiegungs-Diagramm erkennen lassen, erfolgt die Bestimmung der Konzentrationsabhängigkeit der Zähigkeitseigenschaften nach Konzepten der Fließbruchmechanik. Bereits die im Bild 5 dargestellten Abhängigkeiten der maximalen Schlagkraft und der Prüfkörperdurchbiegung vom Füllstoffvolumenanteil φ_v lassen deutliche Unterschiede erkennen.

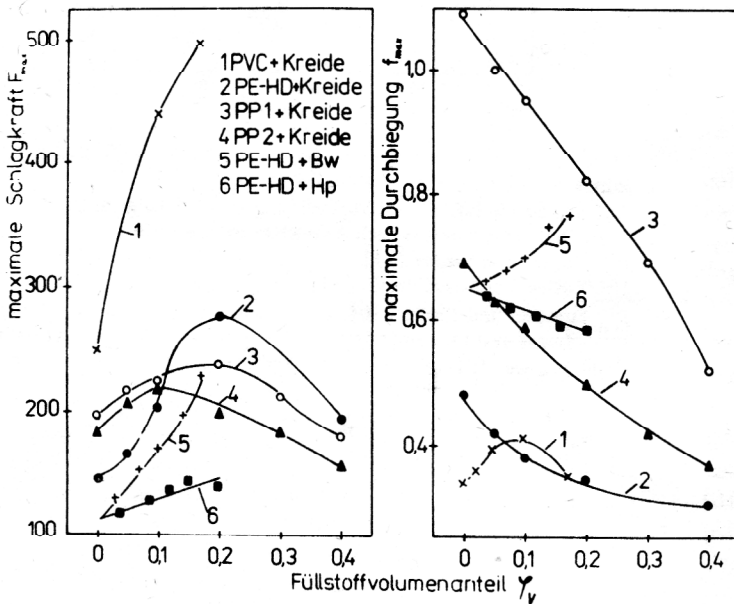


Bild 5
Maximale Schlagkraft und Durchbiegung beim Beginn der instabilen Rißausbreitung für Verbundwerkstoffe mit PVC- und Polyolefinmatrix

Während bei allen Matrixwerkstoffen ein Ansteigen bzw. ein Maximum der Schlagkraft mit zunehmendem Füllstoffvolumenanteil auftritt, läßt die Durchbiegung eine größere Differenzierung erkennen. Die teilchengefüllten Polyolefine (PE, PP) zeigen ein Absinken der Durchbiegung mit zunehmendem Füllstoffvolumenanteil. Demgegenüber tritt bei polarer Matrix bzw. faserförmigen Zusatzkomponenten ein Anstieg bzw. ein Maximum in der Konzentrationsabhängigkeit der maximalen Durchbiegung auf.

Die gegensätzliche Tendenz in der Konzentrationsabhängigkeit von maximaler Schlagkraft und Probendurchbiegung läßt eine Auswertung der Schlagkraft-Durchbiegungs-Diagramme zur Kennwertbestimmung nach dem J-Integralkonzept der FBM zweckmäßig erscheinen, da das J-Integral als energetische Größe das gesamte Schlagkraft-Durchbiegungs-Diagramm zu berücksichtigen er-

laubt und den elastischen und plastischen Anteil bei dem von Sumpter und Turner [16] vorgeschlagenen Auswertverfahren gesondert zu wichten ermöglicht. Gleichzeitig wurde, wie im Abschnitt 2 dargestellt, die Prüfkörpergeometrieunabhängigkeit dieser Zähigkeitskennwerte unter den hier gewählten Meßbedingungen nachgewiesen. Bild 6 gibt die Abhängigkeit des dynamischen J-Integrals vom Füllstoffvolumenanteil für mit Kreide bzw. Baumwollfasern oder Hartpapier gefüllte Polyolefine, sowie für mit Kreide gefülltes PVC wieder.

Aus Bild 6 wird deutlich, daß die Zugabe von Füllstoffen zunächst zum Anstieg der J-Integralwerte führt. Als eine Ursache für ein Sinken der Zähigkeit bei hohen Kreidgehalten sind die bei hohen Füllstoffkonzentrationen im REM beobachteten Agglomerate der Füllstoffe anzusehen.

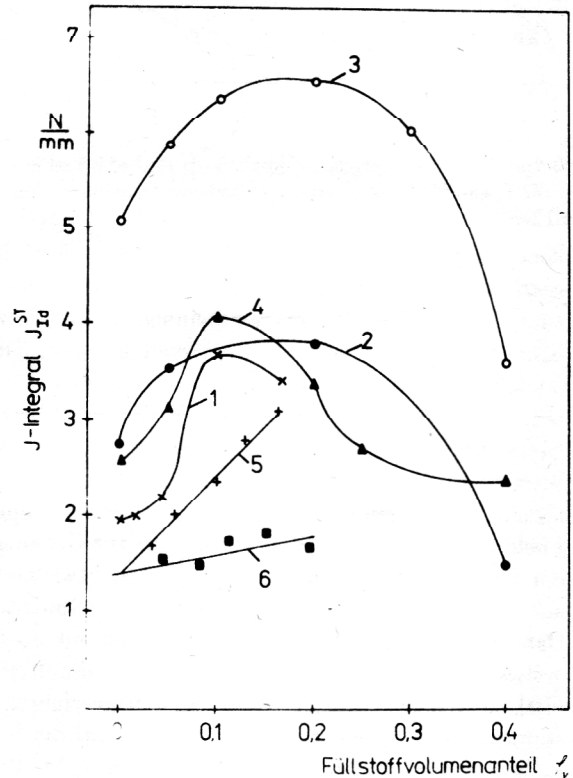


Bild 6
Abhängigkeit des J-Integrals vom Füllstoffvolumenanteil für Polyolefin- und PVC-Matrixwerkstoffe (Werkstoffbezeichnungen vgl. Bild 5)

4. Zusammenfassung

Mit der Optimierung der Meßbedingungen zur Beurteilung der Zähigkeitseigenschaften konnte gezeigt werden, daß die J-Integralbestimmung aus dem Schlagkraft-Durchbiegungs-Diagramm unter Anwendung der Auswertmethode von Sumpter und Turner es gestattet, von der Probengeometrie unabhängige Zähigkeitskennwerte zu bestimmen.

Mit der Abhängigkeit der J-Integralwerte vom Füllstoffvolumenanteil wird auf der Basis bruchmechanischer Konzepte ein Zähigkeitsvergleich der verschiedenen Werkstoffvarianten möglich. Mit der Deutung der mikrostrukturellen Ursachen des Zähigkeitsabfalls bei höheren Füllstoffvolumenanteilen sind Ansatzpunkte für die weitere Werkstoffveredlung möglich.

Die Autoren danken Herrn Prof. Dr. sc. nat. B. Michel, Leiter der Abt. Bruchmechanik und Mikromechanik der AdW der DDR, Institut für Mechanik Karl-Marx-Stadt und Herrn Dr. rer. nat. H.-P. Sommer für ihre Unterstützung bei der Bearbeitung der Problemstellung und der Durchführung der FEM-Rechnungen.

LITERATUR

- [1] Hoffmann, H.; Grellmann, W.: *Wiss. Z. Techn. Hochschule Leuna-Merseburg* 24 (1982) Nr. 1, S. 50.
- [2] Grellmann, W.: AdW der DDR, Institut für Mechanik, FMC-Series Berlin und Karl-Marx-Stadt (1982) Nr. 3, S. 102.
- [3] Hoffmann, H.; Grellmann, W.; Martin, M.: *Plaste und Kautschuk* 32 (1985) Nr. 3, S. 107.
- [4] Kolloch, B.: *Wiss. Z. Techn. Hochschule Leuna-Merseburg* 27 (1985) 2, S. 145 – 152.
- [5] Blumenauer, H.; Pusch, G.: *Technische Bruchmechanik*, VEB Deutscher Verlag f. Grundstoffindustrie, Leipzig 1982.
- [6] Kausch, H. H.: *Polymer Fracture* Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1978.
- [7] Bucknall, C. R.: *Toughened Plastics*, London, Intersci. Publ., 1977.
- [8] Fudzii, T.; Dzako, M.: *Bruchmechanik von Verbundwerkstoffen*, Verlag „Mir“ Moskau 1982.
- [9] Williams, J. G.: *Failure in Polymers „Advance in Polymer Science“* Bd. 27 Springer Verlag Berlin/Heidelberg/New York 1978.
- [10] TGL 14068 Prüfung von Plasten, Bestimmung der Schlagbiegefestigkeit nach Charpy, Ausgabe Dez. 1982.
- [11] ST RGW 1491–79 Plaste, Verfahren zur Bestimmung der Schlagbiegefestigkeit nach Charpy.
- [12] May, M.; Hoffmann, H.; Grellmann, W.: *Plaste und Kautschuk* 31 (1984) H. 1, S. 26.
- [13] Grellmann, W.: AdW der DDR, Institut f. Mechanik, FMC-Series Berlin und Karl-Marx-Stadt (1982) Nr. 3, S. 142.
- [14] Begley, J. A.; Landes, J. D.: *ASTM STP 536* (1973) S. 246.
- [15] Rice, J.; Paris, P. C.; Merkle, J. G.: *ASTM STP 536* (1973), S. 231.
- [16] Sumpter, J. D. G.; Turner, C. E.: *ASTM STP 601* (1976) S. 3.
- [17] Merkle, J. G.; Corten, H. T.: *ASME Paper 74, Journal of Pressure Vessel Technology* 96 (1974), S. 286.
- [18] Kanazawa, T.; Machida, D.; Onozuka, M.; Kaned, S.: *Report of the University of Tokyo*, HW x-779-75.
- [19] Grellmann, W.; Sommer, J.-P.: AdW der DDR, Institut für Mechanik, FMC-Series, Berlin u. Karl-Marx-Stadt (1985) Nr. 17, S. 48.
- [20] Hoffmann, H.; Grellmann, W.: VII. Symposium „Verformung und Bruch“ Magdeburg, 3. – 5. 9. 1985, Teil I, S. 160.
- [21] Grellmann, W.: *Beurteilung der Zähigkeitseigenschaften von Polymerwerkstoffen durch bruchmechanische Kennwerte*, TH „Carl Schorlemmer“ Leuna-Merseburg, Diss. B, 1985.
- [22] Hashemi, S.; Williams, J. G.: *J. of Materials Sci* 19 (1984) S. 3746.
- [23] Moloney, A. C.; Kausch, H. H.: *J. of Materials Sci* 18 (1983) S. 208.
- [24] Kameswara, R.: *Engng. Fracture Mechanics* 18 (1981) S. 35.
- [25] Hahn, G. T.; Rosenfield, A. R.: *Intern. Congress on Fracture*, ICF 3, München 1973, PL III-211, S. 1 – 19.
- [26] Nowikow, H. B.: *Problemi protschnosti* (1980) 10, S. 61.