Möglichkeiten zur Reduzierung der eingesetzten Werkstoffmenge für die EWF-Methode

T. Koch *, R. Lach **, S. Seidler *
*** Technische Universität Wien, Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, ** Polymer Service GmbH Merseburg**

Basierend auf den grundlegenden Arbeiten von Broberg [1] und Cotterell und Reddel [2] wurde die Methode der Wesentlichen Brucharbeit (Essential Work of Fracture, EWF), eines der wichtigsten Konzepte der "Plastischen" Bruchmechanik, von Mai und Cotterell [3] das erste Mal für Kunststoffe angewendet. Die Beliebtheit der Methode gründet sich auf die relativ einfache experimentelle Durchführbarkeit und den geringen Material- und Zeitverbrauch. Ein Normentwurf der European Structural Integrity Society (ESIS) [4] befindet sich in Evaluierung.
Das EWF-Konzept basiert auf der Annahme, dass die Gesamtbrucharbeit W in zwei Komponenten aufgeteilt werden kann, die Komponente W_e, die in der Prozesszone dissipiert wird, und die Komponente W_p, welche in der umgebenden plastischen Zone dissipiert wird:

$$W = W_e + W_p = EWF \cdot Bl + \beta w_p \cdot Bl^2 \qquad (1)$$

Durch Division mit der Ligamentlänge wird die spezifische Brucharbeit w erhalten:

$$w = EWF + \beta w_p \cdot l, \qquad (2)$$

wobei w_p die nichtwesentliche Brucharbeit und β ein Formfaktor der plastischen Zone ist.

Die EWF ist unabhängig von der Probekörperform (SENT oder DENT) für eine gegebene Dicke. βw_p ist eine Funktion des plastischen Constraint. EWF hat die Bedeutung einer 'risstreibenden Kraft', vergleichbar mit dem physikalischen Rissinitiierungswert J_i, und βw_p ist ein Maß für den Widerstand gegenüber stabiler Rissausbreitung, vergleichbar mit dem Anstieg dJ/da von Risswiderstandskurven. Die Korrelationen wurden experimentell, numerisch und theoretisch von verschiedenen Autoren gezeigt [3, 5].
Für die Anwendung des EWF-Konzepts müssen einige Anforderungen erfüllt sein, dies sind: das Einsetzen der Rissausbreitung nach plastischer Deformation (Fließen) des Matrixligamentes, das Vorliegen eines ebenen Spannungszustandes und die Selbstähnlichkeit der Kraft-Verlängerungsdiagramme.
Eigene Ergebnisse und Ergebnisse aus der Literatur berücksichtigend wurde festgestellt, dass die Anforderungen an die Gültigkeit der EWF-Methode kritisch zu bewerten sind (Bild 1).

	Selbstähnlichkeit der Kraft-Verlängerungs-Diagramme	Ebener Spannungszustand: Fließspannung unabhängig von der Ligamentlänge
Einfluss der Probekörperdicke		$B << 25\ EWF/\sigma_y$ nicht brauchbar für Polymere
Einfluss der Ligamentlänge	$l < W/3$ grobe Annahme	$l > 3\text{-}5\ B$ nicht brauchbar für $B < 1$ mm
	$l < 2\ r_{pl}$ keine Korrelation	$\sigma_N = \sigma_{N,\,min}\ (\pm 10\%)$ sehr nützlich, aber Hills Theorie schwierig anwendbar für Polymere

Bild 1: Zusammenfassung der Überprüfung der Geometriekriterien für die Gültigkeit der EWF-Methode (W ... Breite, r_{pl} ... Radius der plastischen Zone, σ_y ... Fließspannung, σ_N ... Ligamentfließspannung, $\sigma_{N,\,min}$ ... σ_N für den ebenen Spannungszustand)

In der folgenden Arbeit wurde untersucht, ob die Menge des verwendeten Werkstoffes reduziert werden kann. Dies ist für die Frühstadien der Werkstoffentwicklung bedeutsam, da hier oftmals Volumina von nur wenigen cm³ vorliegen.

Ergebnisse

Zuerst wurde überprüft, ob die Rissausbreitung nach dem Fließen des Ligamentes erfolgte und ob die Kraft-Weg-Kurven selbstähnlich sind (Bild 2). Beide Kriterien wurden erfüllt.

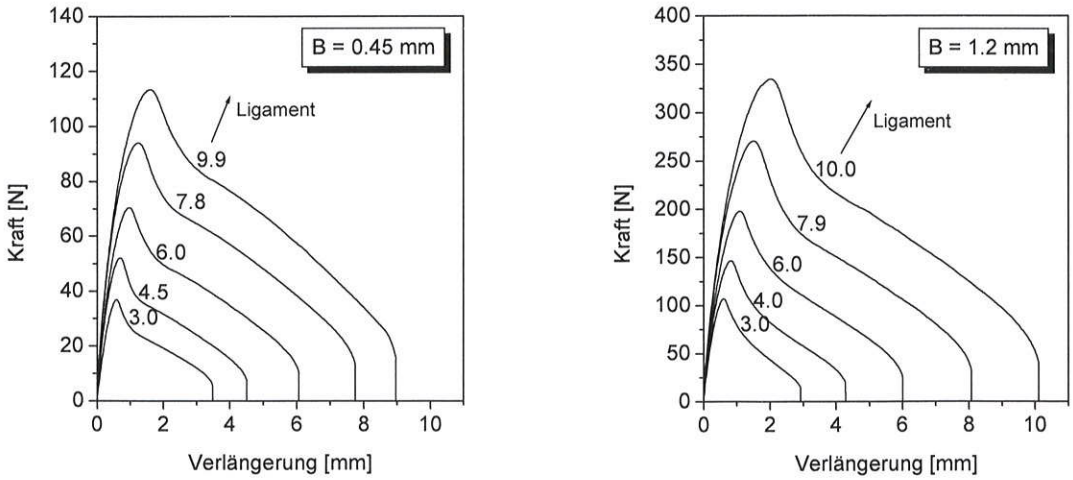

Bild 2: Selbstähnlichkeit der Kraft-Verlängerungs-Kurven. Werkstoff: Ethylen-Propylen (E/P)-Copolymer

Im untersuchten Dickenbereich war die Wesentliche Brucharbeit EWF nicht konstant, der nichtwesentliche Anteil βw_p allerdings schon (Bild 3a). Die Überprüfung der Ligamentfließspannung ergab keine Abhängigkeit von der Dicke (Bild 3b).

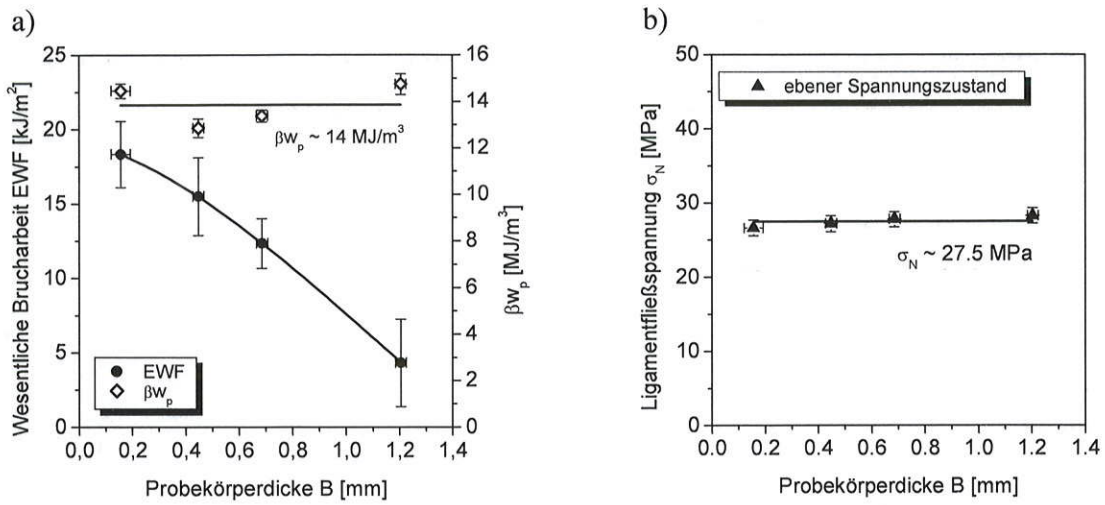

Bild 3: Wesentlicher und nichtwesentlicher Anteil der Brucharbeit in Abhängigkeit von der Dicke (a). Konstante Ligamentfließspannung für die untersuchten Probekörperdicken (b). Werkstoff: E/P-Copolymer

Prinzipiell existieren mehrere Möglichkeiten zur Reduzierung der benötigten Werkstoffmenge:

1. Verringerung der Dicke:
Hierbei muss beachtet werden, dass die Werte für die Wesentliche Brucharbeit nicht immer konstant bleiben, die Ergebnisse somit nur für die jeweilige Dicke gültig sind.

2. Verringerung der Breite:
Die Probekörperbreite kann parallel mit der abnehmenden Ligamentlänge verringert werden. Dies bedeutet, dass, unter Beachtung des Verhältnisses von Breite zu Ligamentlänge (W/l = 3), Prüfkörper mit einem großen Ligament breiter sind als Probekörper mit einem kleinen Ligament.

3. Verringerung der Länge:
Die Einspannlänge und somit auch die Probekörperlänge kann verringert werden. Die oftmals verwendete Einspannlänge von ≥ 40 mm (für Probekörper der Abmessungen von mindestens 90 mm × 30 mm) ist nicht zwangsläufig nötig. Die einzige Bedingung ist, dass sich die plastische Zone zwischen den Klemmen vollständig ausbilden kann.

4. Verringerung aller Abmessungen:
Prüfkörper mit deutlich reduzierter Länge und Breite können verwendet werden (Bild 4). Eine Schwierigkeit stellt bei sehr kleinen Probekörpern jedoch die Einstellung verschiedener Ligamentlängen dar (Bild 5).

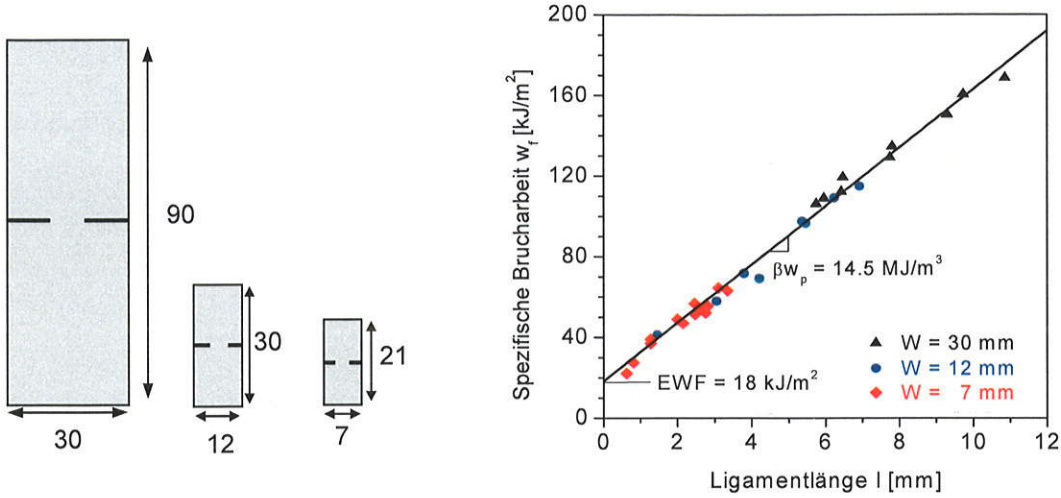

Bild 4: Verringerung aller Abmessungen. Die Verwendung von stark verkleinerten Probekörpern ist prinzipiell möglich. Werkstoff: E/P-Copolymer

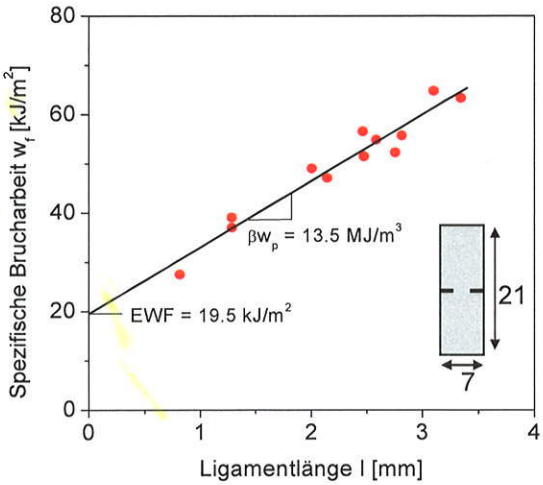

Bild 5: Spezifische Brucharbeit als Funktion der Ligamentlänge für miniaturisierte Probekörper. Der kleine Bereich möglicher Ligamentlängen ist erkennbar. Werkstoff: E/P-Copolymer

Basierend auf den zuvor gezeigten Ergebnissen wurde die Anwendbarkeit einer so genannten Pseudo-Einprobentechnik überprüft, bei welcher kleinere Probekörper aus den jeweils ungeschädigten Bereichen entnommen und dann geprüft werden (Bild 6). Verglichen mit der Miniaturisierung der Prüfkörper hat diese Methode den Vorteil, dass die Ligamentlängen in einem großen Bereich variieren können, wodurch die ermittelten Kennwerte deutlich robuster sind. Die mittels konventioneller Mehrprobentechnik and der Pseudo-Einprobentechnik ermittelten Daten liegen im selben Streubereich.

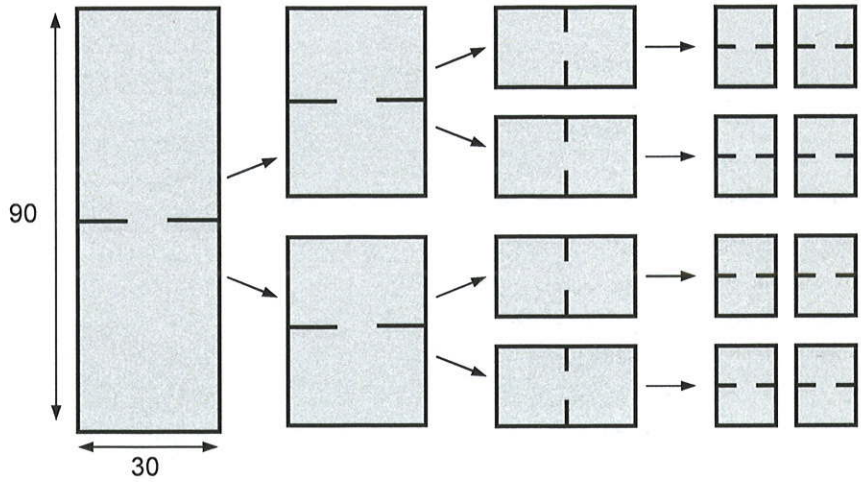

Bild 6: Prinzip der so genannten Pseudo-Einprobentechnik

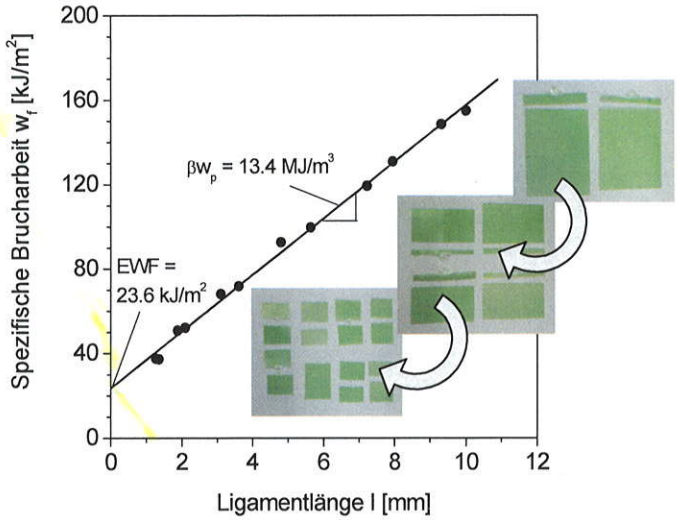

Bild 7: Anwendung der so genannten Pseudo-Einprobentechnik am Beispiel des E/P-Copolymers

Zusammenfassung

Eine deutliche Reduzierung der für die EWF-Methode benötigten Werkstoffmenge ist möglich. Das starke Verkleinern der Prüfkörper kann zu Problemen im Einstellen der unterschiedlichen Ligamentlängen führen. Als vorteilhaft erweist sich eine so genannte Pseudo-Einprobentechnik. Deren Anwendbarkeit ist noch für zweiphasige Werkstoffe mit schlechter Phasenhaftung zu überprüfen.

Literatur

[1] K.B. Broberg, Critical review of some theories in fracture mechanics, Intern J Fract 4 (1968), 11-19.

[2] B. Cotterell, J.K. Reddel, The essential work of plane strain fracture, Intern J Fract 14 (1977), 267-277.

[3] Y.W. Mai, B. Cotterell, On the essential work of ductile fracture in polymers, Intern J Fract 32 (1986), 105-125.

[4] E. Clutton, Essential work of fracture, in: Fracture Mechanics Testing Methods for Polymers, Adhesives and Composites, ESIS publication 28, edited by A. Pavan and J.G. Williams, Elsevier, Amsterdam (2001), p. 177-195.

[5] Y.W. Mai, P. Powell, Essential work of fracture and J-integral measurements for ductile polymers, J Polym Sci Part B: Polym Phys 29 (1991), 785-793.