

---

## MPK – Mechanische Prüfung von Kunststoffen



Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren im Labor MPK.

# Prüfung von Kunststoffen

## Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch (IKBV)

Prozedur zur Ermittlung des Risswiderstandsverhaltens aus dem Instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch



Akkreditiertes Prüflaboratorium nach DIN EN ISO/IEC 17025

MPK-Prozedur

MPK-IKBV: 2016-08  
Teil I und Teil II

---

### Autoren

Prof. Dr. Wolfgang Grellmann  
Dr. Ralf Lach

### Postanschrift

Polymer Service GmbH Merseburg  
Geusaer Str. 81f  
06217 Merseburg

Internet

[www.psm-merseburg.de](http://www.psm-merseburg.de)

### Geschäftsführung

Prof. Dr. Valentin Cepus (Vors.)  
Prof. Dr. Wolfgang Grellmann  
Prof. Dr. Katrin Reincke

Tel.: +49 3461 30889 50

Fax: +49 3461 30889 99

E-Mail: [info@psm-merseburg.de](mailto:info@psm-merseburg.de)

# Inhaltsverzeichnis

1	Anwendungsbereich	1
2	Kurzbeschreibung des Verfahrens	1
<b>Teil I</b>		
3	Kennwertermittlung als Widerstand gegenüber instabiler Rissausbreitung	2
3.1	Zusammenfassung der Testmethode	2
3.2	Prüfkörper	2
3.3	Versuchsdurchführung	3
3.4	Auswertung	4
3.4.1	Allgemeine Angaben	4
3.4.2	Ermittlung der bruchmechanischen Werkstoffkennwerte	4
3.4.3	Überprüfung der Gültigkeit der ermittelten bruchmechanischen Werkstoffkennwerte	5
3.4.3.1	Überprüfung der experimentellen Bedingungen	5
3.4.3.2	Anforderungen an die Prüfkörpergeometrie	6
<b>Teil II</b>		
4	Kennwertermittlung als Widerstand gegenüber stabiler Rissausbreitung	8
4.1	Zusammenfassung der Testmethode	8
4.2	Prüfkörper	8
4.3	Versuchsdurchführung	9
4.4	Auswertung	10
4.4.1	Allgemeine Angaben	10
4.4.2	Ermittlung der Belastungsparameter	11
4.4.3	Darstellung gültiger Risswiderstandskurven zur Bestimmung des Rissinitiierungswertes	11
4.4.4	Bestimmung von $JT_J$	13

5	Literaturverzeichnis	15
	Anlagen	
	<i>Anlage 1:</i> Prüfbericht zur Ermittlung von Kennwerten als Widerstand gegenüber instabiler Rissausbreitung	18
	<i>Anlage 2:</i> Prüfbericht zur Ermittlung dynamischer Risswiderstandskurven	19



# Prozedur zur Ermittlung des Risswiderstandsverhaltens mit dem instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch

W. Grellmann, S. Seidler und W. Hesse, Merseburg

## 1 Anwendungsbereich

Der instrumentierte Kerbschlagbiegeversuch wird zur Bestimmung der Zähigkeitseigenschaften von Kunststoffen verwendet. Er stellt eine messtechnische Erweiterung des konventionellen Kerbschlagbiegeversuchs nach DIN EN ISO 179 [1] dar und wird vorzugsweise an Prüfkörpern mit Metallklingenkerb durchgeführt [2, 3]. Die Palette der verwendeten Kunststoffe reicht dabei von spröden Duromeren bis hin zu hochschlagzähen Polymerblends. Es erfolgt eine getrennte Registrierung des Kraft-Durchbiegungs-Verhaltens und die Trennung in linear-elastische und elastisch-plastische Energieanteile. Unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Prüfkörper- und Kerbgeometrie werden geometrieunabhängige Werkstoffkennwerte ermittelt. Diese Kennwerte können zur Qualitätskontrolle und -sicherung sowie für Forschung und Entwicklung herangezogen werden.

## 2 Kurzbeschreibung des Verfahrens

Die Zähigkeitsprüfung schlagzäher Kunststoffe erfolgt mit Pendelschlagwerken nach DIN EN ISO 13802 [4] mit Schlagenergien von 0,5 bis 50 J und Auftreffgeschwindigkeiten von  $2,9 \text{ ms}^{-1}$  bis  $3,8 \text{ ms}^{-1}$  bei Charpy-Anordnung. Beim Kerbschlagbiegeversuch wird ein einseitig gekerbter Vierkantprüfkörper durch einen Schlag mit einem Pendelhammer zerbrochen. Der Pendelhammer, der an der Schlagseite die Hammer-schneide oder Finne enthält, ist an einem rohrförmigen Pendelarm befestigt. Er beschreibt nach dem Ausklinken einen Kreisbogen und überträgt im tiefsten Punkt der Hammerbahn einen Teil seiner kinetischen Energie auf die Prüfkörper.

Die Aufnahme des Kraftsignals erfolgt über an der Hammerfinne positionierte Halbleiterdehnmessstreifen, die in einer Wheatstone'schen Brückenschaltung angeordnet sind. Die Verstärkung des Signals erfolgt über einen mit integrierten Operationsverstärkern bestückten Kraftverstärker.

Das Messsystem ermöglicht die wahlweise Aufzeichnung von Kraft( $F$ )-Zeit( $t$ )- und Kraft( $F$ )-Durchbiegungs( $f$ )-Diagrammen.

Aus den  $F$ - $t$ -Diagrammen wird unter Berücksichtigung des 2. Newton'schen Axioms durch Integration zunächst die Geschwindigkeit des Pendelhammers als Funktion der Zeit (Gl. 1) und durch nochmalige Integration die Durchbiegung  $f$  des Prüfkörpers als Funktion der Zeit (Gl. 2) ermittelt.

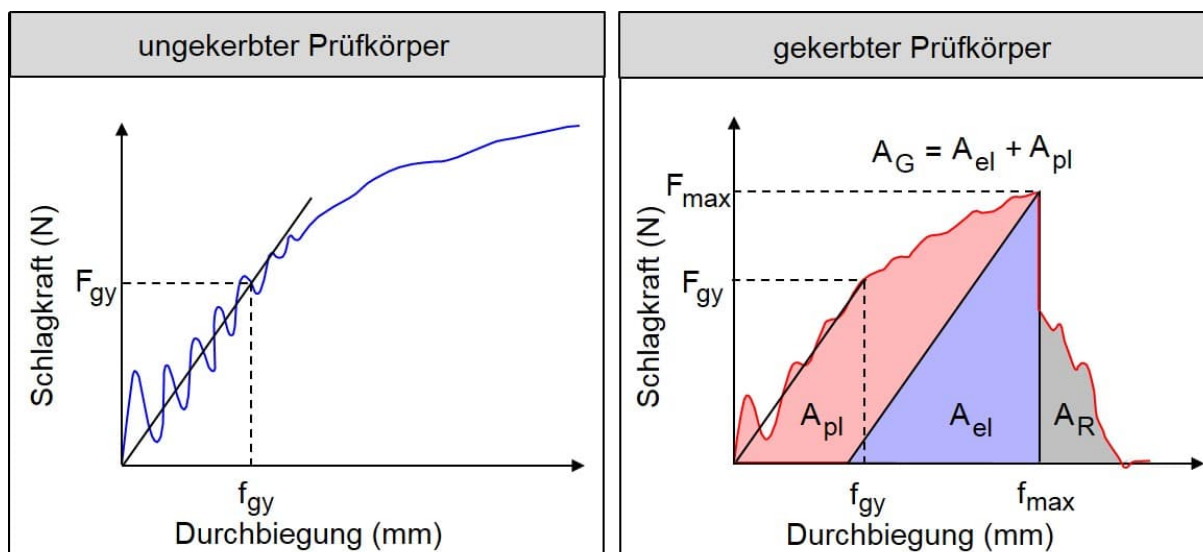
$$v(t) = v_0 - \frac{1}{m} \int_0^t F(\tau) d\tau \quad (1)$$

$$f(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau \quad (2)$$

Die direkte Messung des Wegsignals erfolgt durch die Verschiebung einer am Pendelhammer befestigten Blende im Strahlengang einer photooptischen Wegmesseinrichtung. Die Verstärkung des Signals wird hier durch einen Kompensationsverstärker erzielt.

Als Analog-Digital-Wandler dient ein Speicheroszilloskop, über das die Messwerte direkt in die nachgeordnete Aufzeichnungs- und Auswerteeinheit (PC mit Peripherie) geleitet werden. Das Speicheroszilloskop dient gleichzeitig zur Sichtkontrolle während des Versuches.

Zur Auswertung werden die in Bild 1 angegebenen charakteristischen Messgrößen  $F_{\max}$ ,  $F_{gy}$ ,  $f_{\max}$  und  $f_{gy}$  herangezogen.



**Bild 1:** Charakteristische Kraft-Durchbiegungs-Diagramme eines ungekerbten sowie eines gekerbten Prüfkörpers mit Rissverzögerungsenergie

## Teil I

### 3 Kennwertermittlung als Widerstand gegenüber instabiler Rissausbreitung

#### 3.1 Zusammenfassung der Testmethode

Das Ziel dieser Testmethode besteht in der Bestimmung bruchmechanischer Werkstoffkennwerte, die den Werkstoffwiderstand gegenüber instabiler Rissausbreitung quantifizieren. Die Methode ist gültig für die Dreipunktbiegebeanspruchung von Kunststoffprüfkörpern mit scharfem Anriss. Ausgangspunkt sind Kraft-Durchbiegungs-Diagramme, mit deren Hilfe Spannungsintensitätsfaktoren  $K_{Id}$ ,  $J$ -Integral-Werte  $J_{Id}$ , und kritische Rissöffnungsverschiebungswerte  $\delta_{Id}$ , ermittelt werden.

#### 3.2 Prüfkörper

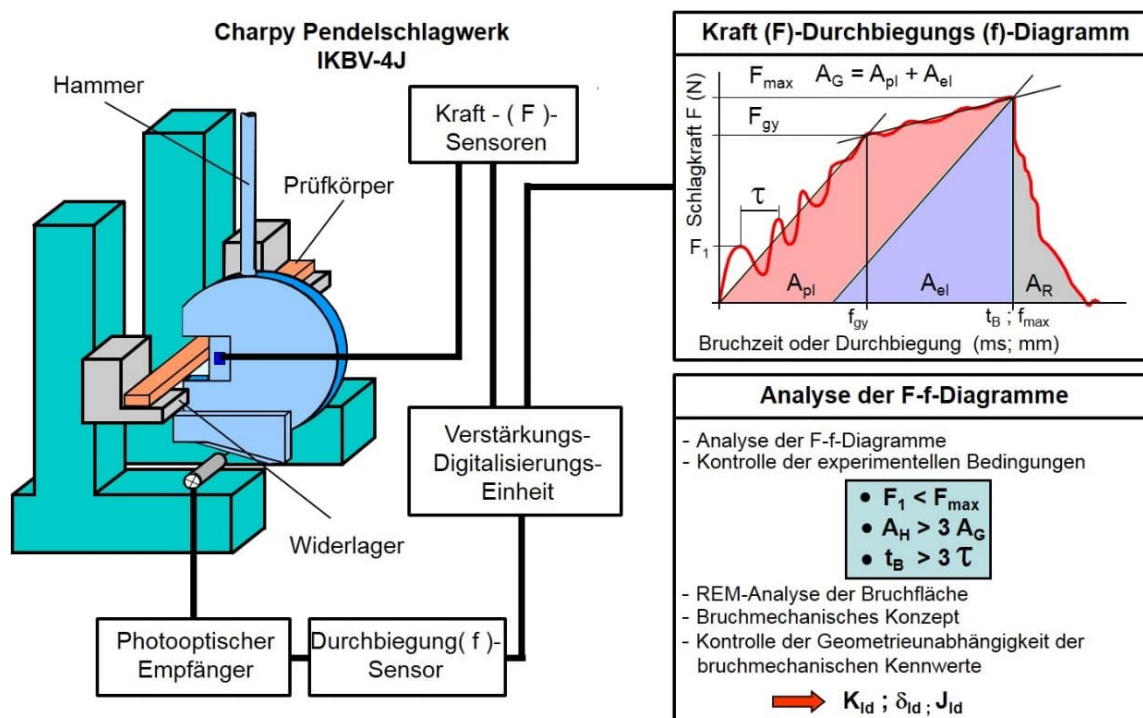
In Anlehnung an die DIN EN ISO 179 [1] werden vorzugsweise Prüfkörper mit den Abmessungen Dicke  $B = 4$  mm, Breite  $W = 10$  mm und Länge  $L = 80$  mm verwendet. Die Kerbeinbringung erfolgt vorzugsweise mittels Metallklingen unter Verwendung einer pneumatischen Kerbeinbringvorrichtung an der Schmalseite der Prüfkörper bis zu einer Ausgangsrislänge von  $a = 2$  mm. Die Stützweite beträgt  $s = 40$  mm. Die

Prüfkörper dürfen keine Verwindungen aufweisen und sollten paarweise parallele und senkrecht aufeinander stehende Oberflächen haben. Die Oberflächen und Kanten müssen frei sein von Kratzern, Kratern, Einfallstellen und Schwimmhäuten. Vor der Prüfung sind die Dicke und die Breite der Prüfkörper mit einer Genauigkeit von 0,01 mm auszumessen, und die Geometrie ist im Prüfprotokoll festzuhalten. Es sollen mindestens 10 Prüfkörper geprüft werden, die vorher 12 h am Prüfort gelagert waren.

### 3.3. Versuchsdurchführung

Der Versuch wird in Normklima durchgeführt, treten Abweichungen davon auf bzw. sind Abweichungen entsprechend dem Prüfziel erforderlich, sind diese im Prüfprotokoll zu vermerken.

Der Prüfkörper wird gegen die Widerlager des Pendelschlagwerkes so angeordnet, dass die Hammerschneide des Pendels in der Mitte des Prüfkörpers auftrifft. Die Kerbmittle befindet sich dabei in der Schlagebene auf der der Hammerschneide gegenüberliegenden Seite (Bild 2). Die Pendelhammergeschwindigkeit sollte dabei vorzugsweise 1,0 oder 1,5 m/s betragen.



**Bild 2:** Bruchmechanik-Messplatz zur Durchführung des instrumentierten Kerbschlagversuchs

Die Aufnahme der Kraft-Durchbiegungs-Diagramme erfolgt nach der in der Bedienungsanleitung vorgegebenen Art und Weise.

Die Ermittlung des dynamischen  $E$ -Moduls  $E_d$  und der dynamischen Streckgrenze  $\sigma_d$  erfolgt an mindestens 5 ungekerbten Prüfkörpern.

Dabei wird der lineare Teil des Kraft-Durchbiegungs-Diagramms des ungekerbten Prüfkörpers berücksichtigt (vgl. Bild 1), d.h., nach Festlegung der Kraft  $F_{gy}$  werden  $E_d$  und  $\sigma_d$  nach Gl. 3 bzw. Gl. 4 berechnet.

$$E_d = \frac{F_{gy} s^3}{4BW^3 f_{gy}} \quad (3)$$

$$\sigma_d = \frac{3F_{gy} s}{2BW^2} \quad (4)$$

### 3.4 Auswertung

#### 3.4.1 Allgemeine Angaben

Zur Auswertung werden die in Bild 1 dargestellten Kräfte und Durchbiegungen mit Hilfe der Software „Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch“ bestimmt. Dabei ist es grundsätzlich möglich, die Schlagarbeit, d.h. sowohl  $A_G$  als auch  $A_R$  bzw.  $(A_G + A_R)$ , grafisch zu ermitteln. Nach der Eingabe der Prüfkörpergeometrie, einschließlich der Ausgangsrisslänge  $a$ , des Bruchspiegels  $a_{BS}$ , der dynamischen Streckgrenze  $\sigma_d$ , und des  $E$ -Moduls  $E_d$ , werden die im Programm unter „Hauptkennwerte“ zusammengefassten Zähigkeitskennwerte berechnet. Sowohl die Eingangsgrößen als auch die errechneten Kennwerte werden ausgegeben und dem Prüfprotokoll hinzugefügt, wobei die Möglichkeit der grafischen Darstellung der  $F$ - $f$ -Diagramme besteht.

#### 3.4.2 Ermittlung der bruchmechanischen Werkstoffkennwerte

Zur Bewertung der Zähigkeit von Kunststoffen nach dieser Prozedur werden folgende Kennwerte bevorzugt angewandt:

##### 1. Dynamische Bruchzähigkeit $K_{Qd}$ [5]

$$K_{Qd} = \frac{F_{max} s}{BW^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (5)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3}{2} \left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \left[ \frac{1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \left(\frac{a}{W}\right)^2\right)}{\left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \right] \quad (6)$$

bzw.

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 2,9 \left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 4,6 \left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} + 21,8 \left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 37,6 \left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} + 38,7 \left(\frac{a}{W}\right)^{9/2} \quad (7)$$

##### 2. $J$ -Integral-Werte $J_{Qd}$

- Auswertemethode nach *Sumpter* und *Turner* (ST) –  $J^{ST}$  [6]

$$J_{Qd}^{ST} = \eta_{el} \frac{A_{el}}{B(W-a)} + \eta_{pl} \frac{A_{pl}}{B(W-a)} \frac{W - a_{eff}}{W - a} \quad (8)$$

mit

$$\eta_{el} = \frac{2F_{gy} s^2 (W - a)}{f_{gy} E_d B W^3} f^2\left(\frac{a}{W}\right) (1 - \nu^2) \quad (9)$$



und

$$\eta_{pl} = 2 - \frac{\left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(0,892 - 4,476 \frac{a}{W}\right)}{1,125 + 0,892 \frac{a}{W} - 2,238 \left(\frac{a}{W}\right)^2} \quad (10)$$

- Auswertemethode nach *Merkle* und *Corten* -  $J^{MC}$  [7]

$$J_{Qd}^{MC} = G_I + \frac{2}{B(W-a)} [D_1 A_G + D_2 A_K - (D_1 + D_2) A_{el}] \quad (11)$$

$$G_I = \frac{K_{Id}^2}{E} (1 - \nu^2) \quad \text{für EDZ} \quad (12)$$

$$D_1 = \frac{1 + \gamma}{1 + \gamma^2} \quad (13)$$

$$D_2 = \frac{\gamma(1 - 2\gamma - \gamma^2)}{(1 + \gamma^2)^2} \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{1,456(W-a)}{s} \quad (15)$$

$$A_K = F_{\max} f_{\max} - A_G \quad (16)$$

### 3. Kritische Rissöffnungsverschiebung $\delta_{Qd}$ [8, 9]

$$\delta_{Qd} = \frac{1}{n} (W-a) \frac{4f_{\max}}{s} \quad (17)$$

bzw.

$$\delta_{Qdk} = \frac{1}{n} (W-a) \frac{4f_k}{s} \quad (18)$$

mit

$$f_k = f_{\max} - f_b \quad (19)$$

Die Angabe weiterer Kennwerte resultiert aus der anwendungstechnischen Problemstellung der Messserie und muss im Prüfprotokoll gesondert ausgewiesen werden.

#### 3.4.3 Überprüfung der Gültigkeit der ermittelten bruchmechanischen Werkstoffkennwerte

##### 3.4.3.1 Überprüfung der experimentellen Bedingungen

Für die Bestimmung bruchmechanischer Kennwerte im instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch ist eine Kontrolle der experimentellen Bedingungen erforderlich [10–15]

##### - Bruchzeit $t_B$

Zur Gewährleistung eines quasistatischen Spannungszustandes im Prüfkörper muss die Bruchzeit  $t_B$  das 2,3 bis 3fache der Periode der charakteristischen Trägheitsschwingung  $\tau$  betragen:

$$t_B \geq 2,3 \dots 3\tau \quad (20)$$

Eine weitere Verringerung von  $t_B$  führt zu auswertemethodischen Problemen und muss vermieden werden.

### - Energieaufnahme ( $A_G + A_R$ )

Die Kontrolle der Energieaufnahme erfolgt nach Gl. 21, wonach die vom Pendelhammer für den Bruchvorgang angebotene Schlagenergie  $A_H$  größer als das 3fache der von dem Prüfkörper aufgenommenen Energie sein muss.

$$A_H > 3(A_G + A_R) \quad (21)$$

### - Aufschlagimpuls

Der Aufschlagimpuls  $F_1$  muss kleiner als die Bruchkraft  $F_{\max}$  sein.

$$F_1 < F_{\max} \quad (22)$$

### 3.4.3.2 Anforderungen an die Prüfkörpergeometrie

Zur Abschätzung der für die Einhaltung des EDZ und damit für die Ermittlung geometrieunabhängiger bruchmechanischer Werkstoffkenngrößen notwendigen Geometriegrößen Dicke  $B$ , Kerbtiefe  $a$  und Ligamentlänge ( $W-a$ ) gelten folgende Beziehungen:

#### - Dynamische Bruchzähigkeit

$$B; a; (W - a) \geq \beta \left( \frac{K_{Id}}{\sigma_d} \right)^2 \quad (23)$$

mit

$$\beta = 3466 K_{Id}^{-1,73} \quad [2, 3, 11, 15-17] \quad (24)$$

#### - J-Integral-Kennwert

$$B; a; (W - a) \geq \varepsilon \frac{J_{Id}}{\sigma_d} \quad (25)$$

mit

$$\varepsilon = 224 J_{Id}^{-0,94} \quad [2, 3, 15-20] \quad (26)$$

#### - Kritische Rissöffnungsverschiebung

$$B; a; (W - a) \geq \xi \delta_{Id} \quad (27)$$

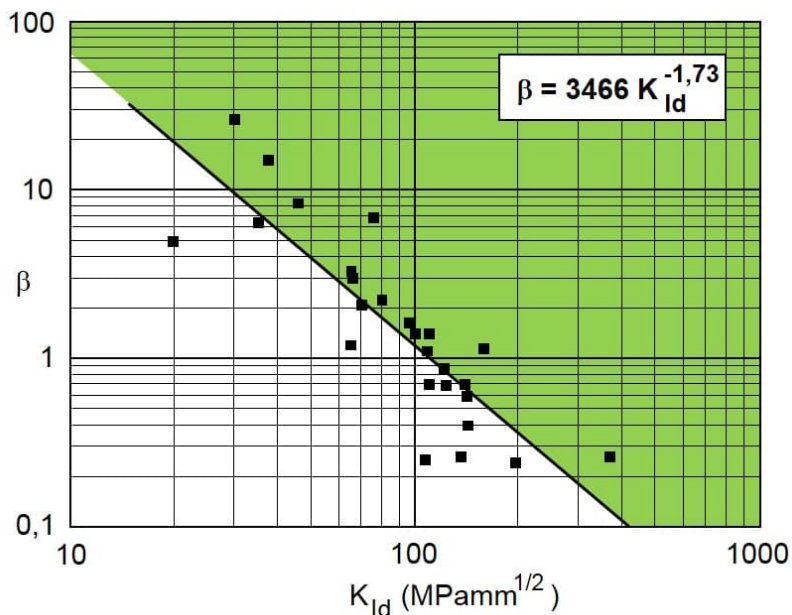
bzw.

$$B; a; (W - a) \geq \xi \delta_{Idk} \quad (28)$$

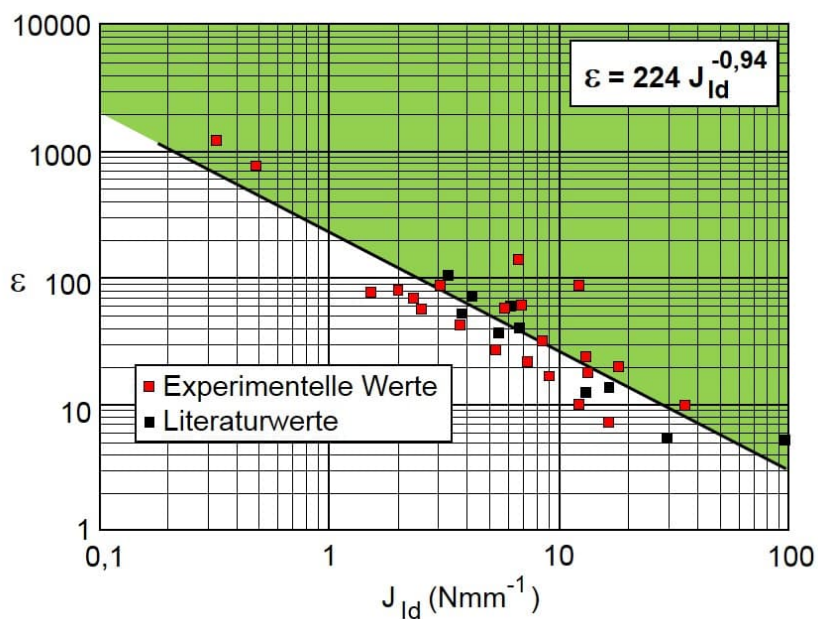
mit

$$\xi = 3,6 \delta_{Idk}^{-0,83} \quad [2, 3, 11, 15-17] \quad (29)$$

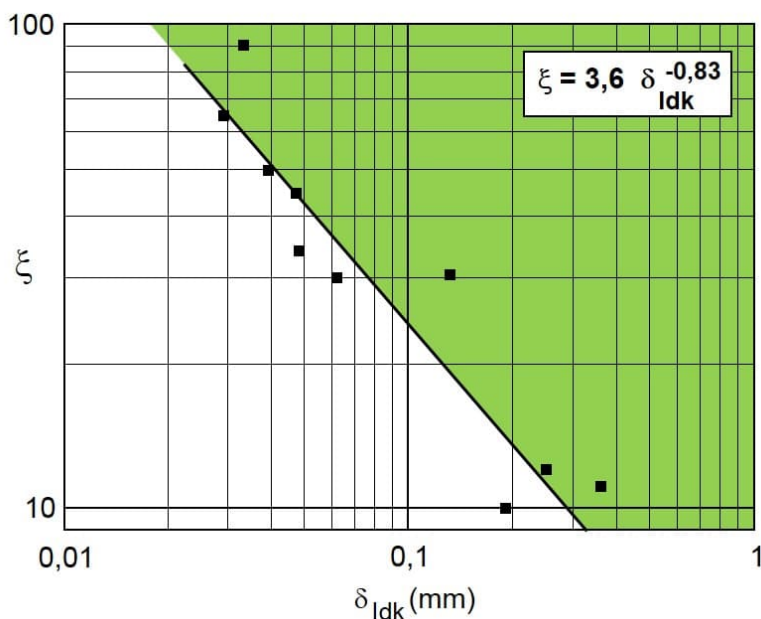
Die funktionellen Zusammenhänge  $\beta = f(K_{Id})$ ,  $\varepsilon = f(J_{Id})$  und  $\xi = f(\delta_{Idk})$  wurden experimentell ermittelt und sind in den Bildern 3 bis 5 enthalten.



**Bild 3:** Anforderungen an die Prüfkörpergeometrie bei der Bestimmung der dynamischen Bruchzähigkeit  $K_{Id}$  [15]



**Bild 4:** Anforderungen an die Prüfkörpergeometrie bei der Bestimmung von  $J$ -Integral-Werten  $J_{Id}$  [13, 15]



**Bild 5:** Anforderungen an die Prüfkörpergeometrie bei der Bestimmung von kritischen Rissöffnungsverschiebungen  $\delta_{ldk}$  [15]

## Teil II

### 4 Kennwertermittlung als Widerstand gegenüber stabiler Rissausbreitung

#### 4.1 Zusammenfassung der Testmethode

Das Ziel dieser Testprozedur ist die Bestimmung bruchmechanischer Werkstoffkennwerte, die den Rissinitiierungsprozess und das Energieaufnahmevermögen des Werkstoffs quantifizieren. Die Methode ist gültig für die Dreipunktbiegebeanspruchung von Kunststoffprüfkörpern mit scharfem Anriss unter Verwendung der Mehrprobentechnik. Ausgangspunkt sind Kraft-Durchbiegungs-Diagramme, mit deren Hilfe  $J$ -Integral- bzw. Rissöffnungsverschiebungs-Werte ermittelt werden, die in Abhängigkeit von der stabilen Rissverlängerung  $\Delta a$  aufgetragen werden. Diese Wertepaare charakterisieren den Werkstoffwiderstand gegenüber stabiler Risseinleitung und -ausbreitung [2, 15, 21–25]. Durch geeignetes Fitting der Wertepaare sind die Ermittlung eines Rissinitiierungswertes und die Quantifizierung energiedissipativer Prozesse möglich.

#### 4.2 Prüfkörper

Wie bei der Kennwertermittlung als Werkstoffwiderstand gegenüber instabiler Rissausbreitung werden vorzugsweise Prüfkörper mit den Abmessungen Dicke  $B = 4$  mm, Breite  $W = 10$  mm und Länge  $L = 80$  mm verwendet. Die Kerbeinbringung erfolgt ebenfalls pneumatisch an der Schmalseite der Prüfkörper bis zu einer Ausgangsrisslänge von  $a = 4,5$ – $5$  mm. Die Stützweite  $s$  beträgt, außer bei Verwendung der Stützweitenmethode,  $s = 40$  mm.

Vor der Prüfung sind die Dicke und die Breite der Prüfkörper mit einer Genauigkeit von  $0,01$  mm auszumessen und die Geometrie ist im Prüfprotokoll festzuhalten.

Für die Aufnahme dynamischer Risswiderstandskurven unter Verwendung der Mehrprobentechnik sind 15 bis 20 identische Prüfkörper erforderlich, die vor dem Versuch 12 h am Prüfort gelagert wurden.

### 4.3. Versuchsdurchführung

Für die Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften bei Raumtemperatur muss für die Normalisierung der Prüfkörper und die Durchführung der Versuche das Standardklima nach DIN EN ISO 291 [26] mit einer Lufttemperatur von 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % (Kennzeichnung: Klima 23/50) verwendet werden [15].

In dieser Norm sind zwei unterschiedliche Klassen von Normklimaten entsprechend den verschiedenen Abweichungsbereichen angegeben. In der Klasse 1 ist eine zulässige Abweichung in der Temperatur von  $\pm 1$  °C und der relativen Luftfeuchte von  $\pm 5$  % und in der Klasse 2 in der Temperatur von  $\pm 2$  °C und der relativen Luftfeuchte von  $\pm 10$  % gefordert. Treten Abweichungen davon auf bzw. sind Abweichungen entsprechend dem Prüfziel erforderlich, sind diese im Prüfprotokoll zu vermerken.

Die Anordnung der Prüfkörper im Pendelschlagwerk erfolgt wie in Abschnitt 3.3 beschrieben.

Vor der eigentlichen Ermittlung der  $J\text{-}\Delta a$ -Wertepaare ist unter folgenden Prüfbedingungen mindestens ein Kraft-Durchbiegungs-Diagramm aufzunehmen:

- Prüfkörpergeometrie:  $L = 80$  mm  
 $B = 4$  mm  
 $W = 10$  mm  
 $a = 4,5\text{--}5$  mm
- Prüfbedingungen:  $s = 40$  mm  
 $v_H = 1$  bzw.  $1,5$  m/s  
 $m_H = 0,955$  kg

Dieses Kraft-Durchbiegungs-Diagramm wird als Ausgangsdiagramm für die eigentlichen Messungen verwendet.

Anschließend werden mit Hilfe einer der folgenden Techniken stabile Anrisse mit definierter Länge erzeugt und parallel dazu Kraft-Durchbiegungs-Diagramme aufgenommen.

#### 1. Energiemethode

Änderung der Hammerenergie durch Änderung der Hammermasse bzw. der Hammergeschwindigkeit (Low-Blow-Technik)

#### 2. Stützweitenmethode

Änderung des Verhältnisses Stützweite/Prüfkörperbreite

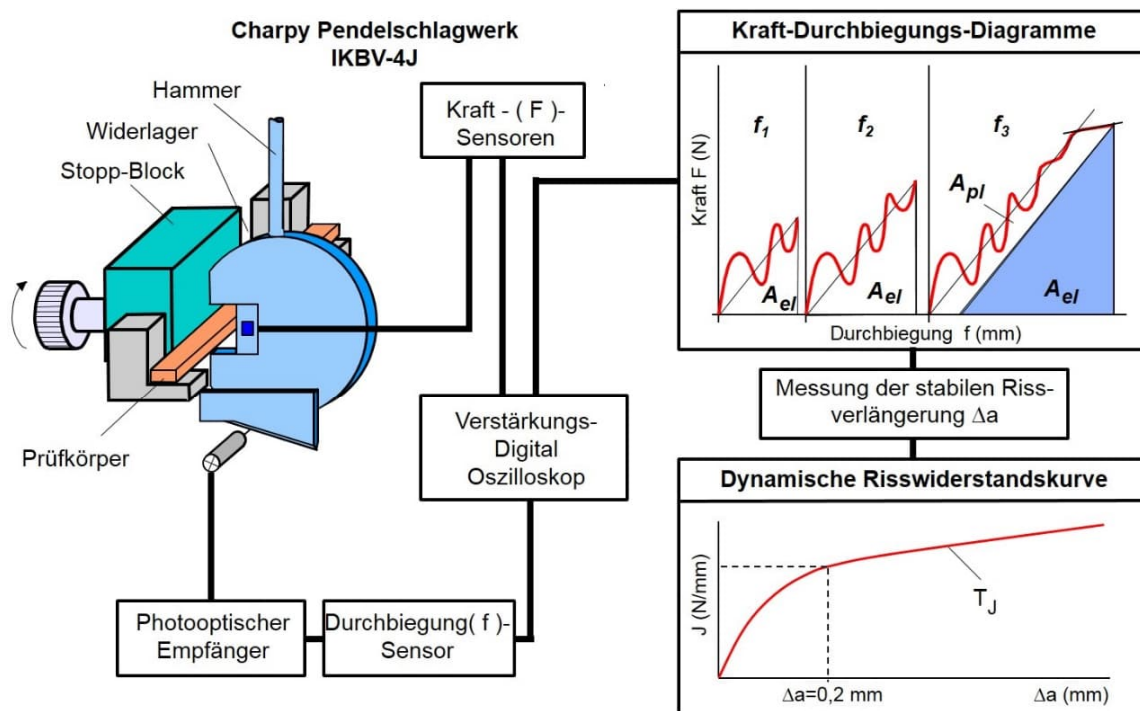
#### 3. Prüfkörperlängenmethode [27]

Reduzierung der Prüfkörperlänge  $L$  auf Länge = Stützweite + 0,1–0,2 mm Übermaß

#### 4. Stopp-Block-Methode [28, 29]

Verwendung von Durchbiegungsbegrenzungselementen definierter Breitenabstufung bzw. einer Auffangvorrichtung für den Pendelhammer mit definiert einstellbarer, zugelassener Prüfkörperdurchbiegung

Die Stopp-Block-Methode wird mit der in Bild 6 dargestellten Zusatzeinrichtung durchgeführt.



**Bild 6:** Bruchmechanik-Arbeitsplatz zur Durchführung des instrumentierten Kerbschlagbiegeversuches mit Stopp-Block-Einrichtung

Zweckmäßig ist dabei eine kontinuierliche Abfolge der Messungen von kleinen zu großen Rissverlängerungen  $\Delta a$  oder umgekehrt. Gemessen wird dabei bis  $F \leq F_{\max}$  des vorab registrierten Kraft-Durchbiegungs-Diagramms.

Die Aufnahme der Kraft-Durchbiegungs-Diagramme erfolgt nach der in der Bedienungsanleitung vorgegebenen Art und Weise.

Das endgültige Trennen der Prüfkörper erfolgt bei tiefen Temperaturen und/oder hohen Prüfgeschwindigkeiten. Anschließend werden die stabilen Rissverlängerungen  $\Delta a$  lichtmikroskopisch ausgemessen.

Die Ermittlung des dynamischen  $E$ -Moduls  $E_d$  und der dynamischen Streckgrenze  $\sigma_d$  erfolgt nach Gl. 3 bzw. Gl. 4.

## 4.4 Auswertung

### 4.4.1 Allgemeine Angaben

Grundlage der Auswertung bilden auch hier die in Bild 1 dargestellten Kräfte und Durchbiegungen, die mit Hilfe der Software „Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch“ bestimmt werden, wobei auch hier die Möglichkeit besteht, die zum jeweiligen Einstellen der stabilen Rissverlängerung notwendige Energie grafisch zu ermitteln. Nach der Eingabe der Prüfkörpergeometrie, einschließlich der Ausgangsrisslänge  $a$  und der stabilen Rissverlängerung  $\Delta a$ , der dynamischen Streckgrenze und des  $E$ -Moduls werden die im Programm unter „ $R$ -Kurven-Integrale“ zusammengefassten Zähigkeitskennwerte berechnet. Sowohl die Eingangsgrößen als auch die errechneten Kennwerte sind auszugeben und dem Prüfprotokoll hinzuzufügen.

Es besteht auch hier die Möglichkeit,  $F$ - $f$ -Diagramme grafisch darzustellen oder als ASCII-File zu exportieren.

#### 4.4.2 Ermittlung der Belastungsparameter

Zur Ermittlung des Belastungsparameters der Risswiderstandskurve werden nach dieser Prozedur folgende Gleichungen verwendet:

##### 1. J-Integral-Werte:

$$J_a = \eta_{el} \frac{A_{el}}{B(W-a)} + \eta_{pl} \frac{A_{pl}}{B(W-a)} \left\{ 1 - \frac{(0,75\eta_{el} - 1)\Delta a}{(W-a)} \right\} \quad (30)$$

mit

$$\eta_{el} = 0,5 + 5,5 \left( \frac{a}{W} \right) - 5 \left( \frac{a}{W} \right)^2 \quad (31)$$

Für die Bestimmung von  $\eta_{el}$  kann auch Gleichung (9) verwendet werden. Die Ermittlung von  $\eta_{pl}$  erfolgt nach Gl. 10.

##### 2. Kritische Rissöffnungsverschiebung

Die Ermittlung der kritischen Rissöffnungsverschiebungen  $\delta_d$  bzw.  $\delta_{dk}$  erfolgt analog zu (17) und (18).

#### 4.4.3 Darstellung gültiger Risswiderstandskurven zur Bestimmung des Rissinitiierungswertes

Die Ermittlung des Rissinitiierungswertes  $J_{0,2}$  bzw.  $\delta_{0,2}$  erfolgt in Anlehnung an das ESIS TC4 Testprotokoll „A Testing Protocol for Conducting J-Crack Growth Resistance Curve Tests on Plastics“ [30, 31]. Dazu wird der folgende Auswerteformalismus angewendet:

1. Auftragen der Abhängigkeit  $J$  bzw.  $\delta = f(\Delta a)$
2. Einzeichnen einer Geraden parallel zur  $J$  bzw.  $\delta$ - Achse bei  $\Delta a = 0,05$  mm ( $\Delta a_{min}$  in Abb. 7)
3. Bestimmung von  $\Delta a_{max}$  nach Gl. 32

$$\Delta a = 0,1(W - a) \quad (32)$$

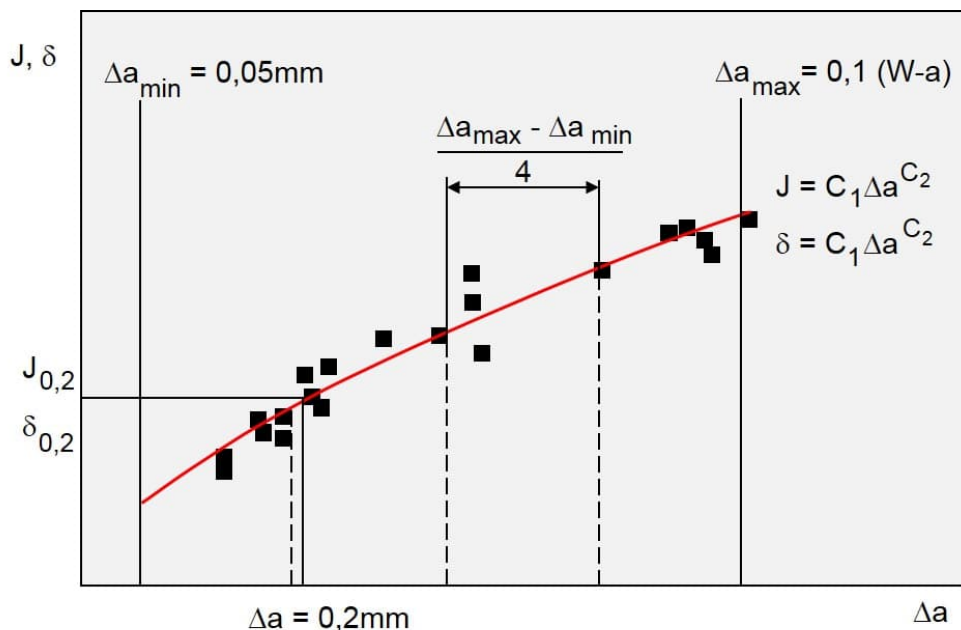
4. Einzeichnen einer zweiten Parallelen zur  $J$  bzw.  $\delta$ -Achse an der Stelle  $\Delta a_{max}$
5. Überprüfung der Messpunkteverteilung (vgl. Bild 7); dabei sind für die Auswertung mindestens 3 Messpunkte im ersten Bereich erforderlich.
6. Kurvenfitting

Zu berücksichtigen sind hierbei alle Messpunkte zwischen  $\Delta a_{min}$  und  $\Delta a_{max}$ .

Als Regressionsfunktion wird eine Potenzfunktion entsprechend Gl. 33 bzw. Gl. 34 gewählt.

$$J \text{ bzw. } \delta = C_1 \Delta a^{C_2} \quad (33)$$

$$J \text{ bzw. } \delta = C_1 (C_3 + \Delta a)^{C_2} \quad (34)$$



**Bild 7:** Gültigkeitsgrenzen, Messpunkteverteilung und Bestimmung des Rissinitiationswertes

### 7. Überprüfung der Gültigkeit der $J$ -Integral- bzw. $\delta$ -Werte

Als  $J_{\max}$ -Wert wird der sich aus Gl. 35 ergebende, kleinere  $J$ -Wert angesehen, und mit Hilfe der Werte  $\Delta a_{\min}$ ,  $\Delta a_{\max}$  und  $J_{\max}$  bzw.  $J_G$  wird eine Gültigkeitsbox für die Risswiderstandskurve definiert (Bild 8).

$$J_{\max} = \frac{(W-a)\sigma_d}{20} \text{ bzw. } J_{\max} = \frac{B\sigma_d}{20} \quad (35)$$

Analog dazu ist die Vorgehensweise bei der Überprüfung der  $\delta$ - $\Delta a$ -Kurve (Bild 8), (Gl. 36).

$$\delta_{\max} = \frac{(W-a)}{50} \text{ bzw. } \delta_{\max} = \frac{B}{50} \quad (36)$$

### 8. Abschließend erfolgt die Überprüfung des Anstiegs der $J$ - $\Delta a$ -Kurve an der Stelle $J_{\max}$ bzw. $J_G$ (vgl. Bild 8) nach Gl. 37.

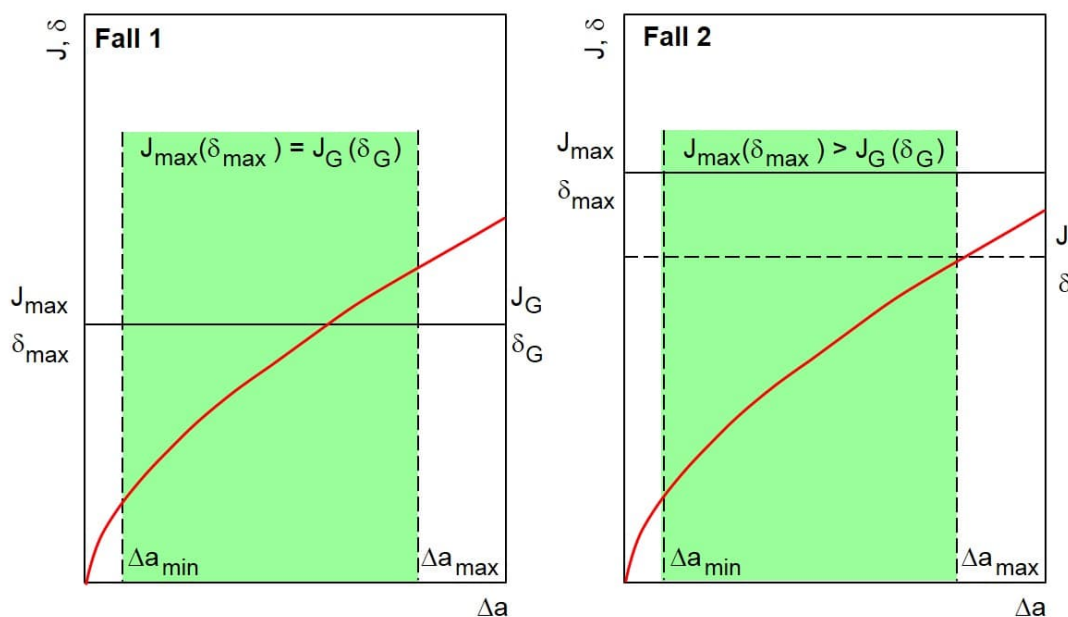
$$\omega = \frac{W-a}{J} \frac{dJ}{d(\Delta a)} \Big|_{J_{\max} \text{ bzw. } J_G} \geq 10 \quad (37)$$

Ist diese Bedingung erfüllt, kann davon ausgegangen werden, dass die  $J$ - $\Delta a$ -Wertepaare innerhalb der dargestellten Grenzen  $\Delta a_{\min}$ ,  $\Delta a_{\max}$  und  $J_{\max}$  bzw.  $J_G$  eine werkstoffspezifische, geometrieunabhängige Risswiderstandskurve repräsentieren. Ist  $\omega < 10$ , reduziert sich die maximal zulässige Rissverlängerung  $\Delta a_{\max}$  entsprechend Gl. 38.

$$\Delta a_{\max} \equiv \Delta a_1 = \frac{C_2(W-a)}{10} \quad (38)$$

Ebenso erfüllt die  $\delta$ - $\Delta a$ -Kurve innerhalb der Grenzen  $\Delta a_{\min}$ ,  $\Delta a_{\max}$  und  $\delta_{\max}$  bzw.  $\delta_G$  alle Anforderungen an eine geometrieunabhängige Risswiderstandskurve.





**Bild 8:** Gültigkeitsgrenzen für J-kontrolliertes Risswachstum

#### 9. Bestimmung des Rissinitiiierungswertes

Nach dieser Prozedur wird als Rissinitiiierungswert der  $J$ - bzw.  $\delta$ -Wert bezeichnet, der sich aus dem Schnittpunkt der Rissausbreitungskurve und einer Parallelen zur  $J$ - bzw.  $\delta$ -Achse bei  $\Delta a = 0,2$  mm ergibt. Dieser  $J_{0,2}$ - bzw.  $\delta_{0,2}$ -Wert ist unter den folgenden Bedingungen ein gültiger  $J$ - bzw.  $\delta$ -Wert:

- Es muss mindestens ein  $J$ - $\Delta a$ - bzw.  $\delta$ - $\Delta a$ -Wertepaar zwischen 0,2 und 0,4 mm Rissverlängerung liegen.
- $J_{0,2}$  muss kleiner bzw. gleich  $J_{\max}$  sein,  $\delta_{0,2}$  kleiner bzw. gleich  $\delta_{\max}$
- Der  $J_{0,2}$ -Wert muss das Dickenkriterium des  $J$ -Integral-Konzepts erfüllen (Gl. 39).

$$B;a;(W - a) > \frac{25J_{0,2}}{\sigma_d} \quad (39)$$

- Der  $\delta_{0,2}$ -Wert muss das Dickenkriterium des CTOD-Konzepts erfüllen (Gl. 40).

$$B;a;(W - a) > 25\delta_{0,2} \quad (40)$$

- Der Anstieg der  $J$ - $\Delta a$ - Kurve an der Stelle  $\Delta a = 0,2$  muss kleiner als die Fließspannung des Werkstoffs  $\sigma_y$  sein (verwendet wird  $\sigma_y = \sigma_d$ ).
- Keiner der Prüfkörper darf bei Erreichen der maximalen Schlagkraft Anzeichen von Spaltbruch aufweisen.

#### 4.4.4 Bestimmung von $JT_J$

Die Quantifizierung energiedissipativer Prozesse erfolgt auf der Grundlage des  $JT_J$ -Konzepts von *Will* und *Michel* [32–35] nach folgendem Formalismus:

1. Auftragen der Abhängigkeit  $J = f(\Delta a)$
2. Anpassung der  $J$ - $\Delta a$ -Wertepaare an eine Funktion der Form

$$J = \sqrt{C_4 + C_5 \Delta a} \quad (41)$$

### 3. Überprüfung der Gültigkeit der Risswiderstandskurve

- a) Überprüfung des Anstiegskriteriums an der größten experimentell ermittelten stabilen Rissverlängerung  $\Delta a_{\text{exp}}$  (Gl. 42)

$$\omega = \frac{W-a}{J} \frac{dJ}{d(\Delta a)} \Big|_{\Delta a_{\text{exp}}} \gg 1 \quad (42)$$

- b) Treten bei größeren Rissverlängerungen Abweichungen der Messpunkte von der ermittelten Regressionsfunktion auf, sind an Hand einer  $J^2$ - $\Delta a$ -Darstellung (Bild 9)  $\Delta a_{\text{max}}$  und  $\omega_{\text{exp}}$  zu bestimmen. Anschließend ist eine erneute Anpassung der Wertepaare für  $\Delta a \leq \Delta a_{\text{max}}$  entsprechend Gl. 41 vorzunehmen.

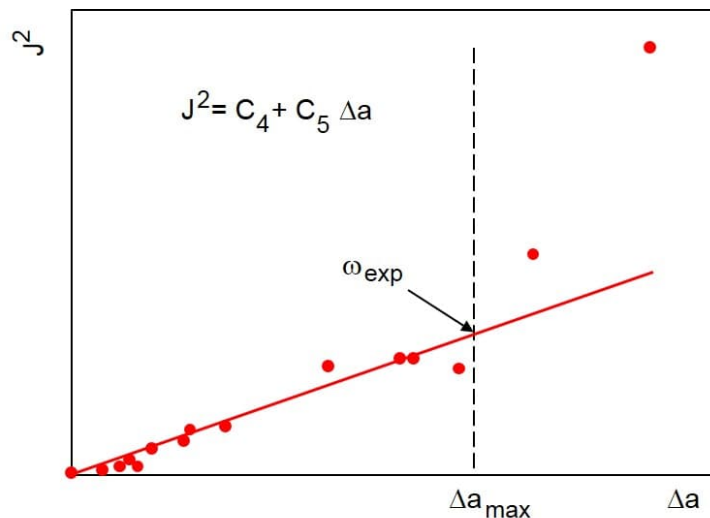
### 4. Bestimmung des $JT_J$ -Wertes

Die Bestimmung des  $JT_J$ - Wertes erfolgt nach Gl. 43. Dieser Wert stellt unter der Voraussetzung, dass die R-Kurve entsprechend Punkt 3 gültig ist, ebenfalls eine geometrieunabhängige bruchmechanische Werkstoffkenngröße dar, die den direkten Vergleich von Risswiderstandskurven unter Berücksichtigung des Werkstoffwiderstandes gegenüber Rissausbreitung ermöglicht.

$$JT_J = \frac{1}{2} C_5 \frac{E_d}{s_d^2} \quad (43)$$

Der Tearing-Modul  $T_J$  [35] wird nach Gl. 44 berechnet und  $J = f(\Delta a)$  entsprechend Gl. 41.

$$T_J = \frac{dJ}{d(\Delta a)} \frac{E_d}{s_d^2} \quad (44)$$



**Bild 9:** Experimentelle Bestimmung von  $\omega$

## Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN ISO 179: Kunststoffe – Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften. Teil 1 (2010-11): Nicht instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung; Teil 2 (2012-06): Instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung
- [2] Grellmann, W., Seidler, S., Hesse, W.: Prozedur zur Ermittlung des Risswiderstandsverhaltens mit dem instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch. In: Grellmann, W., Seidler, S. (Hrsg.) Deformation und Bruchverhalten von Kunststoffen. Springer Berlin Heidelberg (1998) 75–90
- [3] Grellmann, W., Seidler, S., Hesse, W.: Procedure for Determining the Crack Resistance Behaviour Using the Instrumented Charpy Impact Test. In: Grellmann, W., Seidler, S. (Eds.) Deformation and Fracture Behaviour of Polymers, Springer Berlin Heidelberg (2001) 71–86
- [4] DIN EN ISO 13802 (2016-07): Kunststoffe – Verifizierung von Pendelschlagwerken – Charpy-, Izod- und Schlagzugversuch
- [5] ASTM E 399 (2012): Standard Test Method for Linear-Elastic Fracture Toughness  $K_{Ic}$  of Metallic Materials.
- [6] Sumpter J. D. G., Turner C. E. (1976): Cracks and Fracture. ASTM STP 601: 3–18
- [7] Merkle J. G., Corten H. T. (1974): Journal of Pressure Vessel Technology 96, 4: 286ff
- [8] Grellmann W., Jungbluth M.: Anwendung des COD-Konzeptes zur Bestimmung geometrieunabhängiger bruchmechanischer Kennwerte beim instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch. Institut für Mechanik, Berlin und Chemnitz, Fracture Mechanics, Micromechanics and Coupled Fields (FMC)-Series Nr. 37 (1987) 186–192
- [9] Hoffmann H., Grellmann W., Zilvar V.: Instrumented Impact Studies of some Thermoplastic Composites, 28th Microsymposium on Macromolecules Polymer Composites, Prague July 1985, Polymer Composites. Walter de Gruyter & Co., Berlin New York (1986) 233–242
- [10] Grellmann W. (1982): Probleme und Ergebnisse der instrumentierten Kerbschlagbiegeprüfung von Polymerwerkstoffen. Institut für Mechanik, Berlin und Chemnitz, Fracture Mechanics, Micromechanics and Coupled Fields (FMC)-Series, 3: 102–111
- [11] Grellmann W.: Probleme der Ermittlung von Bruch- und Trägheitskräften bei der Bestimmung dynamischer Bruchzähigkeiten von Polymerwerkstoffen. Institut für Mechanik, Berlin und Chemnitz, Fracture Mechanics, Micromechanics and Coupled Fields (FMC)-Series, 3 (1982) 142–151
- [12] Grellmann W.: Bewertung der Zähigkeitseigenschaften durch bruchmechanische Kennwerte. In: Schmiedel H. (Hrsg.) Handbuch der Kunststoffprüfung. Carl Hanser Verlag, München Wien (1992) 139–183
- [13] Grellmann W., Che M.: Assessment of Temperature-Dependent Fracture Behavior with Different Fracture Mechanics Concepts on Example of Unoriented and Cold-Rolled Polypropylene. J. Applied Polymer Science 66 (1997) 1237–1249
- [14] Grellmann W., Sommer J.-P., Hoffmann H., Michel B.: Application of Different J-Integral Evaluation Methods for a Description of Toughness Properties of Polymers. In: Proceedings 1st Conference of Mechanics, June 29–July 5, Prague (Czech) (1987) 129–133

- 
- [15] Grellmann, W., Seidler S. (Hrsg.): Kunststoffprüfung, Carl Hanser Verlag, München (2015) 3. Auflage, ISBN 978-3-446-44350-1)
- [16] Grellmann, W., Seidler, S., Lach, R.: Geometrieunabhängige bruchmechanische Werkstoffkenngrößen – Voraussetzung für die Zähigkeitscharakterisierung von Kunststoffen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 32, 1–10 (2001) 552–561
- [17] Grellmann, W., Lach, R., Seidler, S.: Geometrie-Independent Fracture Mechanics Values of Polymers. *International Journal of Fracture, Letters in Fracture and Micromechanics*, 118 (2002) L9–L14
- [18] Grellmann W., Seidler S.: Application of ESIS Procedure for Determining the Fracture Resistance of Plastics. In: *Proceedings 10th Congress on Material Testing October 7-11, Budapest (Hungary), Vol. II (1991)* 385–390
- [19] Seidler S., Grellmann W.: Determination of Geometry Independent J-Integral Values on Tough Polymers, *International Journal of Fracture, Letters in Fracture and Micromechanics* 96 (1999) L17–L22
- [20] Grellmann W., Seidler S., Bierögel C.: Geometry-Independent Fracture Mechanics Values as a Requirement for Toughness Optimization of Polymers. In: *Proceedings 9th International Conference on Fracture (ICF 9), April 1–5, Sydney (Australia), Vol II (1997)* 1013–1020
- [21] Seidler S.: Anwendung des Reißwiderstandskonzeptes zur Ermittlung strukturbezogener bruchmechanischer Werkstoffkenngrößen bei dynamischer Beanspruchung. *Fortschritt-Berichte, VDI-Reihe 18: Mechanik/Bruchmechanik Nr. 231*, VDI-Verlag, Düsseldorf (1998)
- [22] Seidler S., Grellmann W.: Application of the Instrumented Impact Test to the Toughness Characterization of High Impact Thermoplastics. *Polymer Testing* 14 (1995) 453–469
- [23] Grellmann W., Seidler S.: Reißfähigkeiten von Kunststoffen – Messungen bei dynamischer Beanspruchung. *Materialprüfung* 33, 7–8 (1991) 213–218
- [24] Grellmann, W., Seidler, S., Jung, K., Kotter, I.: Crack Resistance Behavior of Polypropylene Copolymers 79 (2001) 2317–2325
- [25] Grellmann, W., Seidler, S. (Eds.): *Mechanical and Thermomechanical Properties of Polymers*. Landolt-Börnstein, Volume III/6A3, Springer Verlag, Heidelberg (2014) (ISBN 978-3-642-55165-9)
- [26] DIN EN ISO 291 (2008-08): *Kunststoffe – Normalklimate für Konditionierung und Prüfung*
- [27] Sunderland P., Kausch H. H.: The Application of Fracture Mechanics to the Impact Behaviour of Rubber-Toughened Polyamides. *Makromol. Chem., Macromol. Symp.* 16 (1988) 365–378
- [28] Savadori A., Bramuzzo M., Marega C.: J Integral Analysis of Ductile Fracture of PP/EP Rubber Blends. *Polymer Testing* 4 (1984) 73–89
- [29] Grellmann W., Seidler S., Schierjott U., Rufke B.: Anordnung zur Bestimmung des  $JT_J$ -gesteuerten Reißwachstums bei schlagartiger Beanspruchung. *Patentschrift DD 275 113* (1988)
- [30] ESIS TC 4 (2001): *J-Crack Growth Resistance Curve Tests for Plastics under Impact Conditions*.
- [31] Pavan A.: ESIS TC4 Activity on High Rate Testing of Plastics. In: *Proceedings 12th Conference on Fracture, September 14-18, Sheffield (UK), Vol III (1998)* 1363–1368
- [32] Will P., Michel B., Zerbst U.:  $JT_J$ -gesteuertes Reißwachstum und die Energiebilanz am duktilen Reiß. *Technische Mechanik* 7 (1986) 58–60

- 
- [33] Will P.: Integralkriterien und ihre Anwendung in der Bruchmechanik. Fortschritt-Berichte, VDI-Reihe 18: Mechanik/Bruchmechanik Nr. 56, VDI-Verlag, Düsseldorf (1988)
  - [34] Will P., Michel B., Schaper M.: Justification of Nonlinear  $J$ -Resistance Curves, Engng. Fracture Mechanics 37 (1990) 275-281
  - [35] Will P.: R-Curves of Energy Dissipative Materials, J. of Materials Science 29 (1994) 2335–2340
  - [36] Paris P. C. u. a. (1979): Elastic-Plastic Fracture. ASTM STP 668: 5–36



Anlage 2: Prüfbericht zur Ermittlung dynamischer Risswiderstandskurven

Der Prüfbericht muss neben den Werkstoff- und Gerätedaten und der grafischen Darstellung der Risswiderstandskurve die folgenden Angaben enthalten

Prüfbericht

Werkstoff				Datum			
Prüftemperatur [°C]				Prüfer			
Kerbform				Kerbschärfe [µm]			
E-Modul [MPa]				Streckgrenze [MPa]			
Prüfmethode		Energimethode					
		Low-blow-Technik					
		Stützweitenmethode					
		Probenlängenmethode					
		Stopp-Block-Methode					
		Sonstige					
<b>Technik</b>		Einprobentechnik				Mehrprobentechnik	
<b>Probenzahl</b>							
<b>Grenzkriterien</b> J[N/mm], δ[mm] JT <sub>J</sub>		Δa <sub>max</sub> [mm]		J <sub>max</sub> /J <sub>G</sub> [N/mm]		δ <sub>max</sub> /δ <sub>G</sub> [mm]	
		Δa <sub>max</sub> [mm]		ω <sub>exp</sub>			
Δa [mm]							
J [N/mm]							
δ [mm]							
<b>Regression</b> J=f(Δa)	C1		C2		C3		C4
δ=f(Δa)	C1		C2				
<b>Angaben zur Gültigkeit</b>							
				J	N		J N
J <sub>lid</sub> [N/mm]		25J <sub>lid</sub> / σ <sub>d</sub> < B				25 δ <sub>lid</sub> < B	
δ <sub>lid</sub> [N/mm]		25J <sub>lid</sub> /σ <sub>d</sub> < W-a				25 δ <sub>lid</sub> < W-a	
JT <sub>J</sub>		(dJ/d(Δa)) <sub>Δa=0,2&lt;σ<sub>d</sub></sub>					