

**„Entwicklung und Erprobung neuer experimenteller  
Methoden zur Bewertung des stabilen Rissausbreitungs-  
verhaltens von glasfaserverstärkten PA-Werkstoffen“  
(2795)**

Abschlussbericht

über die gesamte Förderperiode  
(01.07.2008 – 30.06.2010)

an die Max Buchner Forschungsstiftung

Dipl. Wirt.-Ing. Markus Kroll  
Dr.-Ing. Beate Langer  
Prof. Dr. rer. nat. habil. Wolfgang Grellmann

Merseburg, Juli 2010

## **Einleitung**

Das Zähigkeitsverhalten von verstärkten Polyamidwerkstoffen hängt sehr stark von der Faserart und dem Faseranteil ab [1–5]. Auf der anderen Seite spielen auch Eigenschaften der Polymermatrix wie die Molekularmasse oder der Anteil und die Verteilung von Elastomerpartikeln eine große Rolle [2, 4, 6]. Für eine umfassende Beschreibung des Zähigkeitsverhaltens ist zudem die quantitative Bewertung des stabilen Risswachstums bei duktilem Matrixbruch bedeutsam, welches in der Vergangenheit nicht an hochverstärkten Polyamidwerkstoffen untersucht wurde. Das Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer zuverlässigen experimentellen Methode zur Ausmessung der stabilen Rissverlängerung an hochverstärkten PA6 Werkstoffen und deren Anwendung.

## **Risswiderstandskurven zur Zähigkeitsbewertung von Polymerwerkstoffen**

Beim Risswiderstands-(R-)Kurven-Konzept wird ein bruchmechanischer Beanspruchungsparameter ( $J$  oder  $\delta$ ) in Abhängigkeit von der Rissverlängerung  $\Delta a$  aufgezeichnet [7]. Dies ist notwendig um die stabilen Risswachstumsprozesse quantitativ zu beschreiben, die den Bruch eines Prüfkörpers einleiten oder wie bei duktilen Werkstoffen, niedrigen Beanspruchungsgeschwindigkeiten und hohen Temperaturen den dominierenden Bruchprozess darstellen [7]. R-Kurven sind auf Grundlage des J-Integral Konzeptes von Rice [8] für viele unverstärkte und elastomermodifizierte Polymerwerkstoffe bestimmt wurden [1, 9–13].

Zur Darstellung von R-Kurven ist eine genaue und reproduzierbare Ausmessung des Anteils der stabilen Rissverlängerung  $\Delta a$  auf der Bruchfläche notwendig. Bedingt durch die mit steigendem Glasfaseranteil zunehmende Unebenheit und Zergliederung der Prüfkörperbruchfläche ist es mit konventionellen lichtmikroskopischen Methoden bei hochverstärkten Polyamidwerkstoffen unmöglich, die unterschiedlichen Bruchflächenanteile genau zu identifizieren und zu vermessen [14–15]. Bei EPR-modifiziertem Polypropylen und Polycarbonat (PC) sowie Acryl-Butadien-Styren (ABS) wurde von verschiedenen Autoren [16–18] als alternativer risswachstumskorrelierter Parameter die mikroskopisch ausgemessene Länge der „stress whitening zone“ in Risswachstumsrichtung verwendet. Die Einfärbung des Rissfortschritts am eingespannten Prüfkörper ist im quasistatischen Bruchmechanikversuch an ABS oder auch an gefüllten und ungefüllten Elastomerwerkstoffen erfolgreich zur Ermittlung von R-Kurven eingesetzt worden [18–19].

Bei glasfaserverstärkten PA6/PA66 Verbundwerkstoffen kamen bisher auch die Schnittmethode bei Nase et. al. [15] sowie die Bruchzeitmethode bei Kroll et.al. [14] zum Einsatz. Um eine Vergleichbarkeit mit R-Kurven anderer Werkstoffe und bei anderen experimentellen Rahmenbedingungen zu gewährleisten, wurde ein neues Verfahren zur Ausmessung der stabilen Rissverlängerung auf der Bruchfläche hochverstärkter Polyamide entwickelt, das die Vorteile verschiedener experimenteller Methoden kombiniert:

- Aufzeichnung von R-Kurven mit der Stopp-Block-Methode [20]
- Fluoreszenzeinfärbung von Rissen und Oberflächendefekten [21]
- 3D Digitalmikroskopie mit Tiefenschärfe durch Depth From Defocus (DFD) [22–24]

## **Fluoreszenzmikroskopie zur Quantifizierung des stabilen Risswachstums**

Ein kommerzielles System aus dem fluoreszierendem Penetrationsmittel ARDROX 985P12 und der zugehörigen Emulgatorlösung ARROX 9PR12 [25] wurde für die Fluoreszenzeinfärbung verwendet. Diese Art Färbemittel wird seit geraumer Zeit erfolgreich zur Detektion von Rissen und anderen hohlraumbildenden Oberflächenfehlern an Bauteilen aus Metall, Keramik oder auch Faserverbund-

werkstoffen eingesetzt [21, 25]. Bisher gibt es noch kein Beispiel für den Einsatz von fluoreszierenden Penetrationsmitteln zur mikroskopischen Bruchflächenanalyse von Polymerwerkstoffen. Es ist bekannt, dass es bei geeigneter Wahl der Fluoreszenzlösung zu einer Diffusion des fluoreszierenden Stoffes in das Polymer und damit zur Sekundärfluoreszenz kommt, was von Samuel und Haque [26] erfolgreich zur Visualisierung der Rissabstumpfung von Polydimethylsiloxan (PDMS) unter Blaulichtanregung eingesetzt wurde. In Biologie, Biochemie und Biotechnologie wird neben der Eigenfluoreszenz von biologischen Substanzen schon lange die durch selektive Dotierung induzierte Fluoreszenz erfolgreich als Präparationsmethode eingesetzt und stetig weiterentwickelt [27–28].

Das Prinzip der Detektion von Rissen an der Oberfläche von Bauteilen ist nachfolgend skizziert:

- Benetzung der Bauteiloberfläche mit dem Penetrationsmittel (färbend oder fluoreszierend)
- Abspülen und Reinigen der Oberfläche mit Wasser oder einem geeigneten Emulgator nach einer definierten Einwirkzeit
- Trocknung der Bauteiloberfläche und optional der Einsatz eines Entwicklerpulvers
- Makro- oder Mikroskopische Begutachtung der Oberfläche im Licht beim Einsatz eines Färbemittels, im UV-Licht oder Blaulicht beim Einsatz eines fluoreszierenden Penetrationsmittels

Bei der Oberflächenbenetzung dringt das Penetrationsmittel in Risse und andere Hohlräume ein. Damit ist die Intensität einer Einfärbung abhängig von der Benetzbarkeit der Bauteiloberfläche durch das Penetrationsmittel und der Kapillarität. Nachdem im zweiten Schritt das Penetrationsmittel nahezu vollständig von der Werkstoffoberfläche entfernt wird, enthalten nur noch Risse und Hohlräume Reste davon. Dadurch werden diese Fehler bei der Beobachtung sofort sichtbar. Die Sensitivität des Verfahrens kann noch durch den Einsatz eines Pulverentwicklers (ein meist keramisches Pulver mit einem sehr hohen Oberflächen/Volumen-Verhältnis) verstärkt werden, dass durch eine größere Kapillarwirkung Färbemittel wieder aus den Rissen herauszieht und somit auch sehr kleine Defekte sichtbar macht.

Mit Hilfe der Methoden der statistischen Versuchsplanung wurde das Standardverfahren des ARDROX-Systems auf die Anforderungen zur Einfärbung von Bruchflächen hochverstärkter PA6 Verbundwerkstoffe angepasst. Die genaue Vorgehensweise der Verfahrensoptimierung wird in einer gesonderten Veröffentlichung beschrieben. Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden zwei prinzipielle Strategien zur Identifizierung der stabilen Rissverlängerung auf der Bruchfläche durch Fluoreszenzeinfärbung untersucht. Einerseits kann die Einfärbung vor dem Bruch des Restligaments erfolgen (Strategie 1) und andererseits ist auch die direkte Benetzung der kompletten Bruchfläche nach erfolgtem Restbruch des Ligaments möglich (Strategie 2). Der Verfahrensablauf der Prüfkörpereinfärbung, Prüfung und mikroskopischen Begutachtung als Ergebnis der Optimierung ist für beide alternativen Strategien in Tabelle 1 dargestellt.

Die Bruchflächen zweier Prüfkörper, die mit diesen beiden Strategien eingefärbt wurden, sind zusammen mit der resultierenden R-Kurve für konditioniertes PA6/EPR-g-MA GF40 mit einem Elastomeranteil von 7,5 M.-% in Bild 1 dargestellt. Aufgrund der einfacheren Durchführbarkeit der Strategie 2 wurde diese für alle folgenden Untersuchungen ausgewählt.

Tabelle 1: Experimenteller Ablauf der Fluoreszenzeinfärbung

Prozessschritt	Ablauf	Einwirkzeit / Parameter
1	Prüfkörper (PK) mit Metallklinge kerben	$a=4.5\text{ mm}$
2	PK mit Stopp-Block-Methode mit definierter Durchbiegung beanspruchen	$4J\text{ Pendel}, 1\text{ m/s}$
3*	Restbruch des Ligaments (S2)	<i>Cryobruch</i> ( $N_{2fl.}$ )
4	Bruchfläche mit Emulgatorlösung reinigen	$10\%$ wässrige Lösung
5*	fluoreszierendes Penetrationsmittel auf Kerb des beanspruchten PK (S1) / Bruchfläche (S2) applizieren	$t_F=15\text{ min}$
6	PK in Emulgatorlösung spülen	$t_E=150\text{ s}, 10\%$ wässrige Lösung
7	PK im Ofen trocknen	$t_T=30\text{ min}, T_T=80\text{ }^\circ\text{C}$
8*	Restbruch des Ligaments (S1)	<i>Cryobruch</i> ( $N_{2fl.}$ )
9	Bruchfläche unter UV-Anregung im Digitalmikroskop betrachten	

\* ... Prozessschritt bei den 2 Experimentalstrategien unterschiedlich

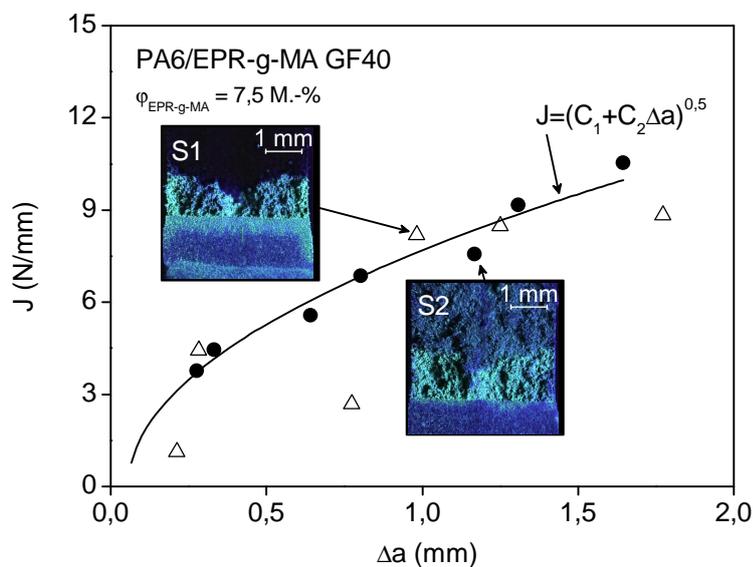


Bild 1: Bestimmung von R-Kurven mit Fluoreszenzeinfärbung nach Strategie 1 und 2

Insbesondere die elastomermodifizierten Werkstoffe zeichnen sich durch einen sehr hohen Kontrast zwischen dem Anteil der stabilen Rissverlängerung  $\Delta a$  und dem instabilen Restbruch auf der Bruchfläche aus. Die Ursache liegt in der starken plastischen Deformation dieser Werkstoffe im Bereich des stabilen Risswachstums, die mit hohlraumbildenden Prozessen wie Debonding, Voiding, Matrixfließen oder Crazeing einhergeht. Hinzu kommt, dass es eine Diffusion des Penetrationsmittels in das Polyamid gibt, was dadurch belegt wird, dass selbst glatte Bereiche wie der Anfangskerb noch schwach fluoreszieren (vgl. Bild 1).

In Bild 2 sind die Bruchflächen eines Prüfkörpers des unmodifizierten PA6 GF40 dargestellt. Dabei zeigt sich deutlich die Ähnlichkeit der fluoreszenzmikroskopischen Aufnahme in Bild 2b mit dem detailreichen rasterelektronenmikroskopischen Bild (Bild 2c).

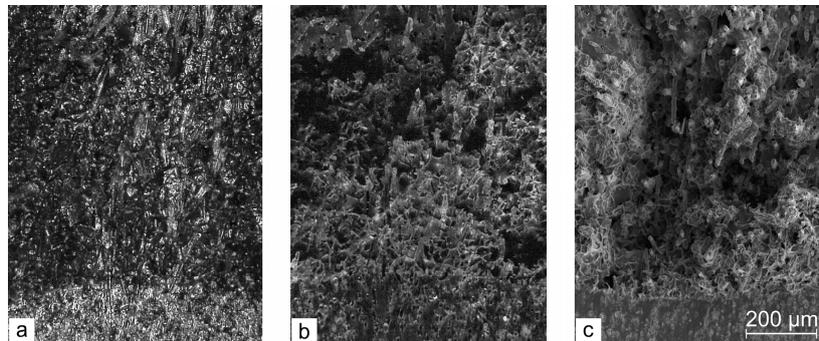


Bild 2: Bruchflächenaufnahmen von PA6 GF40 - stabiles Risswachstum; a) Auflicht, sichtbares Licht; b) Auflicht, UV-Licht, in Grau; c) Rasterelektronenmikroskopisches Bild

Nachfolgend werden die wesentlichen Vorteile des Fluoreszenzverfahrens zur  $\Delta a$ -Ausmessung dargestellt:

- Die mikroskopischen Abbildungen sind unabhängig von der Farbe des Werkstoffs oder den optischen Eigenschaften der Bruchfläche (Reflexionsvermögen, Glanz, Lichtbrechung...).
- Weil das Bild durch UV-angeregte Emission entsteht, gibt es keine durch die Reflektion der Lichtquelle hervorgerufenen Abbildungsstörungen wie in Bild 2a.
- Der Helligkeitskontrast der Oberfläche resultiert einzig aus der Struktur und Benetzbarkeit der Oberfläche sowie der Diffusionsrate der Fluoreszenz in den Werkstoff und beinhaltet gegenüber einem lichtmikroskopischen Bild zusätzliche Informationen. Das Verfahren ist sensitiv gegenüber hohlraumbildenden Deformations- und Risswachstumsprozessen wie Crazing, Debonding oder Matrixfließen und besonders für die Bewertung von Bruchflächenphänomenen geeignet. Dadurch ist der Kontrast zwischen unterschiedlich deformierten Bruchflächenanteilen bei elastomermodifizierten Werkstoffen besonders hoch (siehe Bruchflächenaufnahmen in Bild 1).
- Wenn es keinen signifikanten Helligkeitskontrast zwischen dem Anteil des stabilen Risswachstums und der Restbruchfläche gibt, so reicht die Abbildungsschärfe beim Einsatz eines Digitalmikroskops mit DFD-Technologie dennoch aus, um aufgrund der Bruchflächenstruktur eindeutig zwischen den Bruchflächenanteilen differenzieren zu können (siehe Bild 3).
- Das Verfahren ist einfach und nachgewiesenermaßen sehr robust gegenüber Parameterschwankungen.
- Selbst beim Einsatz eines 3D-Digitalmikroskops ist dieses Verfahren im Vergleich zur Verwendung von REM oder ESEM zur Ausmessung von Bruchflächen insbesondere bei Anwendung der Mehrprobenmethodik zur R-Kurven-Bestimmung mit geringeren Kosten verbunden.

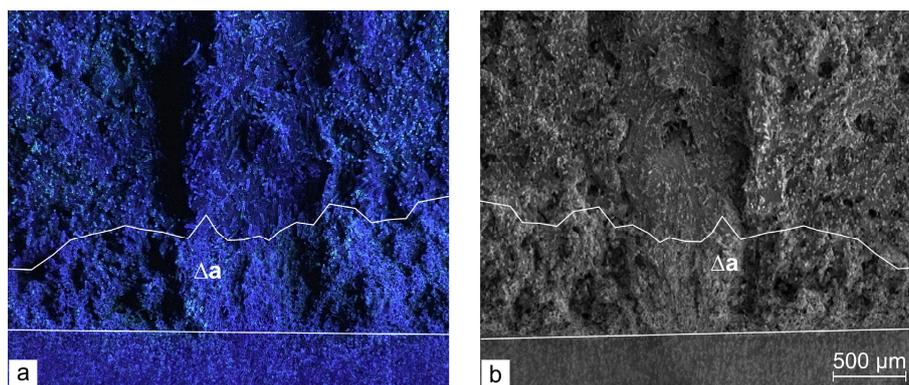


Bild 3: Bildvergleich an PA6GF40; a) Bruchfläche linke Prüfkörperhälfte - UV-Fluoreszenzmikroskopie, b) Bruchfläche rechte Prüfkörperhälfte - REM

## Anwendung der Fluoreszenzmethode zur Zähigkeitsbewertung hochverstärkter PA6 Werkstoffe

### Experimentelles

R-Kurven wurden von den Polyamidwerkstoffen in Tabelle 2 aufgezeichnet. Alle Werkstoffe enthielten außerdem 1 M.-% Additive und Ruß als Farbstoff. Die Abhängigkeit mechanischer Eigenschaften wie Steifigkeit, Festigkeit und Bruchdehnung vom Faser- und Elastomeranteil wird in Tabelle 2 deutlich.

Tabelle 2: Zusammensetzung und Grundcharakterisierung der untersuchten Werkstoffe

Zusammensetzung					Zugversuch		
PA6 (M.-%)	GF (M.-%)	GF (Vol.-%)	EPR-g-MA (M.-%)	PA6 / EPR-g-MA	$E_t$ (MPa)	$\sigma_m$ (MPa)	$\epsilon_B$ (%)
PA6 GF spritztrocken							
99	0	0	-	-	3300	78	3,0
94	5	2	-	-	4090	80	2,2
89	10	4	-	-	4930	93	2,2
79	20	8	-	-	7060	143	2,9
69	30	12	-	-	9190	173	3,9
59	40	16	-	-	12480	198	3,4
PA6 / EPR-g-MA GF40 normalkonditioniert							
59	40	16	0	100 / 0	8570	144	6,9
54	40	16	5	92 / 8	7880	132	8,0
51,5	40	16	7,5	87 / 13	-	-	-
49	40	16	10	83 / 17	7230	121	9,3

Die  $J$ - $\Delta a$  Wertepaare wurden im instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch (IKBV) entsprechend der MPK-Prozedur ermittelt [20, 29]. Dabei wurde das oben erwähnte Stopp-Block-Verfahren angewendet um unterschiedliche stabile Rissverlängerungen  $\Delta a$  in den Prüfkörpern zu realisieren. Die R-Kurven wurden mit Hilfe der Wurzelfunktion (1) angepasst.

$$J = (C_1 + C_2 \Delta a)^{0,5} \quad (1)$$

### Ergebnisse

In Bild 4 sind R-Kurven aller untersuchten Werkstoffe dargestellt. Die Prüftemperaturen wurden so gewählt, dass der dominierende Bruchprozess stabiles Risswachstum ist. Bis zu einem Glasfaseranteil von 20 M.-% konnte  $\Delta a$  mit konventioneller lichtmikroskopischer Ausmessung bestimmt werden. Darüber hinaus war dies aufgrund der zerklüfteten Bruchfläche nicht möglich. Durch die Fluoreszenzmethode konnten dennoch stabile Rissverlängerungen ermittelt und R-Kurven abgeleitet werden. Es zeigt sich in Bild 4a, dass der Anstieg der R-Kurven bis zu einem Glasfaseranteil von 30 M.-% zunimmt. Eine weitere Erhöhung des Faseranteils führt dann zu einer Anstiegsverminderung. Durch Zugabe eines Elastomers wie EPR-g-MA kann der Widerstand gegenüber stabiler Risseinleitung und -ausbreitung erhöht werden. Dies wird in Bild 4b deutlich.

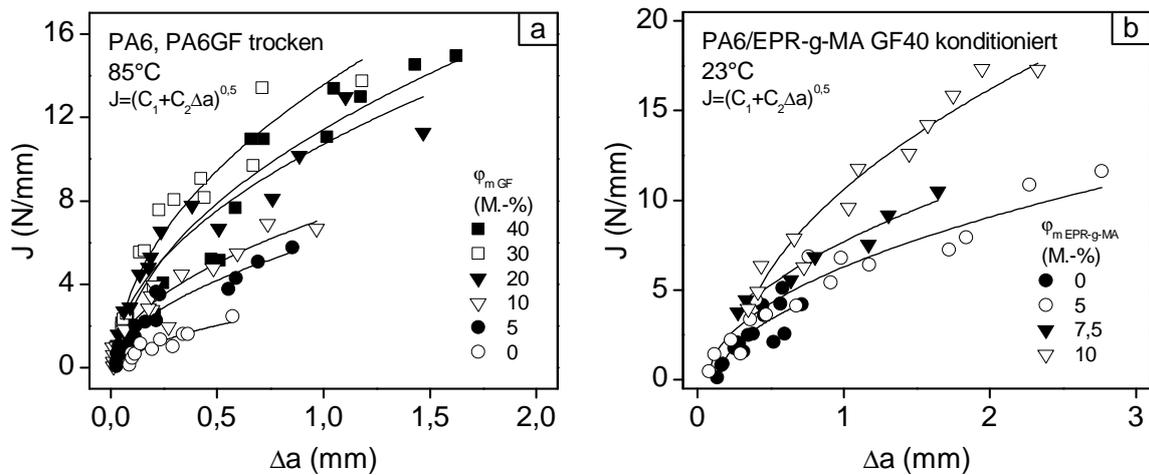


Bild 4: R-Kurven von glasfaserverstärktem PA6 (a) und verstärktem elastomermodifizierten PA6 (b)

Der Widerstand gegenüber stabiler Risseinleitung kann durch den physikalischen Rissinitiiierungswert  $J_{0,2}$  quantifiziert werden, der Widerstand gegenüber stabiler Rissausbreitung durch den Tearing-Modul  $T_j$  [7, 20, 29]. Entsprechend dem Verlauf der R-Kurven ergibt sich für beide Kenngrößen in Bild 5 ein ausgeprägtes Maximum bei einem Glasfaseranteil von 30 M.-%.

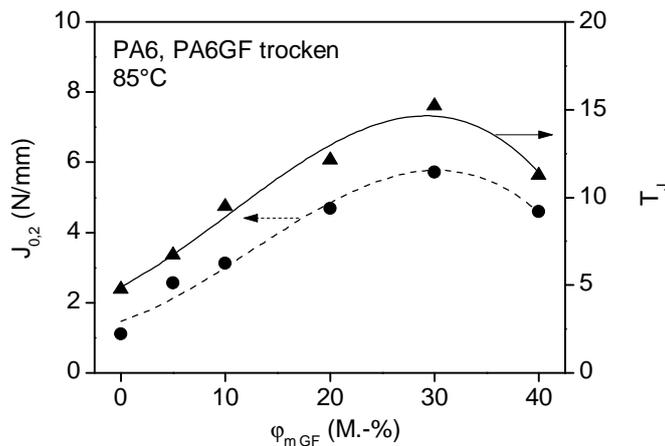


Bild 5: Widerstand gegenüber stabiler Rissinitiiierung und Rissausbreitung in Abhängigkeit vom Glasfaseranteil

## Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz eines fluoreszierenden Penetrationsmittels hat sich als wirkungsvolle Methode zur Bewertung des stabilen Risswachstums von hochverstärkten Polyamidwerkstoffen erwiesen. Begünstigt wird eine mikroskopische Identifizierung verschiedener Bruchflächenbestandteile durch hohlraumbildende Deformationsprozesse und die Diffusion von Fluoreszenzmittel in das Polymer. Mit Hilfe dieser neuen experimentellen Technik konnte bei trockenen glasfaserverstärktem PA6 ein ausgeprägtes Maximum des Widerstands gegenüber stabilem Risswachstum bei 30 M.-% Glasfaseranteil identifiziert werden. Veröffentlichungen zu der hier vorgestellten und neu entwickelten Methode befinden sich in Vorbereitung.

## Literaturverzeichnis

- [1] Gomina, M.; Pinot, L.; Moreau, R. und Nakache, E.: *Fracture behaviour of short glass fibre-reinforced rubber-toughened nylon composites*, In: B.R.K. Blackman, A. P. und Williams, J. G. (Hrsg.): *European Structural Integrity Society*, Elsevier, (2003), S. 399–418.
- [2] Laura, D. M.; Keskkula, H.; Barlow, J. W. und Paul, D. R.: *Effect of glass fiber and maleated ethylene-propylene rubber content on the impact fracture parameters of nylon 6*, *Polymer* 42 (2001) 14, S. 6161–6172.
- [3] Seidler, S.: *Application of Single-Specimen Testing Methods for Determining J-R Curves of Polymers*, In: Grellmann, W. und Seidler, S. (Hrsg.): *Deformation and Fracture Behaviour of Polymers*, Springer-Verlag, New York, (2001), S. 105–120.
- [4] Laura, D. M.; Keskkula, H.; Barlow, J. W. und Paul, D. R.: *Effect of glass fiber and maleated ethylene-propylene rubber content on tensile and impact properties of Nylon 6*, *Polymer* 41 (2000) 19, S. 7165–7174.
- [5] Langer, B.: *Bruchmechanische Bewertung von Polyamid-Werkstoffen*, Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, (1997).
- [6] Laura, D. M.; Keskkula, H.; Barlow, J. W. und Paul, D. R.: *Effect of rubber particle size and rubber type on the mechanical properties of glass fiber reinforced, rubber-toughened nylon 6*, *Polymer* 44 (2003) 11, S. 3347–3361.
- [7] Grellmann, W. und Seidler, S.: *Polymer Testing*, Carl Hanser Verlag, Munich, (2007).
- [8] Rice, J. R.: *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*, *Journal of Applied Mechanics* 35 (1968) 2, S. 379–386.
- [9] Zhu, X.-K.: *J-integral resistance curve testing and evaluation*, *Journal of Zhejiang University - Science A* 10 (2009) 11, S. 1541–1560.
- [10] Baldi, F. und Riccò, T.: *High-rate J-testing of toughened polyamide 6/6: Applicability of the load separation criterion and the normalization method*, *Eng. Fract. Mech.* 72 (2005) 14, S. 2218–2231.
- [11] Bethge, I.; Reincke, K.; Seidler, S. und Grellmann, W.: *Influence of Modifier Content and Temperature on Toughness Behaviour of Polyamide*, In: Grellmann, W. und Seidler, S. (Hrsg.): *Deformation and Fracture Behaviour of Polymers*, Springer-Verlag, (2001), S. 242–256.
- [12] Langer, B.; Seidler, S. und Grellmann, W.: *Influence of Temperature and Moisture on Toughness Behaviour of Polyamide*, In: Grellmann, W. und Seidler, S. (Hrsg.): *Deformation and Fracture Behaviour of Polymers*, Springer Verlag, New York, (2001), S. 209–228.
- [13] Nair, S.; Subramaniam, A. und Goettler, L.: *Fracture resistance of polyblends and polyblend matrix composites: Part II Role of the rubber phase in Nylon 6,6/ABS alloys*, *Journal of Materials Science* 32 (1997) 20, S. 5347–5354.

- [14] Kroll, M.; Langer, B.; Schumacher, S. und Grellmann, W.: *The influence of carbon black batches on the fracture behavior of glass fiber reinforced PA6/PA66 blends*, J. Appl. Polym. Sci. 116 (2010) 1, S. 610–618.
- [15] Nase, M.; Langer, B.; Schumacher, S. und Grellmann, W.: *Toughness optimization of glass-fiber reinforced PA 6/PA 66-based composites: Effect of matrix composition and colorants*, J. Appl. Polym. Sci. 111 (2009) 5, S. 2245–2252.
- [16] Hornsby, P. und Premphet, K.: *Fracture toughness of multiphase polypropylene composites containing rubbery and particulate inclusions*, Journal of Materials Science 32 (1997) 18, S. 4767–4775.
- [17] Lee, C.-B. und Chang, F.-C.: *Toughening behavior of elastomer-modified polycarbonates based on the j-integral*, Polym. Eng. Sci. 32 (1992) 12, S. 792–803.
- [18] Zhang, M.-J.; Zhi, F.-X. und Su, X.-R.: *Fracture toughness and crack growth mechanism for multiphase polymers*, Polym. Eng. Sci. 29 (1989) 16, S. 1142–1146.
- [19] Reincke, K.: *Bruchmechanische Bewertung von ungefüllten und gefüllten Elastomerwerkstoffen*, Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, (2005).
- [20] Grellmann, W.; Seidler, S. und Hesse, W.: *Procedure for Determining the Crack Resistance Behaviour Using the Instrumented Impact Test*, In: Grellmann, W. und Seidler, S. (Hrsg.): *Deformation and Fracture Behaviour of Polymers*, Springer-Verlag, New York, (2001), S. 71–86.
- [21] Unbekannter Autor: *Ja zur Anregung mit LED! Aber warum müssen es gerade 365 nm sein?*, ZfP-Zeitung 117 (2009) Dezember 2009, S. 21–22.
- [22] Leroy, J.-V.; Simon, T. und Deschenes, F.: *Real Time Monocular Depth from Defocus*, (2008), S. 103–111.
- [23] McCloskey, S.; Langer, M. und Siddiqi, K.: *Evolving Measurement Regions for Depth from Defocus*, (2007), S. 858–868.
- [24] Schechner, Y. Y. und Kiryati, N.: *Depth from Defocus vs. Stereo: How Different Really Are They?*, International Journal of Computer Vision 39 (2000) 2, S. 141–162.
- [25] *Technical Datasheet: Ardrex 985P11 - 985P14*, Chemetall, (2003).
- [26] Samuel, B. A. und Haque, M. A.: *Visualization of crack blunting using secondary fluorescence in soft polymers*, Polym. Test. 27 (2008) 4, S. 404–411.
- [27] Heilemann, M.: *Fluorescence microscopy beyond the diffraction limit*, J. Biotechnol. In Press, Corrected Proof.
- [28] Blake, R. A.: *Cellular screening assays using fluorescence microscopy*, Curr. Opin. Pharmacol. 1 (2001) 5, S. 533–539.
- [29] *MPK-IKBV: Prozedur zur Ermittlung des Risswiderstandsverhaltens aus dem instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch - Teil I: Kennwertermittlung als Widerstand gegenüber instabiler Rissausbreitung*, (2007).