

Bewertung von Kunststoffschweißnähten mittels laseroptischer Dehnmessstechniken

C. Bierögel, T. Fahnert, R. Lach, W. Grellmann

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Werkstoffwissenschaft, D-06099 Halle (S.)

1 Einleitung und Motivation

Das Schweißen ist ein häufig eingesetztes Verfahren der Fügetechnik im Kunststoffbereich, welches in den letzten zehn Jahren entscheidend weiterentwickelt wurde. Stellvertretend seien hier nur das Vibrationsschweißen [1], das Laser-Stumpfschweißen [2] und das Laser-Durchstrahlschweißen [3] sowie ein neues modifiziertes Heizelement-Schweißverfahren für vernetztes Polyethylen [4] genannt.

Im Gegensatz dazu sind die experimentellen Prüf- und Bewertungsverfahren der Schweißverbindungen als auch die theoretischen Modelle zur werkstoffwissenschaftlichen Charakterisierung von Schweißverbindungen nur ungenügend entwickelt. Die meisten Prüfverfahren (Sichtprüfung, Ultraschall, Röntgen, Thermochromie) sind sehr stark technologisch orientiert und gut für die konstruktive Praxis und Produktionsbegleitung geeignet, wobei vordergründig grobe Schweißfehler aufgedeckt werden [5]. Infolge der Minimierung des Bedienerinflusses durch Einführung automatisierter Schweißtechnik [6] sinkt die technologische Bedeutung solcher einfacher Prüfverfahren, und es wird zunehmend Wert auf eine grundlegendere werkstoffwissenschaftliche Betrachtungsweise gelegt.

Der lokal begrenzte Schweißprozess führt zu einer starken räumlichen Variation der Dehnungs- und Temperaturgeschichte und damit zu einer mechanischen Inhomogenität im Werkstoffverhalten [7]. Dabei verändert sich in Abhängigkeit von den Prozessparametern, wie dem Temperaturverlauf und dem Fügedruck, die Werkstoffmikrostruktur, wie Kristallinität und Phasenordnung, und als Folge davon die Fließspannung, die Verformbarkeit und das Bruchverhalten. Ziel einer möglichst umfassenden Charakterisierung von Schweißnähten sollte daher die lokal und zeitlich aufgelöste Ermittlung des Deformations- und Bruchverhaltens

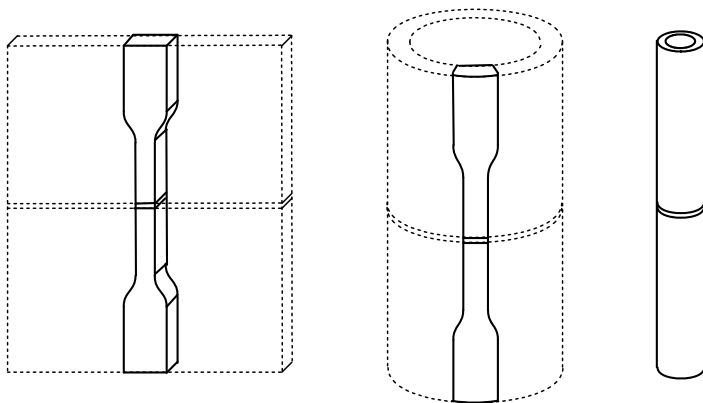


Bild 1. Prüfkörper zur Bewertung von Schweißnähten.

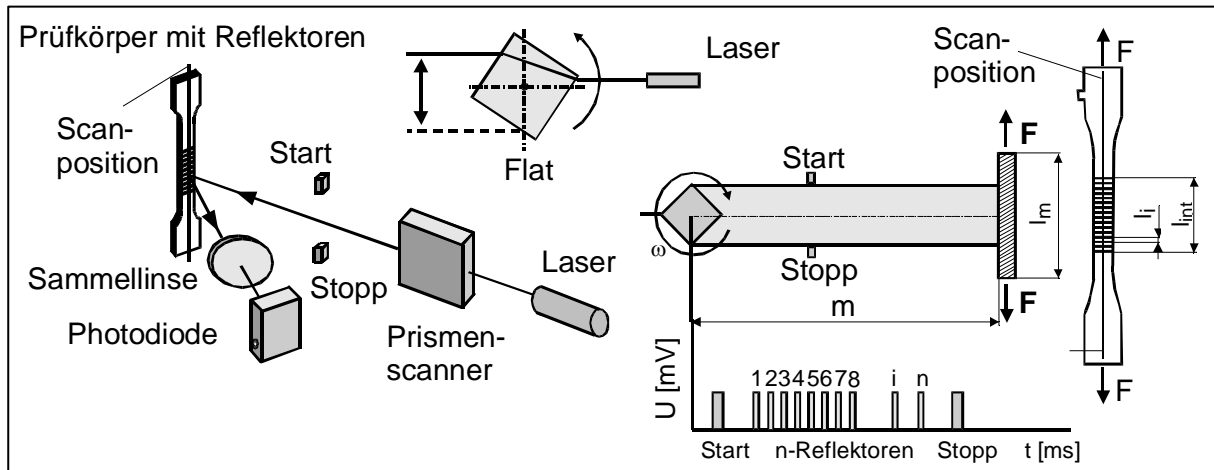


Bild 2. Laserextensometersystem.

sowie die Bestimmung der Schadenstoleranz sein, was mit den üblichen Prüfverfahren besonders hinsichtlich der Ortsauflösung der mechanischen Eigenschaften nicht erreicht wird [8]. Die klassischen Verfahren (Zugversuch und Zeitstandversuch [2,9–14], Fallversuch [15], Falt-Biege-Versuch [11,16,17], Innendruckversuch bei Rohren [10,17,18], bruchmechanische Verfahren [11,19,20]) liefern hier nur den Versagenspunkt, andere Verfahren, wie die Mikrohärtprüfung [7] nur Grundeigenschaften ohne Darstellung des Belastungsverlaufes. Aussagen zur Schadenstoleranz sind schon infolge unterschiedlicher Bewertungsmaßstäbe aus diesen Kennwerten nicht ableitbar [10].

2 Experimentelle Grundlagen

2.1 Gerätetechnik

Mit Laserextensometersystemen, die den speziellen Anforderungen an die orts aufgelöste Werkstoffprüfung von Kunststoffen gerecht werden [21], wurden schweißnahtbehaftete Prüfkörper aus Platten oder Rohren bzw. geschweißte Rohre untersucht (Bild 1). Der an die Universalprüfmaschine Zwick Z020 adaptierte Parallelschanner (Bild 2) erlaubt es, bei einer Ortsauflösung von bis zu $0,1 \mu\text{m}$ und einer Scanrate von 50 Hz auch lokale Dehnungen bei Dehngeschwindigkeiten größer als 200 mm/min zeitlich zu erfassen [22].

Als ein guter Indikator für die Bewertung der Verformungsinhomogenität hat sich die neue Werkstoffkenngröße Heterogenität H – definiert als das Verhältnis der lokalen Dehnungsunterschiede zur integralen Dehnung – erwiesen, die durch den Bezug auf die aktuelle integrale Dehnung auch einen Vergleich unterschiedlicher Phasen des Zugversuches ermöglicht [23].

2.2 Werkstoffe und Prüfkörperpräparation

Die Grundmaterialien waren PA 6 mit 10, 20 und 30 M.-% Kurzglasfasern, wobei spritzgegossene Platten sowohl gleicher als auch unterschiedlicher Glasfaser(GF)-Gehalte mittels Heizelementschweißen unter optimierten Schweißbedingungen (Schweißtemperatur: $300 \text{ }^\circ\text{C}$, Schweißdruck: 19 MPa) verschweißt wurden. Aus schweißnahtbehafteten Platten mit den Materialkombinationen PA 6 + 10 M.-% GF/PA 6 + 10 M.-% (10/10), 20/20, 30/30, 10/20,

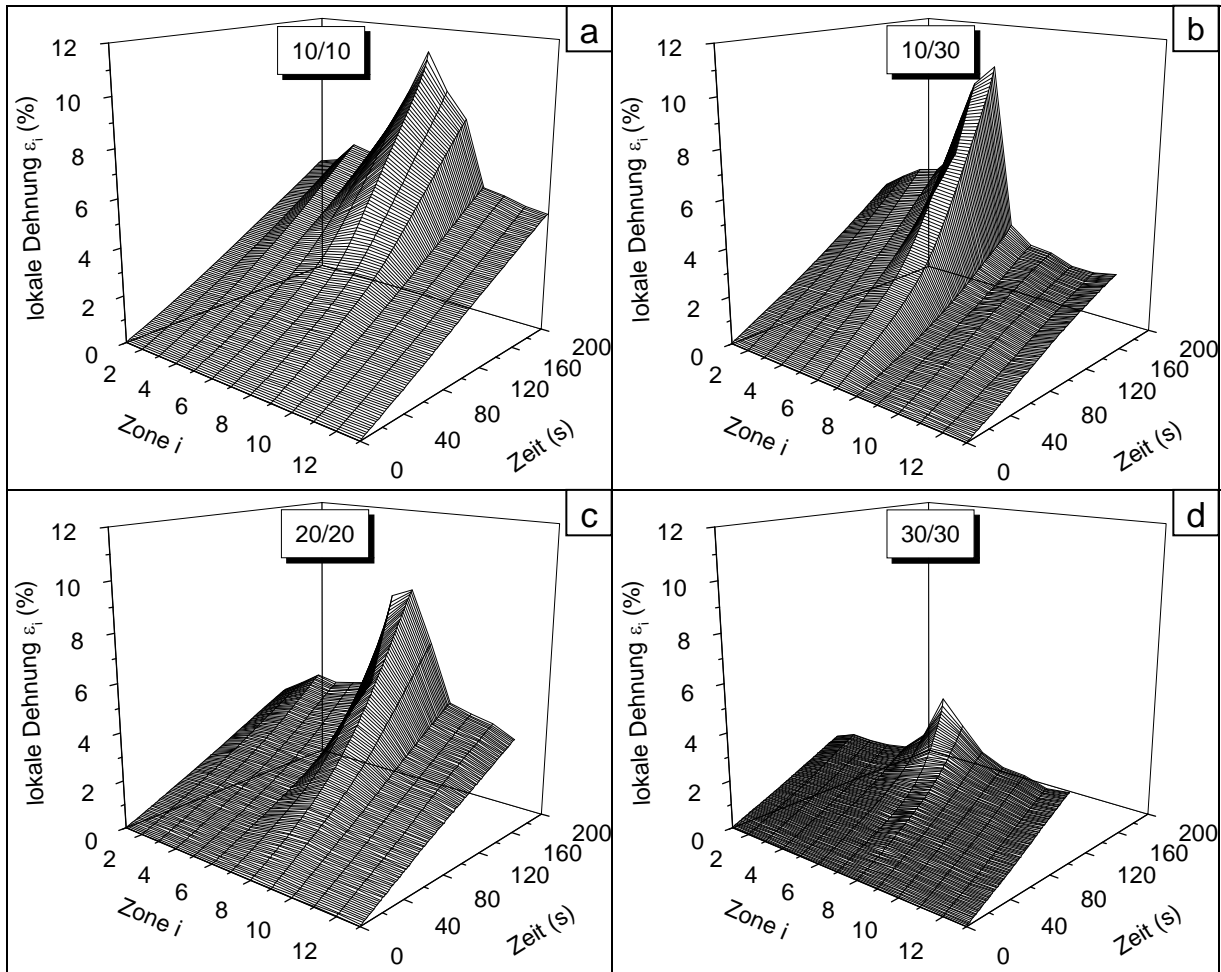


Bild 3. Lokale Dehnungen ε_i als Funktion der Zeit für 10/10 (a), 10/30 (b) 20/20 (c) und 30/30 (d).

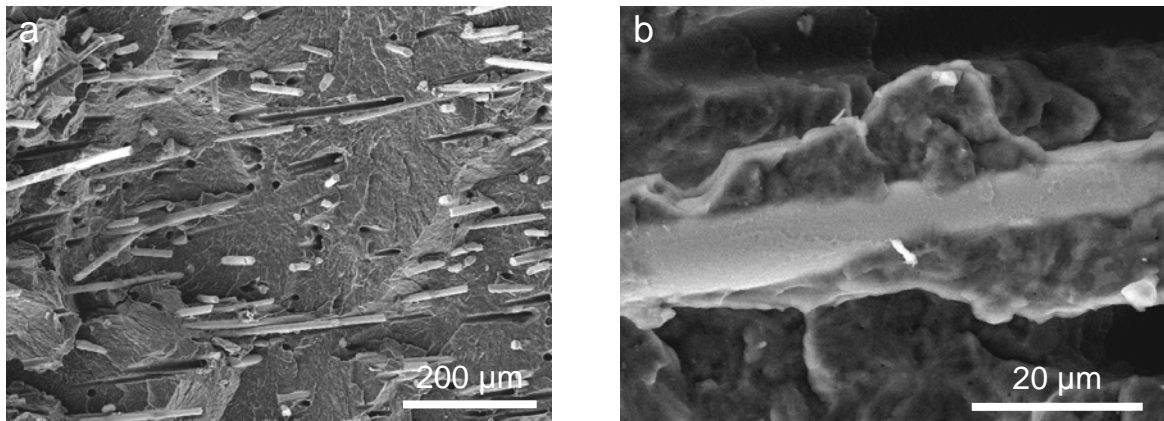


Bild 4. REM-Aufnahme der Kryobruchfläche (a) und Ausschnittsvergrößerung (b) des Grundwerkstoffes PA 6 mit 20 M.-% GF.

10/30 und 20/30 wurden Zugprüfkörper derart präpariert, dass die Schweißnaht in der Mitte der Prüfkörper senkrecht zur Beanspruchungsrichtung lag. Nach Streifenkodierung mit je 7 Streifen beidseitig der Schweißnaht im Abstand von 1 mm erfolgte die Ermittlung des lokalen Dehnungsverhalten bei einer Traversengeschwindigkeit von 1 mm/min.

In vorangegangenen Untersuchungen wurde der Einfluss verschiedener Materialparameter, der Herstellung und der Prüfkörpergeometrie auf die Dehnungseigenschaften von teilweise

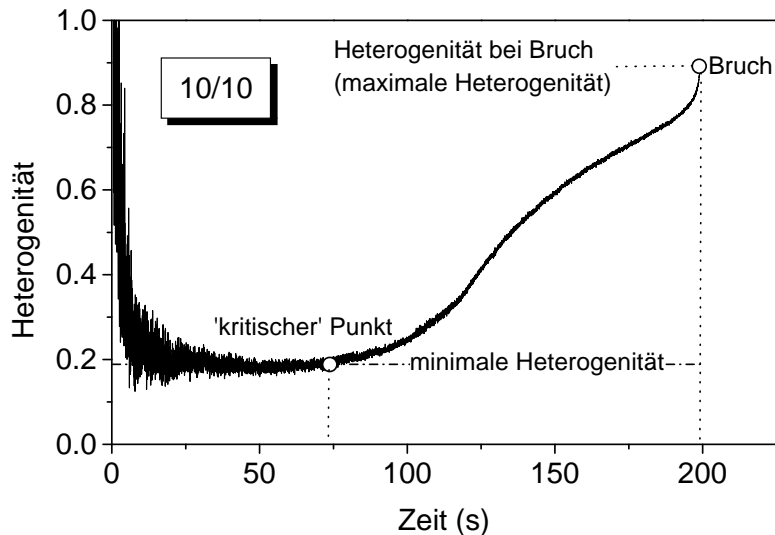


Bild 5. Heterogenität als Funktion der Zeit für 10/10.

kurzglasfasern- oder kohlenstofffaserverstärkten PA 6, PA 66 und PP untersucht [22–25]. Allgemein konnte eine Erhöhung der mechanischen Heterogenität dieser Kunststoffe in Abhängigkeit vom Faseranteil festgestellt werden. Als Versagensmechanismen konnten mittels simultaner Schallemissionsprüfung [26] Faser-Pull-Out, Faserbruch und – bei Verwendung eines Haftvermittlers – eher Kohäsivversagen in der Matrix ermittelt werden.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die höchsten Dehnungswerte wurden – wie erwartet – im Bereich der Schweißnaht gefunden, ohne dass dort eine Einschnürung erfolgt (Bild 3). Jedoch ist die Ausdehnung der lokalen Dehnungsüberhöhung (10 ± 2 mm) viel größer als die Breite der Schweißnaht (ca. 1 mm) und der Wärmeeinflusszonen und ein Indiz für kraftschlüssigen Materialzusammenhalt im unbeeinflussten Werkstoff infolge guter Matrix-Faser-Haftung (Bild 4). Die zeitliche Entwicklung von lokalen Dehnungsunterschieden kann durch die Heterogenität als Funktion der Zeit veranschaulicht werden (Bild 5). H ist generell für alle Werkstoffkombinationen bis zu einer ‚kritischen‘ Zeit konstant und widerspiegelt dann als minimale Heterogenität lokale Dehnungsheterogenitäten in den Grundwerkstoffen und Unterschiede im Verformungsverhalten der Werkstoffe bei Werkstoffkombinationen außerhalb der Schweißnaht.

Die Medianwerte der Zugfestigkeit liegen unabhängig von der Werkstoffkombination bei 59–66 MPa im Bereich der Zugfestigkeit der Matrix (60 MPa), was auf einen matrixdominierten volumenschaffenden (da keine Einschnürung erfolgt) Deformationsmechanismus in der Schweißnaht hinweist und durch die Anordnung der Fasern in der Schweißnaht senkrecht zur Beanspruchungsrichtung begründet ist (Bild 6). Unterdurchschnittliche Werte der Zugfestigkeit sind mit einer deutlich geringeren Heterogenität bei Bruch H_B (maximale Heterogenität) verknüpft (Bild 7). Während jedoch die Festigkeit relativ unempfindlich auf die Schweißgüte reagiert (Festigkeitsabnahme 10–15 %), wird H_B bis zu einem Faktor 3 reduziert. Das weist darauf hin, dass die Verwendung integraler Kenngrößen, wie dem Schweißfaktor, abgesehen von prinzipiellen Problemen bei unterschiedlichen Werkstoffkombinationen, kein hinreichend abgesichertes Entscheidungskriterium bei der Bewertung von Schweißnähten liefern kann.

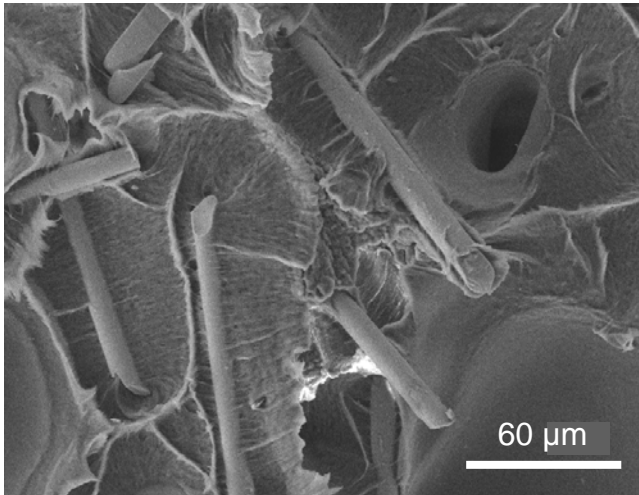


Bild 6. REM-Bruchflächenaufnahme der Schweißnaht von 10/20.

4 Weiterführende Arbeiten

Zur Zeit laufende experimentelle bzw. sich in der Auswertungsphase befindende Untersuchungen haben zum Gegenstand: (1) Bewertung von schweißnahtbehafteten, aus Plattenmaterial präparierten Zugprüfkörpern aus PA 6/GF bei Variation der Schweißparameter (Schweißtemperatur: 280–310 °C, Variation der Anwärmzeit und des Schweißdruckes), (2) Bewertung von schweißnahtbehafteten, aus Rohren präparierten Zugprüfkörpern aus Polyethylen-Werkstoffen, die einer unterschiedlichen thermischen und medialen Vorbehandlung unterzogen wurden bzw. bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen (Temperatur, Medium) geprüft werden und (3) Bewertung von schweißnahtbehafteten Rohren aus Polyethylen-Werkstoffen unter Zugbeanspruchung.

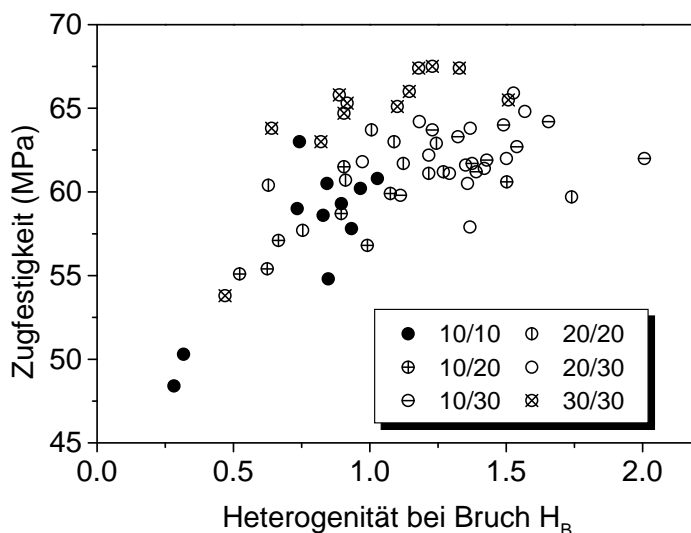


Bild 7. Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Heterogenität bei Bruch.

5 Danksagung

Der Leuna-Miramid GmbH, besonders Herrn Dr. Schumacher, wird für die Bereitstellung der Werkstoffe (PA 6/GF) und die Anfertigung der Ausgangsplatten im Spritzgussverfahren gedankt. Besonderer Dank gilt dem Kunststoff-Zentrum gGmbH, Leipzig, insbesondere Herrn Dr. Schmuck und Herrn Dr. Tobias, für die Organisation und Durchführung der Schweißarbeiten mittels Heizelementschweißtechnik. Für die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen danken die Autoren weiterhin Frau Dr. K. Morawietz, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, Halle (S.). Der DFG wird für die finanzielle Unterstützung gedankt.

6 Literatur

- [1] H. Kaiser, *Schweißtechnische Forschungsberichte*, Dt. Verl. für Schweißtechnik, Düsseldorf, **1992**, Bd. 47.
- [2] H. Potente, J. Korte, *Kunststoffe* **1997**, 87, 590–595.
- [3] U. Wesemann, *Gas- Wasserfach: Gas/Erdgas* **1995**, 136, 530–533.
- [4] W. Tobias, *Gummi Fasern Kunststoffe* **2001**, 54, 27–29.
- [5] W. Tobias, *3 R International* **1998**, 37, 705–709.
- [6] E. Lehmann, *Swiss Plast.* **1998**, 20, 26–31.
- [7] Y. Lu, D. M. Shinozaki, *Polym. Eng. Sci.* **1997**, 37, 1815–1824.
- [8] H. Chen, R. J. Scavuzzo, T. S. Srivatsan, *J. Mater. Sci. Lett.* **1997**, 16, 897–898.
- [9] N. S. Taylor, M. J. Troughton, *Annu. Tech. Conf – Soc. Plast. Eng.* **1997**, 55, 1210–1213.
- [10] J. Bowman, *Weld. Met. Fabr.* **1996**, 64, 62–65.
- [11] H.-J. Becker, *Gas- Wasserfach: Gas/Erdgas* **1995**, 136, 526–529.
- [12] J. Hessel, E. Mauer, *Materialprüfung* **1994**, 36, 240–244.
- [13] P. v. Speybroeck, A. Vinchier, *BECETEL Report 2336*, BECETEL, Gent, **1994**.
- [14] R. Knausenberger, G. Menges, E. Schmachtenberg, *DVS-Berichte*, Dt. Verl. für Schweißtechnik, Düsseldorf, **1984**, Bd. 84.
- [15] R. J. McGreevy, *Annu. Tech. Conf. – Soc. Plast. Eng.* **1995**, 53, 1224–1228.
- [16] U. Egen, *Schweißtechnische Forschungsberichte*, Dt. Verl. für Schweißtechnik, Düsseldorf, **1985**, Bd. 4.
- [17] H. Kolz, *Kunststoffberater* **1996**, 41, 31–35.
- [18] U. Wesemann, *Gas- Wasserfach: Gas/Erdgas* **1997**, 138, 285–289.
- [19] F. Ramsteiner, *Polym. Test.* **1996**, 15, 573–584.
- [20] G. P. Marshall, D. Hepburn, B. Cosgrove, *Prog. Rubber Plast. Technol.* **1995**, 11, 193–210.
- [21] W. Grellmann, C. Bierögel, *Materialprüfung* **1998**, 40, 452–459.
- [22] C. Bierögel, W. Grellmann, in: *Deformation and Fracture Behaviour of Polymers* (Eds.: W. Grellmann, S. Seidler), Springer, Berlin Heidelberg, **2001**, S. 365–384.
- [23] W. Grellmann, C. Bierögel, S. König, *Tagungsband Werkstoffwoche '96*, DGM, Stuttgart, **1996**, S. 939–944.
- [24] W. Grellmann, C. Bierögel, S. König, *Polym. Test.* **1997**, 16, 225–240.
- [25] W. Grellmann, C. Bierögel, S. König, *Tagungsband Werkstoffprüfung 1996*, DVM, Bad Nauheim, **1996**, S. 537–548.
- [26] C. Bierögel, W. Grellmann, H. Drude, K.P. Kugler, *Tagungsband Werkstoffprüfung 1997*, DVM, Bad Nauheim, **1997**, S. 127–137.