

Auslegung von Kunststoffkonstruktionen

Dehngrenzen und sprödes Werkstoffverhalten

Die Auslegung von Kunststoffbauteilen auf Dehngrenzen abzustützen, ist nicht nur einfach und trefflich, sondern vor allem auch werkstoffgerecht. Bei sprödem Werkstoffverhalten nimmt der Ab-stand zwischen der Mikroschädigung als primäres Kriterium und dem finalen makroskopischen Versagen durch Bruch merklich ab. Diese Tatsache ist im Auge zu behalten, gerade auch bei der dehnungsbezogenen Auslegung von Thermoplastbauteilen.

Johannes Kunz¹

Sprödes Verhalten ist ein vielschichtiges Thema. Ursachen können strukturelle Gegebenheiten sein, wie Molekülketten mit stark eingeschränkter Beweglichkeit durch Ringstrukturen, hoher Kristallisationsgrad oder Faserverstärkung bzw. Füllung mit harten Partikeln. Es kann auch aus äusseren Einwirkungen folgen, etwa durch Bewitterung und generell Alterung durch Kettenabbau, erhöhte Beanspruchungsgeschwindigkeit oder gleichsinnig-mehrachsige Spannungszustände. Duroplaste sind wegen der engmaschigen Vernetzung intrinsisch spröde.

Sprödes Verhalten bei Thermoplasten

Bei Thermoplasten von Bedeutung ist auch der thermomechanische Zustandsbereich unter den Einsatzbedingungen. In der Regel verhalten sie sich unterhalb der Glasübergangstemperatur energieelastisch-spröde, oberhalb entropieelastisch-zäh. Sprödes Verhalten zeigt sich in einer geringen Bruchdehnung sowie im Fehlen von Streckgrenze und plastischem Verformungsbereich. Das Arbeitsaufnahmevermögen des Werkstoffs ist entsprechend reduziert (Abb. 1), und es besteht eine hohe Gefahr der schlagartigen Ausbreitung von kleinen Anrissen zum verformungsarmen Bruch. Ein solcher Trennbruch verläuft unter Zug senkrecht zur grössten Normalspannung, unter Druck in der Ebene der grössten Schubspannung. Die Bruchfläche präsen-

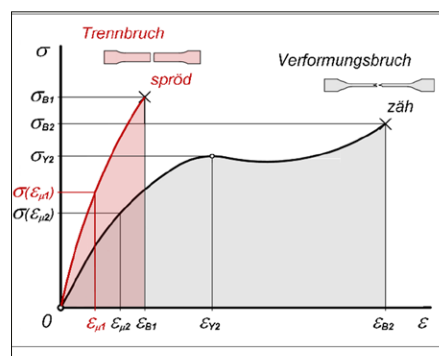


Abb. 1: Spannungs-Dehnungskurven von Kunststoffen bei sprödem und bei zähem Verhalten, und zugehörigem Arbeitsaufnahmevermögen (schattierte Fläche), mit Mikroschädigungs-Dehngrenzen ϵ_μ (Bild: IWK).

tiert sich ähnlich wie bei Glas scharfkantig und glatt bis glänzend. Ein intrinsisch sprödes Verhalten zeigen vor allem amorphe Thermoplaste, unter denen das unmodifizierte PS oder PMMA typische Vertreter sind. Auch faserverstärkte teilkristalline Thermoplaste können eine mehr oder weniger ausgeprägte Spröde aufweisen, insbesondere bei hohem Faseranteil.

Je spröder sich ein Thermoplast verhält, umso kleiner ist die Spanne zwischen der ersten Schädigung im Mikrobereich und dem makroskopischen Versagen durch Bruch. Dieser Umstand legt es auch bei der dehnungsbezogenen Auslegung nahe, dem Verdacht auf sprödes Verhalten die nötige Beachtung zu schenken und für eine angemessene Sicherheit zu sorgen.

Dehngrenzen als Auslegungskriterien

Bei der Auslegung thermoplastischer Kunststoffbauteile bzw. dem erforderlichen Festigkeitsnachweis hat sich die dehnungsbezogene Betrachtungsweise als ebenso werkstoffgerecht wie zweckmässig

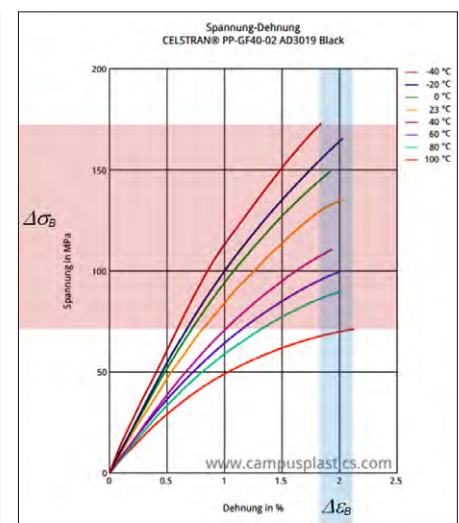


Abb. 2: Isotherme Spannungs-Dehnungskurven eines PP-GF40-Typs mit eingezeichneten Streubereichen von Bruchspannung σ_B und Bruchdehnung ϵ_B (Bild: IWK / www.campusplastics.com).

erwiesen. Sie wurde seinerzeit von Menges und seinen Mitarbeitern aufgrund ihrer Erkenntnisse über das Versagensverhalten der Kunststoffe propagiert, bei dem die mikromechanische Schädigung des Gefüges wie Crazes, Mikrorisse und aufgebrochenen Partikel-Grenzflächen das massgebende Kriterium darstellt [1–3]. Inzwischen ist dieser Ansatz zu einer bewährten, praxistauglichen Methode weiterentwickelt worden [4–8]. Er hat, nebst anderen, den grossen Vorzug, dass der Streubereich der Bruchdehnung ϵ_G bei unterschiedlichen Bedingungen deutlich kleiner ist als jener der Bruchspannung σ_G (Abb. 2), was eine wesentlich genauere, weitgehend parameterunabhängige Abschätzung der Versagensgrenzen ermöglicht.

Die mikromechanischen Schädigungs-zonen verlaufen stets senkrecht zur maximalen positiven Dehnung ϵ_{max} im Bauteil,

¹ Prof. Dipl.-Ing. Johannes Kunz, Institutspartner, IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung Rapperswil an der OST Ostschweizer Fachhochschule

die aus den drei Hauptdehnungen $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ im kritischen Punkt zu bestimmen ist. Diese wird in der Verformungsbedingung – gemäss der Grösstdehnungshypothese – der zulässigen Dehnung ϵ_{zul} gegenübergestellt:

$$\epsilon_{max} = \max(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) \leq \epsilon_{zul} = \epsilon_G \cdot \frac{C}{S} \quad (1)$$

Die zulässige Dehnung ϵ_{zul} berechnet sich aus der Grenzdehnung ϵ_G , dem Einflussfaktor C zur Berücksichtigung der verschiedenen Abhängigkeiten und einer angemessenen Sicherheit S gegen Mikroschädigung. Normalerweise, d.h. bei unproblematischen Gegebenheiten liegt die Sicherheit bei $S \approx 1,0 \dots 1,2$, in kritischen Fällen bei $S \approx 1,2 \dots 1,5$ oder höher.

Die Grenzdehnung ϵ_G ist definiert als asymptotischer Grenzwert der zeitabhängigen, makroskopisch bestimmbaren Dehnung ϵ_μ , die mit dem Auftreten der erwähnten mikromechanischen Schädigungen korreliert (Abb. 3). Diese Grenzdehnung ϵ_G liegt in einer für die verschiedenen Werkstoffgruppen je charakteristischen Grössenordnung, die innerhalb des Dauergebrauchstemperaturbereichs praktisch konstant ist. Aufgrund dieser Tatsache eignet sich ihre Verwendung insbesondere auch für Auslegungen, bei denen der Kunststofftyp noch nicht genau bekannt ist. Bei amorphen Thermoplasten beträgt die Grenzdehnung praktisch durchwegs $\epsilon_G \approx 0,8\%$, das nichtmodifizierte Polystyrol macht mit $\epsilon_G \approx 0,4\%$ eine Ausnahme. Etwas anders ist die Situation bei den teilkristallinen Thermoplasten, deren Grenzdehnung signifikant von der Steifigkeit abhängt [8], beschreibbar durch die Beziehung

$$\epsilon_G \approx 5,0 - 3,1 \cdot [1 - \exp(-0,9 \cdot \frac{E}{E^*})] \quad [\%] \quad (2)$$

Darin dient $E^* = 1000 \text{ MPa}$ als Bezugs-E-Modul.

Bei zeitlich limitierten Beanspruchungen lassen sich die Kunststoffe z.T. deutlich über die asymptotische Grenzdehnung ϵ_G hinaus dehnen, ohne eine Mikroschädigung zu erleiden (Abb. 3). Diese Mikroschädigungs-Dehngrenze, hier mit dem Symbol $\epsilon_\mu(t)$ gekennzeichnet, nimmt also zeitabhängig ab. Sie begrenzt das stationäre Kriechen und die reversible, in etwa linear-viskoelastische Verformbarkeit. Mit zunehmender Spannung σ im Kriechversuch steigt die Mikroschädi-

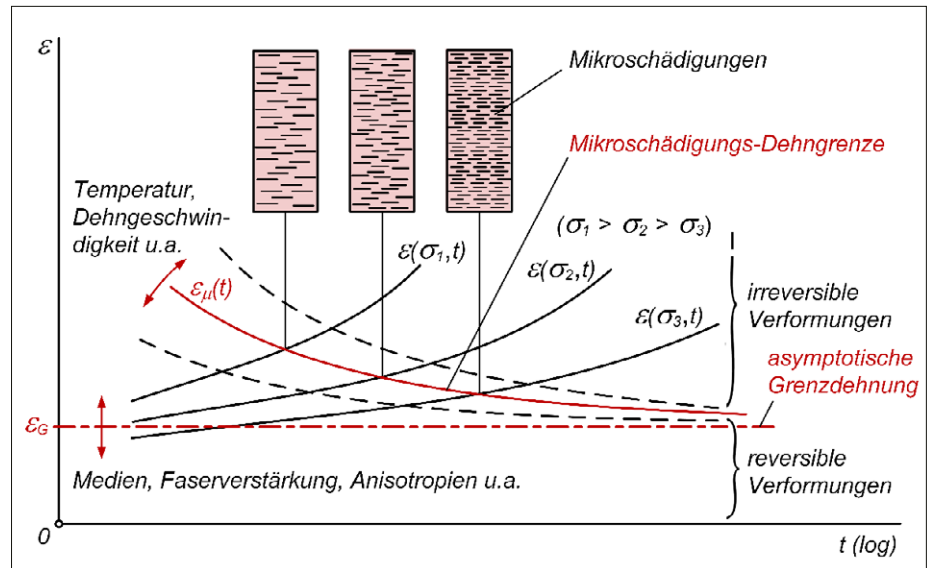


Abb. 3: Zeitdehnlinien $\epsilon(\sigma_i, t)$ bei Zugbeanspruchung unter konstanter Spannung σ_i mit Mikroschädigungs-Dehngrenze ϵ_μ in Funktion der Zeit t und diverser Einflüsse sowie Grenzdehnung ϵ_G als Asymptote (schematisch) (Bild: IWK, in Anlehnung an Menges [1]).

gungs-Dehngrenze $\epsilon_\mu(t)$, die Zeit bis zu deren Erreichen nimmt dagegen ab.

Einflüsse auf die Dehngrenzen

Die verschiedenen Einflüsse auf die Dehngrenzen wirken unterschiedlich [8]. So beeinflusst die Temperatur ϑ die zeitabhängige Mikroschädigungs-Dehngrenze $\epsilon_\mu(t)$, nicht aber die Grenzdehnung ϵ_G selber, solange sie die Dauerbrauchstemperatur nicht überschreitet (Abb. 3). Ein dieser Tatsache entsprechender Ansatz muss mit dem Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip [9] im Einklang sein. Für den Temperatureinfluss ab $\vartheta \approx 0^\circ\text{C}$ und $t \geq 10^{-2} \text{ h}$ gilt die Beziehung

$$C_1 = 1 + 0,8 \cdot m \cdot f_{1t} \cdot f_{1\vartheta} \quad (3)$$

$$f_{1t} \approx \exp \left[-0,4 \cdot \left(2 + \log \left(\frac{t}{t_0} \right) \right) \right] \quad (3a)$$

$$f_{1\vartheta} \approx 1,38 - 0,38 \cdot \frac{\vartheta}{\vartheta_R} \quad (3b)$$

als Stand der Technik [8]. Darin ist $m \geq 1,0$ ein Materialfaktor (Tabelle 1), $t_0 = 1 \text{ h}$ und die Raumtemperatur $\vartheta_R = 23^\circ\text{C}$ sind Bezugsgrössen. Bei Thermoplasten mit unbekanntem Materialfaktor führt $m = 1,0$ zur sicheren Seite. Zügige Kurzzeitbelastungen, wie sie etwa bei der Betätigung von Schnappverbindungen auftreten, können in (3a) gut durch die Zeit $t = 10^{-2} \text{ h}$ angenähert werden [10].

Generell steigt die Mikroschädigungs-Dehngrenze $\epsilon_\mu(t)$ mit zunehmender Dehnge-

windigkeit [11] und nähert sich der Bruchdehnung ϵ_B , was einer gewissen Versprödung gleichkommt. Die Bruchdehnung selber nimmt unter moderaten Dehngeschwindigkeiten ebenfalls leicht zu [12], bei höheren Dehngeschwindigkeiten sinkt sie wieder [13]. Bei PMMA z. B. beträgt $\epsilon_\mu(t)$ bei 1 %/min ca. 3 %, bei 100 %/min ca. 4,3 %. Darüber hinaus ist kein verwertbares Zahlenmaterial bekannt. Daher wird diesem Einfluss nicht mit einem Faktor, sondern – wie weiter unten ausgeführt wird – in anderer Form Rechnung getragen. Von diesen Überlegungen ausgenommen sind schlagartige Belastungen mit ihren extremen Dehngeschwindigkeiten. Die Bauteilauslegung erfordert in solchen Fällen verformungsenergetische Betrachtungen [14].

Im Gegensatz zu den erwähnten Einflüssen wirken sich z. B. eine Füllung bzw. Faserverstärkung, der Kontakt mit Medien oder Binde- und Schweissnähte direkt auf die asymptotische Grenzdehnung ϵ_G aus. Fasern oder harte Füllstoffen senken die Mikroschädigungs-Dehngrenze der Formmassen infolge von Grenzflächenschädigungen und Dehnungsüberhöhungen. Einen Anhaltspunkt für den entsprechenden Einflussfaktor gibt, ganz gut passend zum Übergang vom linearen zum nichtlinearen Bereich vieler Spannungs-Dehnungs-Kurven, der Schätzwert $C_2 \approx 0,5$.

Die Abhängigkeit vom massebezogenen Faser- bzw. Füllstoffanteil kann durch die Beziehung

$$C_2 \approx 0,1 + 0,9 \cdot \exp(-3,5 \cdot \psi) \quad (0 < \psi \leq 0,75) \quad (4)$$

erfasst werden, die so für Glas gilt. Bei Bedarf lässt sich der Masseanteil ψ aus dem Faser-Volumenanteil φ berechnen [15]. Für Verbundwerkstoffe mit anderem Dichteverhältnis $(\rho_F/\rho_M)_x$ als Glas, z.B. bei Carbonfasern, kann deren Masseanteil ψ_x für die Formel (4) umgerechnet werden [8] mit

$$\psi \approx \frac{\psi_x}{\psi_x + 0,4 \cdot (1 - \psi_x) \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_M}\right)_x} \quad (5)$$

Bei faserverstärkten Thermoplasten sind die Fasern im Bereich von Bindenähten von untergeordneter Bedeutung. Wenn der Bindenahteneinfluss (siehe unten) erfasst wird, ist der Fasereinfluss nicht auch noch zu berücksichtigen, und es kann $C_2 = 1,0$ gesetzt werden.

Für den Einfluss von Medien auf die Mikroschädigungs-Dehngrenzen gibt es angesichts der unbegrenzten Vielfalt an Kombinationen von Werkstoffen und Medien samt deren Konzentrationen und sonstigen Bedingungen wie Temperatur und Belastungsdauer weder umfassende noch allgemeingültige Aussagen. Die Einflussfaktoren, die auf bekannten Ergebnissen von Versuchen mit ausgewählten Thermoplasten und Medien aus der Literatur beruhen, sind bereits publiziert worden [8].

Auch über die Einflüsse der Verarbeitungsverfahren und -bedingungen auf die Mikroschädigungs-Dehngrenzen liegt kaum zahlenmässig Greifbares vor. Aufgrund von Beobachtungen an spritzgegossenen PS-Proben und an verrecktem PMMA wird von orientierungsbedingten Anisotropien berichtet, und dass die Dehngrenzen in Orientierungsrichtung im Vergleich zum orientierungsfreien Zustand mit zunehmendem Orientierungsgrad ansteigen, während sie quer dazu abfallen.

Wie sich Bindenähte an Spritzgiessteilen auf die mikroskopischen Schädigungsmechanismen und die damit verbundene Dehngrenze auswirken, ist bislang nicht bekannt geworden. In erster Näherung kann von denselben Größenordnungen der Einflussfaktoren wie bei der spannungsbezogenen Auslegung ausgegangen werden. Diese liegen bei teilkristallinen Thermoplasten im Bereich $C_3 \approx 0,85 \dots 1,0$, bei amorphen Thermoplasten beträgt der

Bereich gar $C_3 \approx 0,45 \dots 0,95$ [16]. Analoges gilt für Schweissnähte, wofür etwa pauschal $C_4 \approx 0,3 \dots 0,8$ angegeben wird [17].

Die Aufgabe, diese und ggf. auch weitere Einflüsse ingenieurmässig zu beurteilen und zahlenmässig festzulegen, obliegt dem Anwender. Unter Vernachlässigung allfälliger Wechselwirkungen zwischen einzelnen Einflüssen ergibt sich schliesslich als Gesamtfaktor das Produkt

$$C = C_1 \cdot C_2 \cdot \dots \cdot C_i \cdot \dots \cdot C_n = \prod_{i=1}^n C_i \quad (6)$$

Vorgehen bei sprödem Werkstoffverhalten

Ist das mutmassliche Werkstoffverhalten unter Belastung als spröde zu beurteilen, empfiehlt es sich, die maximale Dehnung nicht nur der Mikroschädigungs-Dehngrenze gemäss der Verformungsbedingung (1) gegenüberzustellen, sondern auch der Bruchdehnung ϵ_B als zweitem Kriterium. Letztere sollte natürlich für dieselben Bedingungen gelten, die der ganzen Auslegung zugrunde liegen. Diese Überprüfung erfolgt dann am einfachsten durch Berechnung der vorhandenen Sicherheit gegen Bruch anhand der Beziehung

$$S_B = \frac{\epsilon_B}{\epsilon_{zul}} = \frac{\epsilon_B}{\epsilon_G} \cdot \frac{S}{C} \quad (7)$$

worin ϵ_{zul} die zulässige Dehnung aus (1) bei einer Sicherheit S gegen Mikroschädigung darstellt. Je nach Risikobeurteilung sollte die Sicherheit gegen Trennbruch im Bereich von $S_B = 1,5 \dots 2,0$ oder höher liegen.

Wird z.B. ein Polystyrol PS mit $\epsilon_G = 0,4 \%$ und $\epsilon_B = 1,0 \%$ betrachtet, das kurzzeitig, also während $t \approx 10^{-2} h$, bei $\vartheta_R = 23^\circ C$ unter sonst unproblematischen Bedingungen belastet wird, so ergibt sich nach (3) mit $m = 1,0$ (Tabelle 1) ein resultierender Einflussfaktor $C = C_1 \approx 1,8$. Unter Einrechnung von $S = 1,2$ bedeutet dies mit (7) eine akzeptable Sicherheit gegen Bruch von

$$S_B = \frac{\epsilon_B}{\epsilon_G} \cdot \frac{S}{C} \approx \frac{1,0}{0,4} \cdot \frac{1,2}{1,8} \approx 1,7 \quad (8)$$

Ein anderes Beispiel: Für ein PP-GF40 kann dem Datenblatt [18] der Zug-E-Modul $E = 9200 MPa$ und ein isothermes Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Abb. 2) ent-

Werkstoff	Materialfaktor m
PMMA	3,8
PVC	1,4
PC	4,8
POM	1,0
PP	2,3
andere	1,0

Tabelle 1: Materialfaktor m für verschiedene Thermoplaste.

nommen werden. Dieses gibt bei der Temperatur $\vartheta = 60^\circ C$ die Bruchdehnung $\epsilon_B = 2,0 \%$ an; deren Zeitabhängigkeit kann in erster Näherung vernachlässigt werden. Mit Beziehung (2) erhält man, noch ohne Einrechnung des Fasereinflusses, eine Grenzdehnung von $\epsilon_G = 1,9 \%$. Für die Belastungsdauer $t = 10^{-3} h$ und $m = 2,3$ (Tabelle 1) liefert (3) den Einflussfaktor $C_1 \approx 1,1$. Die 40 Masse-Prozent Glasfasern ergeben nach (4) den Faktor $C_2 \approx 0,32$. Da keine weiteren Einflüsse vorliegen, wird nach (6) insgesamt $C = C_1 \cdot C_2 \approx 0,35$. Mit einer gewählten Sicherheit gegen Mikroschädigung von $S = 1,1$ berechnet sich mit (1) die zulässige Dehnung von $\epsilon_{zul} \approx 0,6 \%$. Die vorhandene Sicherheit gegen Bruch beträgt somit nach (7)

$$S_B = \frac{\epsilon_B}{\epsilon_G} \cdot \frac{S}{C} \approx \frac{2,0}{1,9} \cdot \frac{1,1}{0,35} \approx 3,3 \quad (9)$$

Ein solcher Wert ist zur Absicherung gegen Bruch komfortabel. Ein zu knapper Wert dagegen würde entsprechende Korrekturen nahelegen, z.B. die Wahl eines anderen Werkstoffs oder geometrische Änderungen am Bauteil.

Schlussbetrachtung

Das Konzept der dehnungsbezogenen Auslegung von Kunststoffteilen bewährt sich, sachgerecht angewendet, auch bei sprödem Werkstoffverhalten. Natürlich könnte man die Auslegung bei angezeigtem Sprödeverhalten auch direkt vornehmen. Hierzu wäre in (1) anstelle der Grenzdehnung ϵ_G die Bruchdehnung ϵ_B einzusetzen, und zwar unter Einrechnung der auf sie bezogenen Einfluss- und Sicherheitsfaktoren. Dies hat aber gegenüber dem hier vorgestellten Vorgehen den Nachteil, dass dem Anwender nur die Sicherheit S_B gegen Bruch ersichtlich ist,

nicht aber die Sicherheit S gegen Mikroschädigung. Letztere aber ist gerade bei Sprödbuchrisiko von Interesse, liegt doch in den Mikroschädigungen auch der Keim für ein Bruchversagen. Das Zusammenspiel der beiden Versagenskriterien und ihrer massgebenden Grössen kommt in der Beziehung (7) klar zum Ausdruck, weshalb sie bei der Auslegung von Bauteilen mit sprödem Werkstoffverhalten hilfreich sein kann.

Literatur

- [1] Menges, G., Schmidt, H.: Spannungsrisse bei Langzeit-Zugbeanspruchung von Kunststoffen. *Kunststoffe* 57(1967)11, S. 885–890
- [2] Menges, G., Taprogge, R.: Denken in Verformungen erleichtert das Dimensionieren von Kunststoffteilen. *VDI-Z* 112(1970)6, S. 341–346 und 112(1970)10, S. 627–629
- [3] Menges, G.: Erleichtertes Verständnis des Werkstoffverhaltens bei verformungsbezogener Betrachtungsweise. *Fortschrittsberichten der VDI-Zeitschriften*, Reihe 5, Nr. 12. VDI-Verlag Düsseldorf, 1971
- [4] Kunz, J.: Kunststoffe: Prinzipien der Festigkeitsrechnung. *Schweiz. Techn. Zeitschrift* 73(1976)33/34, S. 801–805
- [5] Kunz, J.: Festigkeitsberechnung von Kunststoffkonstruktionen. *Kunststoffe – Synthetics* 41(1994)2, S. 20–26
- [6] Kunz, J.: Ein Plädoyer für die dehnungsbezogene Auslegung. *Kunststoffe* 101(2011)4, S. 50–54
- [7] Kunz, J.: Reversibilität als Auslegungskriterium. *Kunststoffe* 108(2018)2, S. 67–71
- [8] Kunz, J.: Einflüsse auf die Mikroschädigungs-Dehngrenzen. *Kunststoffe* 109(2019)10, S. 212–216
- [9] Schwarzl, F. R.: *Polymermechanik*. Springer Verlag Berlin 1990
- [10] Oberbach, K.: *Kunststoff-Kennwerte für Konstrukteure*. Carl Hanser Verlag München 1980, S. 61
- [11] v. Meysenbug, C.-M., Hartwig, J.: Bestimmung einer kritischen Verformungsgrenze bei thermoplastischen Kunststoffen. *Kunststoff-Rundschau* 19(1972)12, S. 607–612
- [12] Riess, R.: *Verformungsverhalten und Zeitstandfestigkeit von Thermoplasten*. Haus der Technik – Vortragsveröffentlichungen 316. Vulkan-Verlag Essen, 1973, S. 4–16
- [13] Boden, H.-E.: *Das mechanische Verhalten von Thermoplasten bei stossartiger Belastung*. Diss., RWTH Aachen, 1983
- [14] Kunz, J.: *Bauteilauslegung bei schlagartiger Belastung*. *KunststoffXtra* 3(2013)10, S. 67–70
- [15] Ehrenstein, G. W.: *Faserverbundkunststoffe – Werkstoffe – Verarbeitung – Eigenschaften*. 2. Aufl. Carl Hanser Verlag München 2006
- [16] Erhard, G.: *Konstruieren mit Kunststoffen*, 4. Auflage, Carl Hanser Verlag, München 2008
- [17] Stommel, M., Stojek, M., Korte, W.: *FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen*, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München 2018
- [18] www.campusplastics.com

Kontakt

IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung
 Prof. Johannes Kunz
 CH-8645 Rapperswil-Jona
johannes.kunz@ost.ch
www.ost.ch/iwk

KUNSTSTOFFXTRA

Ihre Botschaft perfekt plaziert.

Entdecken Sie mit uns
 Ihre idealen
 Werbemöglichkeiten!

Verlag und Redaktion
 SIGWERB GmbH
 Tel. +41 41 711 61 11
info@sigwerb.com
www.kunststoffxtra.com

