

# Einflüsse auf die Mikroschädigungs-Dehngrenzen

## Dehnungsbezogene Auslegung von Kunststoffbauteilen

Die Qualität einer Bauteilauslegung oder eines Festigkeitsnachweises hängt wesentlich davon ab, wie gut der maßgebende Werkstoffkennwert den Auslegungsbedingungen entspricht. Für diesen Beitrag wurden die Informationen über die Einflüsse auf die Dehngrenzen des werkstoffmechanischen Versagenskriteriums Mikroschädigung aus der Literatur zusammengetragen, ausgewertet und möglichst anwendungstauglich aufbereitet.

Der Festigkeitsnachweis thermoplastischer Kunststoffbauteile gestaltet sich recht einfach, wenn er dehnungsbezogen durchgeführt und die mikromechanische Schädigung des Gefüges als Versagenskriterium verwendet wird [1]. Es gilt dann, die Verformungsbedingung

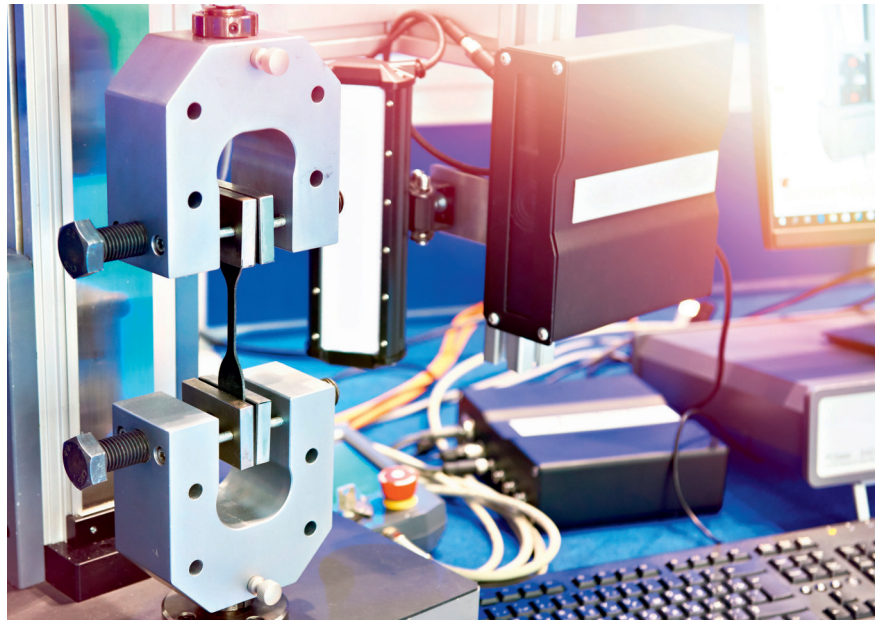
$$\varepsilon_{\max} = \max(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) \leq \varepsilon_{zul} = \varepsilon_G \cdot \frac{C}{S} \quad (1)$$

zu erfüllen [2]. Sie erfasst die Tatsache, dass die mikromechanischen Schädigungszonen stets senkrecht zur maximalen positiven Dehnung  $\varepsilon_{\max}$  im Bauteil verlaufen und dass daher – entsprechend der Navierschen Größtdehnungshypothese – die größte positive der drei Hauptdehnungen  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  der zulässigen Dehnung  $\varepsilon_{zul}$  gegenüberzustellen ist [3–5].

$\varepsilon_{zul}$  berechnet sich aus der Grenzdehnung  $\varepsilon_G$  als werkstoffmechanischem Basiswert, dem Sicherheitsfaktor  $S \geq 1,0$  und einem Einflussfaktor  $C$ , mit dem die Abhängigkeiten der Grenzdehnung von Belastungsdauer, Temperatur, Medien usw. möglichst realitätsnah erfasst werden. Geht man davon aus, dass zwischen den Einzeleinflüssen  $C_i$  keine Wechselwirkungen bestehen, überlagern sie sich multiplikativ in der Form

$$c = c_1 \cdot c_2 \cdot \dots \cdot c_i \cdot \dots \cdot c_n = \prod_{i=1}^n c_i \quad (2)$$

Als  $\varepsilon_G$  dient der asymptotische Grenzwert der zeitabhängigen, makroskopisch bestimmbaren Dehnung, die mit dem Auftreten der erwähnten mikromechanischen Schädigungen wie Mikroverstreckungszonen (Crazes), Mikrorisse und aufgebrochenen Partikel-Grenzflächen



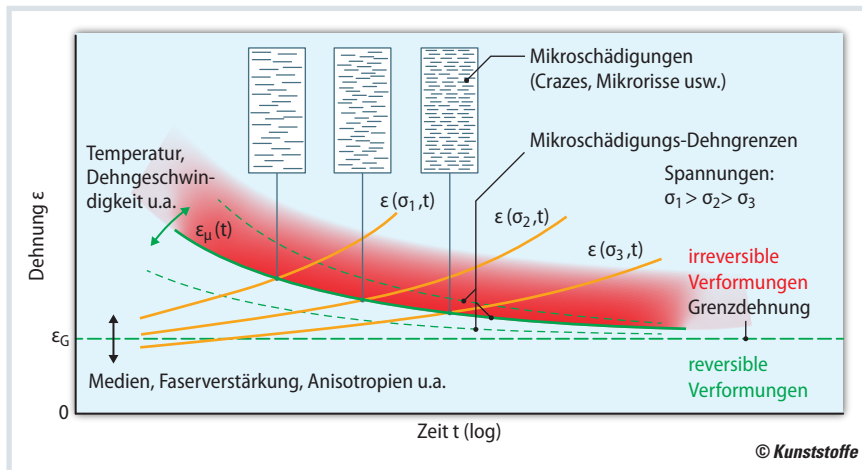
Um Bauteilversagen auszuschließen, gilt es Dehngrenzen zu beachten (© Adobe Stock/S. Ryzhov)

korreliert (**Bild 1**; [6, 7]). Diese Grenzdehnung  $\varepsilon_G$ , in der Literatur auch als Fließgrenzdehnung  $\varepsilon_{F\infty}$ , kritische Dehnung  $\varepsilon_K$  u.ä. bezeichnet, weist für die verschiedenen Werkstoffgruppen eine je charakteristische Größenordnung auf, die bis zur Dauergebrauchstemperatur praktisch unverändert bleibt (**Tabelle 1**; [8–15] und **Tabelle 2**; [7, 16–18]). Sie ist damit ein echter Werkstoffkennwert [3]. Unterhalb  $\varepsilon_G$  ist das Verformungsverhalten vieler Kunststoffe grundsätzlich linear-viskoelastisch [1], was die Anwendung des Hookeschen Gesetzes gestattet.

Bei zeitlich begrenzten Beanspruchungen können die Kunststoffe z.T. deutlich höhere Dehnungen als  $\varepsilon_G$  ertragen, ohne dass eine Mikroschädigung auftritt (**Bild 1**). Diese zeitabhängig abneh-

mende Mikroschädigungs-Dehngrenze soll hier mit dem Symbol  $\varepsilon_{\mu}(t)$  gekennzeichnet werden. Sie bildet die Grenze des stationären Kriechens und der reversiblen Verformbarkeit. Je höher die Spannung  $\sigma$  im Kriechversuch ist, umso höher liegt die Mikroschädigungs-Dehngrenze, während die Zeit bis zu deren Erreichen abnimmt; die Mikroschädigungen sind größer, aber weniger zahlreich.

Quantitative Angaben zur Mikroschädigungs-Dehngrenze sind in der Literatur jedoch nur für einzelne Werkstoffe und in Diagrammform oder dann stark verallgemeinernd zu finden. So wurde für kurze Belastungszeiten bis hin zu etwa einer Stunde ein genereller Einflussfaktor  $C \approx 2$  in der Größenordnung gegenüber der Grenzdehnung  $\varepsilon_G$  genannt [19]. Zu weite-



**Bild 1.** Zeitdehnlinien  $\epsilon(\sigma, t)$  bei Zugbeanspruchung unter konstanter Spannung  $\sigma$ , mit Mikroschädigungs-Dehngrenze  $\epsilon_u$  in Funktion der Zeit und diverser Einflüsse sowie Grenzdehnung  $\epsilon_G$  als Asymptote (schematisch) (Quelle: IWK, in Anlehnung an Menges [6, 7])

ren Einflüssen wie Temperatur, Faserverstärkung, Medien, Spannungszustand liegen – wenn überhaupt – ebenfalls nur punktuelle Daten vor. Angesichts dieser Situation ist der Ruf aus der Praxis nach differenzierteren Angaben über diese Einflüsse verständlich. Hierbei ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen Einflüssen auf den Verlauf der Mikroschädigungs-Dehngrenze  $\epsilon_u$  oberhalb der Grenzdehnung  $\epsilon_G$  und solchen auf die Grenzdehnung selber.

### Vorgehen zur Erfassung der Gesetzmäßigkeiten

Die Ermittlung neuer Daten ist wegen des damit verbundenen enormen Aufwands kein Thema. Deshalb wurde der Versuch unternommen, die im Schrifttum verfügbaren Informationen neu und für die An-

wendung in der Praxis auszuwerten. Dies bedeutete die Sichtung der Berichte über die wissenschaftlichen Arbeiten aus den Jahren um 1970, größtenteils am Aachener Institut für Kunststoffverarbeitung IKV durchgeführt, auf Hinweise über die Grenzdehnung  $\epsilon_G$  und deren Zusammenhänge mit den verschiedenen Einflussgrößen. In Anbetracht der spärlichen Datengänge dürfen die Erwartungen allerdings nicht allzu hoch angesetzt werden.

Es geht in erster Linie darum, Daten zusammenzutragen, abzugleichen und, soweit möglich, eventuelle Gesetzmäßigkeiten herauszuarbeiten. Soweit solche sich in Formeln darstellen lassen, wird das weniger auf der Basis wissenschaftlicher Methoden wie Statistiken usw. geschehen können als vielmehr unter Anwendung ingenieurpraktischer Einschätzungen und Plausibilitätsüberlegungen. Dies

auch vor dem Hintergrund, dass die Daten aus verschiedenen Quellen z. T. nicht deckungsgleich und daher interpretationsbedürftig sind.

Die mit diesem Vorgehen erzielbaren Resultate dürften dennoch brauchbar und hilfreich sein. Für diese Aussage gibt es gute Gründe: Zum einen ist die Grenzdehnung  $\epsilon_G$ , wie alle anderen Werkstoffkennwerte auch, keine eindeutige feste Größe, sondern nicht zuletzt auch aus messtechnischen Gründen einer mehr oder weniger großen Streuung unterworfen. Und zum anderen sind die Bauteilauslegung als Ganzes und damit auch der Festigkeitsnachweis mit nicht zu unterschätzenden Unschärfen behaftet, was dem damit befassten Ingenieur ein gesundes Augenmaß abverlangt [20].

### Grenzdehnung als Basis

Die Grenzdehnung  $\epsilon_G$  als Grundkennwert der Bauteilauslegung aufgrund des Versagenskriteriums Mikroschädigung ist »

### Der Autor

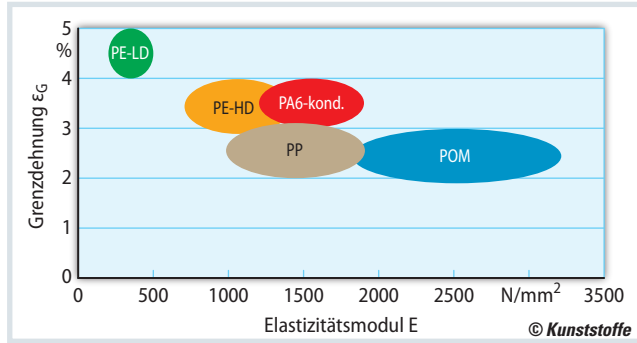
**Prof. Dipl.-Ing. Johannes Kunz**, Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) an der HSR Hochschule für Technik Rapperswil in Rapperswil/Schweiz; [jkunz@hsr.ch](mailto:jkunz@hsr.ch)

### Service

#### Literaturhinweise und Digitalversion

» [Literaturverzeichnis und Artikel-PDF:](#)  
[www.kunststoffe.de/2019-10](http://www.kunststoffe.de/2019-10)

**Bild 2.** Grenzdehnung  $\epsilon_G$  teilkristalliner Thermoplaste in Abhängigkeit der Steifigkeit; E-Modul-Bereiche nach [16] und [22] (Quelle: IWK)



weder genormt, noch wird sie systematisch ermittelt und in Datenbanken aufgeführt. Der Anwender ist daher auf Informationen aus der Fachliteratur angewiesen. In den verschiedenen Publikationen werden die Zahlenwerte fast durchweg als Bereiche angegeben (z.B. [9, 10, 19, 21]). Diese wurden für den vorliegenden Beitrag ausgewertet und neu zusammengestellt (Tabelle 1 und 2).

Es bestätigt sich, dass – von Ausnahmen abgesehen – die Grenzdehnungen der meisten amorphen Thermoplaste praktisch in derselben Größenordnung liegen. Eine relativ große Bandbreite zeigen dagegen die teilkristallinen Thermoplaste. Jene mit höherem E-Modul weisen eine kleinere Grenzdehnung  $\epsilon_G$  auf als die Werkstoffe geringerer Steifigkeit [12], und es deutet sich zwischen diesen beiden Eigenschaften ein gewisser Zusammenhang an (Bild 2; [16, 22]). Daraus eine mathematische Beziehung ableiten zu wollen, erscheint aber zu gewagt. Die Differenzierung in Wertebereiche dürfte angemessener sein (Tabelle 2).

### Belastungszeit und Temperatur

Neben der Grenzdehnung  $\epsilon_G$  als Kennwert für sehr große Belastungszeiten interessiert vor allem der Einfluss begrenzter Belastungszeiten auf das Auftreten der Mikroschädigungen bzw. den zeitlichen Verlauf der Mikroschädigungs-Dehngrenzen  $\epsilon_{\mu}(t)$  (Bild 1). Denn darin birgt sich je nach Werkstoff ein mehr oder weniger großes Potenzial für seine Belastbarkeit.

Angaben dazu finden sich zu einigen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten: PMMA, PC und PVC bzw. POM und PP, auf die sich die Auswertung beschränken muss. Die Temperatur  $\vartheta$  wirkt sich auf die Dehngrenze aus, nicht aber auf die Grenzdehnung selber, solange sie die Dauergebrauchstemperatur nicht

überschreitet. Ein Ansatz für einen Einflussfaktor, der dieser Tatsache entspricht, hat daher die Form  $C_1 \approx 1 + f_{11}(t) + f_{12}(\vartheta)$ . Er ist mit dem Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip [23] im Einklang. Aufgrund der verfügbaren Daten kann der Einflussfaktor mit der Funktion

$$c_1 \approx 1 + 0,8 \cdot m \cdot \exp \left[ -0,4 \cdot \left( 2 + \log \left( \frac{t}{t_0} \right) \right) \right] \cdot \left( 1,38 - 0,38 \cdot \frac{\vartheta}{\vartheta_R} \right) \quad (3)$$

abgeschätzt werden. Darin sind  $m$  ein werkstoffabhängiger Parameter (Tabelle 3),  $t_0 = 1$  h die Bezugszeit und  $\vartheta_R = 23$  °C die Raumtemperatur als Bezugsgröße.

Diese Abschätzung stimmt gut mit den zugänglichen Daten überein (Bild 3). Eine Ausnahme bildet PP, für das nur eine einzige Quelle [13] gefunden wurde. Obwohl die zugrundeliegenden Daten bei Temperaturen  $\vartheta \geq \vartheta_R$  ermittelt wurden, dürfte (3) aber bis etwa 0 °C angewendet werden können. Für Temperaturen unter dem Gefrierpunkt liegen leider keine Zahlenwerte vor. Die Formel (Bild 4) ist so angelegt, dass sie mehrheitlich zu kleineren Werten tendiert; die maximalen Abweichungen liegen bei rund 20 %. Bei anderen als den aufgeführten Werkstoffen dürfte der Beihelf  $m = 1,0$  zur sicheren Seite tendieren.

Steigende Temperaturen wirken sich in der Abschätzung (3) zeitlich beschleunigend aus, d.h. der Einflussfaktor  $C_1$  nimmt ab. Dies bestätigt sich bei den amorphen Thermoplasten. Bei POM als teilkristallinem Thermoplasten deuten die Daten für 23 °C [10, 15, 24, 25] und 60 °C [13, 24] eine gegenteilige Tendenz an, welche in (3) mit der Temperaturfunktion  $f_{12} \approx (\vartheta/\vartheta_R)$  anstelle des letzten Klammerters erfasst werden kann.

Zügige Kurzzeitbelastungen, wie sie etwa bei der Betätigung von Schnappverbindungen auftreten, können in (3)

gut durch die Zeit  $t = 10^{-2}$  h angenähert werden [26]. Generell steigt die Mikroschädigungs-Dehngrenze mit zunehmender Dehngeschwindigkeit [27]. Bei PMMA z.B. beträgt sie bei 1 %/min ca. 3 %, bei 100 %/min ca. 4,3 %. Da sie sich damit der ebenfalls leicht ansteigenden Bruchdehnung nähert [13], ist es jedoch vernünftig, diesen Einfluss in der Berechnung nicht zu berücksichtigen.

### Einfluss einer Faserverstärkung

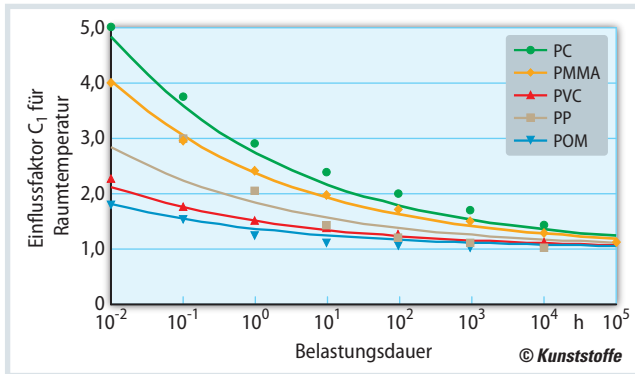
Zur Beeinflussung der Mikroschädigungs-Dehngrenze durch Beigabe von Fasern oder harten Füllstoffen finden sich leider nur zwei quantitative Angaben [14]. Zu den Auswirkungen von Faserorientierung und Faserlänge liegen keine Angaben vor. Der Schätzwert  $C_2 \approx 0,5$  gibt einen ersten groben Anhaltspunkt [21], der übrigens gar nicht so schlecht mit dem Übergang vom linearen zum nichtlinearen Bereich vieler Spannungs-Dehnungskurven zusammenpasst. Eine proportio-

Kunststofffamilie	$\epsilon_G$ [%]	Obere Grenztemperatur [°C]
<b>Amorphe Thermoplaste:</b>		
ABS	0,8 ... 1,0	< 80
CAB	0,7 ... 0,8	< 70
PA 12 (amorph)	0,8 ... 1,0	< 70
PC	0,8 ... 1,0	< 100
PMMA	0,8 ... 1,0	< 85
PS	0,3 ... 0,4	< 60
PVC	0,8 ... 1,0	< 45
SAN	0,7 ... 0,8	< 60
<b>Teilkristalline Thermoplaste:</b>		
PA 6, kond.	3,0 ... 4,0	< 80
PE-HD (PE hart)	3,0 ... 4,0	< 70
PE-LD (PE weich)	4,0 ... 5,0	< 60
POM	2,0 ... 3,0	< 80
PP	2,0 ... 3,0	< 100

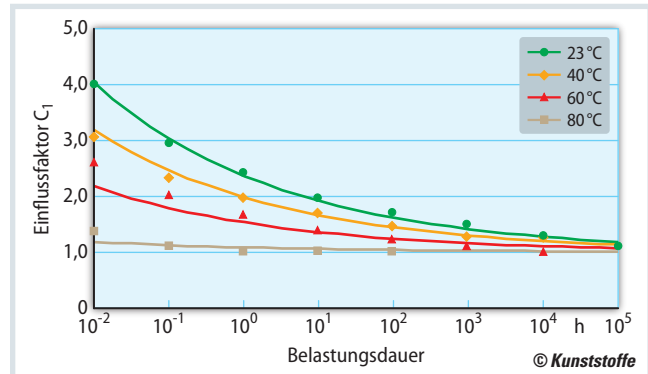
**Tabelle 1.** Grenzdehnungsbereiche und obere Grenztemperatur verschiedener Kunststofffamilien (Quelle: IWK, ausgewertet nach [8–15] u.a.)

Kunststoffgruppe	$\epsilon_G$ [%]
Amorphe Thermoplaste	0,8 ... 1,0
Schlagzähmodifizierte Blends	0,8
<b>Teilkristalline Thermoplaste:</b>	
2500 < E ≤ 4000 N/mm <sup>2</sup>	2,0 ... 5,0
1000 < E ≤ 2500 N/mm <sup>2</sup>	2,0 ... 2,5
500 < E ≤ 1000 N/mm <sup>2</sup>	2,5 ... 3,0
E ≤ 500 N/mm <sup>2</sup>	3,0 ... 4,0
	4,0 ... 5,0

**Tabelle 2.** Pauschale Grenzdehnungsbereiche verschiedener Kunststoffgruppen und E-Modul-Bereiche bei teilkristallinen Thermoplasten (Quelle: IWK, ausgewertet nach [7, 16–18])



**Bild 3.** Auswirkung der Belastungsdauer auf die Grenzdehnung  $\varepsilon_G$  von Thermoplasten: Gegenüberstellung von Werkstoffdaten und Werteverlauf aus der Berechnungsformel (Quelle: IWK)



**Bild 4.** Einflussfaktor  $C_1$  für die Auswirkung von Belastungsdauer und Temperatur auf die Grenzdehnung  $\varepsilon_G$  von Thermoplasten, am Beispiel von PMMA (Quelle: IWK)

nale Abnahme der Grenzdehnung mit zunehmendem Masseanteil  $\psi$  an Kurzglasfasern postuliert die Formel  $C_2 \approx 1 - 1,5 \times \psi$  [16]. Sie ergibt jedoch bei höheren Glasfaser-Masseanteilen unrealistisch tiefe Werte (**Bild 5**). Ein nichtlinearer Ansatz für den Einflussfaktor führt, abgestützt auf die Auswertung der Spannungs-Dehnungs-Kurven ausgewählter Thermoplaste, zur Näherungs-Beziehung

$$c_2 \approx 0,1 + 0,9 \cdot \exp(-3,5 \cdot \psi) \quad (4)$$

$$(0 < \psi \leq 0,75)$$

Der Masseanteil  $\psi$  lässt sich bei Bedarf aus dem Faser-Volumenanteil  $\varphi$  anhand der Beziehung

$$\psi = \frac{1}{1 + \frac{(1-\varphi) \cdot \rho_M}{\varphi \cdot \rho_F}} \approx \frac{2,5 \cdot \varphi}{1 + 1,5 \cdot \varphi} \quad (5)$$

berechnen [28]. Im letzten Term ist das Dichteverhältnis  $\rho_F/\rho_M$  zwischen Fasern F und Matrix M mit dem Wert 2,5 eingesetzt,

wie es für Glas realistisch ist. Weicht das Dichteverhältnis  $(\rho_F/\rho_M)_x$  des Verbundwerkstoffs davon ab, z.B. bei Carbonfasern, so kann dessen Masseanteil  $\psi_x$  für die Formel (4) umgerechnet werden mit

$$\psi \approx \frac{\psi_x}{\psi_x + 0,4 \cdot (1 - \psi_x) \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_M}\right)_x} \quad (6)$$

Grundlage hierfür ist die Annahme gleicher Volumenanteile bei beginnender Mikroschädigung im Faserverbundkunststoff, für die ja primär geometrische Effekte wie Dehnungsüberhöhungen maßgebend sind.

### Einfluss von Medien

Zum Einfluss von Medien auf die Mikroschädigungs-Dehngrenzen lassen sich 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 treffen. Aus der Literatur bekannte Ergebnisse aus Versuchen mit ausgewählten Thermoplasten und Medien [29–31] lassen für diese die Ermittlung von Einflussfaktoren  $C_3$  zu (**Tabelle 4**; [13, 29, 30]).

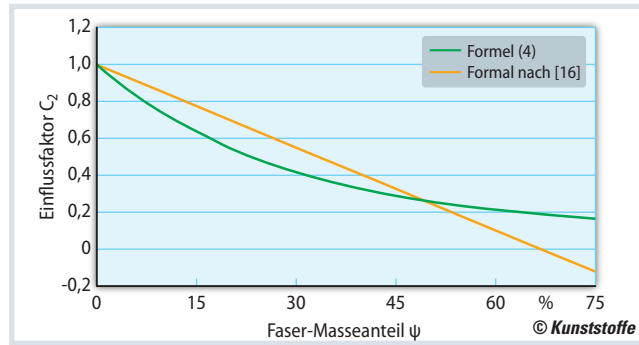
Liegen keine Angaben vor, so mag als Faustregel helfen: Ist ein Werkstoff gegenüber einer Medieneinwirkung in einer bestimmten Anwendung beständig [32], so gilt  $C_3 = 1,0$ . Ist er nicht beständig, ist es der falsche Werkstoff.

### Verarbeitungseinflüsse

Über Einflüsse der Verarbeitungsverfahren und -bedingungen auf die Mikroschädigungs-Dehngrenzen liegt wenig Greifbares vor. Solche Angaben wären aber vor allem im Zusammenhang mit Spritzgießbauteilen von großem Interesse. Zu orientierungsbedingten Anisotropien wird aufgrund von Messungen an spritzgegossenen PS-Proben und an verrecktem PMMA berichtet, dass die »

**Bild 5.** Einflussfaktor  $C_2$  für die Auswirkung einer Faserverstärkung auf die Grenzdehnung  $\epsilon_G$  von Thermoplasten

(Quelle: IWK)



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

**Tabelle 3.** Materialfaktor m für verschiedene Thermoplaste (Quelle: IWK)

Dehngrenzen in Orientierungsrichtung im Vergleich zum orientierungsfreien Zustand mit zunehmendem Orientierungsgrad ansteigen, während sie quer dazu abfallen [25]. Dieser plausible qualitative Hinweis bestätigt sich bei einem nicht näher spezifizierten schlagzähem Styrol-Copolymerisat auch zahlenmäßig: Die Grenzdehnungen  $\epsilon_G$  parallel und quer zur Orientierungsrichtung nehmen gegenüber der isotropen Probe um rund 40 % zu bzw. ab [33], was durch einen Einflussfaktor  $C_4 \approx 1,4$  bzw.  $C_4 \approx 0,7$  ausgedrückt werden kann. Inwieweit dies auch auf andere Werkstoffe zutrifft, bleibt indessen unklar.

Eigenspannungen, wie sie insbesondere in Spritzgießbauteilen infolge unterschiedlicher Schwindungen beim Abkühlen auftreten, sind stets das Ergebnis gegenseitig behinderter Verformungen. Sie bilden für sich ein inneres Gleichgewichtssystem. Bei einer dehnungsbezogenen Auslegung sind diese behinderten Verformungen zu berücksichtigen, da sie sich den durch äußere Belastung hervorgerufenen Verformungen überlagern [33]. Die Mikroschädigungs-Dehngrenze wird dadurch zwar nicht beeinflusst, jedoch durch die behinderten Dehnungen mehr oder weniger stark ausgeschöpft.

Wie sich Bindenähte an Spritzgießteilen auf die mikroskopischen Schädigungs-

mechanismen und die damit verbundene Dehngrenze auswirken, ist bislang nicht bekannt geworden. Neuere Technologien wie z. B. die Schallemissionsanalyse [34] könnten diesbezügliche Untersuchungen wohl erleichtern.

### *Einfluss des Spannungszustands*

Mehrachsige Spannungszustände wirken sich kaum auf die zeitabhängig abnehmende Mikroschädigungs-Dehngrenze und erwiesenermaßen nicht auf deren Asymptote  $\epsilon_G$  aus [3]. Dies gilt unabhängig vom Mehrachsigsigntegrad des Spannungszustands und von dessen räumlicher Verteilung bis hin zu hochgradigen Spannungskonzentrationen z. B. bei Kerbwirkung. Bei dieser Art der Einwirkung übrigens können unterhalb der Mikroschädigungs-Dehngrenze die bekannten Formzahlen angewendet werden [5].

Bei zugdominanten mehrachsigen Spannungszuständen ist zu beachten, dass die maximale Dehnung infolge der überlagerten Querkontraktionen gegenüber der einachsigen Beanspruchung reduziert wird, bei Druckdominanz jedoch erhöht wird.

### *Fazit*

Über weitere Einflüsse ist, wenn überhaupt, nur wenig und kaum zahlenmäßig Auswertbares bekannt. Bei Vorliegen entsprechender Informationen lassen sich natürlich jederzeit anwenderdefinierte Einflussfaktoren bestimmen und in (2) einrechnen. Wenn solche nicht quantifiziert werden können, empfiehlt es sich, an ihrer Stelle  $C_i = 1,0$  zu setzen und, nach bewährter Ingenieur-Usanz, einem größeren Versagensrisiko durch einen angemessen erhöhten Sicherheitsfaktor vorzubeugen. Dies ist insofern unproblematisch, als die mikroskopische Gefügeschädigung keine ultimative Versagensart darstellt wie z. B. Bruch.

Die hier dargelegten Betrachtungen über die diversen Abhängigkeiten der Mikroschädigungs-Dehngrenze stellen den Versuch dar, die in zahlreichen Fachbeiträgen aus früheren Jahren enthaltenen Informationen zu bündeln und für die Berechnungspraxis zu erschließen. Damit kann die ebenso einfache wie elegante dehnungsbasierte Bauteilauslegung systematisiert und deren Nachvollziehbarkeit verbessert werden. Unrealistisch wäre aber die Erwartung, damit wesentlich genauere bzw. zutreffende Resultate erzielen zu können. Denn das Rechenmodell, das durch die Verformungsbedingung (1) zusammen mit den verschiedenen Einflussfaktoren gebildet wird, entspricht – wie dies bei allen Rechenmodellen der Fall ist – der komplexen Wirklichkeit weiterhin nur unvollkommen. Und auch hier gilt: Je detaillierter die Betrachtung, umso mehr offene Fragen werden aufgeworfen. Dennoch oder gerade deshalb können die hier vorgestellten Resultate hilfreich sein, solange keine besseren bekannt werden. ■

Werkstoff	Einflussfaktor $C_3$ / Medium / Temperaturbereich							
	H <sub>2</sub> O, destilliert			Nekasil 5 %	NaOH 10 %	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 10 %	Trafo-Öl Diala D	Iso-butanol
	< 23 °C	< 40 °C	< 60 °C	< 23 °C	< 23 °C	< 23 °C	< 23 °C	< 23 °C
PMMA	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0
PVC	0,13	0	0	0,25	1,0	1,0	0,75	0,63
PC	1,0	0	0	1,0	0	k.A.	1,0	1,0
POM	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	k.A.	1,0	1,0
PP	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	k.A.	1,0	0,5
PE-HD	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

ausgewertet nach [13, 29, 30]; k.A.: keine Angabe

**Tabelle 4.** Einflussfaktor  $C_3$  für Medieneinwirkung auf die Grenzdehnung  $\epsilon_G$  (Quelle: IWK)

## Literaturhinweis

- [1] Menges, G., Schmidt, H.: Spannungsrisse bei Langzeit-Zugbeanspruchung von Kunststoffen. Kunststoffe 57(1967)11, S. 885-890
- [2] Kunz, J.: Kunststoffe: Prinzipien der Festigkeitsrechnung. Schweiz. Techn. Zeitschrift 73(1976)33/34, S. 801-805
- [3] Menges, G., Schmidt, H.: Das Kriechdehnungsverhalten amorpher thermoplastischer Kunststoffe bei mehrachsiger Zugbeanspruchung unter Berücksichtigung der optisch erkennbaren Fließgrenze. Plastverarbeiter 21(1970)5, S. VII-1 - VII-5
- [4] Menges, G.: Das Verhalten von Kunststoffen unter Dehnung. Kunststoffe 63(1973)2, S. 95–100 und 63(1973)3, S. 173-177
- [5] Menges, G.: Ingenieurmäßige Festigkeitsrechnung für Spritzgussteile aus Thermoplasten. Kunststoffe 57(1967)1, S. 2-8
- [6] Menges, G.: Werkstoffe in neuer Sicht. VDI-Z 113(1971)7, S. 478-481
- [7] Menges, G.: Erleichtertes Verständnis des Werkstoffverhaltens bei verformungsbezogener Betrachtungsweise. Fortschrittsberichten der VDI-Zeitschriften, Reihe 5, Nr.12. VDI-Verlag Düsseldorf, 1971
- [8] Schreyer, G. (Hrsg.): Konstruieren mit Kunststoffen. Carl Hanser Verlag München, 1972; S. 509
- [9] Kaufhold, R.: Berechnung und Konstruktion von Bauteilen aus Thermoplasthalbzeugen. 2. Aufl., VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1977, S. 27
- [10] 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
- [11] Pohrt, J.: Beispiele aus der Feinwerktechnik. In: Schreyer, G. (Hrsg.): Konstruieren mit Kunststoffen. Carl Hanser Verlag München, 1972, S. 1059
- [12] Menges, G.: Dimensionierung von Kunststoffteilen auf Basis von kritischen Deformationen. Kunststoffe-Plastics 24(1977)8, S.15-25
- [13] Rieß, R.: Verformungsverhalten und Zeitstandfestigkeit von Thermoplasten. Haus der Technik - Vortragsveröffentlichungen 316. Vulkan-Verlag Essen, 1973, S. 4-16
- [14] Menges, G., Wiegand, E., Pütz, D., Maurer, F.: Ermittlung der kritischen Dehnung teilkristalliner Thermoplaste. Kunststoffe 65(1975)6, S. 368-371
- [15] Reichherzer, R.: Das Deformationsverhalten als Grundlage für die Dimensionierung mechanisch beanspruchter Teile aus Kunststoff. Technica 23(1974)15, S. 1262
- [16] Baur, E. et al.: Saechtling Kunststoff Taschenbuch. 31. Aufl. Carl Hanser Verlag München 2013
- [17] Menges, G.: Werkstoffkunde der Kunststoffe. Sammlung Göschen. De Gruyter Verlag Berlin, 1970
- [18] Taprogge, R.: Konstruieren mit Kunststoffen. VDI Taschenbücher T 21. VDI Verlag Düsseldorf, 1971
- [19] Kunz, J.: Ein Plädoyer für die dehnungsbezogene Auslegung. Kunststoffe 101(2011)4, S. 50-54
- [20] Kunz, J.: Bauteilauslegung mit Augenmaß. Kunststoffe 103(2013)12, S. 56-60
- [21] Kunz, J.: Reversibilität als Auslegungskriterium. Kunststoffe 108(2018)2, S. 67-71
- [22] Hellerich, W., Harsch, G., Haenle, S.: Werkstoff-Führer Kunststoffe, 8. Aufl. Carl Hanser Verlag München 2001
- [23] Schwarzl, F. R.: Polymermechanik. Springer Verlag Berlin 1990
- [24] Menges, G., Schmidt, H.: Spannungsrissbildung und elastisch-plastisches Verformungsverhalten von thermoplastischen Kunststoffen bei Langzeitbeanspruchung. Plastverarbeiter 119(1968)7, S. 547-551

- [25] Schmidt, H.: Untersuchungen der Fließzonenbildung und des mechanischen Langzeitverhaltens von thermoplastischen Kunststoffen bei ein- und zweiachsig wirkenden Zugspannungen. Kunststoff-Rundschau 19(1972)1, S. 1-7; 19(1972)3/4, S. 56-65; 19(1972)4, S. 145-150, 19(1972)5, S. 196-199; 19(1972)7, S. 320-326
- [26] Oberbach, K.: Kunststoff-Kennwerte für Konstrukteure. Carl Hanser Verlag München 1980, S. 61
- [27] v. Meysenbug, C.-M., Hartwig, J.: Bestimmung einer kritischen Verformungsgrenze bei thermoplastischen Kunststoffe. Kunststoff-Rundschau 19(1972)12, S. 607-612
- [28] Ehrenstein, G. W.; Faserverbundkunststoffe – Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften. 2. Aufl. Carl Hanser Verlag München 2006
- [29] Menges, G., Rieß, R., Taprogge R.: Verformungsverhalten thermoplastischer Kunststoffe in flüssigen Medien. Materialprüfung 14(1972)5, S. 141-146
- [30] Rieß, R.: Untersuchungen zum Verformungsverhalten thermoplastischer Kunststoffe in ausgewählten Flüssigkeiten. Diss. RWTH Aachen 1973