

Reversibilität als Auslegungskriterium

Beanspruchungen beim Konstruieren kunststoffgerecht begrenzen

Bei der festigkeitsmäßigen Auslegung von Bauteilen gilt es, Bruch oder irreversible Verformungen mit ausreichender Sicherheit zu vermeiden. Konstrukteure wenden auf Kunststoffteile in der Praxis oft eine von metallischen Werkstoffen geprägte Denkweise an. Die Situation bei Kunststoffen ist jedoch komplexer. Insbesondere bei der Sicherstellung reversibler Verformungen bietet die dehnungsbezogene Auslegung eine Reihe von Vorteilen.

Der Ausschluss bleibender Verformungen bei der Auslegung von Bauteilen gilt schon seit Langem als bedeutendes Kriterium. Mit ihm wird die Reversibilität der Verformungen sichergestellt, d. h. nach der Entlastung findet infolge elastischer bzw. viskoelastischer Rückstellkräfte eine selbstständige kraftfreie Rückverformung in die ursprüngliche Lage und Gestalt des Bauteils statt. Mit dieser 1878 erhobenen Forderung [1] kann Franz Grashof (1826–1893), Professor für Maschinenlehre, Gründungsinitiator und erster Direktor des VDI, als ein Wegbereiter der verformungsbezogenen Bauteilauslegung gelten.

Grenzen reversibler Verformungen

Bei zunehmender Belastung duktiler metallischer Werkstoffe werden nacheinander drei Grenzen durchschritten:

- die Proportionalitätsgrenze σ_p als Ende des Hookeschen Bereichs,
- die Elastizitätsgrenze σ_E am Übergang von reversiblen zu irreversiblen Verformungen und
- die Fließgrenze σ_F , ab der Fließvorgänge größeren Umfangs ohne Lastzuwachs einsetzen.

Diese Grenzen werden vorwiegend in älteren Lehrbüchern, denen auch die damals gebräuchlichen Bezeichnungen und Symbole entnommen sind, sauber auseinandergehalten (Bild 1). Gleichzeitig wird aber auch darauf hingewiesen, dass diese Grenzen messtechnisch schwer zu unterscheiden sind [2]. Da sie zudem nahe beieinander liegen, werden sie in der Auslegungspraxis nicht differenziert; als Grenze reversibler Verformungen wird die Fließgrenze betrachtet [3], die bei Zugbeanspruchung „Streckgrenze“ genannt wird. Wo eine solch ausgeprägte Streckgrenze fehlt, wird an ihrer Stelle eine technische Streckgrenze $R_{p0,2}$ definiert, bei der eine plastische Dehnung von 0,2% gemessen wird [4]. Sie wird daher auch 0,2%-Dehngrenze genannt (Bild 2). In diesem Fall ist die Reversibilität durch einen angemessenen Sicherheitsfaktor anzustreben.

Bei Polymerwerkstoffen ist die Sachlage eine andere. Hier wird die Streckgrenze, unabhängig vom werkstoffmechanischen Geschehen, als jener Punkt im Spannungs-Dehnungs-Diagramm betrachtet, bei dem ein Dehnungszuwachs ohne Steige-

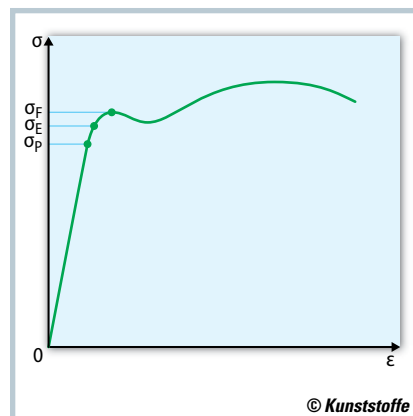


Bild 1. Proportionalitäts-, Elastizitäts- und Fließgrenze im Spannungs-Dehnungs-Diagramm duktiler metallischer Werkstoffe mit ausgeprägter Streckgrenze (Quelle: IWK; nach [2])

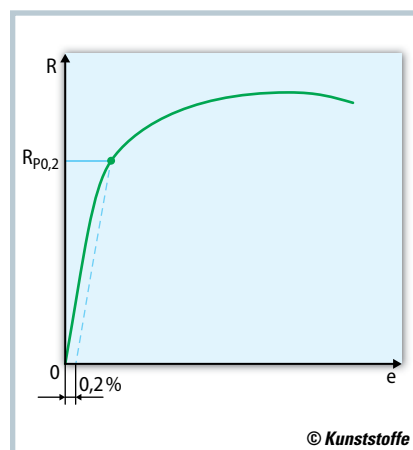


Bild 2. Technische Streckgrenze: Dehngrenze bei 0,2% plastischer Dehnung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm duktiler metallischer Werkstoffe ohne ausgeprägte Streckgrenze, mit R als Spannung und e als Dehnung (Quelle: IWK; nach EN ISO 2862-1:2016 [4])

rung der Spannung auftritt [5]. Bei duktilem Verhalten, vorwiegend bei teilkristallinen Thermoplasten oberhalb der Glasübergangstemperatur, ist der Übergang von einer anfänglich linear-viskoelastischen Verformung zur Streckgrenze Y oft alles andere als ausgeprägt; die Spannungs-Dehnungskurve verläuft oberhalb eines nahezu linearen Bereichs degressiv mit stetig abnehmender Steigung bis hin zum Punkt Y mit erstmals horizontaler Tangente (Bild 3). Theoretisch ließen sich auch hier Bereiche mit linear-viskoelastischer, nichtlinear-viskoelastischer und »

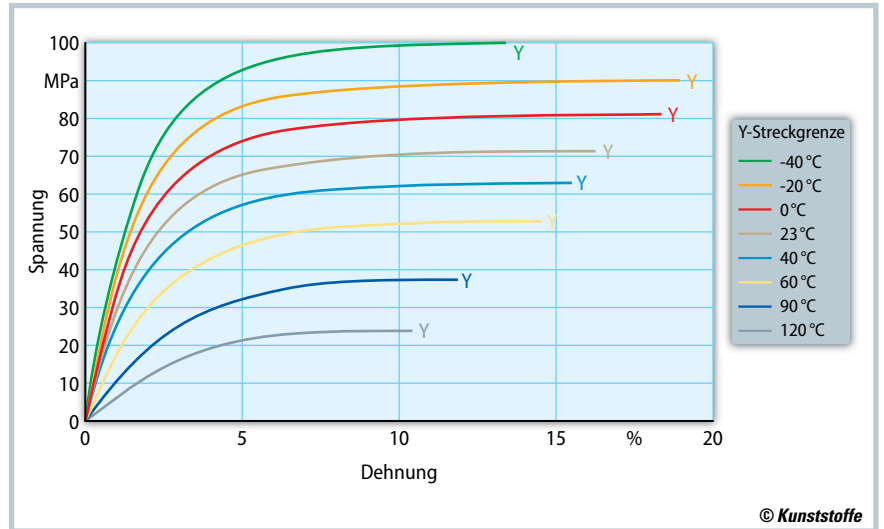


Bild 3. Duktilen Verhalten: isotherme Spannungs-Dehnungslinien des POM-H Delrin 500P NC010 mit Streckgrenze Y (Quelle: Material Data Center)

Der Autor

Prof. Dipl.-Ing. Johannes Kunz ist am Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) an der HSR Hochschule für Technik Rapperswil, Schweiz, tätig; jkunz@hsr.ch

Service

Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/4524403

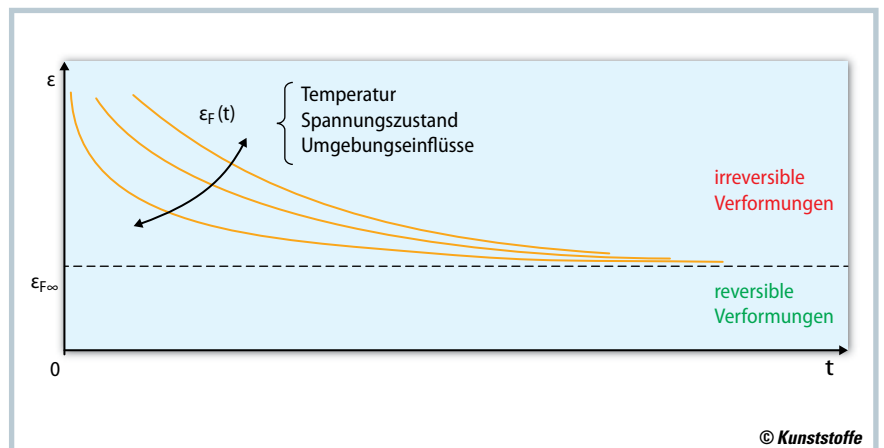


Bild 4. Reversibilitätsgrenze: Temperatur und Spannungszustand eines Bauteils sowie Umgebungseinflüsse beeinflussen den zeitlichen Verlauf der „Fließdehnung“ ϵ_F , die die Bereiche reversibler und irreversibler Verformung trennt, mit der „Fließgrenzdehnung“ $\epsilon_{F\infty}$ als weitgehend unabhängiger Asymptote (Quelle: IWK; nach Menges)

nichtlinear-viskoplastischer Verformung abgrenzen, was jedoch mit größeren messtechnischen Schwierigkeiten verbunden wäre. Grundsätzlich aber hat sich bei Kunststoffen gezeigt, dass irreversible Verformungen nicht erst ab der Streckgrenze auftreten, sei sie nun ausgeprägt oder nicht, sondern bei bereits deutlich geringeren Werten von Spannung und Dehnung.

Reversibilität bei Kunststoffen

Bleibende Verformungen stellen sich bei Kunststoffen ab einer gewissen Verformung nicht nur bei duktilem, sondern auch bei sprödem Werkstoffverhalten ein, wie es typisch ist für Temperaturen unterhalb des Glasübergangs, also im üblichen Anwendungsbereich amorpher Thermoplaste. In den Jahren um 1970 wurde, vor allem von Menges und seinen Mitarbeitern am Aachener IKV, in verschiedenen Publikationen aufgezeigt, dass oberhalb bestimmter werkstofftypischer Dehnungen in Thermoplasten irreversible werkstoffmechanische Phänomene auftreten [6–10]. Solche Erscheinungen sind die Bildung mikroskopi-

scher Verstreckungszonen (Crazes) im amorphen Gefüge bis hin zu Mikrorissen, das Aufreißen von Sphärolithgrenzen bei teilkristallinen Thermoplasten oder das lokale Ablösen an den Grenzen zwischen Füllstoffpartikeln und Matrix bei gefüllten oder faserverstärkten Werkstoffen. Gemeinsam ist diesen Vorgängen, dass sie erste Schädigungen im Mikrobereich darstellen, die sich makroskopisch als messbare irreversible Dehnungen auswirken. Die Abgrenzung gegenüber reversibler Verformung zeigt bei vergleichsweise kurzzeitigen Belastungen gewisse Abhängigkeiten von Spannungszustand, Temperatur und Umgebungsmedien, die aber mit zunehmender Belastungsdauer verschwinden (**Bild 4**). Der asymptotische Grenzwert liegt für die verschiedenen Kunststoffklassen und -familien in einer jeweils charakteristischen Größenordnung (**Tabelle 1**), weshalb er als Werkstoffkennwert betrachtet werden kann.

Menges bezeichnete diese Werkstoffkenngröße u. a. als Fließgrenzdehnung $\epsilon_{F\infty}$ oder Kritische Dehnung ϵ_K . Für den im Kurzzeitbereich variablen Dehnungswert ϵ_F verwendete er den Begriff Fließdehnung. Es ist nachvollziehbar, dass diese Bezeich-

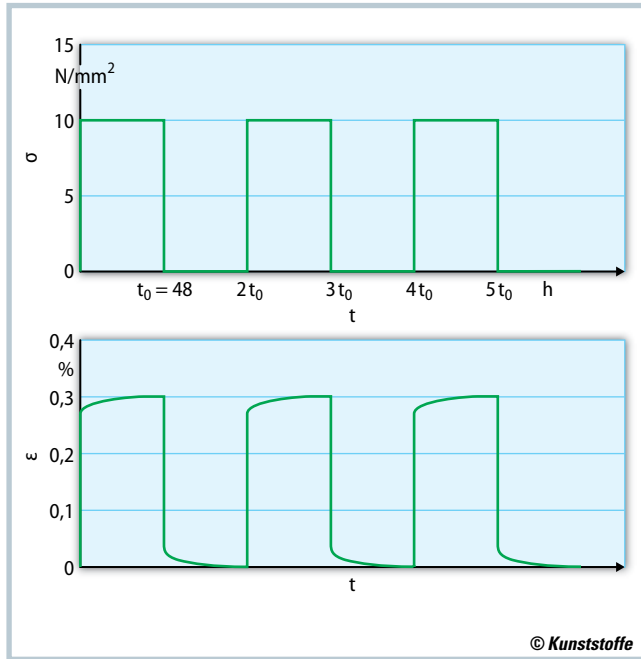


Bild 5. Zyklische Be- und Entlastung: Spannungs- und Dehnungsverlauf von PVC-E-Proben bei Raumtemperatur (Quelle: IWK; nach [6])

nungen nicht allseits als glücklich betrachtet werden, denn zum einen unterscheidet sich der dahinter stehende Vorgang klar vom Fließen, wie es von metallischen Werkstoffen mit ihrem kristallinen Aufbau her bekannt ist. Und zum anderen kann das Adjektiv „kritisch“ manchem zugeordnet werden, ohne konkret etwas auszusagen. Treffender wäre für diesen Werkstoffkennwert der Begriff „Reversibilitätsgrenze“, der in einem klaren Bezug zum werkstoffmechanischen Geschehen des Übergangs vom reversiblen zum irreversiblen Verhalten steht. Dennoch sollen, um nicht zu verwirren, auch hier die bisher kursierenden Begriffe und Symbole angewendet werden.

Bleiben die Dehnungen innerhalb dieser Grenzen, so sind die Verformungen reversibel. Die auf die Entlastung folgende Rückverformung ist also vollständig. Infolge der Viskoelastizität der Kunststoffe erfolgt diese Wiederherstellung allerdings zeitabhängig und bei Anwendung einfacher viskoelastischer Modellvorstellungen in einem theoretisch unendlich langen asymptotischen Prozess. Die praktische Erfahrung zeigt jedoch, dass der Zeitbedarf für die vollständige Rückverformung nur etwa der Dauer der vorausgegangenen Belastung entspricht (**Bild 5**). Bei repetitiven Belastungen sind daher zwischen den einzelnen Belastungszyklen ausreichend lange lastfreie Intervalle erforderlich, wenn die Reversibilität der Verformungen gewahrt bleiben soll. Andernfalls würden Verformungsüberlagerungen resultieren, die früher oder später zu Schädigungen und bleibenden Verformungen führen.

Die Reversibilitätsgrenze $\epsilon_{F_{\infty}}$ ist weder genormt, noch wird sie in den Werkstoffdatenbanken aufgeführt. Die bislang bekannt gewordenen Werte (**Tabelle 1**) entstammen praktisch alle wissenschaftlichen Untersuchungen. Für ihre experimentelle Bestimmung sind Messungen optisch-visueller Effekte wie Lichtdurchlässigkeit und Trübung sowie herkömmliche Dehnungsmessungen eingesetzt worden oder die Schallemissionsanalyse, mit der auch aktuell gearbeitet wird [11, 12]. »

Dehnungsbezogene Auslegung

Angesichts der erwähnten Zusammenhänge liegt es nahe, Kunststoffteile dehnungsbezogen auszulegen, zumal wenn ihre Verformungen reversibel bleiben sollen. Die dehnungsbezogene Auslegung ist in der Praxis nach wie vor wenig bekannt, obwohl sie eine Reihe von Vorteilen bietet [13, 14]. Von der Streckgrenze beispielsweise ist bekannt, dass die Streckspannung der Polymerwerkstoffe sich in Funktion von Belastungsgeschwindigkeit, Belastungsdauer und Temperatur sehr stark ändert, die Streckdehnung dagegen nur minimal. Analoges gilt auch für die oben beschriebene Reversibilitätsgrenze. Dies führt dazu, „dass bei Bauteilen aus Polymerwerkstoffen die Verformungsbetrachtung und die Überprüfung durch Verformungsmessungen eine sehr viel größere Rolle spielen als bei Metallen“ [15] und eine spannungsbezogene Auslegung kompliziert machen, während die Auslegung auf Basis der Verformungen bzw. Dehnungen dehnungsbezogen einfach ist.

Bei der dehnungsbezogenen Auslegung handelt es sich grundsätzlich darum, im Festigkeitsnachweis die Verformungsbedingung

$$\varepsilon_{V_{\max}} \leq \varepsilon_{\text{zul}} = \varepsilon_G \cdot C / S \quad (1)$$

zu erfüllen. Mit ihr wird die größte, für das Bauteil aufgrund einer geeigneten Versagenshypothese berechnete Vergleichsdehnung $\varepsilon_{V_{\max}}$ gegen einen zulässigen Dehnungswert ε_{zul} abgegrenzt. Letzterer basiert auf einem Dehnungsgrenzwert ε_G , der dem maßgebenden Versagensmechanismus zugeordnet ist. Mit dem Einflussfaktor C kann der unter Prüfbedingungen ermittelte Wert von ε_G an davon abweichende Betriebsbedingungen angepasst werden. Man denke hier an Belastungsdauer, Tempera-

Kunststoff/Kunststoffgruppe	$\varepsilon_{F_{\infty}}$ [%]
Thermoplaste, amorph: generell	0,6–1,0
■ ABS	0,8–1,5
■ CAB	0,8
■ PA12	0,7–1,0
■ PC	0,7–1,0
■ PMMA	0,7–1,0
■ PS	0,3
■ PVC	0,7–1,0
■ SAN	0,7
Thermoplaste, teilkristallin: generell	2,0–6,0
■ PA6, konditioniert	2,8–4,0
■ PE-HD (PE hart)	2,0–4,0
■ PE-LD (PE weich)	3,0–6,0
■ POM	1,5–3,0
■ PP	2,0–3,0
Thermoplaste, glasmattenverstärkt	0,2–0,7
Duroplaste, unverstärkt	0,1–0,2
Duroplaste, UD-verstärkt	0,05–0,2

Tabelle 1. Fließgrenzdehnung als Reversibilitätsgrenze verschiedener Kunststoffarten (Quelle: [6–12], [15] u. a.)

tur, Feuchte, Medien usw. Je nach Werkstoffverhalten und damit zusammenhängendem Auslegungskriterium stehen als Dehnungsgrenzwert ε_G im Vordergrund

- die Bruchdehnung ε_B bei Bruch vorwiegend unter sprödem Verhalten,
- die Streckdehnung ε_V bei Verstreckung duktiler Werkstoffe und
- die Fließgrenzdehnung $\varepsilon_{F_{\infty}}$ zur Vermeidung erster Werkstoffschädigungen.

Der Sicherheitsfaktor $S \geq 1,0$ soll das Versagen ausschließen und so das Funktionieren des Bauteils im Betrieb sicherstellen.

Bei Kunststoffbauteilen wird die Reversibilität der Verformungen erreicht, wenn die maximale positive Dehnung im Bauteil, also die größte der drei Hauptdehnungen $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ des lokalen Verformungszustands, die Reversibilitäts- und Schädigungsgrenze nicht überschreitet. Diese Forderung entspricht der Aussage der Größtdehnungshypothese [16], die sich demnach für die Anwendung des Kriteriums Reversibilität am besten eignet. Die größte Dehnung ε_{\max} des i. Allg. dreiachsigen Verformungszustands wirkt übrigens, wie aus der Elastizitätstheorie bekannt, stets in Richtung der größten Normalspannung (Hauptspannung). Sie kann bei der Anwendung der Finiten-Elemente-Methode (FEM) als größte Hauptdehnung ausgewertet werden, z. B. unter der Bezeichnung „Principal Total Strain Max“. Als relevanter Dehnungsgrenzwert ε_G für die Vermeidung irreversibler Verformungen unter Langzeitbelastung gilt die oben erwähnte Fließgrenzdehnung $\varepsilon_{F_{\infty}}$. Damit konkretisiert sich für das Auslegungskriterium Reversibilität die Verformungsbedingung (1) zum Aus-

$$\varepsilon_{\max} = \max(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) \leq \varepsilon_{\text{zul}} = \varepsilon_{F_{\infty}} \cdot C / S \quad (2)$$

Wirken die Belastungen kurzzeitig, etwa bis hin zu etwa einer Stunde, so kann dies erfahrungsgemäß mit einem Einflussfaktor $C \approx 2$ erfasst werden [17]. Die Fließgrenzdehnung gefüllter bzw. kurzfaserverstärkter Kunststoffe lässt sich mit $C \approx 0,5$ gegenüber solchen ohne Füllung oder Verstärkung abschätzen, und zwar in erster Näherung unabhängig vom Füllstoffanteil.

Die Anwendung der Verformungsbedingung (2) hat neben der Sicherstellung der Reversibilität eine Reihe weiterer vorteilhafter Konsequenzen, so vor allem die Tatsache, dass bis zum Dehnungsgrenzwert $\varepsilon_{F_{\infty}}$ das Spannungs-Dehnungsverhalten praktisch linear ist und so dank Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes die grundlegenden Berechnungsformeln aus der Elastizitätstheorie und die bekannten Überlagerungsprinzipien angewendet werden dürfen.

Dass die Fließgrenzdehnung $\varepsilon_{F_{\infty}}$ nicht als präziser Zahlenwert verfügbar ist, sondern nur als mehr oder weniger eng begrenzter Streubereich (**Tabelle 1**), hat nicht zuletzt messtechnische Gründe. Dies steht aber angesichts der übrigen Unschärfen, denen ohnehin jede technische Berechnungsaufgabe unterworfen ist [18], einer erfolgreichen Anwendung in der Auslegungspraxis nicht entgegen.

Reversibilität an Bauteilen

Die Reversibilität der Verformung ist bei vielen Bauteilen und Funktionselementen eine essenzielle Anforderung. Bei Kunststoffteilen ist dabei die Viskoelastizität zu beachten, die sich als

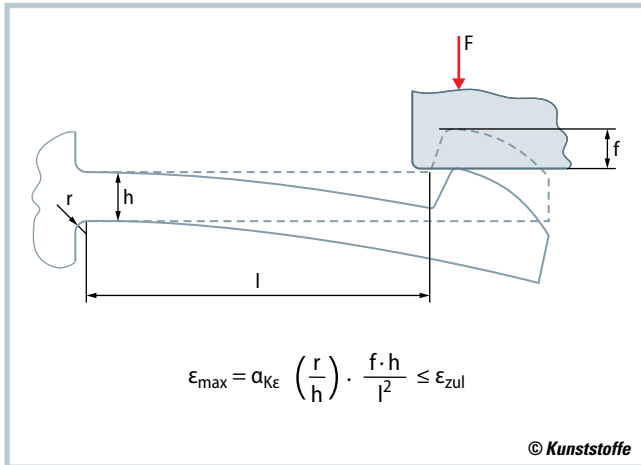


Bild 6. Geometrisch bestimmte Maximaldehnung einschließlich Kerbwirkung; Formzahl α_{KE} als Funktion von r/h , bei der Anbindung eines Schnapphakens unter wegdefinierter Belastung (Quelle: IWK)

zeitabhängig abnehmende Werkstoffsteifigkeit äußert. Eine kraftdefinierte Langzeitbelastung führt zur Retardation, also zur stetig zunehmenden Verformung (Kriechen). Diese ist zur Sicherstellung der Reversibilität in Kenntnis der Belastungsdauer über den Dehnungsgrenzwert $\epsilon_{F_{\infty}}$ zu limitieren, wozu der entsprechende Kriechmodul benötigt wird.

Typische Anwendungsbeispiele, bei denen Schädigungen und bleibende Verformungen die Funktion beeinträchtigen können, sind etwa Federelemente, bei denen die Last vorgegeben ist, oder Zahnräder und Laufrollen unter Stillstandslast. Wird bei Zahnrädern oder Laufrollen die Schädigungsgrenze nicht überschritten, so wird die während des Stillstands aufgebaute Verformung im Betrieb nach einer gewissen Anlaufzeit reversibel restituiert. Im Betrieb sind die beanspruchten Bereiche von Zahnrädern oder Laufrollen jeweils nur während eines Bruchteils einer Umdrehung unter Last, im Intervall dazwischen können sie sich in die Ausgangslage zurückverformen. Bei höheren Drehzahlen ab etwa 5 Hz ist dabei die dämpfungsbedingte Wärmeentwicklung zu beachten, die eine Steifigkeitsabnahme und somit höhere Verformungen zur Folge hat.

Bei Bauteilen, deren Belastung vom vorgegebenen Verformungsweg abhängt, wie beispielsweise Schnapphaken oder Federelemente mit vorgegebenem Federweg, ist die maximale Dehnung wegdefiniert und damit zeitunabhängig. Sie ist rein geometrisch bestimmt, d. h. sie lässt sich aus den Bauteilabmessungen und dem gegebenen Verformungsweg berechnen. Ist diese maximale Dehnung bei Beginn einer Langzeitbelastung zulässig, so bleibt sie es während der gesamten Belastungsdauer, soweit der Dehnungsgrenzwert nicht durch Alterungsprozesse reduziert wird. Allerdings bleibt zu beachten, dass unter Langzeitbelastung die Spannung relaxiert, also stetig abgebaut wird. Unter Kurzzeitbelastung können höhere Dehnungswerte zulässig sein.

Solche Gegebenheiten mit vorbestimmter Verformung liegen nicht nur bei Federelementen mit definiertem Federweg vor. Bei Pressverbindungen zwischen Stahlwellen und Kunststoffnaben entspricht die maximale Dehnung der Durchmesserendifferenz, die beim Fügen zu überwinden ist.

Bei Schraubverbindungen von Kunststoffteilen mit Schrauben aus metallischen oder hochsteifen Polymerwerkstoffen ist die Sachlage etwas komplizierter, indem zuerst ein Zusammenhang zwischen der Reversibilitätsgrenze $\epsilon_{F_{\infty}}$ und der beim Anziehen aufzubauenden Druck-Vorverformung hergestellt werden muss. Nur kurzzeitig „wegdefiniert belastet“ sind dagegen die federnden Elemente von Schnappverbindungen. Hier ergibt sich die Dehnung aus der Geometrie des Elements und der beim Fügen und Lösen zu überwindenden Hinterschneidung. Das Dehnungsmaximum bei Schnapphaken liegt, einschließlich der ebenfalls geometriebestimmten Kerbwirkung [19], in aller Regel bei der Anbindung an das Bauteil. Es kann einfach berechnet und auf Reversibilität beschränkt werden (Bild 6).

Fazit

Es steht außer Frage, dass die Reversibilität der Verformungen ein wichtiges Kriterium bei der Bauteilauslegung ist. Während es bei metallischen Werkstoffen dadurch erfüllt werden kann, dass die Spannungen bzw. Dehnungen unterhalb der Streckgrenze bleiben, genügt bei Kunststoffen diese Forderung nicht. Erste Schädigungen unter Last und damit verbunden irreversible Verformungen stellen sich schon bei deutlich geringeren Dehnungswerten ein. Es empfiehlt sich daher, sich auf die als Reversibilitätsgrenze erkannte Fließgrenzdehnung $\epsilon_{F_{\infty}}$ auszurichten. Dies kann einfach und zweckmäßigerweise dehnungsbezogen mittels der Verformungsbedingung (2) erfolgen.

Die Kenntnis dieser hier vorgestellten Zusammenhänge und deren Handhabung, basierend auf Grundlagenwissen, sind von hoher Praxisrelevanz und gehören zum unverzichtbaren Instrumentarium des mit Kunststoffen konstruierenden und berechnenden Ingenieurs. Der Eindruck täuscht wohl nicht, dass dieses Thema aber selbst in der Ingenieurausbildung und in der Fachliteratur über das Konstruieren mit Kunststoffen noch nicht so gewürdigt wird, wie es von seiner Bedeutung her angemessen wäre. Verbreitet klingt noch immer eine Denkweise an, die vom Verhalten der metallischen Werkstoffe geprägt ist, der Werkstoffmechanik der Kunststoffe jedoch nur ansatzweise gerecht wird und die daher endlich überwunden werden sollte. ■

Literaturhinweis

- 1 Grashof, F.: Theorie der Elasticität und Festigkeit mit Bezug auf ihre Anwendungen in der Technik. Verlag Rudolph Gaertner, Berlin 1878; Zitat S. 2:
"Bei den als Glieder von Bau- und Maschinenkonstruktionen technisch angewendeten Körpern ist im Allgemeinen zu verlangen, dass ihr Deformationszustand in jedem Punkte nicht nur unterhalb der Grenze bleibe, bei der die Festigkeit überwunden wird, sondern auch unterhalb einer solchen Grenze, womit eine bleibende Deformation des Körpers von merklicher Größe verbunden wäre. Die Aufgabe der technischen Elasticitäts- und Festigkeitslehre besteht demnach nicht nur in der Entwicklung des Zusammenhangs zwischen der Deformation und der Belastung, d. i. der Inanspruchnahme durch äußere Kräfte, eines Körpers von gegebenem Material bei gewisser Gestalt und Größe, sondern insbesondere auch darin, gewisse Dimensionen oder belastende Kräfte unter übrigens gegebenen Umständen so zu bestimmen, dass der Deformationszustand in keinem Punkte eine gewisse erfahrungsmäßig als höchstens zulässig erachtete Grenze überschreite."
- 2 Bickel, E.: Die metallischen Werkstoffe des Maschinenbaus. Springer Verlag, Berlin 1953, S. 165
- 3 Wellinger, K.; Dietmann, H.: Festigkeitsberechnung. Grundlagen und technische Anwendung. 2. Aufl., Alfred Kröner Verlag, Stuttgart 1969, S. 26
- 4 EN ISO 2862-1:2016: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur
- 5 EN ISO 527-1:2012: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze
- 6 Menges G.; Schmidt, H.: Spannungsrisse bei Langzeit-Zugbeanspruchung von Kunststoffen. Kunststoffe 57(1967)11, S. 885–890
- 7 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
- 8 Menges, G.: Das Verhalten von Kunststoffen unter Dehnung. Kunststoffe 63(1973) 2, S. 95–100 und 63(1973)3, S. 173–177
- 9 Menges, G.; Riess, R.: Verarbeitungs- und Umgebungseinflüsse auf die kritische Dehnung von Kunststoffen. Kunststoffe 64(1974)2, S. 87–92
- 10 Menges, G.; Riess, R.; Suchanek, H.-J.: Einfluss korrosiver Flüssigkeiten auf mechanisch beanspruchte Thermoplaste. Kunststoffe 64(1974)4, S. 200–204
- 11 Skrabala, O.; Bonten, C.: Bestimmung der kritischen Dehnung mittels Schallemissionsanalyse. 23. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium 6.–7. März 2013. Tagungsband, S. 179–181
- 12 Geyer, A.; Röber, T.; Bonten, C.: Die kritische Dehnung nutzen. Kunststoffe 107(2017)10, S. 143–147
- 13 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
- 14 Menges, G.: Erleichtertes Verständnis des Werkstoffverhaltens bei verformungsbezogener Betrachtungsweise. Fortschritts-Bericht VDI Reihe 5, Nr. 12 (1971)
- 15 Ehrenstein, G. W.; Erhard, G.: Konstruieren mit Polymerwerkstoffen. Hanser Verlag, München 1983, S. 35
- 16 Navier, C. L. M. H.; de Saint-Venant, A. J. C. B.: Résumé des Leçons données à l'École des Ponts et Chaussées sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines. 3. Aufl., Paris 1864
- 17 Kunz, J.: Ein Plädoyer für die dehnungsbezogene Auslegung. Kunststoffe 101(2011)4, S. 50–54
- 18 Kunz, J.: Bauteilauslegung mit Augenmaß. Kunststoffe 103(2013)12, S. 56–60
- 19 Kunz, J.; Studer, M.: Die Kerbwirkung bei der Anbindung von Schnapphaken. Kunststoffe 97(2007)7, S. 46–51