

Johannes Kunz

Ein Plädoyer für die dehnungsbezogene Auslegung

Versagen berechnen



Institut für Werkstofftechnik
und Kunststoffverarbeitung

Institut für Werkstofftechnik
und Kunststoffverarbeitung (IWK)
HSR Hochschule für Technik Rapperswil
Oberseestrasse 10, Postfach 1475
CH-8640 Rapperswil
T +41 (0)55 222 47 70
F +41 (0)55 222 47 69
iwk@hsr.ch
www.iwk.hsr.ch

Sonderdruck

Versagen berechnen. Die Dehnung ist bei der Auslegung von Kunststoffteilen im Allgemeinen das geeignetere Kriterium als die Spannung. Das Denken in Verformungen statt in Spannungen, wie es bei metallischen Konstruktionswerkstoffen gebräuchlich ist, öffnet einen besseren Zugang zum Erfassen des Verhaltens der Kunststoffe unter mechanischer Belastung und vereinfacht zudem auch den Berechnungsvorgang selbst.

Ein Plädoyer für die dehnungsbezogene Auslegung

JOHANNES KUNZ

In den Jahren um 1970 sind unter der Federführung von Georg Menges eine Reihe grundlegender Beiträge veröffentlicht worden, mit denen eine Auslegung von Kunststoffbauteilen auf Basis von kritischen Verformungen propagiert wurde. Sie waren das Ergebnis umfangreicher werkstoffmechanischer Untersuchungen und ingenieurtechnischer Betrachtungen [1–10] am Aachener Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV). Mit ihnen wurde aufgezeigt, dass sich mit der Verwendung der Dehnung als Auslegungsgrundlage mancherlei Vorteile verbinden. Ein solches verformungsbezogenes Vorgehen erfordert ein gewisses Umdenken gegenüber den herkömmlichen Gepflogenheiten der Konstruktionspraxis, insbesondere des Maschinen- und Apparatebaus, wo die Berechnungen seit Generationen von Ingenieuren und Konstrukteuren auf die Spannung ausgerichtet sind. Dass sich für Kunststoffkonstruktionen die Dehnung als Auslegungskriterium besser eignet, ist also keine neue Erkenntnis; sie ist aber in der Praxis noch nicht so verbreitet, wie es von der Sache her gerechtfertigt wäre.

Verformungsbedingung

Die dehnungsbezogene Auslegung geht davon aus, dass das Erreichen eines bestimmten, vom Spannungszustand unabhängigen Dehnungswerts im Bauteil einen Versagensmechanismus auslöst, den es zu vermeiden gilt. Im Zentrum der

ARTIKEL ALS PDF unter www.kunststoffe.de
Dokumenten-Nummer KU110700

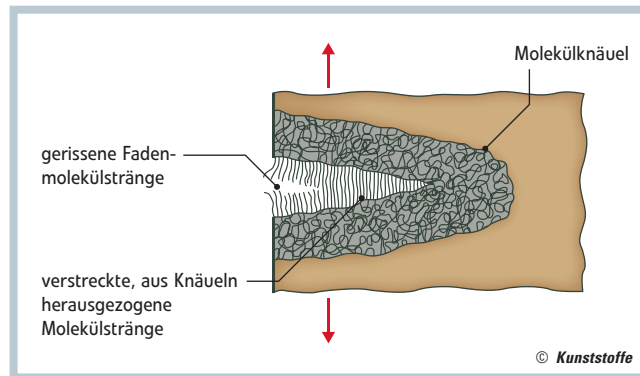


Bild 1. Craze (Fließzone) mit Mikrorissbildung. Schematische Darstellung nach Kambour [20]

dehnungsbezogenen Auslegung steht daher die Verformungsbedingung

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

Mit ihr wird die für das Bauteil berechnete positive Maximaldehnung ϵ_{\max} gegen einen zulässigen Dehnungswert ϵ_{zul} abgegrenzt. Diese zulässige Dehnung basiert auf einem Spannungs-Grenzwert ϵ_G für die Dehnung bei Eintreten eines bestimmten Versagensmechanismus im einachsigen Spannungszustand. Er ist gegebenenfalls durch den Einflussfaktor C zu korrigieren, wenn die Betriebsbedingungen infolge gewisser Einflüsse wie beispielsweise Zeit, Temperatur, Feuchte, Medien usw. von den Bedingungen abweichen, unter denen er ermittelt wurde. Mit dem Sicherheitsfaktor $S \geq 1$ wird gewährleistet, dass im Betrieb der Dehnungsgrenzwert nicht erreicht wird, d. h. dass kein Versagen eintritt und das Bauteil seine Funktion mit hinreichender Sicherheit erfüllt.

Die größte positive Dehnung wird aus den drei Hauptdehnungen $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ ausgewählt. Diese berechnen sich

durch Überlagerung der jeweiligen „einachsigen“ Dehnungen $\epsilon_{1e}, \epsilon_{2e}, \epsilon_{3e}$ mit den zugehörigen Querkontraktionen gemäß

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \epsilon_{1e} - \mu \cdot (\epsilon_{2e} + \epsilon_{3e}) \\ &= \frac{\sigma_1}{E_{C1}} - \mu \cdot \left(\frac{\sigma_2}{E_{C2}} + \frac{\sigma_3}{E_{C3}} \right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_2 &= \epsilon_{2e} - \mu \cdot (\epsilon_{3e} + \epsilon_{1e}) \\ &= \frac{\sigma_2}{E_{C2}} - \mu \cdot \left(\frac{\sigma_3}{E_{C3}} + \frac{\sigma_1}{E_{C1}} \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_3 &= \epsilon_{3e} - \mu \cdot (\epsilon_{1e} + \epsilon_{2e}) \\ &= \frac{\sigma_3}{E_{C3}} - \mu \cdot \left(\frac{\sigma_1}{E_{C1}} + \frac{\sigma_2}{E_{C2}} \right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Darin sind E_{C1} die möglicherweise spannungsabhängigen Kriechmoduln und μ die Poisson- oder Querkontraktionszahl des Werkstoffs. Die „einachsigen“ Dehnungen sind jene Werte, die die einzelnen Hauptspannungen hervorriefen, wenn sie je für sich allein einachsig wirkten. Sie lassen sich bequem etwa anhand eines

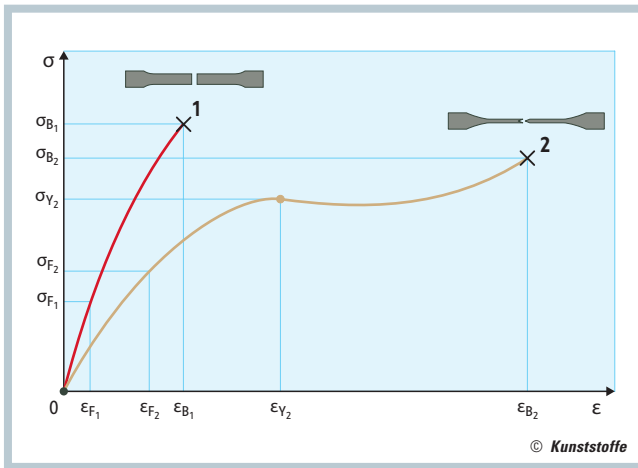


Bild 2. Versagensverhalten: Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus dem Zugversuch (schematisch). 1: sprödes Verhalten mit Trennbruch; 2: zähes Verhalten mit Verformungsbruch; F: Rissbildung (Fließzonen, Crazes, Mikrorisse), Y: Verstreckung; B: Bruch

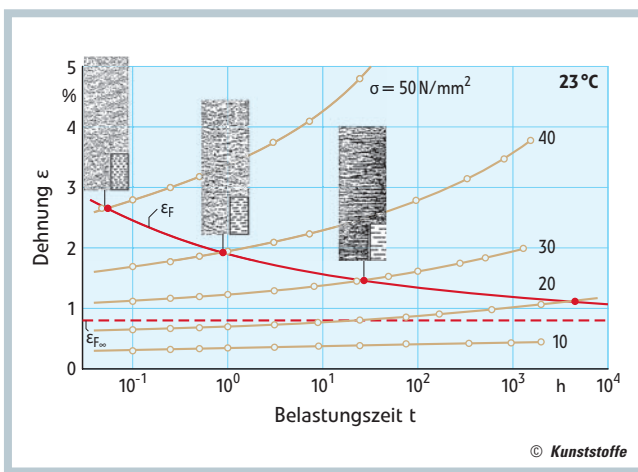


Bild 3. Zeitdehnlinsen von PMMA unter Zugbeanspruchung: Einfluss von Belastungshöhe und Zeit auf Bildung, Länge und Anzahl der Crazes (Fließzonen) [6]. epsilon_F: Fließdehnung; Dehnung beim ersten Auftreten von Crazes; epsilon_F_infinity: kritische Dehnung oder Fließgrenzdehnung; asymptotischer Grenzwert der Fließdehnung

isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagramms bestimmen.

Das Dehnungsmaximum tritt stets in Richtung der absolut größten Hauptspannung auf. Bei geeigneter Nummerierung der Hauptspannungen entsprechend $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ gilt also auch $\epsilon_1 \geq \epsilon_2 \geq \epsilon_3$. Dabei ist zu beachten, dass der Spannungswert Null größer ist als jede negative, also auf Druck wirkende,

Normalspannung, und dass bei allseitig gleichem Druck (im hydrostatischen Spannungszustand) keine positive Dehnung entsteht.

Dieses Vorgehen entspricht der Anwendung der Größtdehnungs-Hypothese [11] zur Umrechnung eines mehrachsigen Spannungszustands in einen einachsigen Vergleichs-Spannungszustand. Dies ist speziell bei Anwendung der Finite Elemente Methode (FEM) zu beachten, indem für die Auswertung nicht unbedenken die Vergleichsspannung nach der Gestaltänderungsenergie-Hypothese (zumeist bezeichnet als: Equivalent von Mises Stress) herbeigezogen wird, sondern die größte Hauptdehnung (z. B. Principal Total Strain Max).

Dehnungen als werkstoffmechanische Versagensgrößen

Bei den polymeren Werkstoffen kommen als werkstoffmechanische Versagensursachen unter äußerer Belastung nicht nur Bruch und Verstreckung in Frage, sondern, wie die Arbeiten von Menges aufzeigen, auch die Bildung von Crazes und Mikrorissen (hier kurz Rissbildung genannt)

unter Zugbeanspruchung (Bild 1). Dabei handelt es sich um irreversible Vorgänge, bei denen der Werkstoff eine mehr oder weniger große Schädigung erfährt. Solche Fließ-Rissbildungszonen treten vorzugsweise an Grenzflächen im Werkstoffgefüge auf, etwa an Grenzflächen zwischen Partikeln amorpher oder zwischen Sphärolithen teilkristalliner Thermoplaste, aber auch an den Grenzen zwischen Füllstoffpartikeln und Matrix bei gefüllten oder faserverstärkten Werkstoffen.

Das Auftreten dieser Rissbildungszonen korreliert mit ganz bestimmten Größenordnungen der makroskopischen Dehnungen, die bei transparenten Kunststoffen mit einer Veränderung der Lichtdurchlässigkeit im Sinne einer Trübung einhergehen. Diese Tatsache kann – neben anderen – zur experimentellen Ermittlung der Rissbildung als Versagensursache herangezogen werden.

Für die Auslegungspraxis interessant ist auch die Tatsache, dass die Versagensursache Rissbildung bei schwingender Belastung ebenso relevant ist wie bei ruhender bzw. quasi-statischer Belastung [12, 13]. Dies ermöglicht die einfache und zuverlässige Auslegung von schwingend mehrachsig beanspruchten Kunststoffteilen anhand der Verformungsbedingung (1), was spannungsbezogen bislang noch nicht möglich ist.

Kritische Dehnung – ein wichtiger Werkstoffkennwert

Neben der Bruchdehnung ϵ_B und der Streckdehnung ϵ_Y existiert bei Kunststoffen also noch ein dritter Dehnungsgrenzwert ϵ_F , der die schädigungsfreien Verformungen von den irreversiblen Verformungen abgrenzt (Bild 2). Auch dieser Dehnungsgrenzwert hängt mehr oder weniger stark von Belastungszeit, Temperatur, Belastungsgeschwindigkeit, Mehrachsichtigkeit des Spannungszustands und Umgebungsmedien ab. Entscheidend ist nun, dass er mit zunehmender Belastungszeit einem asymptotischen Endwert zustrebt, der auch unter weitläufig variierten Bedingungen praktisch nicht mehr unterschritten wird, und der für die verschiedenen Werkstoffgruppen eine charakteristische Größe aufweist (Tabelle 1). Damit bietet sich dieser Grenzwert als Werkstoffkennwert an, für den Menges die Begriffe Fließgrenzdehnung oder kritische Dehnung ϵ_{F_∞} einführte.

Bei kurzzeitig dauernden Belastungen bis hin zu etwa einer Stunde kann davon ausgegangen werden, dass Schädigungen erst ab ca. dem zweifachen Wert von ϵ_{F_∞}

Kunststoffgruppe	ϵ_{F_∞} [%]
Thermoplaste, amorph – ungefüllt – gefüllt	0,6 – 1,0 0,3 – 0,5
Thermoplaste, teilkristallin, steif – ungefüllt – gefüllt	2,0 – 4,0 1,0 – 2,0
Thermoplaste, teilkristallin, weich – ungefüllt – gefüllt	3,0 – 6,0 2,0 – 3,0
Thermoplaste, glasmattenverstärkt	0,2 – 0,7
Elastomere, gefüllt	≈ 5,0
Duroplaste – unverstärkt – UD-verstärkt	0,1 – 0,2 0,05 – 0,2

Tabelle 1. Größenordnung der Fließgrenzdehnung bei verschiedenen Kunststoffgruppen

auftreten. Damit ergibt sich für die Verformungsbedingung (1) bei Kurzzeitbelastung ein Einflussfaktor $C \approx 2$.

Die kritische Dehnung als Werkstoffkennwert weist eine Reihe von Eigenschaften auf, die für die Auslegungspraxis von Bedeutung sind. Bis zu dieser Schädigungsgrenze verlaufen die Kriechvorgänge stationär (Bild 3), und die Verformungen sind reversibel (Bild 3), wenn auch zeitabhängig. In diesem Bereich ist der Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung in etwa linear, also gilt das Hookesche Gesetz. So können die bekannten Berechnungsgleichungen aus der linearen Elastizitätstheorie problemlos übernommen werden. Weiter sind für Dehnungen unterhalb dieses Kennwerts die Steifigkeiten aus Kriech- und aus Relaxationsversuchen nahezu gleich. Daher lassen sich mit dem Kriechmodul auch Relaxationsvorgänge rechnerisch erfassen. Praktisch ist auch die Tatsache, dass in vielen Fällen mit einer Sicherheit $S = 1$ gerechnet werden kann, da beginnende Rissbildung im Mikrobereich noch kein dramatisches Versagen darstellt und bis zu Verstreckung oder Bruch eine große

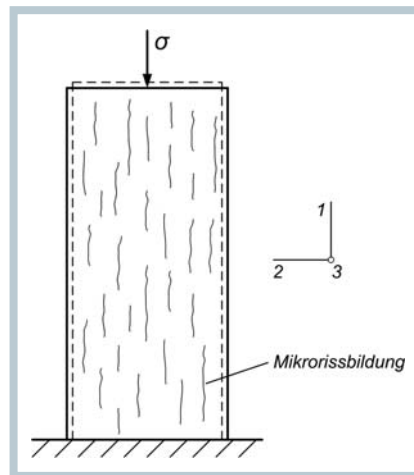


Bild 4. Körper unter einachsiger Druckbeanspruchung; Mikrorissbildung senkrecht zur größten positiven Dehnung, d.h. parallel zur Beanspruchungsrichtung

Die größten positiven Dehnungen treten also quer zur Beanspruchungsrichtung auf. Dies bedeutet, dass sich bei Überschreiten der kritischen Dehnung $\epsilon_{F_{\sigma_2}}$ Risse bilden, die senkrecht zur größten Dehnung verlaufen, also längs, und dass der Werkstoff unter Druckbeanspruchung

stärker schädigungsfrei verformt werden kann als unter Zug.

Ein dünnwandiges Rohr unter Innendruck p steht bekanntlich unter einem zweiachsigen Spannungszustand (Bild 5), bei dem die Spannung in Umfangsrichtung doppelt so groß ist wie die Spannung in Achsrichtung. Wegen $\sigma_1 = 2 \cdot \sigma_2 > \sigma_3 \approx 0$ wird mit Anwendung der sogenannten „Kesselformel“ $\sigma_1 = p \cdot d/2 \cdot s$ die größte Dehnung

$$\begin{aligned} \epsilon_{\max} &= \epsilon_1 = \epsilon_{1e} - \mu \cdot \epsilon_{2e} \\ &= \frac{p \cdot d}{2 \cdot s} \cdot \left(1 - \frac{\mu}{2}\right) \leq \epsilon_{zul} \end{aligned} \quad (4)$$

in Umfangsrichtung gemessen. Dementsprechend werden Rissbildungszonen und Mikrorisse in axialer Richtung orientiert sein.

Die maximale Dehnung ist bei Schnappverbindungen ausschließlich von der Geometrie bestimmt (Bild 6). Sie ist damit ist ein entscheidendes Auslegungskriterium. So gilt bei gegebenem Federweg f eines Schnapphakens mit konstantem Querschnitt die Beziehung

$$\epsilon_{\max} = \alpha_K \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{f \cdot h}{l^2} \leq \epsilon_{zul} \quad (5)$$

Für die Geometrie des Hakens stehen die Länge l und die Höhe h des rechteckigen Querschnitts. Mit der Formzahl α_K ist auch die Kerbwirkung bei der Anbindung berücksichtigt [14].

Auch bei der Dimensionierung von Filmgelenken ist die Dehnung ausschlaggebend, wie sie bei der Biegung auf der Außenseite des Gelenks auftritt. Sie ist ebenfalls rein geometriestimmt (Bild 7) nach dem Zusammenhang [15]

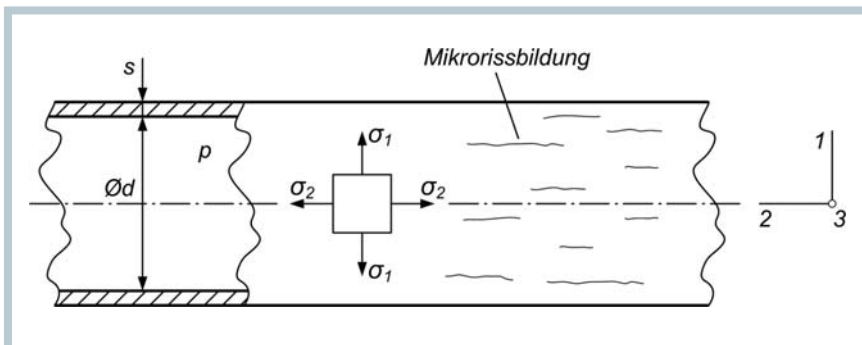


Bild 5. Rohr unter Innendruck; Mikrorissbildung senkrecht zur größten positiven Dehnung, d.h. axial

Belastungsreserve besteht. Ausnahmen davon bilden etwa Anwendungen, bei denen eine Trübung unbedingt zu vermeiden ist oder wenn Umgebungsmedien vorliegen, die die Spannungsrissbildung begünstigen.

Illustrative Beispiele und Anwendungen

Wird ein Körper einachsig auf Druck beansprucht (Bild 4), so gilt $\sigma_2 = \sigma_3 = 0 > \sigma_1$ und damit $\epsilon_{\max} = \epsilon_2 = \epsilon_3 > 0 > \epsilon_1$. Da es sich bei ϵ_2 und ϵ_3 um Querdehnungen handelt, folgt

$$\begin{aligned} \epsilon_{\max} &= \epsilon_2 = \epsilon_3 = -\mu \cdot \epsilon_1 \\ &= -\mu \cdot \frac{\sigma_1}{E_{C1}} \leq \epsilon_{zul} \end{aligned} \quad (3)$$

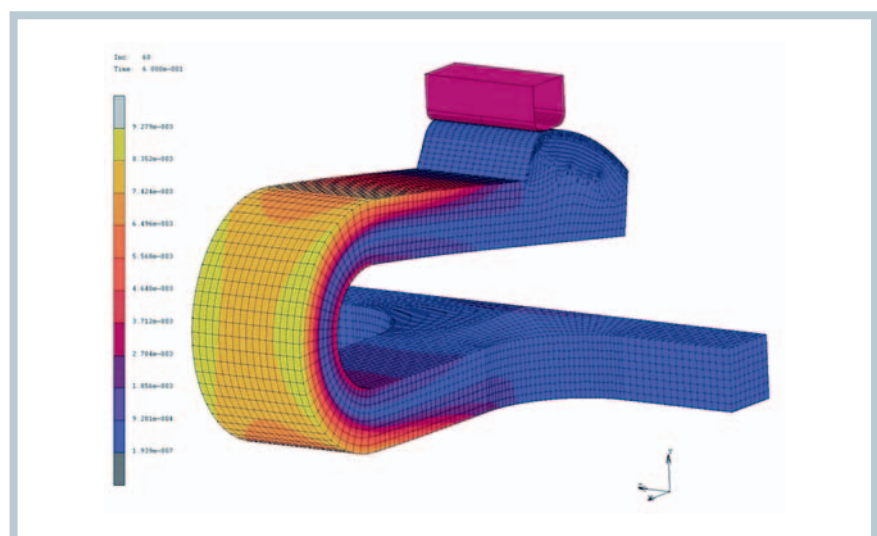


Bild 6. Maximale Dehnung als entscheidendes Auslegungskriterium bei Schnapphaken. Beispiel: U-förmig gekrümmter Schnapphaken (IWK)

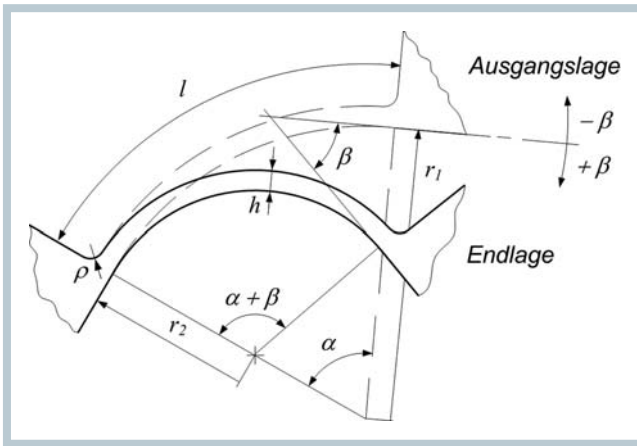


Bild 7. Geometrische Verhältnisse am idealisierten Filmgelenk bestimmen die maximale Dehnung (nach Hoechst/Ticona)

$$\epsilon_{\max} = \frac{h}{2 \cdot \left(1 + \frac{h}{2 \cdot r_1}\right)} \cdot \beta \leq \epsilon_{zul} \quad (6)$$

Darin sind h die Dicke und l die Länge des Filmgelenks, r₁ der Krümmungsradius im unverformten Zustand und beta der Biegeverschiebungswinkel [rad]. Je nach Größe des Biegeverschiebungswinkels und anvisierter Anzahl von Betätigungen sind hier bei der Bestimmung der zulässigen Dehnung die Dehnungsgrenzwerte epsilon_Y, epsilon_B oder Werte aus Dauerschwingversuchen einzusetzen.

Dehnungen bestimmen auch das Stabilitätsverhalten

Dass Dehnungen auch für das Stabilitätsverhalten schlanker Konstruktionen unter Druckbeanspruchung maßgebend sind, wurde ebenfalls von Menges erkannt und bekannt gemacht [16, 17]. Das stabile Gleichgewicht der axialen Druckkräfte an einem schlanken Stab wird unter einer bestimmten Kraftgröße instabil, d. h. der Stab kann seine tragende Funktion nicht weiterhin erfüllen. Nach der Eulerschen Theorie gilt für diese sogenannten Knickkraft F_K die bekannte Beziehung

$$F_K = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{s^2} \quad (7)$$

Darin sind E der Elastizitätsmodul, I das für das Knicken maßgebliche axiale Flächenträgheitsmoment des Stabquerschnitts und s die für das Knicken maßgebliche sogenannte freie Knicklänge, nämlich der Abstand zwischen zwei Wendepunkten der beim Knicken ausgebeugenen Stabachse. Diese freie Knicklänge hängt also nebst der effektiven Stablänge l auch von der Lagerung des Stabes ab, d. h. von den Randbedingungen der fünf kombinatorisch möglichen Knickfälle (Bild 8) [18].

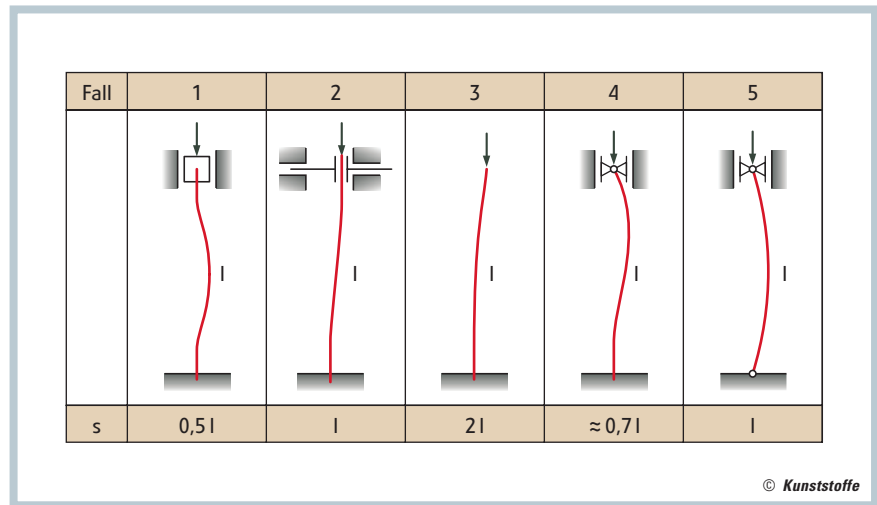


Bild 8. Die fünf Knickfälle mit ihren zugehörigen freien Knicklängen s (nach [18])

Mit dem sogenannten Schlankheitsgrad

$$\lambda = s \cdot \sqrt{\frac{A}{I}} \quad (8)$$

als Kennzahl für die knickrelevante Geometrie des Stabes und dem Hookeschen Gesetz kann von Beziehung (3) auf die kritische Stauchung

$$\epsilon_K = \frac{\sigma_K}{E} = \frac{F_K}{E \cdot A} = \pi^2 \cdot \frac{I}{s^2 \cdot A} = \frac{\pi^2}{\lambda^2} \quad (9)$$

geschlossen werden. Diese ist die auf die Stablänge l bezogene Verkürzung des Stabes beim Knicken. Die kritische Stauchung ist somit allein von der Geometrie bestimmt. Dies bedeutet, dass geometrisch gleiche Stäbe aus unterschiedlichen Werkstoffen bei ein- und derselben Stauchung versagen. Allerdings hängen die hierfür je erforderlichen Spannungen bzw. Kräfte über den Elastizitätsmodul E direkt von der Werkstoffsteifigkeit ab.

Bei der dehnungsbezogenen Auslegung stellt die Stabilitätsbedingung

$$|\epsilon| \leq \epsilon_{zul} = \epsilon_K \cdot \frac{C}{S_K} \quad (10)$$

sicher, dass die kritische Stauchung unter den Betriebsbedingungen nicht erreicht wird. Darin sind, wie in der Verformungsbedingung (1), C ein allfälliger Einflussfaktor und S_K der einzubeziehende Faktor für die Sicherheit gegen Knicken.

Der Zusammenhang zwischen der kritischen Stauchung epsilon_K und dem Schlankheitsgrad lambda nach Beziehung (9) stellt eine Hyperbel 2. Grades dar, die wie bei der Knickspannung üblicherweise als Euler-Hyperbel bezeichnet wird. Die Funktion ist also dimensionslos und werkstoffunabhängig. Im doppellogarithmischen Diagramm wird sie als Gerade abgebildet

(Bild 9). Die Gegenüberstellung von Theorie und Versuch an unterschiedlichen Werkstoffen zeigt eine erstaunliche Übereinstimmung, abgesehen von einer prozentual praktisch konstanten Abweichung der unteren Grenze des Messwertestreibereichs. Diese Abweichung ist sicherlich auch auf die möglichen Imperfektionen wie vorgebogene Stabachse, verformbare Lagerung, exzentrischer oder nichtaxialer Lastangriff sowie nichtlineares Verformungsverhalten des Werkstoffs zurückzuführen, also auf die nicht vollkommen erfüllten Voraussetzungen der Euler-Theorie [19]. Erfasst man sie empirisch in einem abmindernden Einflussfaktor, so ergibt dies über den ganzen Bereich des Schlankheitsgrads die Größenordnung C ≈ 0,65. Diese Zusammenhänge gelten bei hinreichend hohen Schlankheitsgraden.

Die für das Knicken schlanker Stäbe gewonnenen Erkenntnisse treffen analog auch auf zweidimensionale Problemstellungen zu wie das Beulen von Scheiben und Schalen unter Druckbelastung.

Abschließende Gedanken

Mit der dehnungsbezogenen Auslegung kann das charakteristische Versagensverhalten der Kunststoffe besser erfasst werden als mit der Ausrichtung auf die Spannungen. Die Einführung der Dehnung als Auslegungskriterium war diesbezüglich bahnbrechend und mitentscheidend dafür, dass die Konstruktionspraxis lernte, Bauteile aus Kunststoff einfach, sachgerecht und sicher zu dimensionieren und diesen vielseitigen Werkstoff für im-

Da zwischen den Spannungen und den Dehnungen eine klare Zuordnung besteht, können die Versagensmechanismen nicht nur von der Spannungsseite her betrachtet werden, sondern auch auf Basis der Dehnungen. Grundsätzlich aber sind die Dehnungen die natürlicheren, anschaulicheren Größen. Während die Verformungen direkt sichtbar und messbar sind, können Kräfte und die daraus resultierenden Spannungen nur über ihre Wirkungen erfasst werden, wozu eben primär die Verformungen gehören. ■

unter Dehnung. Kunststoffe 63 (1973) 2, S. 95–100 und 63 (1973) 3, S. 173–177
 8 Menges, G., Riess, R.: Verarbeitung- und Umgebungseinflüsse auf die kritische Dehnung von Kunststoffen. Kunststoffe 64 (1974) 2, S. 87–92
 9 Menges, G., Riess, R., Suchanek, H.-J.: Einfluss korrosiver Flüssigkeiten auf mechanisch beanspruchte Thermoplaste. Kunststoffe 64 (1974) 4, S. 200–204
 10 Menges, G.: Dimensionierung von Kunststoffteilen auf Basis von kritischen Deformationen. Kunststoffe-Plastics 24 (1977) 8, S. 15–25
 11 Navier, C. L. M. H., Saint-Venant, A. J. C.: 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
 12 Menges, G., Alf, E.: Das Verhalten thermoplastischer Kunststoffe unter schwingender Beanspruchung. Plastverarbeiter 21 (1970) 5, S. VIII-1 bis VIII-6
 13 Menges, G., Alf, E.: Dimensionierung von schwingend mehrachsig beanspruchten Kunststoffteilen. Materialprüfung 14 (1972) 6, S. 193–200
 14 Kunz, J., Studer, M.: Die Kerbwirkung bei der Anbindung von Schnapphaken. Kunststoffe 97 (2007) 7, S. 46–51
 15 Kunz, J., Bachmann, S., Studer, M.: Filmgelenke dehnungsbezogen auslegen. Kunststoffe 97 (2007) 12, S. 129–132
 16 Menges, G., Gaube, E.: Knicken und Beulen von thermoplastischen Kunststoffen am Beispiel des Hartpolyäthylens. Kunststoffe 58 (1968) 2, S. 153–158 und 58 (1968) 9, S. 642–648
 17 Menges, G., Roskothen, H. J.: Deformationsgrenzen als Bemessungsgrundlage bei Stabilitätsgrenzen. Kunststoffe 63 (1973) 12, S. 889–898
 18 Ziegler, H.: Vorlesungen über Mechanik. Birkhäuser, Verlag, Basel und Stuttgart 1970, S. 265
 19 Menges, G., Franken, H. W.: Einfluss von Bauteil- Ungenauigkeiten auf das Stabilitätsverhalten. Kunststoffe 62 (1972) 5, S. 309–317
 20 Kambour, R. P.: Stress-Strain Behavior of the Craze. Polymer Engineering and Science 8 (1968) 10, S. 281–289

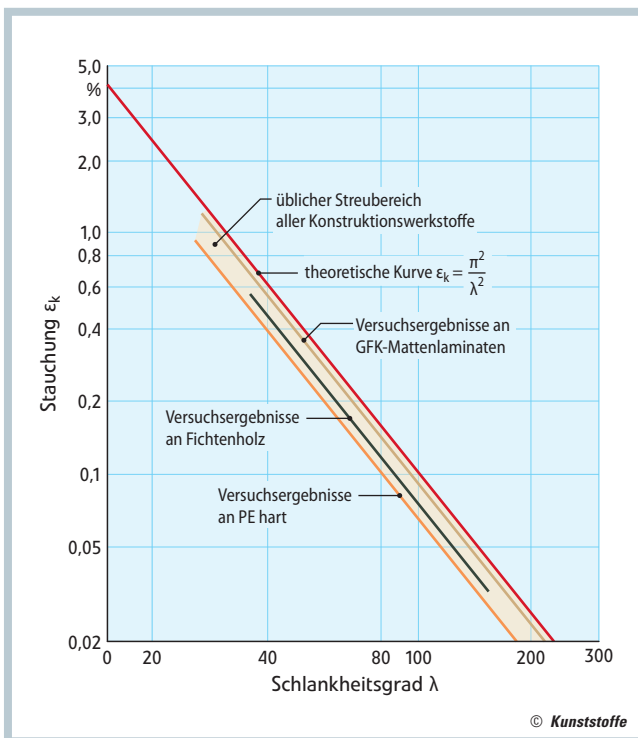


Bild 9. Geometrie bestimmt das Stabilitätsverhalten: dimensionsloses, werkstoffunabhängiges Knickdiagramm [6]

mer anspruchsvollere Anwendungen einzusetzen.

Um diese Vorzüge noch besser nutzen zu können, ist es wichtig, dass die dehnungsbezogene Auslegung in der Ingenieurausbildung bewusst gelehrt und in der Praxis konsequent umgesetzt wird. Und das nicht nur in der Kunststofftechnik, sondern vor allem auch im Maschinen- und Apparatebau. Dazu gehört aber auch das dringende Anliegen an die Werkstoffprüfung, vermehrt auf die Bedürfnisse der Konstrukteure einzugehen und so wichtige Werkstoffkennwerte wie die kritische Dehnung und die Querkontraktionszahl systematisch zu messen und in den Datenlisten zu dokumentieren. Eine verlässliche Auslegung der Kunststoffkonstruktionen erfordert aber auch die Bereitstellung der erforderlichen Kennwerte durch die Hersteller und Vertreiber der Werkstoffe.

LITERATUR

1 Menges, G.: Ingenieurmäßige Festigkeitsrechnung für Spritzgussteile aus Thermoplasten. Kunststoffe 57 (1967) 1, S. 2–8
 2 Menges, G., Schmidt, H.: Spannungsrisse bei Langzeit-Zugbeanspruchung von Kunststoffen. Kunststoffe 57 (1967) 11, S. 885–890
 3 Menges, G.: Kriterium „Kritische Stauchung“. Kunststoff-Berater 14 (1969) 1, S. 25–27
 4 Menges, G., Schmidt, H.: Spannungsrisbildung und elastisch-plastisches Verformungsverhalten von thermoplastischen Kunststoffen bei Langzeitbeanspruchung. Plastverarbeiter 19 (1968) 7, S. 547–551
 5 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
 6 Menges, G.: Erleichtertes Verständnis des Werkstoffverhaltens bei verformungsbezogener Betrachtungsweise. Fortschritts-Bericht VDI Reihe 5, Nr. 12 (1971)
 7 Menges, G.: Das Verhalten von Kunststoffen

DER AUTOR

PROF. DIPL.-ING. JOHANNES KUNZ, geb. 1940, ist am Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) an der HSR Hochschule für Technik Rapperswil, Schweiz, tätig; jkunz@hsr.ch

SUMMARY

THE CASE FOR STRAIN BASED DESIGN
 CALCULATING FAILURE. In general strain is a more suitable criterion than stress in designing parts made from polymers. Thinking in terms of deformation instead of stress, as is commonly the case for metallic construction materials, leads to a better consideration of the behavior of polymers under mechanical loading and also simplifies the calculation process itself.

Read the complete article in our magazine *Kunststoffe international* and on www.kunststoffe-international.com