

Werkstoffmechanik – Schaumstoffe

Ein Steifigkeitsmodell für Strukturschaumstoffe

TEXT: Johannes Kunz

Für die Auslegung von Bauteilen mit integraler Schaumstruktur ist eine geeignete mathematische Beschreibung der Steifigkeitseigenschaften unerlässlich. Ein solches Modell sollte die Steifigkeitsverteilung über den Querschnitt möglichst gut erfassen, gleichzeitig aber auch einfach gehandhabt und in einer durchgängigen Berechnungstheorie angewendet werden können.

Die Anwendung des im Beitrag vorgestellten Modells für quasistatische Belastungen wird anhand der Beanspruchungen auf Zug oder Druck und auf Biegung beispielhaft gezeigt.

Struktur, Dichte und Steifigkeit

Struktur- oder Integralschaumstoffe zeichnen sich dadurch aus, dass sie einen geschäumten und damit porösen Kern und kompakte, porenfrei Außenschichten aufweisen (**Bild 1**). Dieser Aufbau verleiht ihnen hervorragende Leichtbaueigenschaften mit hoher Biegesteifigkeit bei geringem Gewicht. Darüber hinaus haben sie ein hohes Dämmungsvermögen gegen Wärme und Schall. Man findet sie daher häufig in der Fahrzeugtechnik und in anderen anspruchsvollen Anwendungsbereichen. Neben den bewährten Integralschaumstoffen aus thermo- und duroplastischen Kunststoffen [1, 2] stoßen in jüngerer Zeit auch solche aus Leichtmetallen wie Magnesium und Aluminium auf wachsendes Interesse [3, 4].

Die Steifigkeit des Strukturschaumstoffes wird bestimmt durch die Steifigkeit des Werkstoffs und die Zellstruktur, d.h. die Verteilung der Poren bzw. Zellen nach Größe und Dichte über den inhomogenen Querschnitt. Diese Verteilung kann je nach den Verarbeitungsbedingungen ganz unterschiedlich sein. Die lokale Steifigkeit im Querschnitt, ausgedrückt durch den Elastizitätsmodul E , korreliert mit der lokalen Dichte ρ des porösen Werkstoffs [5] z.B. in der Form

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^m \quad (1)$$

Darin bezeichnet der Index 0 die Kennwerte für den ungeschäumten Werkstoff. Der Exponent wird z.B. für PUR-Schaum mit $m = 1,8$ angegeben [6].

Für die Berechnungspraxis hilfreich ist ein Schaumstoff-Steifigkeitsmodell, das die wesentlichen Einflussgrößen auf möglichst einfache Weise erfasst und die Anwendung in den bekannten Formeln der Festigkeitslehre ermöglicht. Sie beschränken sich damit auf hinreichend kleine Verformungen und deren lineare Verknüpfung mit den Spannungen, d.h. die Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes. Solche Berechnungen sind geeignet für die

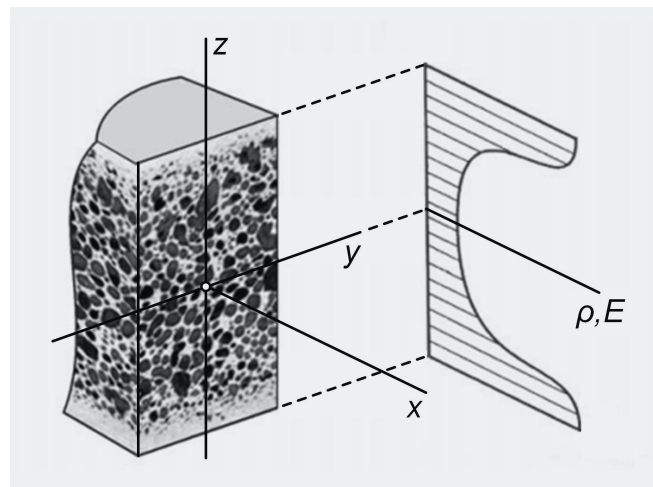


Bild 1. Verlauf von Dichte und Elastizitätsmodul in einem Strukturschaumstoff. Grafik: IWK, adaptiert nach [4]

schnelle Bestimmung realistischer Beanspruchungsgrößen oder auch als Basis bzw. Absicherung aufwendiger FEM-Analysen.

Elastizitätsmodul

Maßgebend für das Steifigkeitsverhalten des Strukturschaumstoffes ist der Verlauf des Elastizitätsmoduls über den Querschnitt. Ein einfaches, von der Verknüpfung mit dem Dichteverlauf nach (1) unabhängiges Modell geht von einer symmetrischen Verteilung über den Querschnitt aus (**Bild 2**). Es erfasst wesentlich die Eigenschaften sowohl der Randschicht R als auch des geschäumten, zellularen Kerns K. In der Randschicht wird er durch einen konstanten Wert E_a angenähert und im Kern K durch ein Potenzgesetz $E(z)$ beschrieben [7]. Weitere Parameter sind der Minimalwert E_v , der Exponent $n > 1$ sowie die Abmessungen h und h_K . Damit gilt für die Randschichten

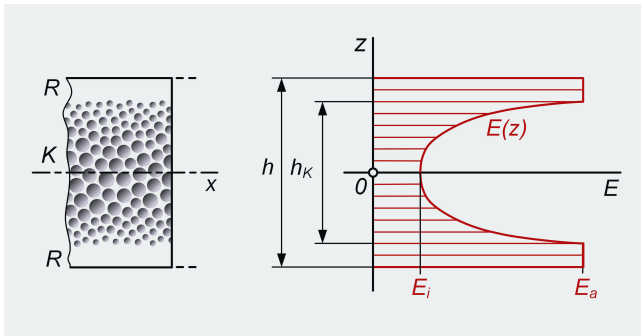


Bild 2. Verlauf des Elastizitätsmoduls über den Querschnitt eines Strukturschaumstoffs (schematisch) nach den Beziehungen (2) und (3). Grafik: IWK

$$E = E_a = \text{konst.} \quad \left(\frac{h_K}{2} \leq |z| \leq \frac{h}{2}\right) \quad (2)$$

und für den Kern

$$E(z) = E_i + (E_a - E_i) \cdot \left(2 \cdot \frac{|z|}{h_K}\right)^n = E_i \cdot \left[1 + \left(\frac{E_a}{E_i} - 1\right) \cdot \left(2 \cdot \frac{|z|}{h_K}\right)^n\right] \quad (3)$$

$$\left(\frac{h_K}{2} \leq |z| \leq \frac{h}{2}\right)$$

Für $E_a/E_i = 1$ liefert (3) den Wert E_a eines kompakten, ungeschäumten Querschnitts. Dies ergibt sich auch für $n = 0$. Die Verwendung von $|z|$ in (3) stellt sicher, dass $E(z)$ nicht nur symmetrisch ist bezüglich $z = 0$, sondern auch bei beliebigen, insbesondere ungeraden Exponenten $n > 1$ positive Werte liefert. Brauchbare Daten für den Parameter E_a/E_i und den Exponenten n sind in der Literatur leider kaum vorhanden. Aufgrund der Korrelation (1) lässt sich feststellen, dass in der Praxis der Exponent in der Größenordnung von 2,0 ... 15 oder höher liegen kann (Bild. 3). Bei Kunststoffen sind die Steifigkeitsparameter E_a und E_i den Abhängigkeiten von Belastungszeit, Temperatur usw. unterworfen, was im Modell berücksichtigt werden kann.

Für ein makromechanisches Steifigkeitsmodell ist im einfachsten Fall der Isotropie nebst dem Elastizitätsmodul eine weitere Steifigkeitsgröße erforderlich, z.B. die Poissonzahl μ oder der Schubmodul G , alle drei untereinander verknüpft durch

$$G(z) = \frac{E(z)}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad (4)$$

Zum Verlauf von G und μ über den Schaumstoff-Querschnitt ist die Literatur nicht ergiebig. Bekannt ist, dass offenporige Schaumstoffe praktisch keine Querkontraktion aufweisen, was $\mu \approx 0$ bedeutet. Zur Poissonzahl geschlossenzelliger Schaumstoffe wird pauschal die Bandbreite 0,1 ... 0,4 angegeben [8]. Die Rückrechnung mit (4) anhand der integralen Durchschnittswerte von E und G aus Datenblättern des geschlossenzelligen, vernetzten PVC-Hartschaumstoffs „Airex C70“ [9] im Dichtebereich von 40 bis 250 kg/m³ ergibt Poissonzahlen zwischen 0,023 bis 0,21, bei Verwendung der integralen Minimalwerte von E und G liegen sie zwischen 0,0 und 0,056. Daher kann dem Modell vereinfachend $\mu \approx 0$ zu Grunde gelegt werden.

Zug- und Druckbeanspruchung

Bei der Beanspruchung durch eine Normalkraft F_n kann von der Vorstellung ausgegangen werden, dass sich der auf Zug oder

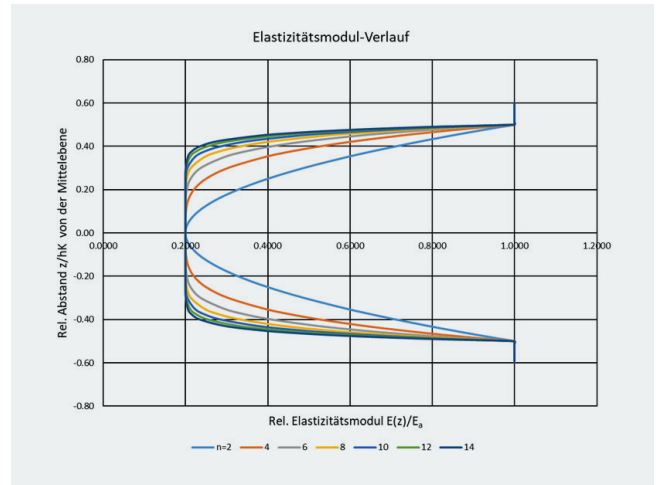


Bild 3. Verlauf des Verhältnisses $E(z)/E_a$ über den Querschnitt in Funktion des Exponenten gemäß Ansatz (2) und (3); mit $E_i/E_a = 0,2$ und $h/h_K = 1,2$. Grafik: IWK

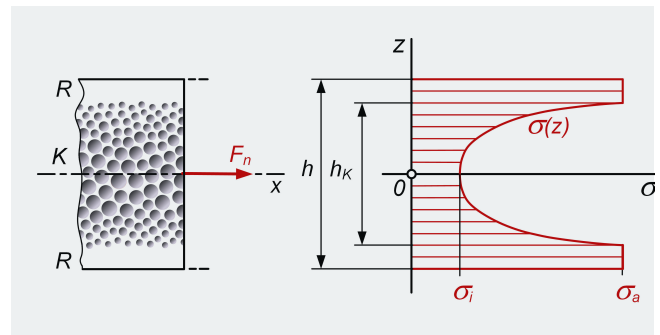


Bild 4. Normalspannungsverlauf über den Querschnitt eines Integral-schaumstoffs unter Zugbeanspruchung (schematisch) nach den Beziehungen (7) und (8). Grafik: IWK

Druck beanspruchte Querschnitt als Ganzes parallel verschiebt. Damit ist die Dehnung ϵ im ganzen Querschnitt gleich groß. Der Elastizitätsmodul hängt als symmetrische Funktion gemäß (2) und (3) von z ab, nicht aber von y (Bild 1), da er über die Querschnittsbreite b konstant ist.

Die Zug/Drucksteifigkeit $S_{z,d}$, also der auch Dehnsteifigkeit genannte Widerstand eines einachsigt auf Zug oder Druck beanspruchten Bauteils im Querschnitt A gegen eine Längsverformung, ist das Verhältnis der beanspruchenden Normalkraft F_n zur von ihr hervorgerufenen Dehnung ϵ . Für sie gilt allgemein:

$$S_{z,d} = \frac{F_n}{\epsilon} = \int_A \frac{\sigma(z)}{\epsilon} \cdot dA = \int_A E(z) \cdot dA \quad (5)$$

Dem Integralcharakter von Beziehung (5) entsprechend überlagern sich die Steifigkeiten von Rand und Kern additiv wie bei parallel angeordneten Federn. Mit dem Ansatz (2) und (3) für den Elastizitätsmodul und mit $n > 1,0$ ergibt sich die Zug/Drucksteifigkeit von Querschnitten konstanter Breite b zu

$$S_{z,d} = b \cdot \int_h E(z) \cdot dz = E_a \cdot \left[1 - \frac{n}{n+1} \cdot \frac{h_K}{h} \cdot \left(1 - \frac{E_i}{E_a}\right)\right] \cdot b \cdot h = \bar{E}_{z,d} \cdot b \cdot h \quad (6)$$

$\bar{E}_{z,d}$ im letzten Term ist der mittlere Zug/Druck-Elastizitätsmodul, eine charakteristische Steifigkeitsgröße des Strukturschaumstoffs.

Die Normalspannung als Produkt aus Normalkraft F_n und Elastizitätsmodul $E(z)$ nach (2) und (3), dividiert durch die Zug/Drucksteifigkeit (6), verläuft im Querschnitt somit gleichartig wie $E(z)$ (Bild 4). Sie hat in der Randschicht ihren Größtwert mit

$$\sigma(z) = \frac{F_n}{S_{z,d}} \cdot E_a = \sigma_a = \text{konst.} \quad \left(\frac{h_K}{2} \leq |z| \leq \frac{h}{2}\right) \quad (7)$$

Im Kern ist die Normalspannung

$$\sigma(z) = \frac{F_n}{S_{z,d}} \cdot E_i \cdot \left[1 + \left(\frac{E_a}{E_i} - 1\right) \cdot \left(2 \cdot \frac{|z|}{h_K}\right)^n\right] \quad \left(-\frac{h_K}{2} \leq z \leq \frac{h_K}{2}\right) \quad (8)$$

Sie hat bei $|z| = 0$ ihr Minimum

$$\sigma(z = 0) = \frac{F_n}{S_{z,d}} \cdot E_i = \sigma_i \quad (9)$$

und stimmt bei $|z| = h_K/2$ wie erwartet mit der Randschichtspannung σ_a überein. Die Dehnung lässt sich anhand von (5) zu $\varepsilon_{z,d} = F_n \delta_{z,d}$ berechnen.

Biegung

In der klassischen Biegetheorie bleibt nach der Bernoulli-Hypothese der beanspruchte Querschnitt unter dem Biegemoment eben und dreht sich als Ganzes. Damit ist die Dehnung ε eine lineare Funktion von z . Die Biegesteifigkeit S_b als Widerstand eines auf Biegung beanspruchten Schaumstoffteils im Querschnitt A gegen eine Biegeverformung ist definiert als Verhältnis des beanspruchenden Biegemoments M_b zur von ihr hervorgerufenen Krümmung $k = 1/\rho_k = 1/(\varepsilon \cdot z)$, mit ρ_k als Krümmungsradius, also

$$S_b = \frac{M_b}{k} = \frac{1}{k} \cdot \int_A \sigma(z) \cdot z \cdot dA = \frac{1}{k} \cdot \int_A E(z) \cdot \varepsilon(z) \cdot z \cdot dA = \int_A E(z) \cdot z^2 \cdot dA \quad (10)$$

Die additive Überlagerung der Steifigkeiten von Rand und Kern unter Verwendung von (2) und (3) für den Elastizitätsmodul und mit $n > 1,0$ ergibt für die Biegesteifigkeit von Querschnitten konstanter Breite b insgesamt

$$S_b = E_a \cdot \left[1 - \frac{n}{n+3} \cdot \left(\frac{h_K}{h}\right)^3 \cdot \left(1 - \frac{E_i}{E_a}\right)\right] \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} = \bar{E}_b \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (11)$$

Der über die Querschnittsfläche A gemittelte Biege-Elastizitätsmodul \bar{E}_b im letzten Term unterscheidet sich vom mittleren Zug/Druck-Elastizitätsmodul $\bar{E}_{z,d}$ in (6).

Die Normalspannung ist proportional zum Produkt aus Biegemoment M_b , Elastizitätsmodul $E(z)$ und Abstand z von der Biegeachse y und umgekehrt proportional zur Biegesteifigkeit S_b (11) (Bild 5 und Bild 6), hat also die Form

$$\sigma(z) = \varepsilon(z) \cdot E(z) = \frac{M_b}{S_b} \cdot E(z) \cdot z \quad (12)$$

In der Randschicht ergibt dies mit dem konstanten Elastizitätsmodul E_a nach (2) den linearen Normalspannungsverlauf

$$\sigma(z) = \varepsilon(z) \cdot E(z) = \frac{M_b}{S_b} \cdot E_a \cdot z \quad \left(\frac{h_K}{2} \leq |z| \leq \frac{h}{2}\right) \quad (13)$$

mit dem Maximalwert in der äußersten Schicht

$$\sigma\left(z = \frac{h}{2}\right) = \sigma_b = \frac{M_b}{S_b} \cdot E_a \cdot \frac{h}{2} \quad (14)$$

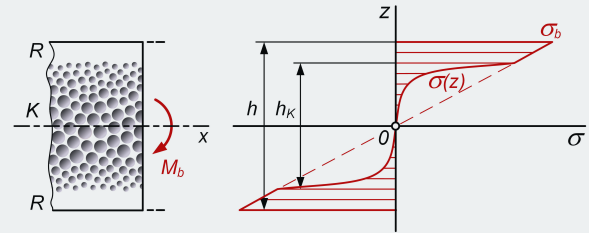


Bild 5. Normalspannungsverlauf über den Querschnitt unter Biegebeanspruchung (schematisch) nach den Beziehungen (13) und (15). Grafik: IWK

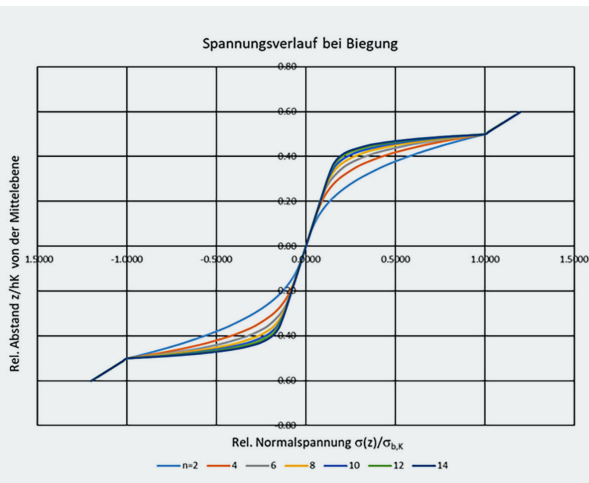


Bild 6. Normalspannungsverlauf über den Querschnitt unter Biegebeanspruchung nach den Beziehungen (13) und (15) in Funktion des Exponenten n ; mit $E_i/E_a = 0,2$ und $h/h_K = 1,2$. Grafik: IWK

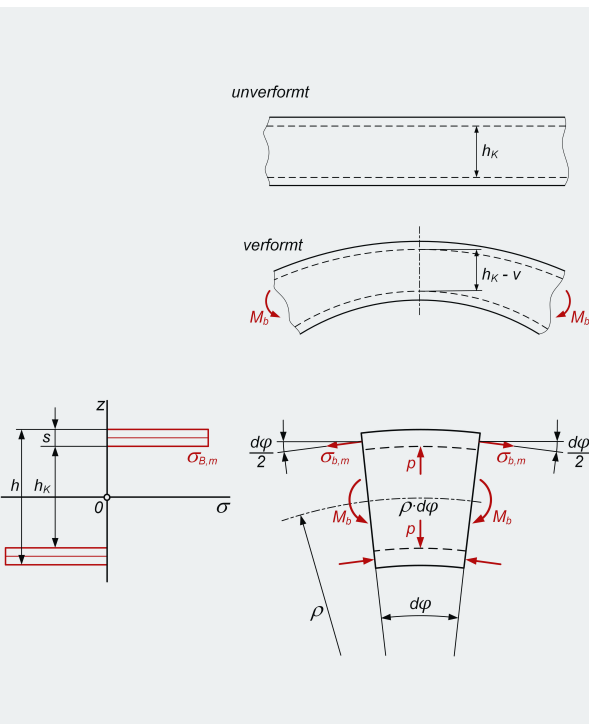


Bild 7. Querdruck p bei Biegung. Grafik: IWK

Die Normalspannung im Kern verläuft mit (3) nach der Beziehung

$$\sigma(z) = \frac{M_b}{S_b} \cdot E_i \cdot \left[1 + \left(\frac{E_a}{E_i} - 1 \right) \cdot \left(2 \cdot \frac{|z|}{h_K} \right)^n \right] \cdot z \quad \left(-\frac{h_K}{2} \leq z \leq \frac{h_K}{2} \right) \quad (15)$$

Ihre Extremwerte liegen bei $|z| = h_K/2$. Sie stimmen mit den dortigen Randschichtspannungen

$$\sigma \left(|z| = \frac{h_K}{2} \right) = \frac{M_b}{S_b} \cdot E_a \cdot \frac{h_K}{2} \quad (16)$$

überein. Aus der Krümmung

$$k = \frac{M_b(x)}{S_b} = w_b''(x) \quad (17)$$

nach (10) erhält man durch zweimalige Integration über x unter Beachtung der Randbedingungen die Durchbiegung bzw. die Biegelinie $w_b(x)$.

Mit dem Steifigkeitsmodell (2) und (3) kann auch der Querdruck bei Biegung und die daraus resultierende Verformung approximativ berechnet werden. Sie entstehen dadurch, dass sich die steiferen Randschichten unter den positiven Normalspannungen auf der konvexen Seite und den negativen Normalspannungen auf der konkaven Seite anzunähern suchen (Bild 7). Der Lösungsansatz setzt eine schwache Krümmung $h/\rho \ll 1$ voraus, womit der Unterschied zwischen den Krümmungsradien auf der konvexen und der konkaven Seite in erster Näherung vernachlässigbar wird. Weiter wird vereinfachend angenommen, dass das Biegemoment ausschließlich von den Randschichten übernommen wird, mit näherungsweise konstant angenommenen Normalspannungen $\sigma_{b,m}$. Die Berechnung [7] liefert die im Kern wirkende Druckspannung

$$\sigma_{K,z} = p \approx \frac{2 \cdot M_b^2}{S_b \cdot b \cdot (h + h_K)} \quad (18)$$

und die Zusammendrückung

$$v \approx \frac{2 \cdot M_b^2 \cdot h_K}{S_b \cdot b \cdot (h + h_K)} \cdot \frac{n + 1}{n \cdot E_i + E_a} \quad (19)$$

Schub bei Querkraftbiegung

Ruft die Belastung nebst dem Biegemoment M_b im betrachteten Querschnitt auch eine Querkraft F_q hervor (Bild 8), so bewirkt diese Schubbeanspruchung eine entsprechende Schubverformung, welche sich der Biegeverformung überlagert. Die hierfür maßgebende Schubsteifigkeit S_s bedeutet den Widerstand des im Querschnitt A auf Schub beanspruchten Bauteils gegen eine Schubverformung, also gegen eine Winkeländerung. Sie ist definiert als Verhältnis der beanspruchenden Querkraft F_q zum von ihr hervorgerufenen mittleren Schubwinkel γ_m , also

$$S_s = \frac{F_q}{\gamma_m} = \frac{1}{\gamma_m} \cdot \int_A \tau(z) \cdot dA = \frac{1}{\kappa} \cdot \int_A G(z) \cdot dA \quad (20)$$

Die Beziehung (4) zwischen Schub- und Elastizitätsmodul bei Isotropie verknüpft die Schubsteifigkeit mit der Zug/Drucksteifigkeit (6) in der Form

$$S_s = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \mu)} \cdot \int_A E(z) \cdot dA = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{S_{z,d}}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad (21)$$

Der Schubkoeffizient κ in (20) und (21) berücksichtigt die über z ungleichmäßige Verteilung der Schubspannung $\tau(x)$. Er hat für kompakte, homogene Rechteckquerschnitte die Größe $\kappa = 1,2$ [10]. Wegen der geringen Schubsteifigkeit im Kern kann wie bei Sandwehlementen in guter Näherung $\kappa \approx 1,0$ gesetzt werden. Dadurch wird die Schubsteifigkeit minim überschätzt.

Die Schubspannung bei Querkraftbiegung ist an jeder Stelle proportional zum Produkt aus den lokalen Werten von Schubwinkel γ und Schubmodul G . Ihre Verteilung über z (Bild 8 und Bild 9) lässt sich elastizitätstheoretisch herleiten [7]. In der Randschicht ergibt sich der Parabelbogen

$$\tau(z) = \frac{F_q \cdot E_a}{8 \cdot S_b} \cdot h^2 \cdot \left[1 - \left(2 \cdot \frac{z}{h} \right)^2 \right] \quad \left(\frac{h_K}{2} \leq |z| \leq \frac{h}{2} \right) \quad (22)$$

mit dem Maximum bei $|z| = h_K/2$, also beim Übergang zum Kern.

Im Kern verläuft die Schubspannung nach einer Parabel höherer Ordnung in der Form

$$\tau(z) = \frac{F_q \cdot E_a}{8 \cdot S_b} \cdot h_K^2 \cdot \left\{ \left(\frac{h}{h_K} \right)^2 - 1 + \frac{E_i}{E_a} \cdot \left[1 - \left(2 \cdot \frac{z}{h_K} \right)^2 \right] + \frac{2}{n + 2} \cdot \left(1 - \frac{E_i}{E_a} \right) \cdot \left[1 - \left(2 \cdot \frac{|z|}{h_K} \right)^{n+2} \right] \right\} \quad \left(-\frac{h_K}{2} \leq z \leq \frac{h_K}{2} \right) \quad (23)$$

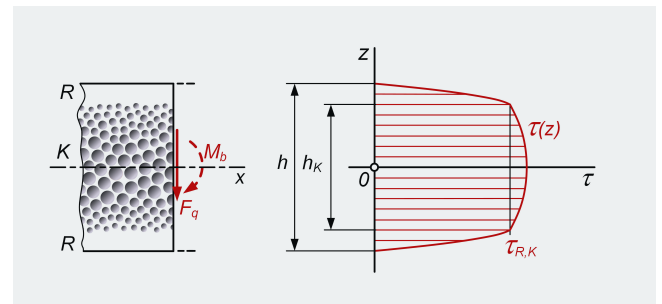


Bild 8. Schubspannungsverlauf bei Querkraftbiegung (schematisch) nach den Beziehungen (22) und (23). Grafik: IWK

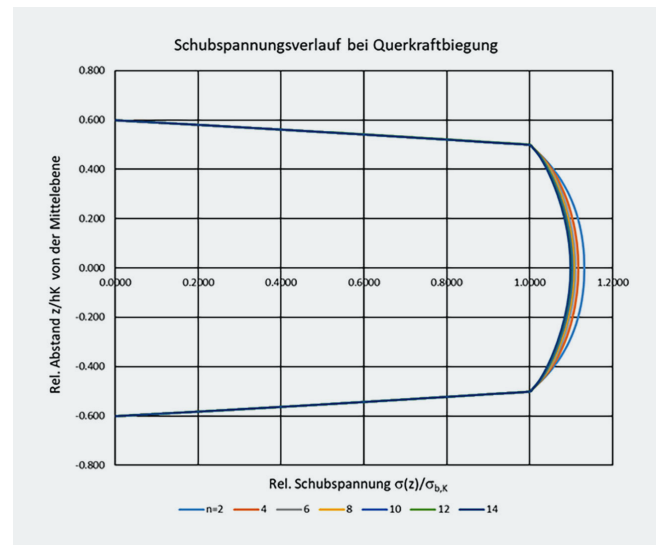


Bild 9. Schubspannungsverlauf über den Querschnitt bei Querkraftbiegung nach den Beziehungen (22) und (23) in Funktion des Exponenten n ; mit $E_i/E_a = 0,2$ und $h/h_K = 1,2$. Grafik: IWK

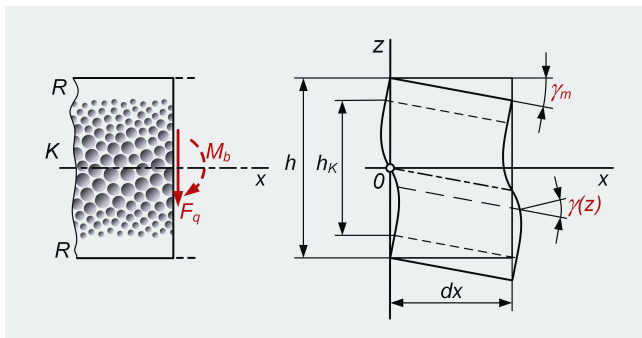


Bild 10. Schubverformung am Längenelement bei Querkraftbiegung (schematisch). Grafik: IWK

Die Bauteilverformung unter Schub ist im betrachteten Querschnitt (**Bild 10**) charakterisiert durch den gemittelten Schubwinkel

$$\gamma_m(x) = \frac{F_q(x)}{S_s} = w'_s(x) \tag{24}$$

Er entspricht der ersten Ableitung der schubbedingten Auslenkung $w_s(x)$ der Bauteilachse. Diese Durchsenkung erhält man, unter Beachtung der Randbedingungen, durch Integration von (24) über x . Sie überlagert sich der Durchbiegung $w_b(x)$ zur Gesamtauslenkung

$$w(x) = w_b + w_s \tag{25}$$

Der Anteil der Durchsenkung $w_s(x)$ an der Gesamtauslenkung $w(x)$ kann, anders als bei kompakt-homogenen Querschnitten, auch bei größeren Verhältnissen von Bauteillänge l zu Querschnittshöhe h erheblich sein.

Experimentelle Bestimmung

Das Steifigkeitsmodell (2) und (3) enthält die fünf voneinander unabhängigen Parameter h, h_K, E_a, E_i und n . Deren Bestimmung ist mit wenigen Vorgehensschritten möglich. Die Querschnittsgrößen h und h_K lassen sich visuell ausmessen. Der Elastizitätsmodul E_a der Randschicht kann als Zug-Elastizitätsmoduls des ungeschäumten Kunststoffes nach DIN EN ISO 527 bestimmt oder gegebenenfalls einem Datenblatt entnommen werden. Ein Zugversuch mit der integralen Schaumstoffprobe liefert nach (6) den mittleren Zug/Druck-Elastizitätsmodul $\bar{E}_{z,d}$; der mittlere Biege-Elastizitätsmodul \bar{E}_b nach (11) wird zweckmäßigerweise im Vierpunkt-Biegeversuch bestimmt, um den Querkrafteinfluss auszuschalten. Daraus lassen sich die noch offenen Größen berechnen anhand der Beziehungen

$$n = - \frac{3 \cdot \left(1 - \frac{\bar{E}_b}{E_a}\right) - \left(\frac{h_K}{h}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{\bar{E}_{z,d}}{E_a}\right)}{\left(1 - \frac{\bar{E}_b}{E_a}\right) - \left(\frac{h_K}{h}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{\bar{E}_{z,d}}{E_a}\right)} \tag{26}$$

und

$$E_i = E_a \cdot \left[1 - \frac{n+1}{n} \cdot \frac{h}{h_K} \cdot \left(1 - \frac{\bar{E}_{z,d}}{E_a}\right)\right] \tag{27}$$

Damit ist der Verlauf des Elastizitätsmoduls $E(z)$ nach dem Steifigkeitsmodell (2) und (3) quantitativ bestimmt.

Schlussbetrachtung

Mit dem hier betrachteten Modell kann die Steifigkeit von Strukturschaumstoffen wirklichkeitsnah beschrieben werden. Seine fünf makroskopischen Parameter sind praktisch bestimmbar; eine Verknüpfung mit dem Dichteverlauf über den Querschnitt oder mikromechanische Betrachtungen sind nicht erforderlich. Die dem Modell zu Grunde liegenden Annahmen und Idealisierungen entsprechen im Wesentlichen jenen der Elastizitätstheorie, d.h. auch, dass verarbeitungsbedingte Orientierungen und Anisotropien nicht erfasst werden. Eine diesbezügliche Ausweitung wäre in der Anwendungspraxis mit vernünftigem Aufwand wohl nicht zu bewältigen. Trotz den Vereinfachungen können bei Berechnungen mit diesem Modell Ergebnisse erwartet werden, die im Rahmen der Unschärfen jeder Bauteilauslegung realistisch sind. ■

Literatur

- [1] Kaiser, W.: Kunststoffchemie für Ingenieure. 5. Aufl. Carl Hanser Verlag München 2021
- [2] Piechota, H.; Röhr, H.: Integralschaumstoffe. Carl Hanser Verlag München 1975
- [3] Körner, C.: Integral foam moulding of light metals, Springer Verlag Berlin 2008
- [4] Trepper, A.: Niederdruck-Integralschaumgiesen – Technologie für Aluminiumgussteile mit reduziertem Körperschall. Diss. Erlangen-Nürnberg 2010
- [5] Müller, W.; Starke, L.: Modelle zur Berechnung des Elastizitätsmoduls und der Biegesteifigkeit von thermoplastischen Strukturschaumstoffen. Plaste und Kautschuk 31(1984)9, S. 348–35
- [6] Börger, H.: Unveröffentlichte Arbeiten am Süddeutschen Kunststoff-Zentrum Würzburg 1979, zitiert in: Grüters, H., Hiemenz, C.: Berechnung des Verzugs und der Schwindung von PUR-Strukturschaumstoffplatten. Kunststoffe 79(1980)4, S. 288–233
- [7] Kunz, J.: Strukturschaumstoffe. Unveröffentlichte Dokumente. IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung Rapperswil 2021/2022
- [8] Wikipedia, Poissonzahl; aufgerufen am 20.7.2022
- [9] t-Airex-C70.pdf (swiss-composite.ch) und AIREX_C70_D.pdf (timeout.de); aufgerufen am 20.7.2022
- [10] von Bach, C.: Elasticität und Festigkeit. 4. Aufl. Verlag von Julius Springer Berlin 1902, S. 452/453



Prof. Dipl.-Ing. **Johannes Kunz** ist Institutspartner am IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung Rapperswil

Kontakt

IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung Rapperswil an der OST Ostschweizer Fachhochschule Eichwiesstr. 18b, 8645 Rapperswil-Jona/CH johannes.kunz@ost.ch, www.ost.ch/iwk