

8.12 Zugängliches Leichtbaupotenzial

Mit dem Modell für den Leichtbaueffekt liegt eine Beschreibung dafür vor, welches Leichtbaupotenzial mit einer bestimmten Schichtstruktur verbunden ist (Gleichung 8.8). Das Modell für die effektive Deckschichtdicke gibt zusätzlich an, welche Schichtstruktur sich voraussichtlich einstellt, wenn eine bestimmte Dichtereduktion und eine bestimmte Erzeugnisdicke gewählt wird (Gleichung 8.13).

Unter Zuhilfenahme der Beziehung zwischen Gesamtdichtereduktion und Dichtereduktion im Kern, Gleichung 8.7, kann zunächst die Dichtereduktion im Kern als Funktion der Erzeugnisdicke und des effektiven Kernschichtanteils bestimmt werden, Gleichung 8.14.

$$\Delta\rho_k = \frac{1}{k_e} \left(\frac{3}{H} - 3,7 \right) + 4,5 \quad \text{für } H [\text{mm}]: [2,5; 10] \quad (8.14)$$

Diese empirischen Kennwertverläufe lassen sich in das Potenzialdiagramm zum Leichtbaueffekt eingetragen, sodass die Verbesserung der gewichtsbezogenen Biegesteifigkeit für die verschiedenen Erzeugnisdicken erkennbar wird, Bild 8.20.

Erwartungsgemäß ist der Leichtbaueffekt umso größer, je höher die Dichtereduktion im Kernbereich ist. Dabei zeigen dünne Erzeugnisse (2,5 bis 4 mm) einen deutlich höheren Leichtbaueffekt als dickere Produkte mit gleicher Dichtereduktion im Kern.

Bei dünnen Erzeugnissen liegt ein günstigeres Verhältnis zwischen Deckschicht- und Kernschichtdicke vor. Wenn Erzeugnisdicken von 10 mm oder mehr realisiert werden, ergibt sich bezüglich der Biegesteifigkeit keine effektive Verbesserung mehr.

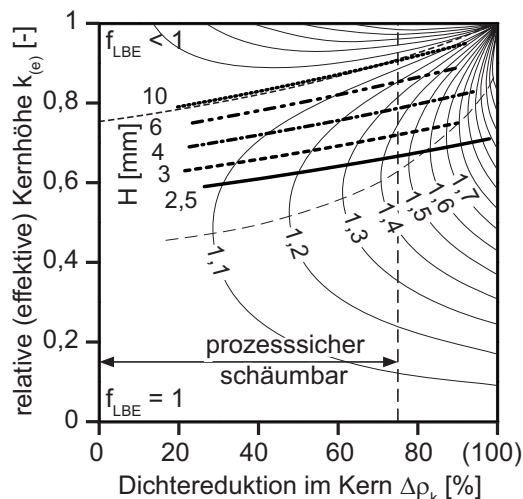


Bild 8.20: Verfahrenstechnisch zugängliches Leichtbaupotenzial von spritzgegossenen Intergalerschäumen aus Polypropylen

8.13 Vorhersage von Steifigkeitskennwerten

Sobald für eine spritzgegossene Integralschaumstruktur die Erzeugnisdicke H und die Gesamtdichtereduktion $\Delta\rho$ festgelegt sind, steht im Wesentlichen auch fest, welche effektive Deckschichtdicke D_e und welche Dichtereduktion im Kern $\Delta\rho_k$ zu erwarten sind. Die effektive Deckschichtdicke und der effektive Kernschichtanteil können unmittelbar mithilfe der Gleichungen 8.12 und 8.13 ermittelt werden. Mit bekanntem effektivem Kernschichtanteil ergibt sich die Dichtereduktion im Kernbereich nach Gleichung 8.14. Die Schichtstruktur des Integralschaums ist somit entsprechend der vorgestellten Modellbildung bereits aufgrund der frei gewählten Erzeugnisdicke und der Gesamtdichtereduktion vorherbestimmt.

Für die Vorhersage der Steifigkeitskennwerte ist der Kernschicht-E-Modul gesucht, der nach Gleichung 8.6 ermittelt werden kann, wobei für unverstärktes Polypropylen ein Wert von 1,8 für den Exponenten n zu empfehlen ist. Damit liegen alle Eingangskennwerte zur Berechnung des erwarteten Biege-E-Moduls E_B nach Gleichung 8.5 vor.

$$E_B = E_d \cdot (1 - k_e^3) + E_k \cdot k_e^3 \quad (\text{vgl. 8.5})$$

$$E_Z = E_d \cdot (1 - k_e) + E_k \cdot k_e \quad (8.15)$$

$$E_0 = E_d = \text{Kompaktwerkstoff-E-Modul}$$

Mit den Eingangskennwerten kann ebenfalls der erwartete Zug-E-Modul E_Z der Integralschaumstruktur ermittelt werden, Gleichung 8.15. Die Vorhersagequalität dieses Ansatzes zur Berechnung der Steifigkeitskennwerte ist in Bild 8.21 gezeigt.

Die Berechnungsergebnisse liegen bei unverstärktem Polypropylen sehr nahe bei den Messwerten. Wenn glasfaserverstärktes Polypropylen (PP-GF, 20 Gew.-% Kurzglasfasern) verarbeitet wird, fällt die Kennwertabminderung, insbesondere der E-Modul-Abfall im Kernbereich, stärker aus. Dem entsprechend kommt es bei der Berechnung zu einer Überschätzung der Steifigkeitskennwerte um ca. 10 %. Mit einem höheren Exponenten n für glasfaserverstärkte Werkstoffe (2,0–2,2) kann das Modell einfach angepasst werden.

Daneben führt das Modell bei physikalisch geschäumtem Polypropylen zu einer Überschätzung der Steifigkeitskennwerte. Bei der physikalischen Begasung bilden sich aufgrund der höheren Schäumaktivität etwas dünnere Deckschichten aus. Eine Anpassung sollte daher erforderlichenfalls beim empirischen Modell für die effektive Deckschichtdicke erfolgen, Gleichung 8.13.

Der letzte Term (1/3) gibt die Dicke der Deckschicht in Millimeter an, die sich bei der Herstellung der Integralschaumstruktur mindestens ergibt. Im Falle von physikalisch geschäumten Erzeugnissen ist eine Anpassung auf einen Zahlenwert zwischen 0,2 und 0,3 sinnvoll.

Insgesamt stellt die Modellbildung, die eine Vorhersagequalität im Bereich von $\pm 10\%$ ausweist, ein praktikables Werkzeug dar, das für die ersten Auslegungsberechnungen bei der Konstruktion von geschäumten Bauteilen ausreichend genau ist. Ob ein Potenzial der Integralschaumstruktur bezüglich der gewichtsbezogenen Biegesteifigkeit vorliegt, kann direkt aus Bild 8.13 und Bild 8.20 abgelesen werden.

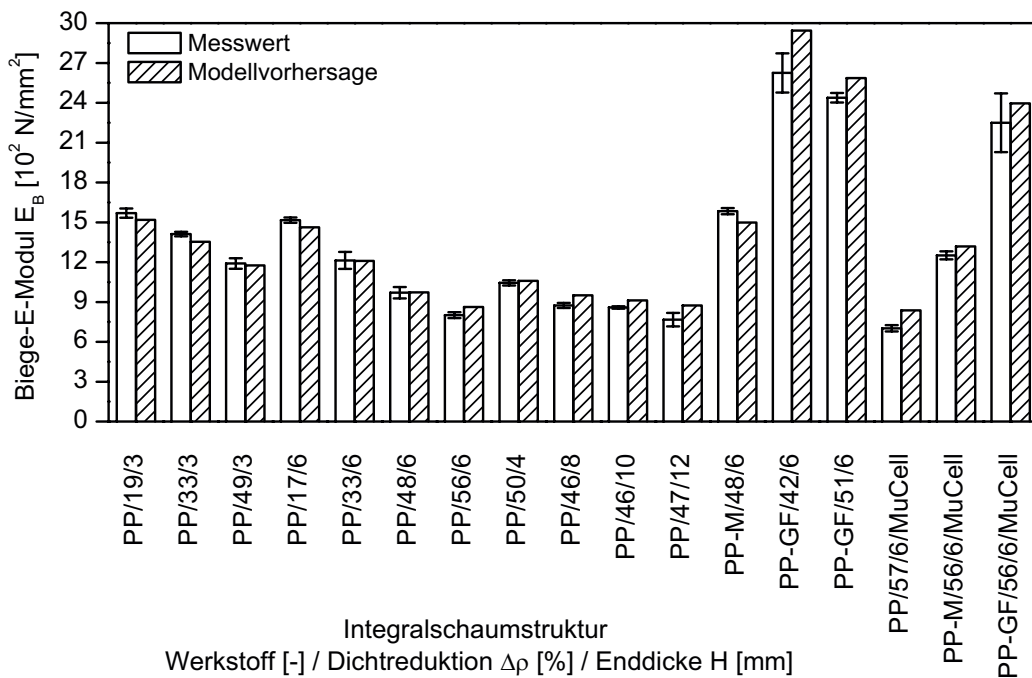
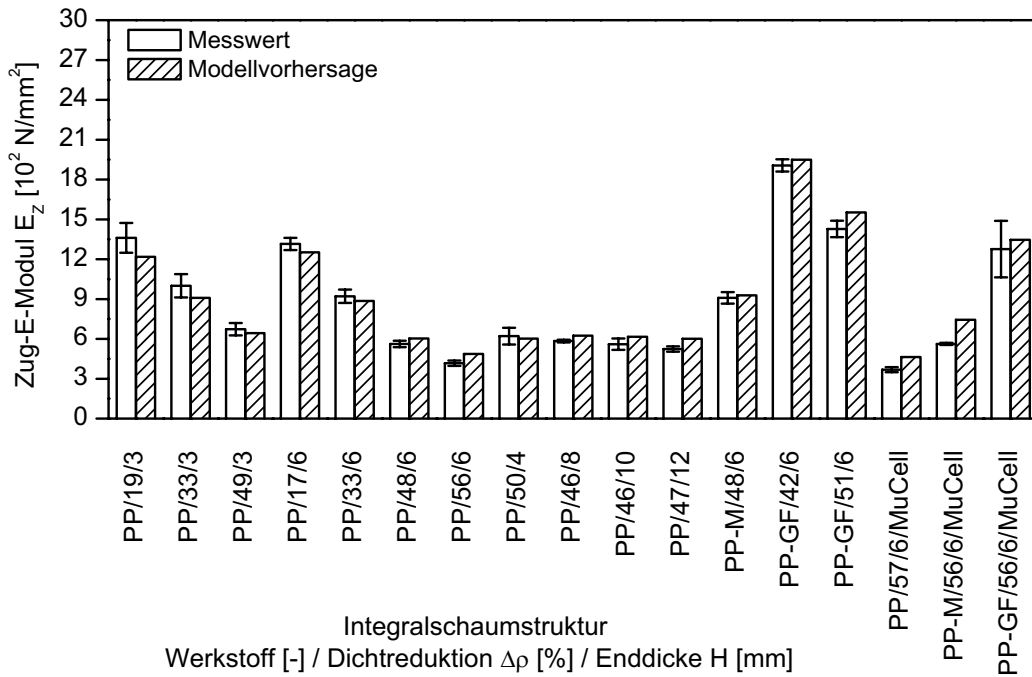


Bild 8.21: Gemessene und berechnete Zug- und Biege-E-Modulwerte von Schaumstrukturen aus verschiedenen Polypropylentypen (vgl. Tabelle 8.3)

8.14 Vorhersage von Festigkeitskennwerten

Für die Vorhersage der Festigkeitskennwerte von geschäumtem Polypropylen sind weitere Berechnungsansätze beschrieben worden, die auf der vorgestellten Modellbildung aufbauen [1]. Dabei ergibt sich für die Berechnung der Streck- oder Bruchspannung $\sigma_{y,Z}$ bei Zugbelastung eine weitreichende Analogie zur Vorhersage des Zug-E-Moduls, Gleichung 8.16.

$$\sigma_{y,Z} = \sigma_{y,0} \left[k_e (1 - \Delta\rho_k)^n - k_e + 1 \right] \quad (8.16)$$

$\sigma_{y,Z}$ = Streckspannung der Integralschaumstruktur bei Zugbelastung

$\sigma_{y,0}$ = Streckspannung des Kompaktwerkstoffs

Zur Vorhersage der Biegebelastbarkeit $\sigma_{y,B}$ sind dagegen Erweiterungen bei der Modellbildung erforderlich, die insbesondere zur Einbeziehung des Sekantenmoduls an die Streckgrenze des kompakten Deckschichtwerkstoffs $E_{s,d}$ führen, Gleichung 8.17. Mit dieser Anpassung wird dem nichtlinear-viskoelastischen Werkstoffverhalten, das bei Biegebelastung den Spannungsabfall in den Deckschichten bestimmt, näherungsweise Rechnung getragen.

$$\sigma_{y,B} = \sigma_{y,0} \left[k_e^3 \frac{E_d}{E_{s,d}} (1 - \Delta\rho_k)^n - k_e^3 + 1 \right] \quad (8.17)$$

$\sigma_{y,B}$ = Streckspannung der Integralschaumstruktur bei Biegebelastung

Die Grundzüge der Auswirkung der Verschäumung auf den Leichtbau in Hinblick auf die Festigkeit sind ähnlich wie bei der Steifigkeit. Bei reiner Zugbelastung ist sowohl bezüglich der Steifigkeit als auch der Festigkeit die kompakte Ausführung am günstigsten. Durch die Integralschaumstruktur wird dagegen bei Biegebelastung sowohl die gewichtsbezogene Biegesteifigkeit als auch die gewichtsbezogene Biegefestigkeit verbessert.

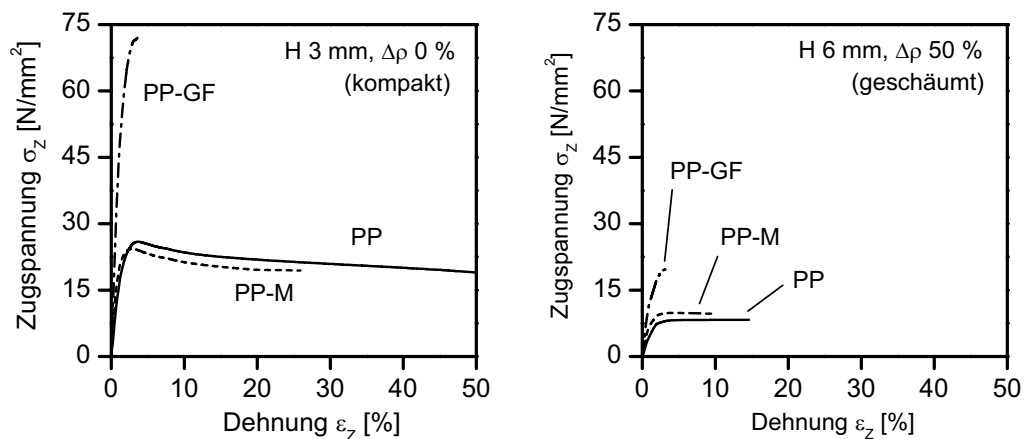
8.15 Einfluss von Füll- und Verstärkungsstoffen auf die Steifigkeit

Polypropylentypen, die für technische Einsatzzwecke bestimmt sind, bieten bei niedriger Kompaktwerkstoffdichte bereits einen vergleichsweise hohen E-Modul, Tabelle 8.3. Die gewichtsbezogenen Steifigkeitskennwerte liegen in einem ähnlichen Bereich wie bei Polyamid. Hinzu kommt der vergleichsweise günstige Materialpreis, der häufig den Ausschlag dafür gibt, dass diese hoch entwickelten Polypropylentypen für Leichtbauanwendungen, bei denen die Kostenstruktur weit im Vordergrund steht, in Betracht gezogen werden.

Das mechanische Verhalten von Konstruktionswerkstoffen wird im Normalfall im Kurzzeit-Zugversuch charakterisiert. Es ergeben sich die Spannungs-Dehnungs-Diagramme für den Kompaktwerkstoff, Bild 8.22 links.

Tabelle 8.3: Kennwerte einer unverstärkten, gefüllten und kurzglasfaserverstärkten Polypropylentype für technische Erzeugnisse

Handelsname und Hersteller		Hostacom®, Fa. Basell		
Kurzbezeichnung		PP	PP-M	PP-GF
Type		PPU X9067HS	HC XM2 U36	HC G2 R03
Füll-/Verstärkungsstoff		-	mineral. Füllstoff 20 Gew.-%	Kurzglasfasern 20 Gew.-%
Dichte	[g/cm ³]	0,91	1,04	1,05
Zug-E-Modul	[N/mm ²]	1700	2650	4800
Streckspannung	[N/mm ²]	26	25	-
Bruchspannung	[N/mm ²]	-	-	70

**Bild 8.22:** Zugverformungsverhalten von kompaktem und geschäumtem Polypropylen (unverstärkt, gefüllt, kurzglasfaserverstärkt)

Durch die Verschäumung auf 50 % der ursprünglichen Dichte nehmen die mechanischen Kennwerte bei Zugbelastung, mit Ausnahme der zu Beginn schon geringen Bruchdehnung von PP-GF, um mehr als 50 % ab, Bild 8.22 rechts.

Wird der Zug-E-Modul auf den tatsächlichen Querschnitt der Zugprobe im kompakten und aufgeschäumten Zustand bezogen, dann ergibt sich bei allen drei Polypropylentypen eine Abminderung um fast 70 %, Bild 8.23 links. Die Abnahme des Zug-E-Moduls ist damit kaum vom verwendeten Werkstoff abhängig.

Bei der Berechnung des Zug-E-Moduls der geschäumten Proben kann anstelle des Gesamtquerschnitts alternativ der tatsächlich enthaltene Materialquerschnitt herangezogen werden, Bild 8.23 rechts. Die verbleibende Abminderung des Zug-E-Moduls um annähernd 40 % gibt die effektive Kennwertveränderung an.

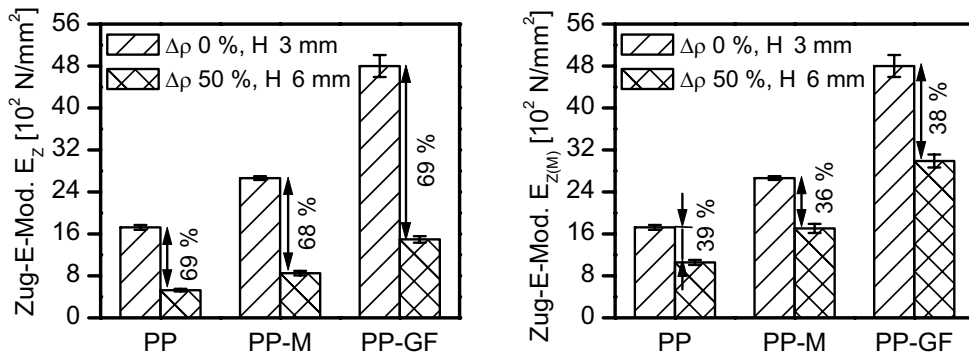


Bild 8.23: Zug-E-Modul von kompaktem und geschäumtem Polypropylen
 links: bezogen auf den Gesamtquerschnitt (absolute Abminderung)
 rechts: bezogen auf den Materialquerschnitt (effektive Veränderung)

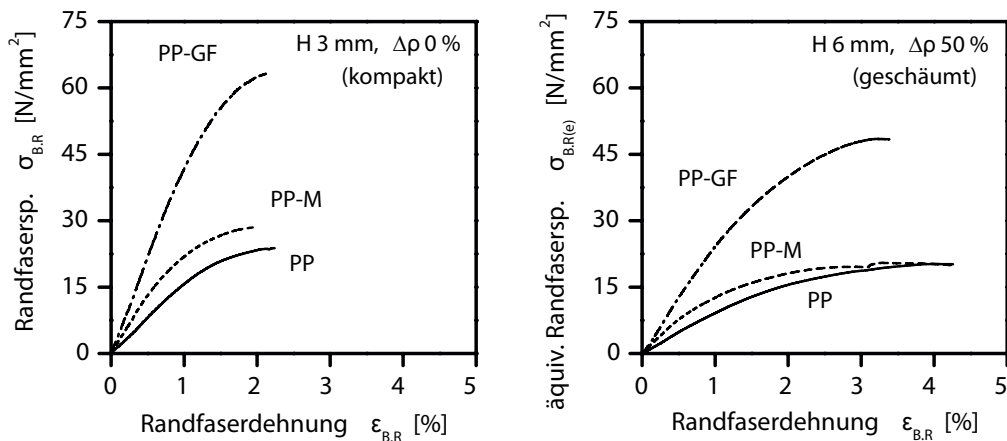


Bild 8.24: Biegeverformungsverhalten von kompaktem und geschäumtem Polypropylen (unverstärkt, gefüllt, kurzglasfaserverstärkt)

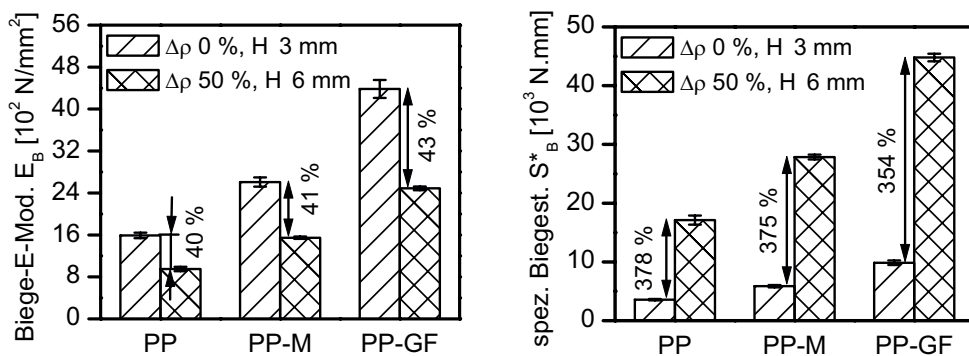


Bild 8.25: Biege-E-Modul von kompaktem und geschäumtem Polypropylen;
 Steigerung der Biegesteifigkeit bei gleichem Flächengewicht

Die Kennwertveränderung infolge der Verschäumung fällt bei Biegebelastung deutlich geringer aus als bei Zugbelastung, Bild 8.24. Die Abminderung des Biege-E-Moduls beträgt in der absoluten Auftragung bei allen drei Werkstoffen nur ca. 40 %, während sich die Rohdichte bereits um 50 % verringerte, Bild 8.25 links.