

Probekörperdicke beeinflusst mechanische Eigenschaften

Bauteilauslegung. Die mechanischen Eigenschaften thermoplastischer Kunststoffe hängen u. a. auch von der Dicke des Probekörpers ab. Das gilt in besonderem Maße für den Elastizitätsmodul: So wurden an 1 mm dicken Probekörpern bis zu 50 % höhere E-Modul-Werte gemessen als am 4 mm dicken Standardprobekörper. Diese Erkenntnis wirft für die Auslegung von Bauteilen mit geringen Wanddicken, wie sie heute üblich sind, wichtige Fragen auf.

**YVES VORDERMANN
FRANK EHRIG
JOHANNES KUNZ**

Die rechnerunterstützte Bauteilauslegung gewinnt im Rahmen des Entwicklungsprozesses immer mehr an Bedeutung. Bevor in Betriebsmittel investiert wird, werden viele Anforderungen mit Hilfe von Berechnungen überprüft. Eine wichtige Rolle spielt hierbei die mechanische Strukturanalyse im Rahmen der beanspruchungsgerechten Gestaltung. Deren Ergebnisse liefern Informationen über auftretende Spannungen und Dehnungen aufgrund der vorgegebenen Randbedingungen und der relevanten Werkstoffkennwerte. Letztere werden in der Kunststofftechnik an genormten Probekörpern von üblicherweise 4 mm Dicke (Typ 1A) unter standardisierten Prüfbedingungen bestimmt [1]. Viele technische Bauteile weisen indes geringere Wanddicken auf, was andere Verarbeitungsparameter bedingt und sich auf Orientierungen, Randschichtdicken und die Werkstoffeigenschaften auswirkt (Bild 1). Über die Zusammenhänge zwischen der Wanddicke und den hieraus resultierenden inneren und äußeren Bauteileigenschaften ist bislang wenig bekannt.

Einflüsse auf die Probekörpereigenschaften

Die Herstellung von Kunststoffteilen beeinflusst wesentlich die Bildung des Werk-

stoffgefüges. Je nach Bauteilgeometrie, Werkstofftyp, Verarbeitungsprozess und Prüfmethode ergeben sich andere Eigenschaftswerte. Die ermittelten Kennwerte repräsentieren primär also nicht die Eigenschaften der untersuchten Formmasse, sondern des aus diesem Werkstoff hergestellten Probekörpers, der sich in einem bestimmten, vor allem verarbeitungsbedingten Zustand befindet. Eine sachgerechte Kennwertdokumentation erfordert deshalb u. a. auch Angaben zum Zu-



Bild 1. Wanddickenabhängige Werkstoffeigenschaften wirken sich auf das mechanische Verhalten der Bauteile aus (Bild: Georg Utz AG, Bremgarten/Schweiz)

stand des Probekörpers und der gewählten Prüfbedingungen.

Wichtige mechanische Kennwerte werden im Zugversuch bestimmt [2, 3]. Sie dienen dem orientierenden Eigenschaftsvergleich, der Qualitätskontrolle sowie der quantitativen Charakterisierung des Versagens- und des Verformungsverhaltens der Kunststoffe bei kurz- und langzeitiger Beanspruchung [4, 5]. Für die Berechnung der Formteile eignen sich diese Kennwerte jedoch nur bedingt, da die realen Formteile den Probekörpern hinsichtlich Wanddicke, Herstellungsbedin-

gungen und Belastungsverlauf nur in den seltensten Fällen entsprechen. Dennoch müssen sich die Auslegung und die Beurteilung von Produkten auf diese Kenngrößen abstützen, solange keine zutreffenderen Werte verfügbar sind.

Äußere Bauteileigenschaften wie mechanisches Verhalten, Masse, Verzug, Glanz, etc. werden maßgeblich durch die inneren Eigenschaften des Bauteils bestimmt. Hierzu zählen z. B. Orientierungen, Kristallinität, Eigenspannungen oder

auch die Molekulargewichtsverteilung. Zur Beschreibung der Mechanismen bei der Strukturbildung müssen Größen herangezogen werden, die die Beanspruchung, die Beanspruchungsgeschichte und den Abkühlverlauf eines Schmelzpartikels beschreiben. Diese lokalen, geometrieunabhängigen Größen werden als Prozessparameter bezeichnet. Wichtige Größen sind Massetemperatur und Massedruck, Abkühlgeschwindigkeit und Schergeschwindigkeit.

Die verschiedenen Einflüsse auf die mechanischen Kennwerte von Kunststoff-

fen beim Spritzgießen waren schon häufig Gegenstand eingehender Untersuchungen. Generell streben die Molekülketten einen ungeordneten Zustand an, solange ihre Beweglichkeit in der Schmelze genügend groß ist. Beim Spritzgießprozess orientieren sich die Molekülket-

Bei Bauteilen mit Filmgelenken liegen extreme Wanddickenunterschiede vor. Das mechanische Verhalten der Gelenkpartie wird, wie man weiß, weitgehend von den hochorientierten Randschichten bestimmt, in denen die Kettenmoleküle infolge der ausgeprägten Scherströmung

tigkeit und Lebensdauer der Filmgelenke [9]. Ob und allenfalls wie sich diese Erkenntnisse auch auf Bauteile mit geringen Wanddicken übertragen lassen, geht aus der verfügbaren Fachliteratur nicht hervor.

Die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Wanddicke ist bislang nur vereinzelt und wenig systematisch erforscht worden. Keine Ergebnisse zeigte die Literaturrecherche bezüglich der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Wanddicke bei sonst gleicher Probekörpergeometrie und unverändertem Prüfverfahren. Immerhin finden sich Hinweise darauf, dass das Festigkeitsverhalten mit abnehmender Wanddicke zunimmt [10]. Ein gegenteiliges Verhalten zeigt sich, wenn Kleinprüfstäbe verwendet werden [11]. Um genauere Kenntnis dieser Abhängigkeiten zu erhalten, wurde in einer Bachelorarbeit untersucht, inwieweit die Probekör-

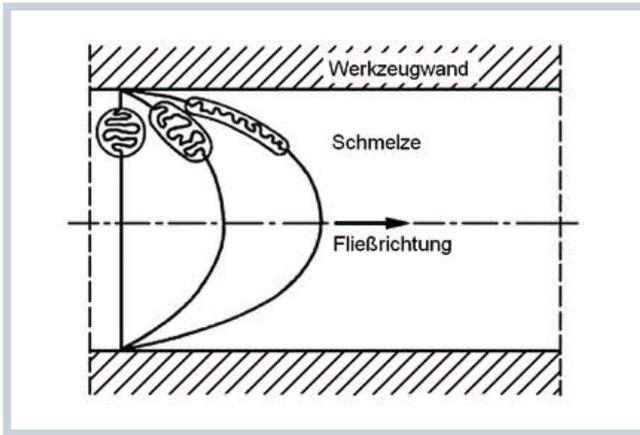


Bild 2. Entstehung der Molekülorientierung in Fließrichtung (nach Chatain [15])

ten fließbedingt mehrheitlich in eine Vorzugsrichtung (Bild 2). Je nach Abkühlgeschwindigkeit friert ein mehr oder weniger großer Teil der orientierten Moleküle ein und bildet hochorientierte Randschichten, was zu einer deutlichen Anisotropie der Eigenschaften führt. So ergeben sich in Orientierungsrichtung prinzipiell erhöhte Steifigkeits- und Festigkeitswerte [6]. Die Zusammenhänge zwischen der Wanddicke des Formteils, den Fließeigenschaften der Formmasse und den Abkühlverhältnissen im Werkzeug sind grundsätzlich bekannt (Bild 3). Die Wanddicke beeinflusst die Dicke der Randschichten, die Morphologie und bei teilkristallinen Formmassen auch den Kristallisationsgrad. Damit führen unterschiedliche Wanddicken zwangsläufig zu unterschiedlichem mechanischen Verhalten. Mit abnehmender Wanddicke steigt die Scherung der Schmelze, es nimmt aber auch die Dicke der hochorientierten Randschicht zu, und die Orientierungen werden ausgeprägter [7, 8].

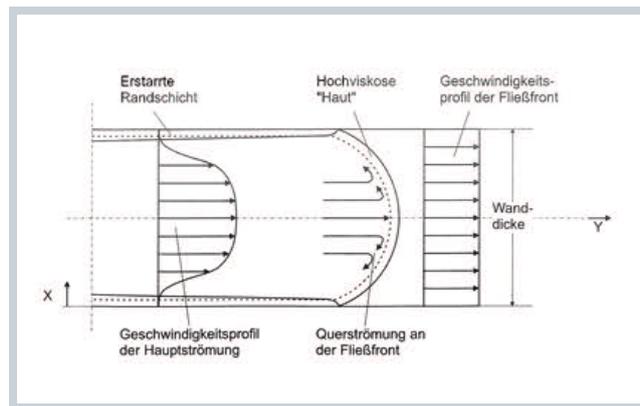


Bild 3. Fließfront, Geschwindigkeitsprofile über die Wanddicke und Randschichtbildung beim Spritzgießen (nach Menges und Leibfried [16])

der Kunststoffschmelze im Bereich der Dünnstelle vorwiegend senkrecht zur Gelenkachse ausgerichtet sind. Bei Filmgelenken aus Polypropylen (PP) weisen diese Randschichten einen wesentlich höheren Elastizitätsmodul und deutlich verbesserte Rückverformbarkeit auf. Je dicker diese Randschichten und je ausgeprägter die Orientierung der Kettenmoleküle sind, umso höher werden Zugfes-

perdicke einen nennenswerten Einfluss auf die mechanischen Werkstoffkennwerte und damit auf die Berechnungsergebnisse bei der Bauteilauslegung hat [12].

Werkstoffe und Probekörperherstellung

Da die Abhängigkeit der mechanischen Kennwerte von der Probekörperdicke zu untersuchen war, standen Kunststoffe im Vordergrund, die vor allem auch in Bereichen geringerer Wanddicke eingesetzt werden. Solche finden sich zum Beispiel bei Spielzeugen oder in Gehäusen von Elektrogeräten wie Handys, Laptops usw. Bei der Auswahl wurde auch darauf geachtet, dass von den Materialherstellern vorgegebene Einstellparameter für die Herstellung von Standardpro-

Typ	Handelsname	Hersteller	Struktur	Zug-Modul [N/mm ²]	Dichte [kg/m ³]	Rheologische Eigenschaften
ABS	Terluran HI-10	BASF	amorph	1900	1030	MVR: 5.5 cm ³ /10 min 220°C, 10 kg
PC	Makrolon 2805	Bayer	amorph	2400	1200	MVR: 9 cm ³ /10 min 300°C, 1,2 kg
PP	Bormod HF955MO	Borealis	teilkristallin	2200	908	MFI: 20 g/10 min 230°C, 2,16 kg
POM	Hostaform C13021	Ticona	teilkristallin	2900	1410	MVR: 12 cm ³ /10 min 190°C, 2,16 kg

Tabelle 1. Untersuchte Werkstoffe und relevante Eigenschaften nach Material Data Center [13]

bekörnern vorhanden waren, um einen Vergleich der zu prüfenden 4 mm dicken Proben mit den Campus-Kennwerten des jeweiligen Kunststoffes zu ermöglichen. Von den schließlich gewählten zwei amorphen (ABS, PC) und zwei teilkristallinen (PP, POM) Thermoplast-Typen können zwei den Standardkunststoffen (ABS, PP) und zwei den Ingenieurkunststoffen (PC, POM) zugeordnet werden (Tabelle 1).

Zur Herstellung der Probekörper analog Typ 1A mit einer Dicke von 1, 2, 3 bzw. 4 mm wurde ein Spritzgießwerkzeug mit auswechselbaren Formplatten eingesetzt. Die Prozessparameter wurden so gewählt, dass die unterschiedlich dicken Probekörper unter möglichst vergleichbaren Bedingungen spritzgegossen werden konnten. Zum einen wurden Proben unter Campus-Bedingungen hergestellt, d. h. mit gleicher Massetemperatur, gleicher Werkzeugtemperatur und gleichem Volumenstrom wie die 4 mm dicken Standardprobekörper aus dem jeweiligen Material. Die Masse- und Werkzeugtemperaturen wurden für die unterschiedlichen Probekörperdicken gleich hoch eingestellt. Der Volumenstrom wurde dabei aus der Einspritzgeschwindigkeit berechnet, definiert als mittlere Geschwindigkeit der Schmelze beim Durchtritt durch den Prüfquerschnitt der Probe. Die benötigten Angaben konnten der Datenbank Campus [14] entnommen werden. Zu Vergleichszwecken wurden aber auch Probekörper mit optimierten, auf die jeweilige Wanddicke abgestimmten Verarbeitungsparametern spritzgegossen. Bei diesen Versuchen konnte allerdings beim gewählten PC-Typ die Kavität für den Probekörper mit der geringsten Wanddicke von 1 mm in keiner der beiden Varianten vollständig gefüllt werden.

Ergebnisse

Bei allen vier Werkstoffen zeigte sich, dass die Zug-Modul-Werte mit geringer werdender Probekörperdicke markant zunehmen (Bild 4). Einen besonders hohen Einfluss auf den Elastizitätsmodul hat die Wanddicke bei den amorphen Thermoplasten. Bei ABS mit 1 mm Dicke und PC mit 2 mm Dicke liegen die Werte um mehr als 50 % über denjenigen der 4 mm dicken Probekörper. Die gleiche Tendenz ist bei den teilkristallinen Werkstoffen PP und POM zu beobachten, wenngleich der Anstieg des Elastizitätsmoduls mit rund 34 % etwas geringer ausfällt.

Hinsichtlich Streckspannung und Streckdehnung verhalten sich die einzel-

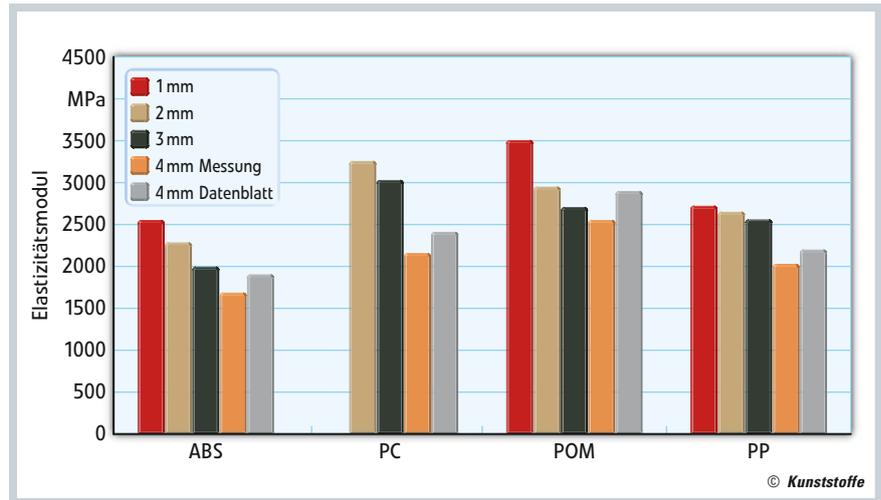


Bild 4. Elastizitätsmodul in Funktion der Probekörperdicke. Mit PC konnte bei d = 1 mm die Kavität nicht gefüllt werden (Bild: IWK)

Werkstoff	Änderung (Vergleich 1 mm zu 4 mm)	
	Streckspannung	Streckdehnung
ABS	15 %	-4 %
PC*)	1 %	-10 %
PP	3 %	-23 %
POM	2 %	-19 %

*) Bei PC werden die Wanddicken von 2 und 4 mm verglichen

Tabelle 2. Änderung von Streckspannung und Streckdehnung bei abnehmender Probekörperwanddicke

nen Materialien ähnlich: Mit abnehmender Wanddicke nimmt die Streckspannung zu, während die Streckdehnung abnimmt (Tabelle 2) – eine Beobachtung, die mit dem Anstieg des Elastizitätsmoduls durchaus im Einklang ist. Der Anstieg der Streckspannung ist aber unterschiedlich hoch. Mit rund 15 % zeigt ABS die stärkste Zunahme der Streckspannung aller untersuchten Werkstoffe bei gleichzeitig geringster Abnahme der Streckdehnung um 4 %. Bei PP und POM nimmt die Streckspannung lediglich um 2 bis 3 % zu, die Streckdehnung dagegen nimmt um rund 20 % ab. Bei PC, mit dem keine 1 mm dicken Probekörper realisiert werden konnten, wurde bei den 2 mm dicken Proben ein minimaler Anstieg der Streckspannung um 1 % gemessen, wogegen die Streckdehnung immerhin um 10 % tiefer liegt als bei den Probekörpern mit 4 mm Dicke.

Dass der Elastizitätsmodul und die Streckspannung mit abnehmender Wanddicke steigen und die Streckdehnung sinkt, ist auf die höhere Orientierung der Makromoleküle in Fließrich-

tung infolge der höheren Scherung bei der Formfüllung zurückzuführen. Dabei werden die Moleküle wegen der höheren Abkühlgeschwindigkeit beim Erstarren der Schmelze in ihrem hochorientierten Zustand eingefroren. Bei den teilkristallinen Thermoplasten bewirkt die schnellere Abkühlung einen geringeren Kristallisationsgrad, was die vergleichsweise kleine Zunahme der Streckspannungswerte bei PP und POM erklärt.

Gefügeuntersuchungen

Um die Hintergründe des Wanddickeneinflusses auf die mechanischen Eigenschaften zu verstehen, wurden bei den teilkristallinen Kunststoffen PP und POM die Querschnitte von Probekörpern mit 4 mm und 1 mm Dicke mikroskopisch untersucht. Es bestätigte sich, dass sich vor allem die Dicke der Randschicht auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt. Die Randschichten weisen im Gegensatz zur Kernzone mit ihrer Sphärolithstruktur eine hohe Orientierung und eine amorphe Struktur auf.

Durch die höhere Fließfrontgeschwindigkeit steigt auch die Scherung und Dehnung der Schmelze an der Werkzeugwand und im Kernbereich. Die hochorientierten Molekülketten werden in diesem Zustand in Wandnähe eingefroren. Somit ergibt sich eine Zunahme der Orientierung in diesen Bereichen. Bei den 1 mm-Proben ist dieser Effekt größer, da im schmalen Querschnitt schnellere Abkühlgeschwindigkeiten stattfinden als bei den 4 mm-Proben. Im Kernbereich hingegen nimmt die Orientierung aufgrund der Relaxation wieder ein wenig ab, da hier die Schmelze längere Zeit braucht, bis sie eingefroren ist. Auch hier relaxie-

ren die Molekülketten der 1 mm-Proben weniger stark als bei den 4 mm-Proben und werden in ihrem orientierten Zustand eingefroren. Aus diesem Grund besitzen die dünneren Proben einen größeren Anteil an hochorientierten Randschichten.

Die Schnittanalyse an PP-Probekörpern (Bild 5) zeigt, dass die durchschnittliche Randschichtdicke bei den 1 mm dicken Proben, die mit gleichem Volumenstrom und demzufolge mit über 13 mal höherer Fließfrontgeschwindigkeit spritzgegossen wurden, rund 132 µm

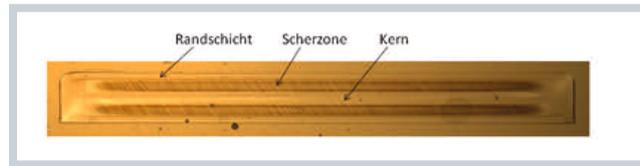


Bild 5. Querschnitt der 1 mm dicken PP-Probe mit gleichem Volumenstrom wie bei der 4 mm-Probe
(Bild: IWK)

und damit rund das Doppelte derjenigen beim Standardprobekörper mit 4 mm Wanddicke beträgt. Der Anteil der Randschicht an der gesamten Querschnittsfläche nimmt dadurch von 4,8 % auf 29,5 % zu, was einem Faktor 6 entspricht. Bei den 1 mm dicken Probekörpern, die

mit optimierten Verarbeitungsparametern hergestellt wurden, war die berechnete Fließfrontgeschwindigkeit noch viermal höher als bei 4 mm Probekörperdicke, und entsprechend ergab sich mit 76,6 µm eine rund 17 % größere Dicke der Randschicht bzw. eine Vervielfachung des Flächenanteils auf 18,5 % (Bild 6).

Bei POM wurde im Querschnitt der 4 mm dicken Probekörper eine Randschichtdicke von 109 µm gemessen. Damit liegt der Anteil der Randschicht an der gesamten Querschnittsfläche bei 7,1 %. Interessanterweise war die Randschicht bei den 1 mm dicken, mit gleichem Volumenstrom hergestellten Probekörpern mit 103 µm nahezu gleich dick wie bei 4 mm Probekörperdicke. Dies entspricht einem Randschicht-Flächenanteil von 22,7 %, der somit mehr als dreimal so groß ist wie beim 4 mm dicken Probekörper (Bild 6).

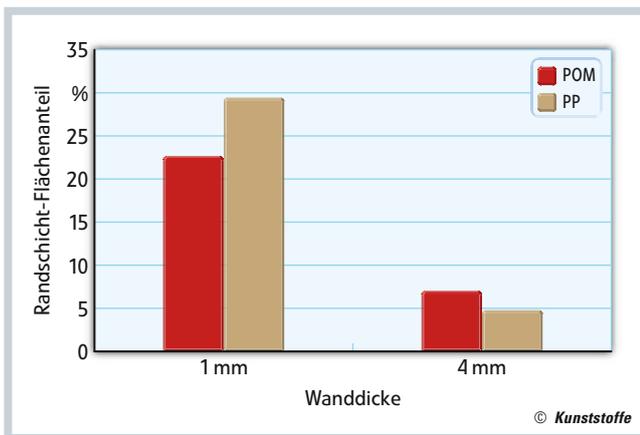


Bild 6. Prozentuale Flächenanteile der Randschichten an der Gesamtquerschnittsfläche bei Probekörperdicke 1 mm und 4 mm (Bild: IWK)



Konsequenzen für die Bauteilauslegung

Es hat sich eindeutig gezeigt, dass so wichtige mechanische Kennwerte wie der Elastizitätsmodul, in geringerem Maß aber auch die Streckspannung und die Streckdehnung, verarbeitungsbedingt von der Wanddicke der jeweiligen Partie der Spritzgießteile abhängig sind und kaum mit den Werten übereinstimmen, die von den Herstellern an 4 mm dicken Probekörpern gemessen und in Datenbanken hinterlegt werden. Die Annahme, dass sich der Kriechmodul als zeitabhän-

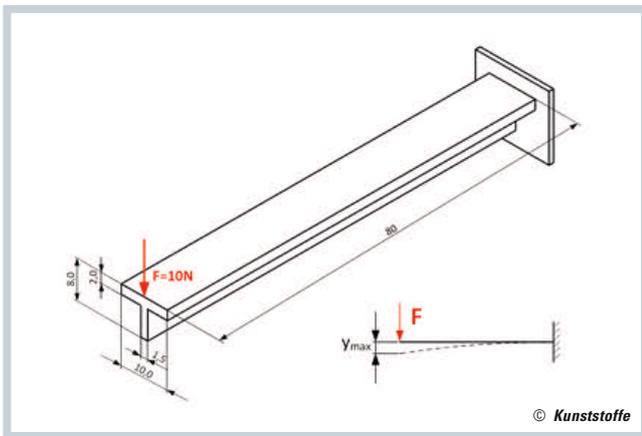


Bild 7. Biegeträger mit versteifender Rippe: Wanddickenabhängigkeit des Elastizitätsmoduls wirkt sich bei vorgegebener Belastung vor allem auf Durchbiegung und Dehnung aus, bei vorgegebener Verformung auf die Spannung

giges Steifigkeitsmaß aus dem Zeitstand-Zugversuch [3] analog verhält, ist nahelegend.

Die Qualität einer Bauteilauslegung steht und fällt mit der Verfügbarkeit und der Akkuranz der benötigten Werkstoffkennwerte. Eine zentrale Größe bei FEM-Analysen wie auch bei analytischen Berechnungen ist – nebst der Poisson- oder Querkontraktionszahl – der Elastizitätsmodul als Steifigkeitsmaß des Werkstoffs: Er ist maßgebend für das Verhältnis von Belastung zu Verformung. Bei vorgegebener Belastung verhält sich die Verformung umgekehrt proportional zum Elastizitätsmodul, bei vorgegebener Verformung hängen die Spannungen direkt vom Elastizitätsmodul ab. Das Beispiel eines einseitig eingespannten, als linear-elastisch bzw. linear-viskoelastisch betrachteten Biegeträgers aus ABS mit versteifender Längsrippe (Bild 7) demonstriert dies klar: Wenn bei gleicher Belastung der Elastizitätsmodul um 20 % erhöht wird, bleibt die Spannung wie erwartet unverändert, Dehnung und Durchbiegung nehmen direkt proportional ab. Werden in einer Variante $E_1 = 2285 \text{ N/mm}^2$ für $d = 2 \text{ mm}$ und an der Rippe für $d = 1,5 \text{ mm}$ $E_2 = 2420 \text{ N/mm}^2$ anstelle des Campus-Werts von 1900 N/mm^2 eingesetzt, so reduzie-

ren sich Durchbiegung und Dehnung um rund 20 %. Wenn die Rippe auch mit E_1 statt mit E_2 gerechnet wird, so ergeben sich um knapp 17 % kleinere Verformungswerte. Diese Erkenntnisse bestätigen sich qualitativ auch bei Anwendung auf reale Bauteile (Bild 1).

Für die Bauteilauslegung stellen sich damit wichtige Fragen:

- Mit welchem Elastizitätsmodul-Wert ist zu rechnen, wenn die Wanddicke des Bauteils stark von 4 mm abweicht?
- Mit welchem Elastizitätsmodul ist zu rechnen, wenn die Wanddicken des Bauteils stark unterschiedlich sind?

- Wie wirken sich diese Wanddickenunterschiede auf das Ergebnis einer Auslegungsrechnung aus, bzw. welchen Stellenwert haben Berechnungsergebnisse auf Basis des Elastizitätsmoduls aus Datenbanken?

Darüber hinaus drängen sich Überlegungen über die Frage auf, inwieweit es noch sinnvoll bzw. vertretbar ist, dass mechanische Kennwerte an 4 mm dicken Proben ermittelt werden, wo doch ein Großteil der heute üblichen Spritzgießformteile Wanddicken in den Bereichen von 1 bis

2,5 mm aufweisen. Wäre nicht zumindest eine Ergänzung durch eine Probe geringerer Dicke, z. B. 2 mm, sonst aber unveränderter Geometrie erwünscht?

Fazit und Ausblick

Es zeigt sich also, dass Kunststoffbauteile mit Wanddicken unter 4 mm, die in einer FEM-Analyse mit E-Modul-Werten gemäß Materialhersteller berechnet werden, im Grunde genommen überdimensioniert sind. Weiter wurde festgestellt, dass die Streckdehnungen mit kleiner werdender Wanddicke abnehmen. Das heißt, dass bei Bauteilen mit einer Wanddicke unter 4 mm die Streckgrenze früher erreicht wird als bei Auslegung mit den Werten aus der Datenbank. Dies kann schließlich zu irreversiblen Verformungen oder zu Beeinträchtigungen der Transparenz des Bauteils führen, hervorgerufen durch Schädigungen im Mikrobereich (Bildung von Fließ- respektive Verstreckungszonen „Crazes“ und Rissen). Aufbauend auf dieser Arbeit werden in künftigen Untersuchungen die Einflüsse der Wanddicke auf die Kristallisation näher betrachtet und hier insbesondere die Sphärolithgröße und deren Verteilung. ■

LITERATUR

Das ausführliche Literaturverzeichnis kann im Internet unter www.kunststoffe.de/A086 abgerufen werden.

DIE AUTOREN

YVES VORDERMANN, BSc FHO in Maschinenteknik, geb. 1989, schloss sein Bachelorstudium an der HSR Hochschule für Technik Rapperswil (Schweiz) 2012 mit einer Arbeit zum obigen Thema ab.

PROF. DR.-ING. FRANK EHRIG, geb. 1967, leitet das Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) an der HSR; fehrig@hsr.ch

PROF. DIPL.-ING. JOHANNES KUNZ, geb. 1940, ist seit seinem Übertritt in den Ruhestand Institutspartner des IWK; jkunz@hsr.ch

SUMMARY

TEST SPECIMEN THICKNESS AFFECTS MECHANICAL PROPERTIES

PARTS DESIGN. The mechanical properties of thermoplastic polymers depend inter alia on the thickness of the sample. This is especially true for the modulus of elasticity: thus, up to 50 % higher modulus values were measured on 1-mm-thick test specimens than on the standard 4-mm-thick specimen. This finding raises important questions for the design of parts with small wall thicknesses that are commonplace today.

Read the complete article in our magazine

Kunststoffe international and on

www.kunststoffe-international.com