

› Auslegung von Kunststoffkonstruktionen

Kriechmodul-Abschätzung und Kriechbeständigkeit

Mangels verfügbarer Werkstoffdaten ist der Fachmann bei der Auslegung von Kunststoffbauteilen oft auf Näherungen und Abschätzungen angewiesen. Dies gilt insbesondere für den Kriechmodul als wichtigem Kennwert zur Erfassung der zeitabhängigen Werkstoffsteifigkeit. Hier wird – nebst anderen – ein Ansatz präsentiert, der sich die Kriechbeständigkeit zunutze macht, soweit diese überhaupt aus Datenbanken ableitbar und relevant ist.

› Johannes Kunz¹

Der Kriechmodul ist bei der Auslegung von Kunststoffbauteilen von zentraler Bedeutung, indem er als Mass für die zeitabhängig abnehmende Steifigkeit der viskoelastischen Werkstoffe den Zusammenhang zwischen der Beanspruchung und der daraus resultierenden Verformung vermittelt. Bei der Lösung strukturmechanischer Problemstellungen (Bild 1) mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) ist er als Eingabegrösse zur Erfassung der Werkstoffeigenschaften unverzichtbar. Er wird überall dort benötigt, wo bei linear-elastischen Problemen der Elastizitätsmodul auftaucht.

Definiert ist der Kriechmodul – nach EN ISO 899-1 als Zug-Kriechmodul bezeichnet [1] – als Verhältnis der konstanten Spannung σ_0 und der mit der Belastungszeit t zunehmenden Dehnung $\varepsilon(t)$, ermittelt im einachsigen Zeitstand-Zugversuch, mithin

$$E_c(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t)} = \frac{F \cdot l_0}{A_0 \cdot \Delta l(t)} \quad (1)$$

Darin sind F die konstante belastende Kraft, A_0 und l_0 die Anfangsgrössen von Querschnittsfläche bzw. Messlänge des Probekörpers und $\Delta l(t)$ dessen zeitlich wachsende Längenzunahme. Für E_c und $\varepsilon(t)$ werden etwa auch die Symbole E_t und ε_t verwendet.

Seltener in Gebrauch ist der in EN ISO 899-2 definierte Biege-Kriechmodul [2]

¹ Prof. Dipl.-Ing. Johannes Kunz, Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) an der HSR Hochschule für Technik Rapperswil, Dozent für Berechnen und Gestalten von Kunststoffteilen im MAS-Studiengang Kunststofftechnik an der Hochschule für Technik der FH Nordwestschweiz.

$$E_{bc}(t) = \frac{F \cdot l^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot f(t)} \quad (2)$$

aus dem Dreipunkt-Biegeversuch mit l als Länge zwischen den beiden Auflagern, b als Breite und h als Dicke des Probekörpers sowie der zeitlich zunehmenden Durchbiegung $\varepsilon(t)$. Dies weil der Zug-Kriechmodul in der Praxis auch bei Biegeproblemen und mehrachsigen Spannungszuständen Verwendung findet.

Neben seiner Abhängigkeit von der Belastungszeit weist der Kriechmodul wie praktisch alle mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe eine mehr oder weniger ausgeprägte Abhängigkeit von der Temperatur ϑ auf. Darüber hinaus wird er – vor allem bei grösseren Verformungen – zunehmend von der Dehnung ε bzw. der Spannung σ beeinflusst. Die Auswertung von Beziehung (1) ergibt dann einen Sekantenmodul (Bild 2), stellt also für das Spannungsintervall $0 \leq \sigma \leq \sigma_0$ die durchschnittliche Werkstoffsteifigkeit dar.

Für die Bauteilauslegung kann der Kriechmodul für die massgebenden Grössen von Zeit und Temperatur im Idealfall einem Kriechmodul-Diagramm (Bild 3) entnommen oder mittels eines relevanten isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagramms (Bild 4) anhand Beziehung (1) bestimmt werden.

Kümmerliche Datenbasis – bedenkliche Situation

Leider handelt es sich beim oben erwähnten Idealfall um eine Ausnahme, sind doch die genannten Diagramme nur für wenige Werkstoffe verfügbar. In der wohl umfassendsten Kunststoff-Datenbank Material Data Center [3] waren am Stichtag 12. No-

vember 2013 insgesamt 39551 Kunststofftypen aufgelistet. Davon waren Kriechmodul-Diagramme gerade mal zu 446 Werkstoffen zu finden, was rund 1,1 Prozent entspricht. Bei den isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagrammen zeigt sich die Situation mit 502 Werkstoffen nur minim besser. Dieselbe Ausbeute zeitigt auch die Recherche in der Kunststoff-Datenbank Campus [4]. Und sucht man bei den Ein-

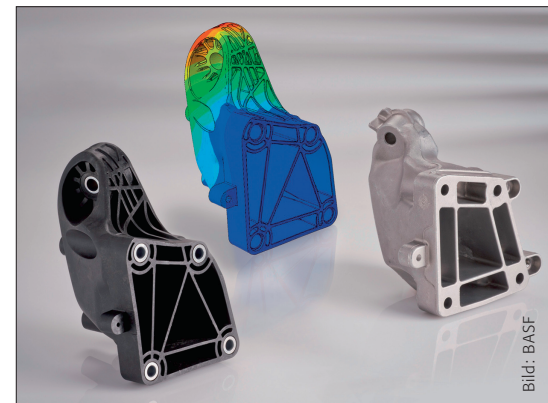


Bild 1: Der Kriechmodul ist ein unverzichtbarer Kennwert bei der Auslegung von Kunststoffbauteilen – hier der weltweit erste Motorträger aus Kunststoff (PA 6 Ultramid A3WG10 CR) in der neuen Mercedes GL-Klasse zur Substitution der bisherigen Aluminiumkonstruktion.

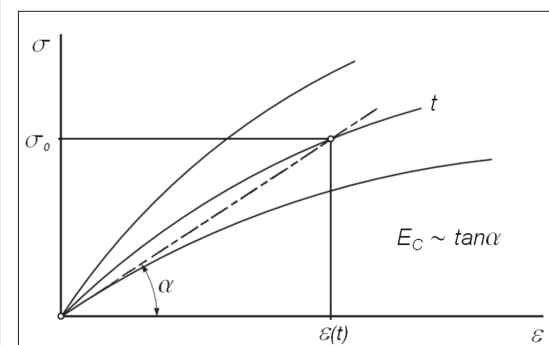


Bild 2: Kriechmodul, definiert als Sekantenmodul der isochronen Spannungs-Dehnungs-Linie für die Zeit t (schematisch).

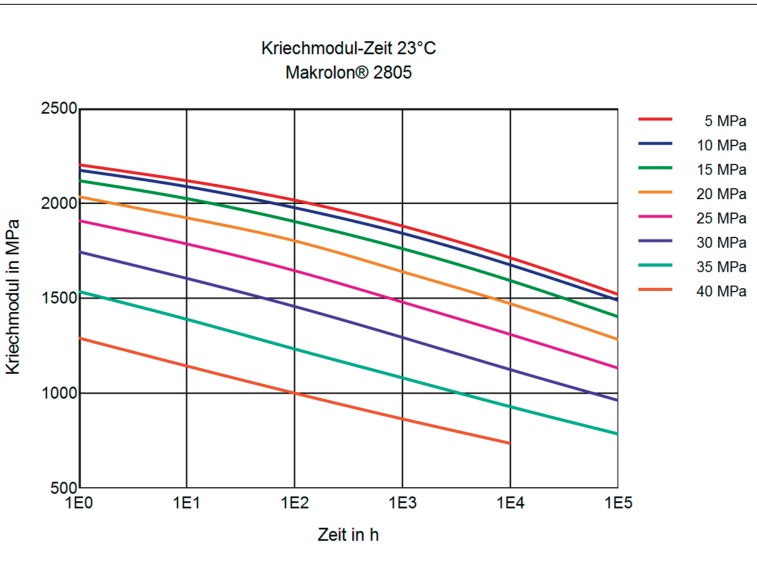


Bild 3: Kriechmodul-Diagramm des PC Makrolon 2805 [4] von Bayer MaterialScience für 23°C.

Punkt-Daten nach den Kriechmodulen für 1 h und für 1000h, sind solche in Campus nur bei 517 Kunststofftypen aufgeführt, wozu in Material Data Center noch 40 weitere Typen kommen. Das sind insgesamt 567 Kunststofftypen, also nicht mal ganz 1,5 Prozent.

Diese Tatsache ist äusserst bedenklich. Es stellt sich die Frage, ob sich die kunststoff-erzeugende Industrie über die Bedürfnisse der Fachleute, die Kunststoffbauteile auslegen, überhaupt im Klaren ist. Da ist auch die beststrukturierte Datenbank nicht hilf-

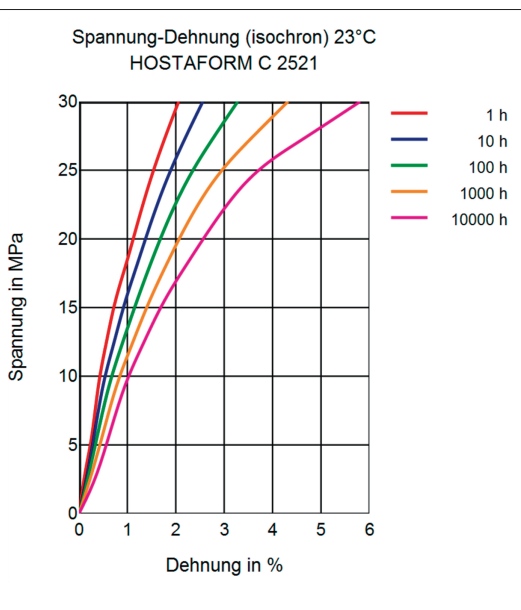


Bild 4: Isochrones Spannung-Dehnungs-Diagramm des POM Hostaform C 2521 [4] von Ticona für 23°C.

reich, wenn wesentliche Daten einfach fehlen. Wenn ein Werkstoff aber erfolgreich eingesetzt werden soll, sind relevante und verlässliche Eigenschaftswerte unabdingbar.

Natürlich ist die Ermittlung dieser Kennwerte in Langzeitversuchen mit entsprechendem Aufwand an Zeit und Geld verbunden. Deshalb wurde seit Langem nach einem

Weg gesucht, der es möglich macht, aufgrund von Daten, die

in Kurzzeitversuchen ermittelt werden können, und mit Hilfe des Zeit-Temperatur-Verschiebungs-Prinzips auf das Langzeitverhalten zu schliessen [5]. Doch der grosse Durchbruch ist damit bis heute noch nicht gelungen, denn auch diese Ansätze benötigen zur Kalibrierung letztlich Messdaten aus Langzeitversuchen.

Näherungen und Abschätzungen als Ausweg

In dieser unbefriedigenden Situation ist der Praktiker auf Näherungsansätze oder wenigstens Abschätzmethoden angewiesen, um den Kriechmodul in einigermaßen realistischer Grössenordnung bestimmen zu können.

Eine plausible Näherung geht davon aus, dass die Kriechmoduln als Ein-Punkt-Daten $E_{C0} = E_C(t_0 = 1 \text{ h})$ und $E_{C3} = E_C(t_3 = 10^3 \text{ h})$ aus einer Werkstoff-Datenbank [3, 4] bekannt sind. Sie basiert weiter auf der Annahme, dass die Steifigkeitsabnahme pro Zeitdekade in etwa konstant ist, was sich im Kriechmodul-Diagramm mit logarithmisch geteilter Zeitskala als geradliniger Verlauf abbildet (Bild 5). Daraus kann die Beziehung

$$E_C(t) \approx E_{C0} - \frac{1}{3} \cdot (E_{C0} - E_{C3}) \cdot \log_{10} \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad (3)$$

abgeleitet werden, welche den Kriechmodul bei Raumtemperatur zumindest im

Bereich ($10^{-2} \text{ h} \leq t \leq 10^4 \text{ h}$) in der Regel recht gut beschreibt (Bild 3) und als Inter- bzw. Extrapolationsfunktion hilfreich ist. Als Bezugszeit ist $t_0 = 1 \text{ h} = 10^0 \text{ h}$ einzusetzen.

Wenn aber die genannten Ein-Punkt-Werte E_{C0} und E_{C3} fehlen, hilft auch Beziehung (3) nicht weiter. In diesem Fall muss auf andere Näherungen ausgewichen werden.

Kriechbeständigkeit und Kriechmodul

Die Kriechbeständigkeit

$$c_c = \frac{E_C(t_3)}{E_C(t_0)} = \frac{E_{C3}}{E_{C0}} \quad (4)$$

beschreibt das Kriechverhalten bzw. die zeitliche Abnahme der Werkstoffsteifigkeit auf ebenso zweckmässige wie einfache Weise [6]. Je grösser diese Kennzahl ist, umso kleiner ist die Kriechneigung des betreffenden Kunststoffs, und umgekehrt. Der Extremfall $c_c = 1$ beschreibt einen Werkstoff mit zeitlich konstanter Steifigkeit, also ohne Kriechen. Im Unterschied zum Kriechmodul, der eine momentane Zustandsgrösse darstellt, drückt die Kriechbeständigkeit das Steifigkeitsverhalten eines Kunststoffs im Laufe der Belastungszeit aus.

Die Auswertung der in den Datenbanken verfügbaren Werte vermittelt eine Vorstellung von der Grössenordnung der Kriechbeständigkeit (Tabelle 2). Diese Zahlenwerte können aber – aufgrund der begrenzten Datenbasis – keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit erheben. Bemerkenswert ist immerhin der Befund, dass bei PA6 die Verstärkung mit Kurzglasfasern generell einen deutlichen Anstieg der Kriechbeständigkeit bewirkt, offenbar aber weniger die Höhe des Verstärkungsanteils (Bild 6). Dieses Bild zeigt sich auch bei andern Werkstoffen wie PA66, PBT, POM und PC.

Mit der Kriechbeständigkeit (4) kann (3) umgeformt werden zu

$$E_C(t, \vartheta) \approx E_{C0} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot (1 - c_c) \cdot \log_{10} \left(\frac{t}{t_0} \right) \right] \quad (5)$$

Damit lässt sich der Kriechmodul mit Hilfe der Kriechbeständigkeitswerte (Tabelle 2) zumindest in der Grössenordnung abschät-

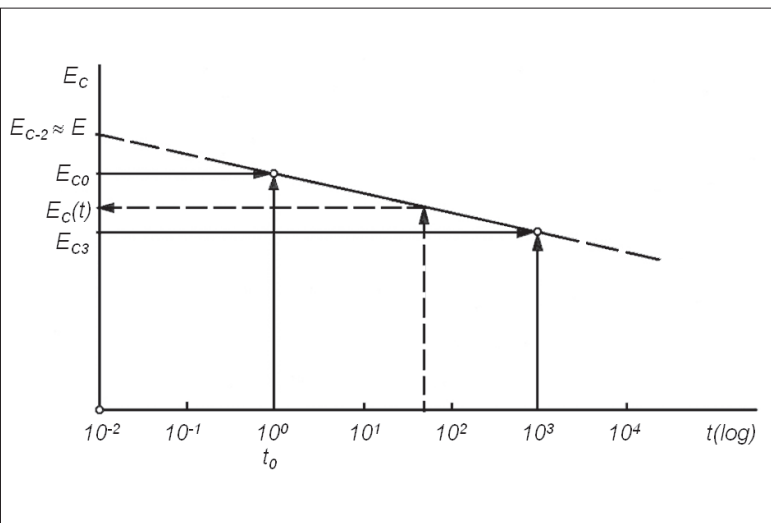


Bild 5: Näherungsweise Kriechmodulbestimmung durch logarithmische Inter- bzw. Extrapolation mit den Kriechmodul-Ein-Punkt-Werten E_{c0} und E_{c3} als Basis.

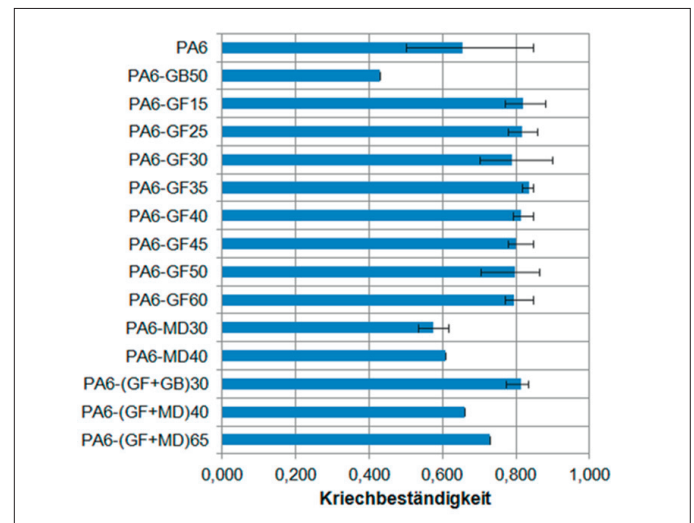


Bild 6: Kriechbeständigkeiten verschiedener Typen von PA6, ausgewertet anhand von Daten von insgesamt 69 Werkstoffen aus dem Material Data Center [3].

zen, sofern wenigstens der Kriechmodul E_{c0} bekannt ist. Dies trifft leider aber auch nicht sehr häufig zu.

Um dennoch eine Aussage über die Größenordnung des Kriechmoduls machen zu können, lässt sich die längst bekannte Tatsache beziehen, dass der Kriechmodul $E_{c0} = E_c(t_0 = 10^{-2} \text{ h})$ recht gut dem im Kurzzeit-Zugversuch [7] ermittelten Elastizitätsmodul E entspricht [8], dass also gilt

$$E \approx E_c(t = 10^{-2} \text{ h}) \quad (6)$$

Der Elastizitätsmodul E , auch etwa Zugmodul genannt, wird in Datenbanken relativ häufig aufgeführt (Tabelle 1). Mit (6) lässt sich aus (5) schliesslich die Beziehung

$$E_c(t) \approx E \cdot \frac{1 - \frac{1}{3} \cdot (1 - c_c) \cdot \log_{10}\left(\frac{t}{t_0}\right)}{1 + \frac{2}{3} \cdot (1 - c_c)} \quad (7.1)$$

bzw. umgeformt

$$E_c(t) \approx E \cdot \frac{3 - (1 - c_c) \cdot \log_{10}\left(\frac{t}{t_0}\right)}{3 + 2 \cdot (1 - c_c)} \quad (7.2)$$

ableiten. Sie erlaubt es, den Kriechmodul $E_c(t)$ allein anhand des Kurzzeit-Elastizitätsmodul E und der Kriechbeständigkeit c_c abzuschätzen.

Betrachtungen an einem Beispiel

Da bei Näherungen keine allgemeingültigen Aussagen über die Genauigkeit der Methode möglich sind, soll hier ein Beispiel die Brauchbarkeit der vorgestellten Ansätze illustrieren. Zu diesem Zweck wird mit dem PC Makrolon 2805 ein Werkstoff betrachtet, von dem nebst den erforderlichen Kriech- und Elastizitätsmoduln auch ein Kriechmodul-Diagramm verfügbar ist, um die abgeschätzten Werte bewerten zu können. Der Datenbank [4] sind zu entnehmen: Elastizitätsmodul $E = 2400 \text{ N/mm}^2$ sowie die Kriechmoduln $E_{c0} = E_c(t_0 = 1 \text{ h}) = 2200 \text{ N/mm}^2$ und $E_{c3} = E_c(t_3 = 10^3 \text{ h}) = 1900 \text{ N/mm}^2$. Soll nun mit diesen Werten der Kriechmodul für die Belastungszeiten $t_2 = 100 \text{ h}$ und $t_4 = 10000 \text{ h}$ abgeschätzt werden, so erhält man mit der Beziehung (3) die Werte $E_{c2} = E_c(t_2 = 10^2 \text{ h}) =$

2000 N/mm^2 und $E_{c4} = E_c(t_4 = 10^4 \text{ h}) = 1800 \text{ N/mm}^2$. Das Kriechmodul-Diagramm (Bild 3) zeigt für diese Zeiten bei Spannungen $\sigma \leq 10 \text{ N/mm}^2$ die gemessenen Werte $E_{c2} \approx 2000 \text{ N/mm}^2$ und $E_{c4} = E_c(t_4 = 10^4 \text{ h}) \approx 1700 \text{ N/mm}^2$, also eine sehr gute Übereinstimmung. Für höhere Spannungen ergeben sich jedoch grössere Abweichungen, die auf zunehmende Nichtlinearität im Spannungs-Dehnungsverhalten zurückzuführen sind.

Die Anwendung von Beziehung (7) liefert mit der Kriechbeständigkeit $c_c = 0,88$ für PC aus Tabelle 2 die Werte $E_{c2} \approx 2040 \text{ N/mm}^2$ und $E_{c4} \approx 1870 \text{ N/mm}^2$, die ebenfalls als brauchbare Näherungen gelten können. Makrolon 2805 weist indessen eine Kriechbeständigkeit $c_c = 0,86$ auf, womit sich aus (7) die Werte $E_{c2} \approx 1990 \text{ N/mm}^2$ und $E_{c4} \approx 1790 \text{ N/mm}^2$ ergäben.

Trotz dieser guten Resultate ist zu gewärtigen, dass in andern Anwendungsfällen die

Eigenschaften	Anzahl Werkstoffe	Anteil in Prozent
Total Werkstoffe	39'551	100,0
Zug-Elastizitätsmodul	18'188	46,0
Zug-Kriechmodul 1 h	567	1,4
Zug-Kriechmodul 1000 h	651	1,6
Isochrones Spannungs-Dehnungs-Diagramm	502	1,3
Diagramm Kriechmodul-Zeit	446	1,1
Kriechkurven	454	1,1

Tabelle 1: Anteil von Werkstoffen mit Angabe kriechrelevanter Kennwerte in Material Data Center [3] (Stichtag 12.11.2013, nach [10]).

Abweichungen etwas grösser ausfallen können.

Temperaturabhängigkeit des Kriechmoduls

Dass auch die Temperaturabhängigkeit des Kriechmoduls näherungsweise berücksichtigt werden kann, wurde schon früher dargestellt [9]. Dies ist – ohne an dieser Stelle auf Einzelheiten einzugehen – mittels einer einfachen Potenzfunktion möglich, welche im Einklang mit dem Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip von der Belastungsdauer t unabhängig ist. Mit dieser Temperaturfunktion kann anhand der Beziehung

$$E_c(t, \vartheta) \approx E_c(t, \vartheta_0) \cdot a_0^{\left(\frac{\vartheta}{\vartheta_0} - 1\right)} \quad (8)$$

innerhalb bestimmter, werkstoffabhängiger Temperaturgrenzen aus dem Kriechmodul $E_c(t, \vartheta_0)$ für die Raumtemperatur $\vartheta_0 = 23^\circ\text{C}$ (seltener noch 20°C) als Bezugstemperatur auf den Kriechmodul $E_c(t, \vartheta)$ für die beliebige Temperatur ϑ geschlossen werden. Die Grösse a_0 in der Temperaturfunktion ist in erster Linie werkstoffabhängig (Tabelle 3). Wo solche Werte fehlen, kann man sich mit $a_0 \approx 0,66$ für Thermoplaste und $a_0 \approx 0,83$ für Duroplaste behelfen [9].

Schlussbemerkung

Die vorgestellten Näherungsansätze führen zu Kriechmodulen in realistischer Grösse, so dass auch bei fehlenden Kriechdaten durchaus gute Resultate erreichbar sind. Zu dieser Aussage berechtigen nicht nur die am Beispiel aufgezeigten Zahlenwerte, sondern auch die Erkenntnis, dass die rechnerische Bauteilauslegung ohnehin mit mancherlei unvermeidbaren Unschärfen in allen Teilbereichen des Auslegungsprozesses behaftet ist [10], welche eine sachgerechte Interpretation der Ergebnisse durch die Konstrukteure und die Berechnungsingenieure erfordern.

Werkstoff	Temperaturkoeffizient a_0	Temperaturgrenze [$^\circ\text{C}$]
PA 6 (trocken)	0,45	60
PA 66 (trocken)	0,5	90
POM	0,75	120
PBT	0,4	60
PET	0,7	120
PE-HD	0,5	80
ABS	0,7	80
PC	0,85	120

Tabelle 3: Temperaturkoeffizienten unverstärkter Thermoplaste, ermittelt anhand von Werkstoffdaten verschiedener Hersteller [4], mit Bezugstemperatur 23°C [9].

Kunststoff	c_c	Kunststoff	c_c
PE-HD	0,45	PPA	0,88
PE-LD	0,60	PPS	0,93
PE-UHMW	0,50	PPSU	0,85
PP	0,50	PSU	0,90
PA6	0,73	LCP	0,80
PA66	0,75	ABS	0,68
PA666	0,75	ASA	0,68
PA612	0,70	PMMA	0,80
PA6/6T	0,85	PS	0,80
PA6/6I	0,90	SAN	0,80
PA11	0,58	SB	0,70
PA12	0,70	TPA	0,70
PA46	0,70	TPC	0,75
PBT	0,75	TPU	0,83
PET	0,75	(ASA+PC)	0,80
POM-Homopolymer	0,60	(PBT+ASA)	0,87
POM-Copolymer	0,65	(PBT+PET)	0,85
PC	0,88	(PC+ABS)	0,72
PESU	0,80	(POM+PUR)	0,70

Tabelle 2: Grössenordnungen von Kriechbeständigkeiten, ausgewertet anhand von Daten aus dem Material Data Center [3].

rische Bauteilauslegung ohnehin mit mancherlei unvermeidbaren Unschärfen in allen Teilbereichen des Auslegungsprozesses behaftet ist [10], welche eine sachgerechte Interpretation der Ergebnisse durch die Konstrukteure und die Berechnungsingenieure erfordern.

Literatur

[1] EN ISO 899-1:2003: Kunststoffe – Bestimmung des Kriechverhaltens – Teil 1: Zeitstand-Zugversuch
 [2] EN ISO 899-2:2003: Kunststoffe – Bestimmung des Kriechverhaltens – Teil 2: Zeitstand-Biegeversuch
 [3] Material Data Center – Werkstoffdaten. M-Base Engineering+Software GmbH, Aachen; www.materialdata-center.com
 [4] Campus Werkstoffdatenbank. CWFG mbH, Frankfurt/Main; www.campusplastics.com
 [5] Menges, G., Schmachtenberg, E.: Beschreibung des mechanischen Verhaltens viskoelastischer Werkstoffe mit Hilfe von Kurzzeitversu-

chen. Kunststoffe 73(1983)9, S. 543–546
 [6] Kunz, J.: Kriechbeständigkeit – ein Kennwert für das Kriechverhalten. Kunststoffe 94(2004)1, S. 30–31
 [7] DIN EN ISO 527-1:2012: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze
 [8] Oberbach, K.: Kunststoff-Kennwerte für Konstrukteure, S. 62. Carl Hanser Verlag München 1980
 [9] Kunz, J.: Temperaturabhängigkeit des Kriechmoduls erfassen. Swiss-Plastics 29(2007)3, S. 25–28
 [10] Kunz, J.: Bauteilauslegung mit Augenmass. Kunststoffe 103(2013)12, S. 56–59

Kontakt

IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung
 Oberseestrasse 10
 CH-8640 Rapperswil
 Telefon +41 (0)55 222 44 00
 jkunz@hsr.ch
 www.iwk.hsr.ch