

# KUNSTSTOFFE

# *Synthetics*

Magazin für Herstellung, Verarbeitung  
und Anwendung von Kunststoffen und neuen Werkstoffen

---

VERARBEITUNG

---

Johannes Kunz

Konstruieren mit Kunststoffen

## **KRIECH- UND STOSSVERHALTEN AUS CAMPUS-DATEN ABLEITEN**

---

Separatdruck aus Zeitschrift «Kunststoffe-Synthetics» Nr. 7/2003

**VS/H** MEDIEN  
VOGT-SCHILD/HABEGGER

Vogt-Schild/Habegger Medien AG, Zuchwilerstrasse 21, CH-4501 Solothurn

Konstruieren mit Kunststoffen

# KRIECH- UND STOSSVERHALTEN AUS CAMPUS-DATEN ABLEITEN

Für das Konstruieren mit Kunststoffen sind die Kriechneigung und das schädigungsfreie Arbeitsaufnahmevermögen unter schlagartiger Belastung wichtige mechanische Eigenschaften, auch wenn sie in den Datenbanken nicht dokumentiert sind. Aus Campus-Daten können jedoch einfache Kennzahlen zu ihrer quantitativen Erfassung abgeleitet werden. Diese Kennzahlen sollen dem Praktiker für Quervergleiche zwischen Kunststoffen, bei der Werkstoffwahl und für die Bauteilauslegung dienen.

Das mechanische Verhalten der Kunststoffe ist mit seinen vielfältigen Abhängigkeiten von Belastungszeit, Belastungsgeschwindigkeit, Temperatur, Feuchtigkeit usw. sehr komplex. Ihre Eigenschaften können daher selbst durch so leistungsfähige Werkstoff-Datenbanken wie CAMPUS nur unvollständig beschrieben werden. Zwar bietet CAMPUS nebst einer Auswahl wichtiger Ein-Punkt-Daten (Single Point-Data) die Möglichkeit, auch Kennfunktionen in Diagrammform als Mehr-Punkt-Daten (Multi-Point-Data) abzulegen. Da zu deren Bestimmung ein sehr grosser Prüfaufwand erforderlich ist, vermag es nicht weiter zu verwundern, dass hier bei einer Vielzahl von Kunststoffen leider empfindliche Lücken bestehen.

In der Konstruktionspraxis kommt man oftmals nicht darum herum, die komplexe Wirklichkeit durch vereinfachende Denkmodelle auf die wesentlichen Zusammenhänge zu reduzieren. In besonderem Mass gilt dies bei der Erfassung der mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe. Solche Denkmodelle erleichtern nicht nur den Durchblick, sie ermöglichen auch die näherungsweise quantitative Beschreibung des mechanischen Verhaltens und bilden damit eine Basis für die sachgerechte Werkstoffwahl oder für die rechnerische Auslegung der Konstruktionen.

Mit ihrer Hilfe lassen sich aber auch etwa Lücken schliessen, die – wie oben dargelegt – in den verfügbaren Daten bestehen können.

## Quantitativ erfasstes Kriechverhalten

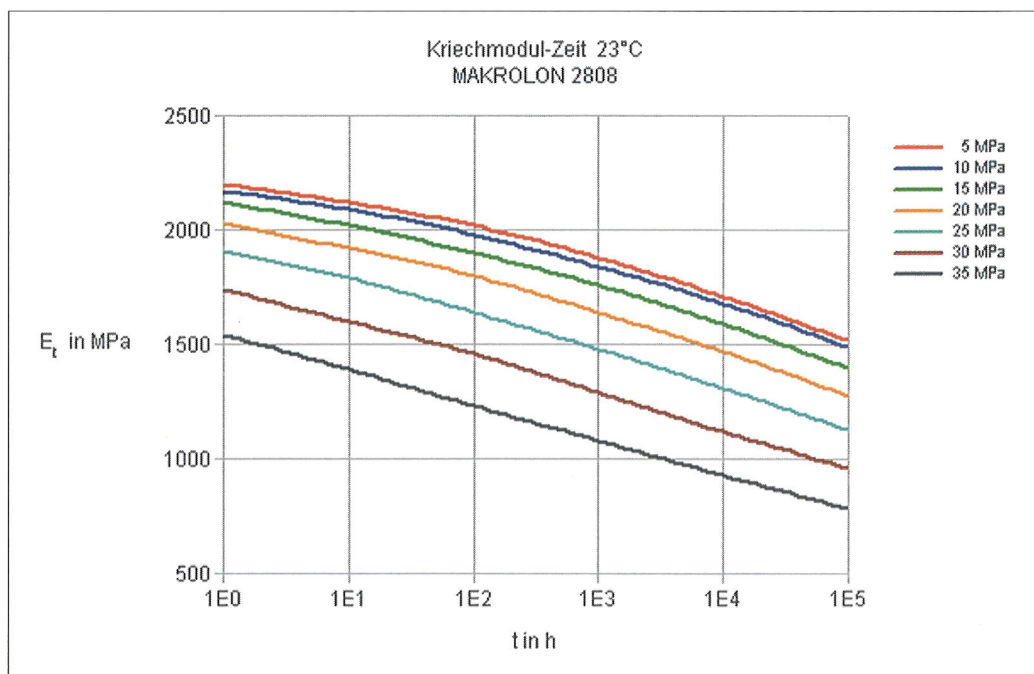
Die Kriechneigung der Kunststoffe ist häufig ein wichtiges Kriterium bei der Werkstoffwahl für Kunststoffkonstruktionen, die langzeitigen Belastungen ausgesetzt sind. Die Polymerwerkstoffe verhalten sich viskoelastisch. Dies bedeutet, dass die Werkstoffsteifigkeit, also der Wider-

stand gegenüber einer Verformung, mit zunehmender Belastungsdauer abnimmt. Unter konstanter Belastung kriecht der Werkstoff, d.h. die sich einstellenden Verformungen wachsen stetig, wenn auch mit abnehmender Verformungsgeschwindigkeit. Bei vorgegebener Verformung äussert sich die Viskoelastizität durch einen zeitabhängigen Abbau der Spannungen, die sog. Relaxation.

Die zeitabhängige Steifigkeit eines Werkstoffs lässt sich zweckmässigerweise durch das Verhältnis der

**Prof. Dipl.-Ing. Johannes Kunz**, Professor für Technische Mechanik und Kunststoffkonstruktion an der HSR Hochschule für Technik, Rapperswil, Dozent für Berechnen und Gestalten von Kunststoffteilen im NDS Kunststofftechnik an der FH Aargau.

Abb. 1: Kriechmodul von Makrolon 2808 (Polycarbonat von Bayer) [1].



konstanten Spannung zur Dehnung in Funktion der Zeit beschreiben, definiert als Kriechmodul

$$E_c(t) = \frac{\sigma}{\varepsilon(t)} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1)$$

Dieser tritt in Berechnungen an Stelle des sonst üblichen Elastizitätsmoduls. Er wird ermittelt durch Messung des Zusammenhangs zwischen Spannung, Dehnung und Belastungszeit und entweder grafisch direkt in Form von Kriechmodul-Diagrammen (Abb. 1) oder indirekt durch isochrone Spannungs-Dehnungs-Diagramme dargestellt. Solche Diagramme finden sich in der Werkstoffdatenbank Campus unter den Mehr-Punkt-Daten. Da sie aber bei vielen Werkstoffen leider fehlen, ist eine Auswertung auf Basis dieser Diagramme nur in wenigen Fällen möglich. Häufiger sind unter den Ein-Punkt-Daten des mechanischen Verhaltens die Kriechmoduln  $E_{C0}$  und  $E_{C3}$  für die Belastungszeiten  $t_0 = 10^0 = 1 \text{ h}$  und  $t_3 = 10^3 = 1000 \text{ h}$  zu finden. Die Kriechneigung kann nun am einfachsten durch den Vergleich der Kriechmoduln für zwei verschiedene Belastungszeiten erfasst werden. Hiefür bieten sich mehrere Möglichkeiten an. Eine zweckmässige Kennzahl für die beliebige Belastungszeit  $t_n$  ergibt sich mit der Definition

$$c_n = \frac{E_c(t_n)}{E_c(t_0)} = \frac{E_{Cn}}{E_{C0}} \quad [-] \quad (2)$$

Darin bedeutet  $t_0$  die Belastungszeit 1 h. Je grösser der Quotient  $c_n$  ist, umso kleiner ist die Kriechneigung

des betreffenden Kunststoffes, und umgekehrt (Tab. 1). So würde der Extremfall  $c_n = 1$  einen Werkstoff mit zeitlich konstanter Steifigkeit beschreiben. Damit eignet sich der Quotient (2) sehr gut für Quervergleiche unter verschiedenen Kunststoffen sowie als Kennzahl für die Werkstoffauswahl. Soll  $c_3$  beispielsweise einen bestimmten Mindestwert erreichen, so kann im Campus-Suchprofil der Ein-Punkt-Daten für  $E_{C3}$  eine geeignete untere Grenze, für  $E_{C0}$  eine um  $1/c_3$  obere Grenze definiert werden. Eine gewisse Einschränkung besteht allerdings darin, dass der damit erhaltene Zahlenwert nur für Raumtemperatur gültig ist. Selbstverständlich lässt sich die Kennzahl  $c_n$  auch anhand der Kriechmodul-Diagramme und isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagramme auswerten.

**Arbeitsaufnahmevermögen abschätzen**

Wissenschaftliche Untersuchungen zu schlag- oder stossartigen Belastungen zeigen, dass sich bei zunehmender Belastungsgeschwindigkeit ein immer ausgeprägteres linear-elastisches Werkstoffverhalten bis hin zum Spröbruch einstellt [2]. Solche Belastungen erfordern vom Werkstoff eine ausreichende Zähigkeit, d.h. ein bestimmtes minimales Arbeitsaufnahmevermögen, und zwar so, dass die Konstruktion bzw. der Werkstoff keinen Schaden nimmt. Die genormten, in den Campus-Ein-Punkt-Daten aufgeführten Charpy-Schlagzähigkeitsprüfungen sind für die Beurteilung

dieses Arbeitsaufnahmevermögens nicht geeignet, da deren Messwerte die Energie für die bleibenden Verformungen und die Zerstörung der Probe mit enthalten.

Dennoch lässt sich, ausgehend von mechanischen Campus-Ein-Punkt-Daten, aufgrund einer einfachen Überlegung ein Zähigkeitswert bestimmen, der sowohl für die Werkstoffauswahl als auch für die rechnerische Auslegung von Konstruktionen unter schlagartiger Belastung beigezogen werden kann.

Eine makroskopisch schädigungsfreie schlagartige Belastung lässt sich bei Kunststoffen mit zähem Verhalten bis etwas unterhalb der Streckspannung annehmen, bei Kunststoffen mit sprödem Verhalten bis unterhalb der Bruchfestigkeit. Das Arbeitsaufnahmevermögen pro Volumeneinheit berechnet sich mit  $\epsilon_G$  als Grenzwert der schädigungsfreien Verformung und  $\sigma_G$  als zugehörigem Spannungs-Grenzwert grundsätzlich zu

$$w_G = \int_0^{\epsilon_G} \sigma \cdot d\epsilon \approx \frac{1}{2} \sigma_G \cdot \epsilon_G \quad [\text{Nmm/mm}^3 = \text{N/mm}^2] \quad (3)$$

was der Fläche unter der Spannungs-Dehnungs-Kurve bis zum Dehnungs-Grenzwert  $\epsilon_G$  entspricht (Abb. 2).

Die Annäherung des Integrals in (3) durch das Produkt stellt eine Vereinfachung dar, die das Resultat auf die sichere Seite bringt, da sie die Krümmung der in aller Regel degressiv verlaufenden Spannungs-Dehnungs-Kurven vernachlässigt. Der Effekt dieser Linearisierung lässt sich unter der Annahme eines sinusförmigen Kurvenverlaufs zwischen Nullpunkt und Grenzwert abschätzen: Mit der linearen Approximation wird das Arbeitsaufnahmevermögen um den Faktor  $4/\pi = 0,87$  zu gering berechnet. Bei Kunststoffen mit zähem Verhalten können somit die Spannung und die Dehnung an der Streckgrenze eingesetzt werden, bei sprödem Verhalten die Werte an der Bruchgrenze des Kurzzeit-Zugversuchs (Tab. 2).

Tab. 1: Kriechneigung ausgewählter Kunststoffe, ausgedrückt durch den Quotienten  $c_3$  für  $t_3 = 10^3 \text{ h}$  nach Gleichung (2).

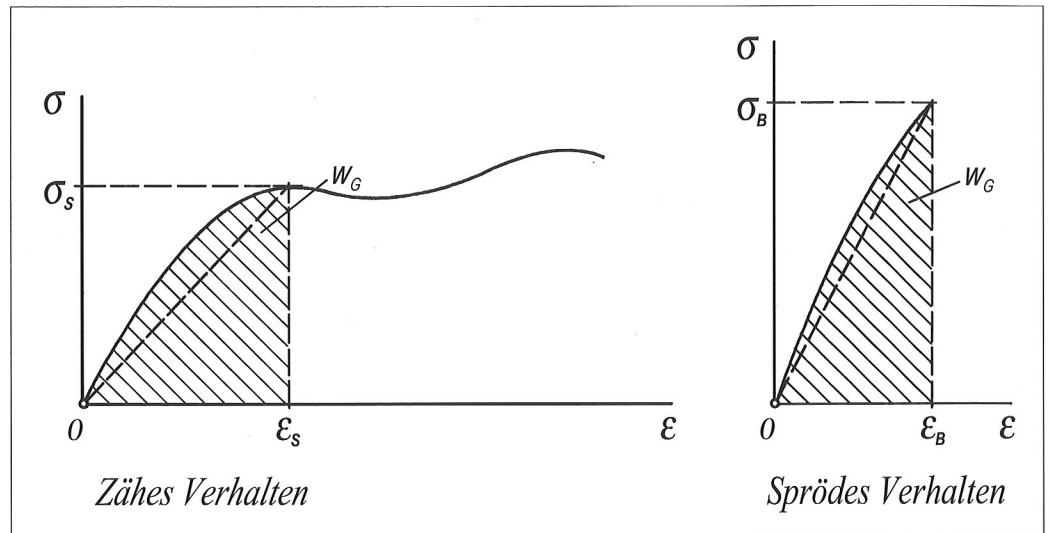
Kunststoff	Typ	CAMPUS-Ein-Punkt-Daten Kriechmodul		Kriechneigung
		$E_{C0}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{C3}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$c_3$ [--]
ABS	Ronfalin STA 60	1500	800	0,53
PA6-GF25	Ultramid B3WG25	3500	3000	0,86
PC	Makrolon 3108	2200	1900	0,86
PMMA	Plexiglas 7H	2900	2300	0,79
POM	Hostaform C 13021	2500	1300	0,52
LCP	Vectra A 950	9000	6600	0,73



Die mit diesem Denkmodell erhaltenen Ergebnisse können leider nicht direkt mit solchen aus der früheren wissenschaftlichen Literatur [3] verglichen werden, denn die meisten damaligen Kunststofftypen sind seither durch verbesserte Einstellungen ersetzt worden. Da die Resultate aber in den Größenordnungen übereinstimmen, kann gefolgert werden, dass die Näherung (3) durchaus realistische Werte für das schädigungsfreie Arbeitsaufnahmevermögen ergibt (Tab. 3). Die so bestimmten Größen für  $w_G$  lassen sich im Bedarfsfall noch um einen frei wählenden Sicherheitsfaktor  $S > 1$  auf zulässige Werte herabsetzen. Dies ist eine gute Grundlage für die rechnerische Auslegung schlagartig beanspruchter Kunststoffkonstruktionen [3, 4].

**Datenbanken intelligent nutzen**

Die hier vorgestellten Berechnungsansätze zur Erfassung der Kriechneigung und des schädigungsfreien Arbeitsaufnahmevermögens von Kunststoffen beruhen auf einfachen Denkmodellen, mit denen das reale



Werkstoffverhalten näherungsweise beschrieben und quantifiziert werden kann. Sie verwenden Werkstoffkennwerte aus Datenbanken wie Campus und erweitern zugleich deren Verwendbarkeit für die Konstruktionspraxis über ihre unmittelbare Aussage hinaus. Damit sind sie nützliche Beispiele dafür, wie Datenbanken sonst noch intelligent genutzt werden können.

**Literatur**

- [1] Campus Werkstoffdatenbank. CWFG mbH, Frankfurt/Main. [www.campusplastics.com](http://www.campusplastics.com)
- [2] Menges, G., Haberstroh, E., Michaeli, W., Schmachtenberg, E.: Werkstoffkunde Kunststoffe. Carl Hanser Verlag München, 2002, 5. Aufl., S. 217 ff.
- [3] Boden, H.-E.: Das mechanische Verhalten von Thermoplasten bei stossartiger Belastung. Diss. RWTH Aachen, 1983
- [4] Kunz, J., in: Kunz, J., Michaeli, W., Herrlich, N., Land, W. (Hrsg.): Kunststoffpraxis: Konstruktion, Kap. 7/7.4.4. WEKA Media GmbH, D-Kissing, Aktualisierungsstand April 2003

Abb. 2: Arbeitsaufnahmevermögen pro Volumeneinheit in den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen von Kunststoffen mit zähem und mit sprödem Verhalten (schematisch).

Mechanisches Verhalten	Merkmal	Arbeitsaufnahmevermögen pro Volumeneinheit [Nmm/mm <sup>2</sup> ]
zäh	Streckgrenze vorhanden	$w_G \approx \frac{1}{2} \sigma_s \cdot \epsilon_s$
spröd	Keine Streckgrenze vorhanden	$w_G \approx \frac{1}{2} \sigma_B \cdot \epsilon_B$

Tab. 2: Arbeitsaufnahmevermögen von Kunststoffen mit zähem und mit sprödem Verhalten.

Kunststoff	CAMPUS-Ein-Punkt-Daten				Arbeitsaufnahmevermögen $w_G$ [Nmm/mm <sup>2</sup> ]	
	Streckspannung $\sigma_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Streckdehnung $\epsilon_s$ [%]	Bruchspannung $\sigma_B$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung $\epsilon_B$ [%]	nach Gl. (3)	nach Lit. [3]
PA6-GF25	--	--	160	3,5	2,8	1,6
PC	63	6	--	--	1,9	>2,1
PC-GF20	--	--	100	3,5	1,8	>2,2
PMMA	--	--	76	5,5	2,1	1,5
POM	65	9	--	--	2,9	>2,6
PVC-U	45	5	--	--	1,1	1,3

Tab. 3: Arbeitsaufnahmevermögen ausgewählter Kunststoffe – Gegenüberstellung der Näherung (3) mit Werten aus der wissenschaftlichen Literatur.