

Henne und Ei des E-Moduls

Was Professoren den Studierenden zum E-Modul sagen sollten

Jaroschek, Christoph, Prof. i.R. der Hochschule Bielefeld, Christoph.Jaroschek@hsbi.de

Zusammenfassung Für einen Konstrukteur ist der E-Modul eine wichtige weitgehend konstante Größe. Mit den Formeln der technischen Mechanik kann damit die Bauteilgestalt so festgelegt werden, dass eine definierte Belastung nicht zu einer Verformung bzw. zum Bauteilversagen führt. Bei Kunststoffen ist der E-Modul anders als bei Metallen nicht konstant. Für die Auslegung sollte eine Kennwert-Funktion angewendet werden, gegebenenfalls muss auch ein neues Prüfverfahren zum Einsatz kommen.

Stichworte: E-Modul, Zugversuch, DMA, mechanische Auslegung

1. Unterschiedliche Blickwinkel

Der E-Modul, auch Zugmodul genannt, geht auf den Physiker Thomas Young (*1773) zurück. Im englischsprachigen Bereich heißt er Young's Modulus. Er wird zunächst als Materialkonstante verstanden und beschreibt die elastische Dehnung eines Materials bei einer vorgegebenen Spannung, konkret die Steigung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms.

Der E-Modul hat für zwei Wissenschaftsbereiche eine Bedeutung (s. Bild 1):

- In der Werkstofftechnik wird der E-Modul als Kennwert ermittelt. Hier sollen möglichst konstante Randbedingungen dafür sorgen, dass Messwerte gut vergleichbar sind. Dazu gehört auch die Wiederholbarkeit von Messungen.
- Die Anwendung des E-Moduls erfolgt in der Konstruktion. Mit den Berechnungsformeln der technischen Mechanik kann für eine angenommene Belastung mit diesem Kennwert eine Bauteilgestalt festgelegt werden. Solange das Bauteil geringeren Lasten ausgesetzt sein wird, wird sich das Bauteil nicht über eine festgelegte Grenze hinweg verformen.

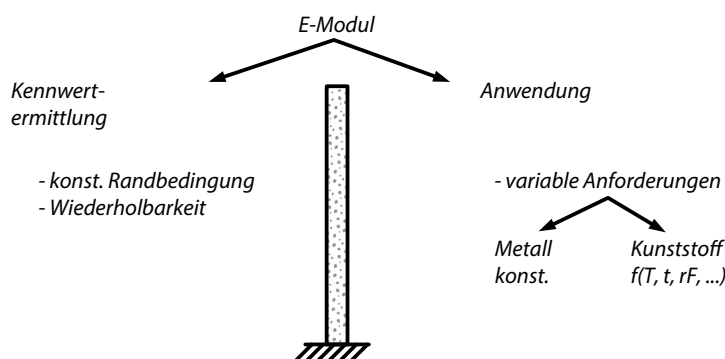


Bild 1: Zwei unabhängige Wissensgebiete zum E-Modul

Diese beiden Bereiche sind leider kaum miteinander verknüpft. Die Werkstoffwissenschaftler freuen sich über eine möglichst exakte Messung. Es werden Maschinen entwickelt und die Prüfbedingungen sind durch DIN-Normen präzise beschrieben.

Die Anwender sind in der Regel Konstrukteure, deren Konstruktionen sehr unterschiedliche Anforderungen erfüllen müssen. Für Konstruktionen aus Metall ist die Anwendung des E-Moduls eher unkritisch, denn für Metalle ist er weitgehend konstant. Anders verhält es sich mit den Kunststoffen. Hier ist der E-Modul in keiner Weise konstant, er hängt sehr stark ab von der Temperatur (T) des Werkstücks, von der Dauer einer Belastung (t), von der Feuchtigkeit (rF).

Das Problem besteht nun darin, dass mit der zunehmenden Bedeutung von Kunststoffen seit circa 1950 der Einfachheit halber die Messmethoden der Werkstofftechnik für die Metalle für die Kunststoffe übernommen wurden. Im Prinzip liegt hier ein *Henne und Ei Problem* vor, denn es stellt sich die Frage, ob aus dem Blickwinkel der Anwendung heraus andere Messmethoden entstanden wären.

Erste Messungen des E-Moduls für Kunststoffe wurden nicht mit dem Zugversuch gemacht. In den Anfängen der Kunststoffzeit waren die Zugprüfmaschinen für Metalle ausgelegt und für Messungen mit Kunststoffen viel zu groß. Sie konnten keine Messwerte erzeugen. Daher hat man zu dieser Zeit den 3-Punkt-Biegeversuch angewendet und aus der Durchbiegung auf den E-Modul geschlossen [1]. Der Wert heißt dann Biegemodul.

Noch heute werden in Datenblättern Werte für den Biegemodul parallel zum E-Modul/Zugmodul angegeben. Die Werte für Biegemodul und E-Modul sind sehr ähnlich und verwirren die meisten Konstrukteure. Man sollte bedenken, dass es in der technischen Mechanik keine Unterscheidung zwischen Biegung und Dehnung unter Zugbelastung gibt. Leider beharren die Kennwertermittler darauf, dass der Biegemodul seine Bedeutung hat, und weigern sich, den Biegemodul endlich in der Mottenkiste der Geschichte verschwinden zu lassen. Hier wird klar deutlich, dass das Gebiet der Werkstofftechnik losgelöst vom Gebiet der Anwendung arbeitet. Ohne das Wissen um die Anwendung wird leider nicht Sinnvolles erzeugt, sondern eher Verwirrung gestiftet.

2. Modellvorstellung zum E-Modul

Young beschreibt ausschließlich die Elastizität eines Körpers unter einer Last [2]. Dies kann mit dem Modell einer Feder dargestellt werden (Bild 2). Bei Metallen entsteht diese Elastizität aufgrund der atomaren Anziehungskräfte. Bei einer Änderung der Temperatur von Raumtemperatur auf 400 °C beobachtet man wegen der thermischen Dehnung einen Abfall des E-Moduls bei Stählen um circa 15 % [3].

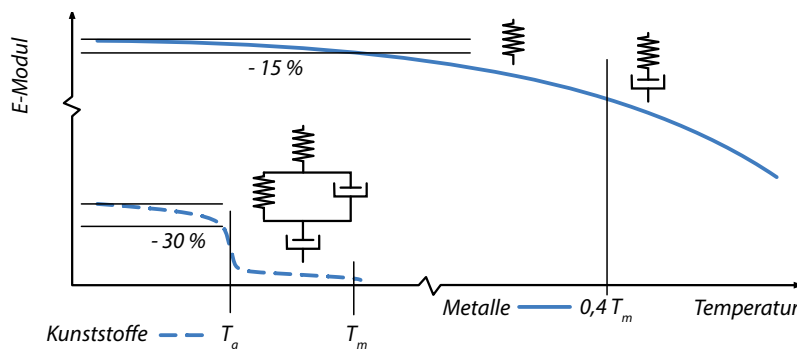


Bild 2: Temperaturabhängigkeit des E-Moduls bei Metallen und Kunststoffen

Ab circa $0,4 T_m$ ist mit einer zusätzlichen Zeitkomponente zu rechnen, bei längerer statischer Belastung beginnt das Material zu kriechen [4]. Für höhere Temperaturen sollte daher die Modellvorstellung durch einen zusätzlichen in Reihe geschalteten Dämpfer dargestellt werden. Dieser würde unter Last langsam ausfahren und stellt somit die zeitliche Komponente dar. Man sollte aber berücksichtigen, dass der überwiegende Anteil der Metalle bei gewöhnlichen Temperaturen bis $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingesetzt werden und hier der Abfall des E-Moduls eher unbedeutend ist.

Bei Kunststoffen ist auch aufgrund der geringeren Dichte der E-Modul im Vergleich zu den Metallen ca. um den Faktor 100 kleiner. Aufgrund des molekularen Aufbaus sind Verformungen teilweise reversibel. Als Modellvorstellung für die mechanische Belastung wird das Burgers-Modell verwendet, das aus einer Reihenschaltung und einer Parallelschaltung von Federn und Dämpfern gebildet wird. Die Parallelschaltung würde bei einer Entlastung wieder zurückfahren und steht somit für den reversiblen Anteil.

Unterhalb der Glasübergangstemperatur T_g verhält sich ein Kunststoff weitgehend elastisch. Ähnlich wie bei den Metallen kann man bei einer kurzzeitigen Belastung als Analogiemodell die Reihenschaltung aus einer Feder und einem Dämpfer verwenden. Wegen der geringen Schmelztemperatur und der geringen Dichte muss man im Bereich von Raumtemperatur bis ca. $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit einem Abfall des E-Moduls von ca. 30 % rechnen. Mit Erreichen oder Überschreiten von T_g können Molekülketten gegeneinander abgleiten, wodurch der E-Modul deutlich vermindert wird.

3. Einflussgrößen auf den E-Modul bei Kunststoffen

Der Zugversuch liefert für Metalle hinreichend präzise Werte, mit denen Konstrukteure die Verformung eines Bauteils unter Last abschätzen können. Der Zugversuch findet üblicherweise bei Raumtemperatur statt. Die Veränderung des E-Moduls bei höheren Temperaturen wird in der Regel nicht beachtet, der Modul wird vereinfacht als Materialkonstante angesehen. Lediglich für Bauteile, die bei höheren Temperaturen als $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ zum Einsatz kommen, werden zusätzliche Kennwerte berücksichtigt. Das betrifft in aller Regel die Zeitstandfestigkeit, also die maximale Belastbarkeit bei längeren Belastungszeiten und hohen Temperaturen.

Für Kunststoffe hat man die bewährten Verfahren und hier konkret den Zugversuch zur Messung des E-Moduls übernommen und damit eine Vielzahl von Unzulänglichkeiten erzeugt.

3.1. Prüfkörperdicke

Während die Prüfkörper für die Messung mit Metallen überwiegend mechanisch bearbeitete, runde Schulterstäbe sind, werden für die Messung der Kunststoffe spritzgegossene flache Schulterstäbe mit einer Dicke von 4 mm (Typ 1A) verwendet [5]. Man bedenke, dass übliche Spritzgussteile eher eine Wanddicke zwischen 1 mm und 2 mm haben. Vordermann und Kunz haben gezeigt, dass die Wanddicke einen großen Einfluss auf den E-Modul hat [6, 7]. Werte mit 2 mm dicken Prüfkörpern sind 30-50 % höher im Vergleich zu den Normprüfkörpern. Die Ursache für die Abweichungen zu den Normprüfstäben

können begründet werden mit Randschichtstrukturen der Spritzgussteile und unterschiedlich hohen Kristallisationsgraden. Auf diese Weise wird zunächst überdimensioniert, denn der Konstrukteur verwendet die nach Norm gemessenen, kleineren Werte.

3.2. Feuchtigkeit

Der E-Modul korreliert mit der Dichte. Einige Materialien sind in der Lage, Feuchtigkeit aufzunehmen, wodurch Wassermoleküle zwischen den Ketten eingelagert werden und diese geringfügig aufweiten. Das entspricht in gewisser Weise eine Verringerung der Dichte. Hierzu zählt speziell Polyamid. Bild 3 zeigt für ein unverstärktes Polyamid, die Änderung der Spannungs-Dehnungs-Kurve des Zugversuches in Abhängigkeit von der Temperatur und der Feuchtigkeit.

Man bedenke, dass Kunststoffe üblicherweise im getrockneten Zustand verarbeitet werden und dann zunächst trocken vorliegen. Nach einer Lagerzeit an normaler Umgebung nehmen diese Materialien Feuchtigkeit auf, je nach Luftfeuchtigkeit und Temperatur geben diese Materialien auch wieder Feuchtigkeit ab. Dieses Diagramm zeigt sehr deutlich, dass solche Materialien in keiner Weise einen konstanten E-Modul haben. Je nach Einsatz Ort und Umgebungsbedingungen kann der E-Modul um bis zu 70 % im Vergleich zum Wert des getrockneten Materials kleiner sein.

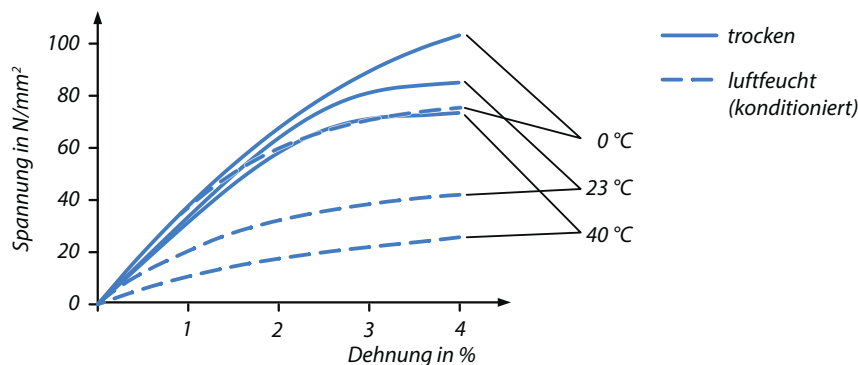


Bild 3: Änderung der Spannungs-Dehnungs-Kurven in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchtigkeit

3.3. Temperatur

Bild 4 zeigt den Verlauf des E-Moduls über der Temperatur für zwei ausgewählte amorphe Materialien (ABS) und ein teilkristallines Material (PA). Man erkennt deutlich für jedes der Materialien einen moderaten Abfall des E-Moduls unterhalb der Glasübergangstemperatur (T_g). Für die amorphen Materialien gilt, dass diese immer unterhalb T_g eingesetzt werden, das ist bei ABS ca. 100 °C. Ein teilkristallines Material hingegen wird häufig auch oberhalb der Glasübergangstemperatur verwendet, die Messwerte von PA zeigen im Bereich von 50 °C einen drastischen Abfall der Messwert.

Man sollte bedenken, dass ein Großteil der technischen Kunststoffe teilkristallin ist, lediglich ABS, PC und SAN sind amorph. Nur diese Materialien sind hinsichtlich ihres mechanischen Verhaltens den Metallen ähnlich, wenn auch die Änderung des E-Moduls erheblich stärker durch die Temperatur beeinflusst wird.

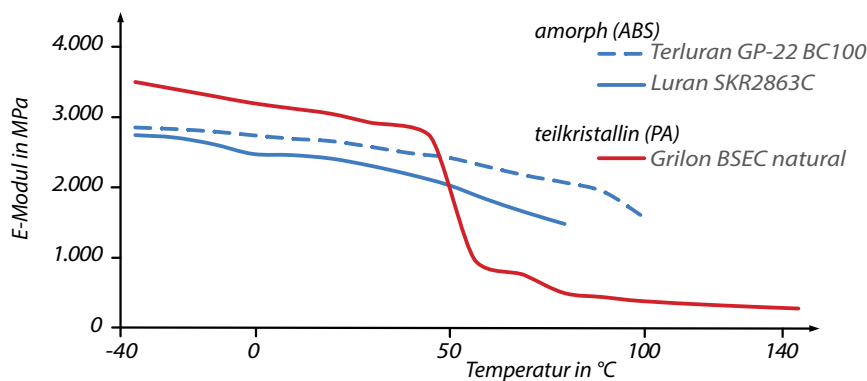


Bild 4: E-Modulfunktion der Temperatur für ABS und Polyamid (Datenquelle campusplastics.com)

Für teilkristalline Materialien müsste zu der Angabe des E-Moduls die Glasübergangstemperatur angegeben werden, damit der Konstrukteur weiß, ob das Material für den vorgesehenen Anwendungsfall und bei einer zu erwartenden Betriebstemperatur zumindest annähernd den E-Modul hat, der im Datenblatt steht und mit dem Zugversuch unter Normbedingungen, d.h. bei Raumtemperatur, gemessen wurde.

Konstrukteure wünschen einen möglichst hohen Modul und wählen möglicherweise faserverstärkte Materialien. Diese sind insgesamt etwas teurer im Vergleich zu den unverstärkten Materialien, aber auch diese Materialien ändern den E-Modul im üblichen Temperatur Einsatzbereich drastisch (Bild 5). Man achte besonders auf die Änderung im Bereich der Glasübergangstemperatur.

Die Glasübergangstemperatur von Kunststoffen wird durch mögliche Feuchtigkeit beeinflusst. Das betrifft speziell Polyamide.

3.4. Zeit der Belastung

Während das Kriechen von Metallen erst bei einer lang andauernden Belastung und bei Temperaturen oberhalb $0,4 T_m$ bedeutend ist, findet das Kriechen von Kunststoffen bereits bei Belastung und moderat geringer Dauer oberhalb T_g deutlich statt.

Mit Hilfe von Kriechversuchen und über den Umweg einer Auftragung der Ergebnisse in isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagrammen lässt sich der Kriechmodul ableiten [4, 8]. Dieser Kriechmodul ist kein Einzelnennwert, sondern vielmehr eine Funktion in Abhängigkeit von Belastungshöhe und -dauer (Bild 6).

Bei genauer Betrachtung ist dieser Kriechmodul keine akademische Meisterleistung, vielmehr eine Nebelkerze für dunkle Elfenbeintürme. Über den Kriechmodul kann der Konstrukteur für eine Last σ_x mit der Dauer t_x eine Bauteilform bzw. Dicke berechnen, bei der das Bauteil sich nicht unzulässig bleibend verformt. Diese Vorgehensweise setzt zunächst ein isochrones Spannungs-Dehnungs-Diagramm voraus. Mit diesem Diagramm kann der Konstrukteur unmittelbar für die entsprechende Last bei einer Belastungszeit t_x die Dehnung ablesen. Die Berechnung eines Kriechmoduls, mit dem man über eine Rückrechnung wieder auf die Dehnung kommt, ist mindestens überflüssig. Kunz hat gezeigt,

dass nur für circa 1 % aller Kunststoffe isochrone Spannungs-Dehnungs-Diagramme vorliegen und schlägt vor, Abschätzungen für Langzeitbelastungen aus den Kurzzeit Zugversuchen vorzunehmen [9].

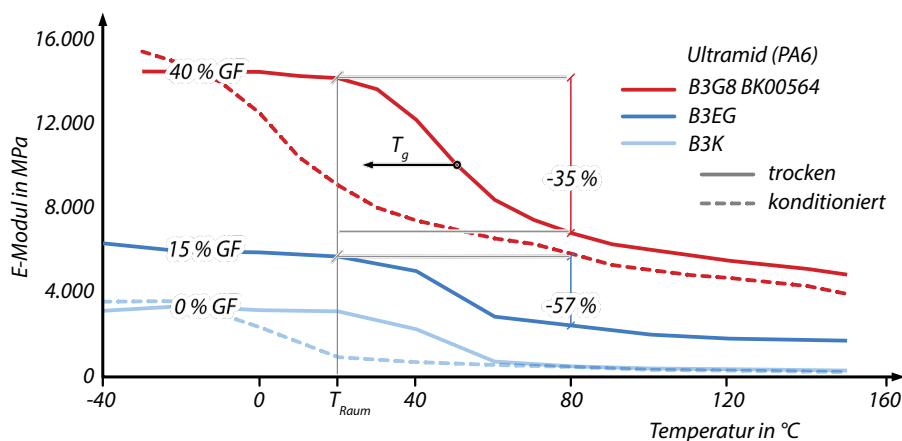


Bild 5: E-Modul von unverstärkten, Glasfaser verstärkten, trockenen und konditionierten PA6 (Datenquelle campus-plastics.com)

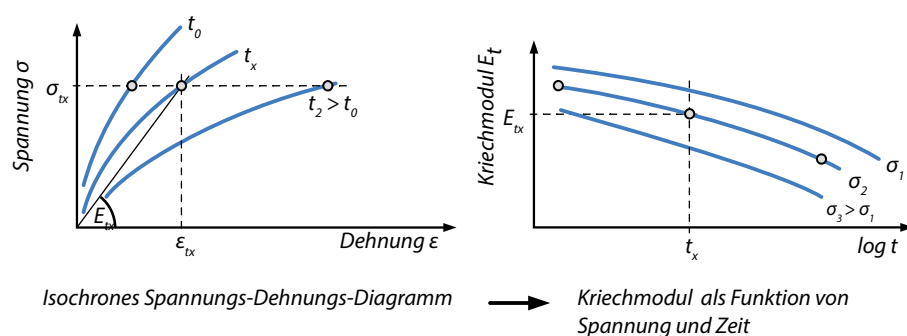


Bild 6: Kriechmodul-Kurvenschar, entwickelt aus einem isochronen Spannung-Dehnungs-Diagramm

4. Alternative zum Zugversuch

Eine Alternative zum Zugversuch ist die DMA (dynamisch-mechanische Analyse). Hier wird ein Material zyklisch z. B. tordierend belastet. Wenn man an einer Seite eines flächigen Prüfkörpers eine Drehbewegung einleitet, ergibt sich auf der anderen Seite, je nach Weichheit des Materials, eine verzögerte Antwort Bewegung. Aus dem Phasenversatz lässt sich auf den E-Modul schließen.

Dieser E-Modul ist nicht zwingend identisch mit dem aus dem Zugversuch. Es stellt sich jedoch die Frage, welche Genauigkeit der dem Konstrukteur zur Verfügung gestellte Wert haben muss.

Die in Bild 3 und 4 gezeigten E-Modul-Temperatur-Kurven sind DMA-Versuchsergebnisse. Heute verfügbare Maschinen können diese zyklische Belastung durchlaufen, während der Prüfkörper langsam kontrolliert erwärmt wird.

Leider sind diese temperaturabhängigen Daten kaum verfügbar. In der Datenbank campusplastics.com sind von insgesamt 9092 gelisteten Kunststoffmaterialien nur für 482

Materialien diese Funktionsdaten verfügbar. Tabelle 1 zeigt für einige Kunststoffsorten die Zahl aller verfügbaren Kunststoffe und im Vergleich hierzu die Anzahl solcher mit der Angabe des temperaturabhängigen E-Moduls. Für einige ausgewählte Sorten ist jeweils der E-Modul für 20 °C bzw. 80 °C angegeben.

Tabelle 1: Angaben zum E-Modul aus campusplastics.com für ungefüllte Kunststoffe

	alle Mat.	mit E(T)	E _{min} in MPa	E _{max} in MPa		E _{20 °C} in MPa	E _{80 °C} in MPa	Δ E _{20 → 80}	T _g in °C
ABS	459	11	1900	3100	Terblend N NG-02 EF	3151	1403	-55,5 %	105
ASA	95	22	2000	2600					100
PC	90	5	2000	2600	Luran S KR2864C	2559	1978	-22,7 %	148
					Luran S KR2861/1C	2370	1990	-16,0 %	
PS	9	6	2000	3300	Styrolution PS 158N/L	3470	2420	-30,3 %	100
					Styrolution PS 454N	2370	622	-73,8 %	
SAN	12	10	3700	3900	Luran 358N	4049	2737	-32,4 %	100
					Luran HH-120	4620	3130	-32,3 %	
POM	123	35	1400	3100	Delrin 127UV NC010	3117	1240	-60,2 %	-60
					Ultraform N2640 Z2 Q600	2130	820	-61,5 %	

5. Resümee

Trotz aller Richtigkeit von Messungen des E-Moduls nach Norm erhält ein Konstrukteur leider keine sinnvolle Angabe zum mechanischen Verhalten eines Kunststoffes. Vielen Konstrukteuren ist die spezielle Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften eines Kunststoffs nur eingeschränkt bewusst. Wenn man diesen Konstrukteuren einen einzelnen E-Modulwert zur Verfügung stellt, ist zu vermuten, dass sie davon ausgehen, dass man mit diesem Wert analog zum Vorgehen der Metalle eine Berechnung und Dimensionierung vornehmen kann – und alles ist gut!

Eigentlich sollte der mit einem **Zugversuch gemessene E-Modul für die Kunststoffe unter Strafe verboten** werden. Da es bereits Maschinen gibt, die den E-Modul als Funktion der Temperatur darstellen können, sollten alle Rohstoffhersteller verpflichtet werden, für ihr Material eine Temperaturfunktion bereitzustellen. Aus diesen Kurven wird für teilkristalline Materialien auch die Glasübergangstemperatur ersichtlich. Im Bereich dieser Temperatur ändert sich die Steifigkeit des Materials ganz besonders. Die in Tabelle 1 angegebenen Glasübergangstemperaturen sind übrigens nicht in campusplastics.com angegeben.

Konstrukteure sollten mindestens die Glasübergangstemperatur für Ihr Material kennen, wenn sie schon nicht die temperaturabhängigen E-Modulwerte erhalten und wenn ihre Konstruktion auch bei Temperaturen oberhalb von 20 °C eingesetzt werden soll.

Literatur

- [1] Jaroschek, C., Das Ende des Biegemodul, Nov. 2012, Kunststoffe.de
- [2] Young, T., A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts, London, 1807
- [3] Münstermann, S., Einflussgrößen auf den Elastizitätsmodul von Stählen für den Fahrzeugbau, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), Schriftenreihe Nr. 182, Frankfurt, 2004
- [4] Jaroschek, C., Kordisch, T, Dahms, M., Weißbach - Werkstoffe und ihre Anwendungen, 21. Auflage, Springer Vieweg Verlag, 2026
- [5] DIN EN ISO 294-1:1998, Kunststoffe – Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten – Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Herstellung von Vielzweckprobekörpern und Stäben
- [6] Vordermann, Y., Ehrig, F. Kunz, J., Probekörperdicke beeinflusst mechanische Eigenschaften, Kunststoffe 9/2013
- [7] Kunz, J., Bauteilauslegung mit Augenmaß, Kunststoffe 12/2013
- [8] DIN EN ISO 899-1:2003, Bestimmung des Kriechverhaltens Teil 1: Zeitstand-Zugversuch
- [9] Kunz, J., Kriechmodul-Abschätzung und Kriechbeständigkeit, KunststoffXtra 03/2014 (Seite 23-26)

Bildmaterial für die Lehre zur freien Verfügung

Henne-Ei-Problem des E-Modul © 2026 by Christoph Jaroschek is licensed under Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International.

To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>