

Prüfung von Kunststoffen und von schwingungsgedämpften geschichteten Systemen

Biegeschwingungsversuch

Bestimmung des komplexen Elastizitätsmoduls

DIN
53 440
 Blatt 2

 Testing of plastics and damped laminated systems; bending vibration test;
 determination of complex modulus of elasticity

Zu dieser Norm gehören:

- DIN 53 440 Blatt 1 Prüfung von Kunststoffen und von schwingungsgedämpften geschichteten Systemen; Biegeschwingungsversuch; Allgemeine Grundlagen zur Bestimmung der dynamisch-elastischen Eigenschaften stab- oder streifenförmiger Probekörper (Ausgabe April 1973)
- DIN 53 440 Blatt 3 —; —; Bestimmung von Kenngrößen schwingungsgedämpfter Mehrschichtsysteme (Ausgabe April 1973)

Textteile, die kursiv gesetzt sind, enthalten zusätzliche Hinweise und Erläuterungen, insbesondere zur Prüfanordnung mit einseitig fest eingespanntem Probekörper.

1. Zweck und Anwendung

Der komplexe Elastizitätsmodul ist eine Werkstoffkenngröße. Er ist ein Maß für die viskoelastischen Eigenschaften bei schwingender Beanspruchung. Bei Kunststoffen ist er je nach Stoffzustand mehr oder weniger stark von der Schwingungsfrequenz und der Temperatur abhängig. Die Bestimmungsgrößen, Speichermodul, Verlustmodul und Verlustfaktor (siehe Abschnitt 2.1) werden in Abhängigkeit von der Frequenz bei bestimmten Temperaturen als Parameter im Bereich der Hörfrequenzen oder in Abhängigkeit von der Temperatur bei bestimmten Parametern der Frequenz gemessen.

Die viskoelastischen Eigenschaften der Kunststoffe hängen vom Stoffzustand und von den in den verschiedenen Zustandsbereichen wirksamen molekularen Relaxationsprozessen ab. Besonders die Temperaturkurven der viskoelastischen Kenngrößen bei fester Frequenz vermitteln einen Überblick über die Zustandsbereiche (siehe DIN 7724). Die Verläufe im einzelnen lassen Schlüsse auf die molekularen Relaxationsprozesse zu. Das Prüfverfahren ist damit wie der Torsionsschwingungsversuch (siehe DIN 53 445) für die Analyse des molekularen Relaxationsverhaltens bei dynamisch-mechanischer Beanspruchung mit kleinen Verformungen (im linearen Bereich) geeignet (mechanische Spektrometrie).

Die Messungen bei Frequenzen im Bereich 10 bis 1000 Hz ergeben darüber hinaus Hinweise auf das Verhalten harter Kunststoffe im Glaszustand bei Stoß- und Schlagbeanspruchungen, wie sie beispielsweise im Schlagbiegeversuch (siehe DIN 53 453) vorliegen.

Da der Frequenzbereich den der Hörfrequenzen umfaßt, gibt der Biegeschwingungsversuch auch unmittelbar Auskunft über akustische Eigenschaften von Kunststoffen, insbesondere die innere Dämpfung, die im Hinblick auf das Dröhnen von Bauteilen aus formbeständigen Kunststoffen von Interesse ist.

Umfassende Informationen über die viskoelastischen Eigenschaften sind nur zu gewinnen, wenn die Kenngrößen als Funktionen der Frequenz und der Temperatur in genügend großen Bereichen gemessen werden. Messungen bei Einzelwerten der Frequenz und der Temperatur sind nur bedingt von Wert (z. B. für die Fertigungskontrolle oder die Abnahmeprüfung), wenn das Verhalten der Stoffe in größeren Frequenz- und Temperaturbereichen bekannt ist, oder wenn zu entscheiden ist, ob ein Kunststoff bei Raumtemperatur (siehe DIN 50 014) im harten oder im weichelastischen Zustand ist.

2. Begriffe

Die in Klammern kursiv angegebenen Übersetzungen von Benennungen in die englische Sprache sind nicht Gegenstand dieser Norm.

2.1. Komplexer Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul beschreibt den Zusammenhang zwischen der Spannung σ und der Dehnung ϵ im Falle der Stabdehnung mit ungehinderter Querkontraktion bei hinreichend kleiner Dehnung (im linearen Bereich)¹⁾. Bei periodischen, kleinen Dehnungen mit sinusförmigem zeitlichen Verlauf ändern sich auch die zugehörigen Spannungen sinusförmig. Infolge der inneren Dämpfung ist die Phase des Spannungsverlaufs gegen diejenige des Dehnungsverlaufs verschoben. Man schreibt deshalb σ und ϵ zweckmäßig als Zeigergrößen $\underline{\sigma}$ und $\underline{\epsilon}$ (siehe

¹⁾ Siehe dazu die Broschüre „Elastische und viskose Eigenschaften von Werkstoffen“, herausgegeben vom Deutschen Verband für Materialprüfung (DVM), bearbeitet von H. Oberst, Berlin-Köln-Frankfurt 1963. Beuth-Vertrieb GmbH.

Erläuterungen siehe DIN 53 440 Blatt 3

Fortsetzung Seite 2 bis 6

(Seite 3 a)

(Seite 6 a, b)

DIN 5483). Der komplexe Elastizitätsmodul $\underline{E}$ ist dann definiert durch:

$$\underline{\sigma} = \underline{E} \cdot \underline{\varepsilon} \quad (1)$$

$$\underline{E} = |\underline{E}| \cdot e^{j\delta} = E' + jE'' = E'(1 + jd) \quad (2)$$

Die Bestimmungsgrößen E' , E'' , $|\underline{E}|$ und d des komplexen Moduls $\underline{E}$ werden als viskoelastische Kenngrößen benutzt.

2.2. Speichermodul

Der Speichermodul E' (bezogen auf die speicherbare Energie; *storage modulus*) ist der Realteil E' . Er ist ein Maß für die wiedergewinnbare Energie, die beim Verformungswechsel während einer Schwingung umgesetzt wird.

2.3. Verlustmodul

Der Verlustmodul (*loss modulus*) ist der Imaginärteil E'' des komplexen Moduls. Er ist ein Maß für die bei der Schwingung nicht wiedergewinnbar umgewandelte Schwingungsenergie.

2.4. Verlustfaktor

Der Verlustfaktor d (*loss factor*) ist der Quotient aus Imaginärteil und Realteil von $\underline{E}$ und Tangens des Phasenwinkels δ des komplexen Moduls

$$d = E''/E' = \tan \delta.$$

Er ist ein Relativmaß für die Energieverluste bei der Schwingung im Vergleich zur wiedergewinnbaren Energie. Zur Unterscheidung vom dielektrischen Verlustfaktor wird d oft mechanischer Verlustfaktor genannt.

2.5. Absoluter Elastizitätsmodul

Der absolute Elastizitätsmodul ist Betrag $|\underline{E}| = \sqrt{E'^2 + E''^2}$ des komplexen Moduls. Er ist gleich dem Quotienten $\hat{\sigma} / \hat{\varepsilon}$ der Amplituden (Scheitelwerte) der Spannung $\underline{\sigma}$ und der Dehnung $\underline{\varepsilon}$. Bei genügend geringer innerer Dämpfung (kleiner Verlustfaktor d) ist der Betrag $|\underline{E}|$ sehr nahe gleich dem Realteil E' , und man darf in diesen Fällen die besondere Kennzeichnung des Realteils weglassen: $E' \approx E$.

3. Probekörper

3.1. Entnahme und Herstellung

Entnahme und Herstellung der Probekörper hängen von dem zu prüfenden Erzeugnis ab und richten sich nach den Angaben in den Normen für das betreffende Erzeugnis. Sind solche Angaben nicht vorhanden, ist für die Herstellung folgendes zu beachten: Die Probekörper können aus gepreßten oder extrudierten Tafeln oder Platten spanend hergestellt oder z. B. direkt spritzgegossen werden. Auf mögliche Anisotropien durch eingefrorene Orientierungen ist gegebenenfalls Rücksicht zu nehmen (Probekörper sind dann in und senkrecht zu der zu erwartenden Anisotropie zu entnehmen).

3.2. Form und Abmessungen

Es werden Probekörper mit Dicken (in Schwingungsrichtung) von etwa 1 bis 6 mm und Breiten von etwa 8 bis 12 mm benutzt. Kleine Querschnittsabmessungen sind im Hinblick auf die obere Grenze des Frequenzbereichs empfehlenswert. Die Dicke soll klein gegen die Biegewellenlänge und die Breite kleiner als die halbe Biegewellenlänge sein (siehe Abschnitt 6.2 und DIN 53 440 Blatt 1, Abschnitt 3). Die Dicke soll kleiner als die Breite sein. Bei Dicken unter 1 mm kann die Gefahr bestehen, daß die Biegeschwingungen nicht allein durch die Biegesteifigkeit bestimmt sind (siehe DIN 53 440

Blatt 1, Abschnitt 3). Die Abweichung der Dicke über die ganze Länge des Probekörpers von der mittleren Dicke soll dem Betrag nach $\leq 0,1$ mm sein. Die Länge beträgt bei den üblichen Prüfanordnungen max. 300 mm. Bei Prüfanordnungen mit freien Probekörper-Enden müssen die Stirnflächen der Probekörper eben sein und senkrecht zur Probekörper-Längsachse stehen.

3.3. Anzahl

Es sind mindestens 2 Probekörper zu prüfen.

Es empfiehlt sich, Probekörper gleichen Querschnitts und unterschiedlicher freier Länge zu verwenden, um bei gegebener Temperatur Frequenzkurven aus einer möglichst dichten Folge von Meßpunkten darstellen zu können. Außerdem bietet sich so die Möglichkeit, die Längenkorrektur des Probekörpers bei fester Einspannung zu kontrollieren.

3.4. Vorbehandlung

Die Bedingungen für eine gegebenenfalls notwendige Vorbehandlung sind zu vereinbaren oder richten sich nach den Angaben in den Normen für das zu prüfende Erzeugnis. Bei Stoffen, deren mechanisches Verhalten stark von der thermischen oder mechanischen Vorgeschichte abhängt, sind vorgeschriebene Konditionierungsbedingungen genau einzuhalten. Zur Beseitigung innerer Spannungen sind die Probekörper nötigenfalls vor den Messungen zu tempern. Der Temperaturbereich der Messungen hängt von der Probenbeschaffenheit ab; nach oben ist er durch die Forderung geringen Fließens begrenzt.

4. Prüfanordnung³⁾

Grundsätzlich sind alle in DIN 53 440 Blatt 1 angeführten Prüfanordnungen anwendbar. Bei Kunststoffen ist es jedoch zweckmäßig, die vertikale Anordnung des Probekörpers zu wählen, bei der dieser am oberen Ende fest eingespannt ist (siehe DIN 53 440 Blatt 1, Bild 3 a) oder in den Schwingungsknoten aufgehängt ist.

Man hat damit die Möglichkeit, in gleichbleibender Prüfanordnung mit kleinen Modifikationen am Gerät einen verhältnismäßig großen Temperaturbereich zu erfassen, der sich z. B. bei amorphen Thermoplasten vom Glaszustandsbereich bis in den Haupterweichungsbereich oberhalb der Glas temperatur und gegebenenfalls darüber hinaus in den Bereich des quasi-gummielastischen Zustandes oder des gummi-elastischen Zustandes bei schwach vernetzten Stoffen erstreckt (siehe DIN 7724).

Eine Prüfanordnung mit fester oberer Einspannung zeigt als Beispiel Bild 1. Bei dieser Art der Halterung können ohne Änderung der Justierung des Probekörpers mehrere Resonanzen verschiedener Ordnung bei gegebener Temperatur messend erfaßt werden, wodurch ein vergleichsweise großer Informationsgehalt im Verhältnis zum Zeitaufwand erreicht wird. Alle Geräteteile sollen in diesem Fall so massiv ausgeführt sein, daß Fehler durch Mitschwingen bei der Prüfung nach Möglichkeit unterdrückt werden. Störungen können beispielsweise durch Resonanzregung einer lockeren Schraube hervorgerufen werden. Die Halterungen enthalten Klemmbacken, die über eine größere Fläche dicht am Probekörper anliegen sollen.

Die untere Halterung wird für Versuche mit beidseitig eingespannten Probekörpern verwendet. Der elektro-

2) Auch die Benennung „dynamischer Elastizitätsmodul“ wird benutzt.

3) Auskünfte über Lieferanten erteilt der Fachnormenausschuß Kunststoffe (FNK) im VDMA, Burggrafenstraße 4-7.

magnetische Schwingungserreger ist dann in horizontaler Anordnung anzubringen.

Die elektromechanischen Wandler sind elektromagnetische Systeme mit zylindrischem Kern und axialsymmetrischem äußeren Magnetpol. Bei dieser Anordnung

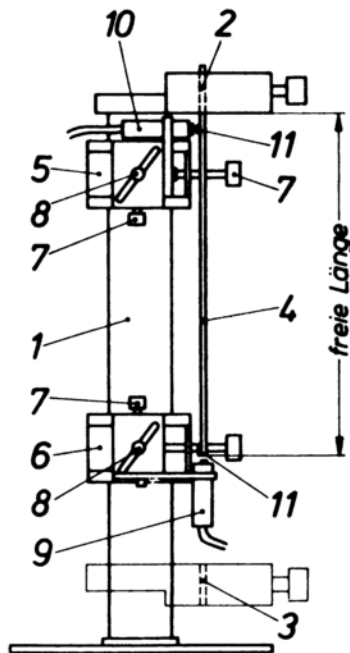


Bild 1. Biegeschwingsungsgerät
(Ausführungsbeispiel in schematischer Darstellung)

- 1 Führungssäule
- 2 obere Halterung
- 3 untere Halterung
- 4 Probekörper
- 5 oberer Kreuzsupport
- 6 unterer Kreuzsupport
- 7 Justierschraube
- 8 Arretierschraube oder -hebel
- 9 elektromagnetischer Schwingungserreger
- 10 elektromagnetischer Schwingungsaufnehmer
- 11 Stahlplättchen

können der magnetische Streufluß und damit das Übersprechen vom Sender- auf das Empfängersystem klein gehalten werden. Deshalb ist auch in Bild 1 das untere elektromagnetische System senkrecht zum oberen angeordnet. Es ist dafür zu sorgen, daß leichte Verschiebbarkeit und Justierbarkeit bei allen Prüftemperaturen, insbesondere in der Kälte, sichergestellt ist.

Auf dem Probekörper sind dünne Stahlplättchen gegenüber den Magnetpolen angebracht. Sie können aufgeklebt und nötigenfalls noch zusätzlich mechanisch befestigt werden, z. B. mit sehr dünnen Drähten. Merkliche Beeinflussung der Schwingungseigenschaften der Probekörper kann dabei weitgehend vermieden werden. Um die Schwingungserregung zu ermöglichen, wird das Erregersystem in der Anordnung nach Bild 1 etwas unsymmetrisch zum Probekörper eingestellt.

Außer elektromagnetischen Wandlern können auch andere elektromechanische Systeme, insbesondere elektrostatische und auch lichtelektrische, als Empfänger-System benutzt werden. Bei Versuchen mit gummielastischen Stoffen empfiehlt es sich, kurze dicke Probekörper zu verwenden, die Schwingung am oberen Probekörperende elektromagnetisch zu erregen und die Schwingungsweite am unteren Ende mit einer elektrostatischen Sonde zu messen. Dabei empfiehlt sich ein Trägerfrequenzverfahren. Bei der Kombination eines elektromagnetischen oder

elektrodynamischen Wandlers mit einem elektrostatischen oder piezoelektrischen kann elektromagnetisches Übersprechen weitgehend auch bei kleinen Abständen vermieden werden. Damit wird die Benutzung kleiner freier Längen (siehe Bild 1) der Probekörper ermöglicht. Kurze gummi- oder quasi-gummielastische Probekörper können gegebenenfalls an einem stabförmigen Zwischenstück aus Stahl befestigt werden, an dessen einem Ende eine Halterung vorgesehen ist. Das andere Ende des Zwischenstücks kann in der Halterung einer Versuchsanordnung nach Bild 1 befestigt werden. Die Schwingung wird in diesem Falle am Zwischenstück als Feder erregt. Zur Unterdrückung systematischer Meßfehler darf das Zwischenstück nicht zu dünn, die Länge der frei schwingenden Feder zwischen den Halterungen nicht zu groß sein (Dicke etwa 2 mm, Länge etwa 20 mm)⁴⁾. Zum gleichen Zweck können auch Tonabnehmersysteme benutzt werden, bei denen der Probekörper am schwingenden Teil befestigt ist. Bei dieser Versuchsanordnung spricht man von der „schwingenden Zunge“ (vibrating reed).

Bei großer Dämpfung, bei der keine auswertbaren Resonanzkurven mehr erhalten werden, kann eine Anordnung zur Prüfung bei stark gedämpften fortschreitenden Biege wellen benutzt werden (siehe DIN 53 440 Blatt 1, Abschnitt 4 und Bild 3d).

5. Durchführung

5.1. Justierung der Probekörper

Die freie Länge der Probekörper soll so groß sein, daß Übersprechen vom Schwingungserreger auf den Schwingungsaufnehmer vermieden wird (Kontrolle durch Herausnehmen des Probekörpers). Die praktisch infrage kommenden größten freien Längen betragen etwa 250 mm. Die freie Länge ist auf $\pm 0,5\%$ zu messen, da sie in den Meßwert des Moduls E' in der 4. Potenz eingeht (siehe Abschnitt 6.1).

Die Klemmbaken der Halterung müssen über ein ausreichend großes Stück des Probekörpers fest an diesen angedrückt werden zur Vermeidung zusätzlicher Dämpfung durch äußere Reibung zwischen Probekörper und Halterung. Der Fehler durch die Reibungsverluste ist am größten in der Grundschiwingung (1. Ordnung); diese ist deshalb nach Möglichkeit zu vermeiden, besonders wenn bei mehreren höheren Ordnungszahlen gemessen werden kann. In den Schwingungen höherer Ordnung ist der Reibungsfehler im allgemeinen vernachlässigbar klein. Der Abstand der elektromagnetischen Schwingungserreger und -aufnehmer vom Probekörper muß so groß sein (besonders bei Probekörpern aus Gummi), daß dessen freie Schwingung nicht durch die Anziehungskraft der permanenten Magnete merklich beeinflusst wird, der Abstand muß genügend klein sein, daß der Pegel der gemessenen Schwingungsamplituden hoch genug über dem Störpegel liegt. Bei den gebräuchlichen Prüfanordnungen liegt der günstigste Abstand bei etwa 3 mm.

5.2. Temperatur- und Frequenzeinstellung

Die Messungen werden im allgemeinen bei verschiedenen, schrittweise geänderten Temperaturen als Parameter durchgeführt. Nach jedem Temperaturschritt ist Temperaturkonstanz abzuwarten. Die Temperatur ist auf $\pm 1^\circ\text{C}$ einzustellen. Da die Frequenz in die Meßergebnisse des Moduls E' quadratisch eingeht, muß sie auf $\pm 1\%$ gemessen werden.

⁴⁾ F. Linhardt: Measurements of the dynamic-mechanical properties of vibration damping materials and damped metal plates. Herausgegeben von H. J. van der Auwera, Belge des Acousticiens, Université de Leuven (1967)