

Prüfung von Kautschuk und Elastomeren
Grundlagen für dynamische Prüfverfahren

DIN
53 535

Testing of rubber; general requirements for dynamic testing

Essais des caoutchoucs; données générales pour les essais dynamiques

Zusammenhang mit der von der International Organization for Standardization (ISO) herausgegebenen Internationalen Norm ISO 2856-75, siehe Erläuterungen.

1 Zweck und Anwendungsbereich

Die vorliegende Norm gibt Definitionen und schreibt die Bedingungen und allgemeinen Anforderungen an Probekörper, Prüfgeräte und Prüfverfahren vor, die zur Bestimmung viskoelastischer Kenngrößen von Elastomeren unter Verwendung periodischer Kräfte oder Verformungen von bestimmter Form, Frequenz und Amplitude, einschließlich Schlagkräften oder -verformungen, dienen.

Die dynamischen Prüfverfahren werden eingesetzt zur Charakterisierung des Verformungsverhaltens von Elastomeren unter Bedingungen, bei denen sich sowohl die Spannung als auch die Verformung mit der Zeit ändert.

Die Norm gilt in erster Linie für die Prüfung von Probekörpern, die im Labor hergestellt sind; doch gelten die gleichen Prinzipien auch für die Prüfungen an Fertigteilen.

Eine genaue Beschreibung des einzelnen dynamischen Prüfverfahrens erfolgt in gesonderten Normen; siehe DIN 53 512, DIN 53 513 und DIN 53 520.

2 Begriffe und Beziehungen zur Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften

Einige der folgenden Begriffe und Beziehungen setzen einen linearen Zusammenhang zwischen der Spannung und der durch sie hervorgerufenen Verformung voraus, wobei man den Quotienten zwischen Spannung und Verformung als Modul bezeichnet. Dies gilt für Elastomere näherungsweise für kleine Amplituden. Bei viskoelastischem Verhalten kann die Verformung wegen innerer Energieverluste hinter der Spannung zurückbleiben.

Es wird empfohlen, nicht den Begriff „Modul“ allein zu verwenden, sondern ihn nach der Art der Beanspruchung näher zu bezeichnen, wie z. B. „Schubmodul“ für die Scherbeanspruchung oder „Dehnmodul“ für die Dehn- und Druckbeanspruchung, vergleiche Bild 1 und Bild 2. Bei der Druckverformung oder auch „negativen Dehnung“, vergleiche Abschnitt 2.1.5, wird der Dehnmodul auch als „Druckmodul“ bezeichnet.

Der „Kompressionsmodul“ von Elastomeren ist um mehrere Zehnerpotenzen größer als die hier behandelten Moduln; er findet in der vorliegenden Norm keine Berücksichtigung. Schub- und Dehnmodul sind unter bestimmten Voraussetzungen Materialeigenschaften des Elastomers und unabhängig von Größe und Form des Probekörpers.

Dagegen ist die Federsteife von der Geometrie (Form und Größe) abhängig; sie wird üblicherweise bei Fertigteilen verwendet.

Die Begriffe werden im folgenden für die Scherbeanspruchung (siehe Bild 1) definiert, sind aber in analoger Weise auf den Fall der Dehn- und Druckbeanspruchung (siehe Bild 2) anzuwenden.

2.1 Begriffe und Beziehungen bei beliebigen periodischen Verformungen

2.1.1 Mechanische Hystereseschleife

Geschlossene Spannungs-Verformungs-Kurve, die während einer Verformungsperiode entsteht, wenn Spannung und Verformung wegen des viskoelastischen Verhaltens nicht in Phase sind (siehe Bild 3 bis Bild 5).

2.1.2 Spezifische Verlustenergie W in J/m^3

Energie durch Volumen, die je Verformungsperiode in Wärme umgewandelt wird. Sie entspricht der Fläche der Hystereseschleife.

2.1.3 Spezifische Verlustleistung N in W/m^3

Mechanische Leistung durch Volumen, die in Wärmeleistung umgewandelt wird. Sie ist das Produkt aus spezifischer Verlustenergie W und Frequenz f . Es gilt:

$$N = W \cdot f \quad (1)$$

2.1.4 Mittelspannung τ_m bzw. σ_m in Pa

Mittelwert der Kraft F während einer Periode geteilt durch die Querschnittsfläche A_0 des unbeanspruchten Probekörpers. Es gilt:

$$\tau_m = F_m/A_0 \text{ bzw. } \sigma_m = F_m/A_0 \quad (2)$$

(siehe Bild 1 bis Bild 5).

2.1.5 Mittelverformung γ_m bzw. ε_m (dimensionslos)

Mittelwert der Verformung γ bzw. ε während einer Periode (siehe Bild 1 bis Bild 5).

Bei der Scherung ist die Verformung gleich dem Tangens des Scherwinkels φ (siehe Bild 1):

$$\gamma = \tan \varphi = s/L_0 \quad (3)$$

Bei der Dehnung ist die Verformung definiert als Quotient aus Längenänderung und Probenlänge L_0 des unbeanspruchten Probekörpers. Es gilt $\varepsilon = (L - L_0)/L_0$, wenn L gleich der Länge des verformten Probekörpers ist (siehe Bild 2).

Fortsetzung Seite 2 bis 10

Normenausschuß Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
 Normenausschuß Kautschuktechnik (FAKAU) im DIN

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, gestattet.

Ist die Dehnung positiv, so wird der Probekörper verlängert, ist sie negativ, wird er verkürzt. Unter Druck bezeichnet man die resultierende negative Dehnung auch als Stauchung oder Druckverformung.

Anmerkung: Es kann von Vorteil sein, die Dehnung durch das Dehnungsverhältnis $\lambda = L/L_0$ zu charakterisieren; es gilt $\lambda = 1 + \varepsilon$.

2.1.6 Statischer Schubmodul G_{stat} bzw. statischer Dehnmodul E_{stat} in Pa

Verhältnis von Mittelspannung zur Mittelverformung:

$$G_{\text{stat}} = \tau_m / \gamma_m \text{ bzw. } E_{\text{stat}} = \sigma_m / \varepsilon_m \quad (4)$$

Bei nichtlinearer Spannungsverformungs-Kurve ist der statische Schubmodul bzw. Dehnmodul abhängig von der Größe der Mittelverformung bzw. Mittelspannung.

2.1.7 Spannungsamplitude τ_a bzw. σ_a in Pa

Verhältnis der Kraftamplitude F_a (d. h. der halben Differenz zwischen Maximalkraft und Minimalkraft) zur Querschnittsfläche A_0 des unbeanspruchten Probekörpers:

$$\tau_a = F_a / A_0 = (F_{\text{max}} - F_{\text{min}}) / 2 A_0 \quad (5)$$

(siehe Bild 1 und Bild 5)

$$\text{bzw. } \sigma_a = F_a / A_0 = (F_{\text{max}} - F_{\text{min}}) / 2 A_0 \quad (\text{siehe Bild 2}) \quad (6)$$

2.1.8 Verformungsamplitude γ_a bzw. ε_a (dimensionslos)

Halbe Differenz aus Maximal- und Minimalverformung:

$$\gamma_a = (\gamma_{\text{max}} - \gamma_{\text{min}}) / 2 \quad (\text{siehe Bild 3}) \text{ bzw. } \quad (7)$$

$$\varepsilon_a = (\varepsilon_{\text{max}} - \varepsilon_{\text{min}}) / 2 \quad (8)$$

2.2 Begriffe und Beziehungen bei sinusförmigen Verformungen und Spannungen

Bei linearem Verhalten hat eine sinusförmige Spannung eine sinusförmige Verformung zur Folge und man erhält als Hystereseschleife eine Ellipse (siehe Bild 5).

Anmerkung: Zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen der Spannung und Verformung erweist sich die Einführung von komplexen Größen als vorteilhaft.

2.2.1 Komplexer Schubmodul G^* bzw. komplexer Dehnmodul E^* in Pa

Verhältnis von Spannung zur Verformung, bei der jede dieser Größen durch eine komplexe Zahl dargestellt wird:

$$G^* = \tau^* / \gamma^*, \text{ mit } G^* = G' + jG'' = |G^*| e^{j\delta} \quad (9)$$

$$\tau^* = \tau_a e^{j\omega t} \text{ und } \gamma^* = \gamma_a e^{j(\omega t - \delta)} \quad (\text{siehe Bild 6}) \quad (10)$$

bzw.

$$E^* = \sigma^* / \varepsilon^*, \text{ mit } E^* = E' + jE'' = |E^*| e^{j\delta} \quad (11)$$

$$\sigma^* = \sigma_a e^{j\omega t} \text{ und } \varepsilon^* = \varepsilon_a e^{j(\omega t - \delta)} \quad (12)$$

mit t = Zeit, δ = Verlustwinkel (siehe Abschnitt 2.2.3)

$$\omega = 2\pi f \quad (= \text{Kreisfrequenz und } f = \text{Frequenz}).$$

2.2.2 Absoluter Schubmodul $|G^*|$ bzw. absoluter Dehnmodul $|E^*|$ in Pa

Betrag des komplexen Schubmoduls bzw. Dehnmoduls.

Es gilt:

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (\text{siehe Bild 6}) \quad (13)$$

$$\text{oder } |G^*| = \tau_a / \gamma_a \quad (14)$$

$$\text{bzw. } |E^*| = \sqrt{E'^2 + E''^2} \quad (15)$$

$$\text{oder } |E^*| = \sigma_a / \varepsilon_a \quad (16)$$

2.2.3 Verlustwinkel δ (rad)

Phasenwinkel zwischen der komplexen Spannung τ^* und komplexen Scherung γ^* bzw. zwischen der komplexen Spannung σ^* und der komplexen Verformung ε^* .

Anmerkung: Für den Zusammenhang zwischen spezifischer Verlustenergie W und dem Verlustwinkel δ gilt: $W = \pi \tau_a \gamma_a \sin \delta$ bzw. $W = \pi \sigma_a \varepsilon_a \sin \delta$.

2.2.4 Verlustfaktor $\tan \delta$ (dimensionslos)

Tangens des Verlustwinkels.

$$\text{Es gilt: } \tan \delta = G'' / G' \quad (\text{siehe Bild 6}) \quad (17)$$

$$\text{bzw. } \tan \delta = E'' / E' \quad (18)$$

2.2.5 Speicher-Schubmodul G' bzw. Speicher-Dehnmodul E' in Pa

Komponente der Spannung, die mit der Verformung in gleicher Phase ist, geteilt durch die Verformungsamplitude (Realteil des komplexen Schubmoduls bzw. Dehnmoduls):

$$G' = \tau_a \cos \delta / \gamma_a = |G^*| \cos \delta \quad (19)$$

$$\text{bzw. } E' = \sigma_a \cos \delta / \varepsilon_a = |E^*| \cos \delta \quad (20)$$

2.2.6 Verlust-Schubmodul G'' bzw. Verlust-Dehnmodul E'' in Pa

Komponente der Spannung, die zur Verformung eine Phasenverschiebung von $\pi/2$ aufweist, geteilt durch die Verformungsamplitude (Imaginärteil des komplexen Schubmoduls bzw. Dehnmoduls):

$$G'' = \tau_a \sin \delta / \gamma_a = |G^*| \sin \delta \quad (\text{siehe Bild 6}) \quad (21)$$

$$\text{bzw. } E'' = \sigma_a \sin \delta / \varepsilon_a = |E^*| \sin \delta \quad (22)$$

2.2.7 Federsteife k in N/m

Kraftamplitude F_a geteilt durch die Längenänderung L_a des Probekörpers (bei einer Dehnbeanspruchung):

$$k = F_a / L_a \quad (\text{siehe Bild 7}) \quad (23)$$

Anmerkung: Die Ermittlung der Federsteife wird mit Vorteil bei der Fertigteilprüfung angewandt.

2.3 Begriffe und Beziehungen für andere Verformungen

Außer den periodischen Verformungen sind freie Schwingungen und schlagartige Beanspruchungen von Bedeutung. Bei freien gedämpften Schwingungen nimmt die Schwingungsamplitude kontinuierlich ab. Falls die Dämpfung eine bestimmte Größe erreicht (die kritische Dämpfung), erhält man ein aperiodisches Abklingen (den aperiodischen Grenzfall).

2.3.1 Logarithmisches Dekrement Λ (dimensionslos)

Natürlicher Logarithmus des Quotienten aus zwei um eine Schwingungsdauer auseinanderliegenden Schwingungsamplituden einer freien, gedämpften Schwingung:

$$\Lambda = \ln (A_n / A_{n+1}) \quad (24)$$

Für kleine Werte von Λ gilt:

$$\tan \delta = \Lambda / \pi \quad (25)$$

2.3.2 Dämpfungsverhältnis u (dimensionslos)

Das Verhältnis der tatsächlichen Dämpfung zur kritischen Dämpfung, wenn man unter kritischer Dämpfung die Dämpfung versteht, bei der das schwingungsfähige System sich im aperiodischen Grenzfall befindet.

Anmerkung: Für $u < 1$ hat man periodische Schwingungen, für $u \geq 1$ dagegen ein aperiodisches Abklingen.

Für das Dämpfungsverhältnis u und das logarithmische Dekrement gilt:

$$u = \frac{\Lambda / 2 \cdot \pi}{\sqrt{1 + (\Lambda / 2 \pi)^2}} = \sin \arctan (\Lambda / 2 \pi) \quad (26)$$

Für kleine Werte von Λ gilt:

$$u = \Lambda / 2 \pi \quad (27)$$

2.3.3 Rückprallelastizität R (dimensionslos)

Das Verhältnis der zurückgewonnenen Energie zur aufgewendeten Energie bei einer Schlagbeanspruchung. (Nach einer Folge von Schlagbeanspruchungen und Erreichen des Dauerzustandes).

3 Bezeichnung des Verfahrens

Bezeichnung für Grundlagen für dynamische Prüfverfahren nach DIN 53 535 (A):

Grundlagen DIN 53 535 – A

4 Prüfgeräte

Prüfgeräte können mit Schlagbeanspruchungen oder mit periodischen Beanspruchungen in den verschiedensten Bereichen der Spannungs- oder Verformungsamplituden, Frequenzen und Temperaturen arbeiten. Die Prüfgeräte können wie folgt nach 3 Gesichtspunkten eingeteilt werden:

- a) Beanspruchungsart:
 - periodische Schwingung außerhalb der Resonanz (siehe DIN 53 513)
 - periodische Schwingung innerhalb der Resonanz
 - freie gedämpfte Schwingung (siehe DIN 53 520)
 - Schlagbeanspruchung (siehe DIN 53 512)
 - rollende, stoßartige Verformung
- b) Aufgebrachte Größe:
 - Verformung
 - Spannung
 - Energie
- c) Frequenzbereich:
 - statische Beanspruchung und niedrige Frequenz < 1 Hz
 - mittlere Frequenz 1 bis 100 Hz
 - hohe Frequenz > 100 Hz

Die Prüfgeräte müssen die Anforderungen der einzelnen Prüfnormen erfüllen; man vergleiche DIN 53 512, DIN 53 513 oder DIN 53 520.

Anmerkung: Resonanz tritt auf, wenn die Frequenz der anregenden Beanspruchung mit der Eigenfrequenz des Schwingungssystems etwa gleich groß ist. Unter Eigenfrequenz ist die Frequenz zu verstehen, mit der das System ohne äußere Anregung schwingen würde.

5 Empfohlene Prüfbedingungen

Aufgrund des viskoelastischen Verhaltens von Elastomeren sind die Ergebnisse der dynamischen Messungen abhängig von den Prüfbedingungen wie Temperatur, Frequenz und Amplitude der aufgetragten Kraft oder Verformung (siehe Anhang C).

Bei sinusförmiger Beanspruchung müssen entweder die Spannungs- oder die Verformungsamplitude sowie entweder die Mittelspannung oder die Mittelverformung vorgeschrieben sein.

5.1 Temperatur

Falls die Temperaturabhängigkeit der viskoelastischen Kenngrößen mit einem automatisch arbeitenden Gerät in einem vorgewählten breiten Temperaturbereich in kleinen Schritten gemessen wird, können die einzelnen Temperaturen beliebig gewählt werden. Es wird empfohlen, mit einer konstanten Aufheiz- bzw. Abkühlgeschwindigkeit von etwa $1^\circ\text{C}/\text{min}$ zu arbeiten.

Wenn die Messungen bei einer (oder einigen) Temperatur(en) nach Temperatúrausgleich durchgeführt werden, sind die Prüftemperaturen aus der folgenden Reihe auszuwählen:

– 70°C	+ 70°C
– 55°C	+ 85°C
– 40°C	+ 100°C
– 25°C	+ 125°C
– 10°C	+ 150°C
0 $^\circ\text{C}$	+ 175°C
+ 23°C	+ 200°C
+ 27°C	+ 225°C
+ 40°C	+ 250°C
+ 55°C	

Die an einer beliebigen Stelle im Probekörper herrschende Temperatur darf von der Prüftemperatur um nicht mehr als ein größter zulässiger Fehler abweichen. Dieser beträgt üblicherweise $\pm 2^\circ\text{C}$, sollte aber in der Nähe einer Übergangstemperatur möglichst auf $\pm 0,5^\circ\text{C}$ beschränkt oder darf im Falle hoher Frequenzen oder hoher Amplituden erweitert werden. Die Abweichung ist im Prüfbericht aufzuführen.

5.2 Form und Art der aufgetragten Beanspruchung

Die aufgetragte Verformung oder Spannung soll vorzugsweise sinusförmig sein, mit möglichst niedrigen Verzerrungen, die insgesamt nicht größer als 10 % sein dürfen. Schubbeanspruchungen sind vorzuziehen, doch werden auch Dehnungs- und Druckbeanspruchungen zugelassen.

Weitere geeignete Arten vorgegebener Beanspruchungen sind folgende:

- freie gedämpfte Schwingungen,
- periodische, halbsinusförmige Beanspruchungen,
- Schlagbeanspruchungen.

5.3 Frequenz und Amplitude

Die Bereiche von Frequenz, Verformungs- und Spannungsamplitude können sich in Abhängigkeit vom Prüfziel über mehrere Dekaden erstrecken. Es wird empfohlen, diese Versuchsparameter logarithmisch zu variieren. Die folgenden Reihen können durch Multiplikation mit geeigneten negativen oder positiven Zehnerpotenzen nach beiden Seiten erweitert werden:

Reihe A: 1; 10
 Reihe B: 1; 3; 10
 Reihe C: 1; 2; 5; 10
 Reihe D: 1; 1,5; 2; 3; 5; 7; 10

5.3.1 Frequenz (Hz)

Der zulässige Fehler der Frequenz darf bis zu $\pm 2\%$ des Sollwertes betragen. Frequenzen über 500 Hz finden hier keine Berücksichtigung.

5.3.2 Verformungsamplitude (dimensionslos)

Der zulässige Fehler für die Verformungsamplitude darf bis zu $\pm 5\%$ des Sollwertes betragen.

5.3.3 Spannungsamplitude (Pa)

Der zulässige Fehler für die Spannungsamplitude darf bis zu $\pm 5\%$ des Sollwertes betragen.

5.4 Mittelverformung oder Mittelspannung

Für die Werte und zulässigen Fehler gilt hier das gleiche wie für die periodisch veränderlichen Werte.

5.5 Einpunktprüfung

Soll für Vergleichsmessungen unter definierten Bedingungen geprüft werden, sind folgende Parameter zu wählen:

– Temperatur $T = 70^\circ\text{C}$

– Form und Art der aufgetragten Verformung sinusförmige Schwingung