

13 (1986) Neue Forschungsergebnisse, kurz gefaßt

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

U. Stephenson und H. Ertel

## Messung dynamischer Elastizitätsmodule viscoelastischer Stoffe — auch bei höheren Frequenzen

Dynamische E-Module von Kunststoffen (Polymeren) haben hinsichtlich schalltechnischer Anwendungen eine kritische Eigenschaft: Sie können bei hohen Frequenzen beträchtlich höhere Werte annehmen als es der nur statisch gemessene Modul vermuten läßt. Das ist z.B. bei ihrem Einsatz als

- Entdröhnmaterial in Sandwichsystemen oder als
- Fugendichtmasse im Hochbau [1]

von wesentlicher Bedeutung, da sich die gewünschte Dämpfung oder Körperschallisolierung bei höheren Frequenzen deutlich verschlechtern kann. So ist die Körperschalldämmung des Materials vom Realteil und die Dämpfung vom Imaginärteil des E-Moduls abhängig; es ist daher notwendig, den komplexen E-Modul, also Real- und Imaginärteil, frequenzabhängig zu messen, und zwar bis mindestens 3 kHz. Bisher bekannte dynamische Meßverfahren lösen dieses Problem systembedingt nur ungenau und unvollständig - wie etwa der Biegeschwingsversuch [2] - oder der Torsionsschwingsversuch [3]. Zwar wird gewöhnlich aus der Temperaturabhängigkeit des Moduls auf seine Frequenzabhängigkeit geschlossen, dies ist aber nur bedingt richtig und daher nur als Behelf einzustufen [4].

Zur direkten Messung der komplexen E-Module viscoelastischer Stoffe auch bei höheren Frequenzen wurde daher im IBP ein rechnerunterstütztes Meßverfahren entwickelt.

### Einfacher Meßaufbau

Der Prüfling hat Quaderform - mit typischerweise 12 mm Kantenlänge - und wird zwischen zwei planen Befestigungskörpern eingeklebt, von denen der eine rückseitig befestigt, der andere von einem elektrodynamischen Shaker sinusförmig bewegt wird. Die Frequenz wird schrittweise erhöht. Die Beschleunigung  $\underline{a}$  wird auf der Shaker-Seite, die dynamische Kraft  $\underline{F}$  auf der befestigten Seite des Prüflings piezoelektrisch in axialer Richtung gemessen [5]. (Bild 1 und 2)

### Vorteile im Vergleich zu den herkömmlichen Techniken

- einfachste Probenherstellung
- wesentlich geringere Empfindlichkeit gegenüber Ungenauigkeiten bei der Probenherstellung
- auch sehr weiche Materialien prüfbar
- Meßergebnisse in sehr großem Frequenzbereich in einem einzigen Meßvorgang
- Meßergebnisse bei beliebigen Frequenzen, nicht nur Resonanz-Frequenzen.

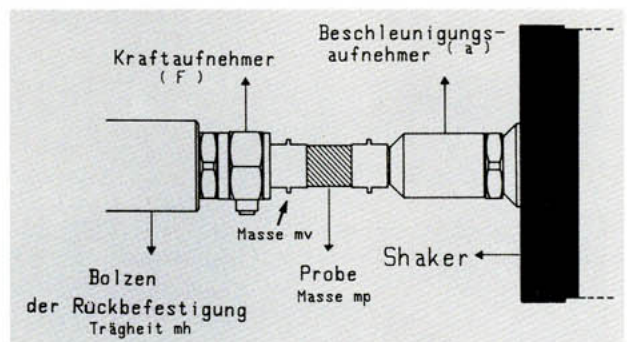


Bild 1: Die Hauptkomponenten der E-Modul-Meßapparatur längs der Schwingungsachse (Verkleinerung 1:2)

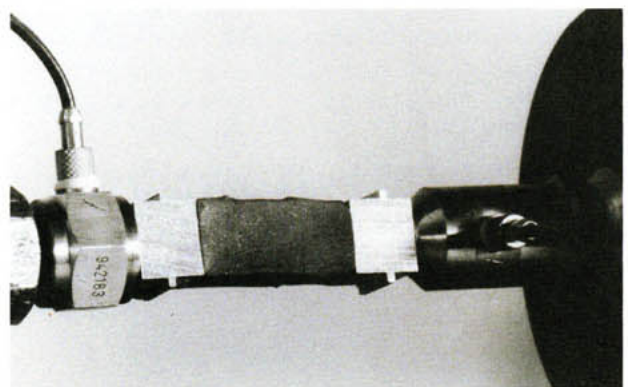
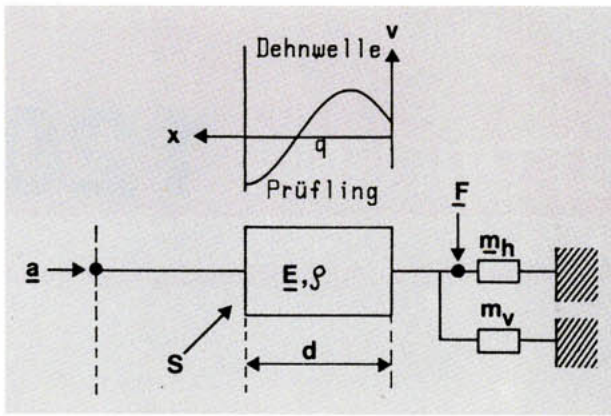


Bild 2: Foto zu Bild 1

### Computer-Auswertung

Ein Fourier-Analysator (Bild 4) berechnet zunächst aus den beiden Meßsignalen  $\underline{a}$  und  $\underline{F}$  deren komplexe Übertragungsfunktion  $\underline{m} = \underline{F}/\underline{a}$ , also Masse- oder Trägheitswerte, die einem Klein-Computer (Bild 4) zur automatischen Weiterverarbeitung übergeben werden.

Bei hohen Frequenzen kann dabei der Prüfling nicht mehr einfach als Feder-Element behandelt werden, da seine Dicke  $d$  (in Schwingungsrichtung) nicht mehr vernachlässigbar klein zur Wellenlänge ist. Es wird daher der kompliziertere Fall einer Ausbreitung und Reflexion von Dehnwellen im Prüfling berücksichtigt (Bild 3).



**Bild 3:** Zur Dehnwellenausbreitung im Prüfling: und zur Berechnung der Trägheit  $\underline{m} = F/a$ : mechanisches Ersatzschaltbild des eingespannten Prüflings.

Die Wellenausbreitung und -dämpfung im Prüfling ist beschreibbar durch eine komplexe Wellenzahl  $\underline{k}$  oder durch ein dimensionsloses  $\underline{q} = \underline{k} \cdot d$ . Die Bestimmungsgleichung für  $\underline{q}$  aus der Meßgröße  $\underline{m}$  kann nach Bild 3 abgeleitet werden und beträgt:

$$-m_p/\underline{m} = -m_p/m_h \cdot \cos \underline{q} + (m_h + m_v)/m_h \cdot \underline{q} \cdot \sin \underline{q} \quad (1)$$

$m_p$  ist die Proben-Eigenmasse. Dabei wird - zur Verbesserung der Genauigkeit - die nie ganz starre Probenrückbefestigung (Bild 4) durch einen in

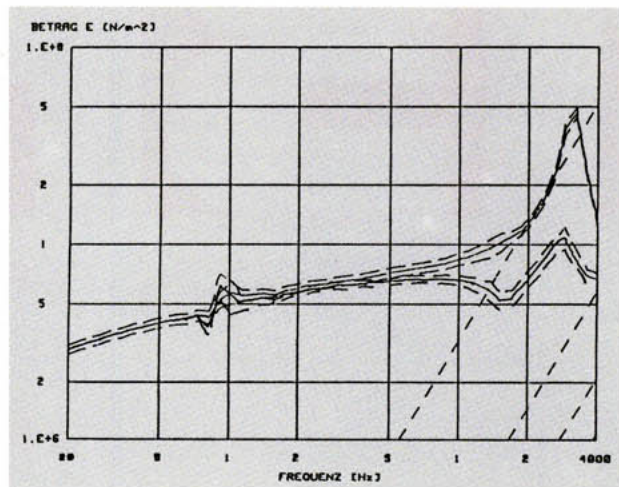


**Bild 4:** E-Modul-Meß-Labor; von rechts nach links: Meßaufbau mit Verstärkern, Fourier-Analysator und Oszillograf, Drucker, Personal-Computer, Plotter

Vorversuchen bestimmten frequenzabhängigen Trägheitswert  $\underline{m}_h$  berücksichtigt; die hinter der Probe, aber noch vor dem Kraftaufnehmer mitschwingende Masse (der Probenhalterung) durch einen Wert  $m_v$ . Aus obiger Gleichung wird, da nicht direkt nach  $\underline{q}$  auflösbar, durch ein Iterationsverfahren  $\underline{q}$  bestimmt. Die Zielgröße E-Modul kann nun leicht aus  $\underline{q}$ ,  $d$ , der Probendichte  $\rho_0$  und der Kreisfrequenz  $\omega$  bestimmt werden:

$$\underline{E} = \rho_0 \cdot d^2 \cdot \omega^2 \cdot \underline{q}^{-2}$$

Eine Fehlerrechnung berücksichtigt dabei Fehlereinflußgrößen. Es zeigte sich, daß das Verfahren selbst bei hohen Meßfrequenzen, bei denen mehrere Viertelwellenlängen ( $\lambda/4$ ) in der Probe enthalten sein können, noch zufriedenstellend genau arbeitet. Demgegenüber würden unter der gewöhnlichen Annahme, die Probe verhalte sich wie eine Feder, bei niedrigen E-Modulen völlig falsche Ergebnisse erzielt werden (Bild 5).



**Bild 5:** Frequenzabhängiger E-Modul: Meßergebnis mit und ohne Wellenausbreitung in der Probe am Beispiel eines Fugendichtstoffes auf Silikon-Basis

- obere Kurve: ohne (Probe als Feder)
- - - untere Kurve: mit Wellenausbreitung
- === (Parallelkurven) errechneter Fehlerbereich dazu
- - - (Geraden) Grenzwertkurven für E entsprechend den Fällen, daß Probendicke =  $\lambda/4, 3/4 \cdot \lambda, 5/4 \cdot \lambda \dots$

#### Einsatzbereiche

Alle relativ weichen viscoelastischen und - im Vergleich zur Probengröße - hinreichend homogenen Stoffe können geprüft werden. Mit leichten technischen Änderungen sind auch härtere Materialien prüfbar.

- Frequenzbereich: 4 Hz ... 4 kHz und statisch (0 Hz)
- E-Module: 0.1 ... 30 N/mm<sup>2</sup> unter 50 Hz  
obere Grenze ansteigend bis  
0.1 ... 1000 N/mm<sup>2</sup> bei 4 kHz

Zur Zeit kann nur bei Raumtemperatur und ohne statische Vorlast gemessen werden. Die Apparatur ist jedoch darauf vorbereitet, damit auch Messungen

- im Temperaturbereich von - 20 °C bis + 80 °C
- mit statischer Vorlast bis zu  $\pm 250$  N und
- des Schubmoduls G durchzuführen.

Bisher wurde die Apparatur zur Messung der frequenzabhängigen E-Module von Fugendichtstoffen für den Einsatz im Hochbau mit Erfolg eingesetzt [6].

#### Literatur

- [1] Stephenson, U.: "Untersuchung der Eigenschaften dauerelastischer Dichtungsmaßnahmen zur Körperschallisolation von Fugenkonstruktionen im Hochbau" IBP-Bericht BS 140/86
- [2] DIN 53 440 (1973) Biegeschwingungsversuch, Prüfung von Kunststoffen und schwingungsgedämpften, geschichteten Systemen
- [3] DIN 53 445 (1979) Torsionsschwingungsversuch, Prüfung von Kunststoffen
- [4] Oberst, M.: "Elastische und viskose Eigenschaften von Werkstoffen". Deutscher Verband für Materialprüfung, Beuth-Verlag 1963
- [5] DIN 53 513, (1983) Bestimmung der viscoelastischen Eigenschaften von Elastomeren bei erzwungenen Schwingungen außerhalb der Resonanz
- [6] IBP-Mitteilung Nr.121 (1986) "Körperschallübertragung durch Fugendichtstoffe"



FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

7000 Stuttgart 80, Nobelstraße 12, Tel.(0711)6868-00  
8150 Holzkirchen (OBB), Postf. 1180, Tel. (08024)643-0

Herstellung und Druck:  
IRB Verlag, Informationszentrum RAUM und BAU  
der Fraunhofer-Gesellschaft, Stuttgart

Nachdruck nur mit schriftlicher Genehmigung des  
Fraunhofer-Instituts für Bauphysik