

» Thermomechanisches Verhalten von PA 12

# Dynamisch-mechanische Analyse am Glasübergang

Das gleichzeitige Einwirken von thermischer und mechanischer Belastung auf ein mechanisches Bauteil respektive System erschwert dessen Entwicklungsprozess massgeblich. Hauptgrund ist die komplexe Wechselwirkung beider Einflussfaktoren. Nachfolgend wird das thermomechanische Verhalten von PA 12 am Glasübergang aufgezeigt.

» **Claudio Corbisieri<sup>1</sup>, Prof. Dr. Pierre Jousset<sup>2</sup>**

Die dynamisch-mechanische Analyse DMA ermöglicht die Untersuchung der komplexen Wechselwirkung von thermischer und mechanischer Belastung. Nachfolgend wird der Messaufbau der DMA bei Dual Cantilever Biegebelastung vorgestellt (Bild 1), welcher zur Ermittlung der umfangreichen Messdaten, wie diese nur selten in Datenbanken verfügbar sind, verwendet wurde. Die mit (a) gekennzeichnete Einspannung leitet eine harmonisch schwingende Deformation zentral in dargestellter Pfeilrichtung auf den Probekörper ein. Die Deformationsamplitude ist so zu wählen, dass näherungsweise linear-viskoelastisches Verhalten vorliegt. Die mit (b) gekennzeichneten Einspannungen sind statisch. Die Einspannungen schränken neben den Verschiebungs- auch Rotationsfreiheitsgrade ein. Aus diesem Grund ist bedingt durch die Einspannung eine komplexe Überlagerung von Schub-, Zug- und Druckspannungen zu erwarten. Die Einspannungsvorrichtung und der Probekörper werden in einer Kammer des Messgerätes temperiert. Wenn eine möglichst homogene Temperaturverteilung erreicht ist, wird die harmonisch schwingende Deformation bei definierter Frequenz eingeleitet.

## Der frequenzabhängige Speicher- und Verlustmodul

Damit die Resultate der DMA interpretiert werden können, werden nachfolgend die

<sup>1</sup> Claudio Corbisieri, B.Sc. FH, ist Masterstudent, Projektleiter am IWK und unterrichtet Technische Mechanik  
<sup>2</sup> Prof. Dr. Pierre Jousset leitet den Fachbereich Verbindungstechnik am IWK

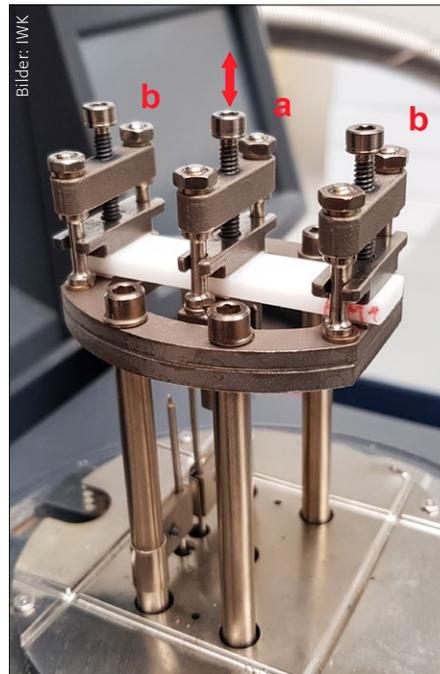


Bild 1: Aufbau der DMA mit Deformationsart Dual Cantilever Biegung.

physikalischen Grundlagen erläutert. Dazu wird das Standardmodell (Bild 2) der linearen Viskoelastizitätstheorie verwendet. Aus dem Modell ergibt sich bei harmonisch schwingender Dehnbelastung die Differentialgleichung [1]. Die Variable  $\epsilon_v$  entspricht der Dehnung des Dämpfers.

$$\epsilon_A \omega \cos(\omega t) = \frac{d\epsilon_v(t)}{dt} + \frac{\eta}{E_F} \frac{d^2\epsilon_v(t)}{dt^2} \quad [1]$$

Die Lösung der Differentialgleichung mit entsprechenden Randbedingungen kann in einen dynamischen Anteil und einen Langzeitanteil unterteilt werden. Zur Interpretation der Messresultate der DMA ist der dynamische Anteil  $\sigma_A(t)$  relevant. [2] zeigt, dass es sich beim resultierenden Elastizitätsmodul  $E^*$  um eine komplexe Zahl handelt.

$$\begin{aligned} \sigma_A(t) &= \epsilon_A \left[ \left( E_F \frac{(\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2} + E_\infty \right) + j E_F \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \right] e^{j\omega t} \\ &= \epsilon_A E^* e^{j\omega t}; \quad \tau = \frac{\eta}{E_F} \end{aligned} \quad [2]$$

Bei der DMA spricht man vom Speicher- und Verlustmodul. Der Speichermodul  $E'$  [3] entspricht dem Realteil des komplexen Elastizitätsmoduls und der Verlustmodul  $E''$  [4] dessen Imaginärteil.

$$\Re(E^*) = E' = E_F \frac{(\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2} + E_\infty \quad [3]$$

$$\Im(E^*) = E'' = E_F \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad [4]$$

Bild 3 zeigt das Antwortverhalten des linear-viskoelastischen Modells bei harmonisch schwingender Dehnbelastung. Das linear-viskoelastische Modell ist in der Lage, die zeitabhängigen Eigenschaften eines Kunststoffes bei harmonisch schwingender Dehnbelastung wie folgt zu beschreiben:

- Der Speichermodul konvergiert bei hohen Frequenzen gegen einen endlichen Grenzwert.

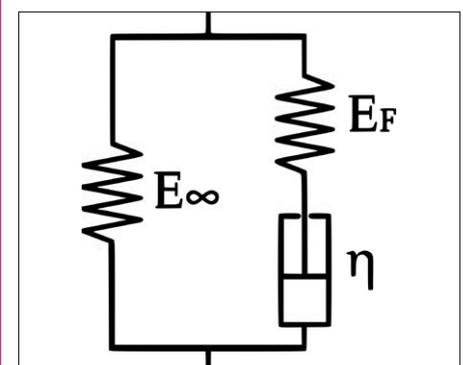


Bild 2: Feder-Dämpfer-Element der phänomenologischen Rheologie.

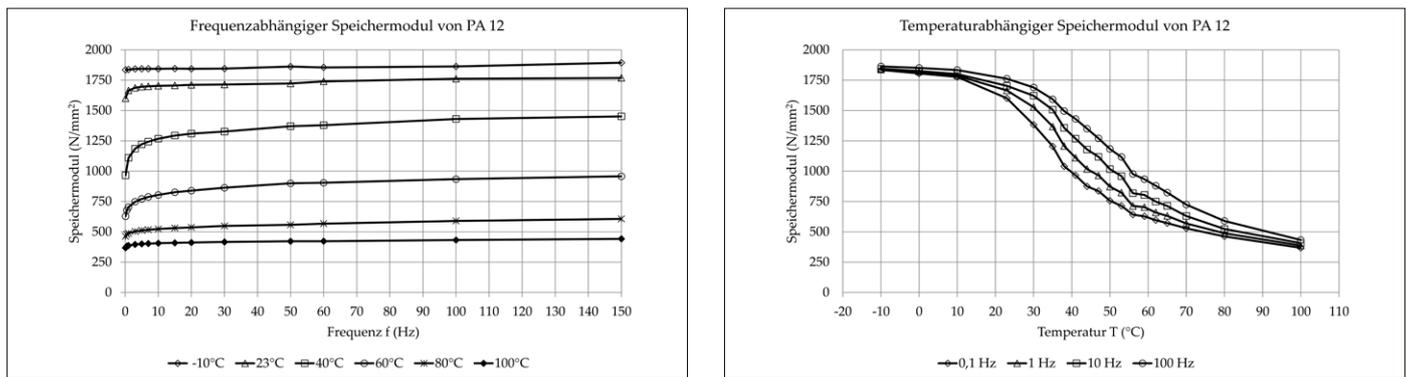


Bild 4: Frequenz- und temperaturabhängiger Speichermodul von PA 12.

– Der in Bild 3 abgebildete Kurvenverlauf des Speichermoduls ist charakteristisch s-förmig.

– Aus dem linear-viskoelastischen Modell kann ein Ansatz für das Verhalten bei sehr tiefen oder hohen Frequenzen abgeleitet werden, wenn diese bedingt durch den Messaufbau nicht zugänglich sind. Der Verlustmodul ist ein Mass für die Irreversibilität der Zustandsänderung. Da zur Auslegung eines mechanischen Bauteils oder Systems der Speichermodul das Werkstoffverhalten in der Regel dominiert, werden die nachfolgenden Untersuchungen auf den Speichermodul eingegrenzt.

### Diskussion der Messresultate

Bild 4 zeigt den frequenz- und temperaturabhängigen Speichermodul des untersuchten PA 12. Der gemessene Frequenzbereich wurde auf 0,1 bis 150 Hz und der gemessene Temperaturbereich auf -10 bis 100°C festgelegt. Aufgrund der fehlenden Daten

bei Frequenzen  $< 0,1$  Hz bedingt durch die eingeschränkte Reproduzierbarkeit der Messresultate kann der Speichermodul lediglich mit Hilfe des Standardmodells der linearen Viskoelastizitätstheorie extrapoliert werden. Die folgende ausgeprägte Frequenzabhängigkeit des Speichermoduls ist bei Temperatur nahe dem Glasübergang feststellbar:

- Der frequenzabhängige Speichermodul nimmt im untersuchten Temperaturbereich bei zunehmender Temperatur ab.
- Der frequenzabhängige Speichermodul fällt abhängig von der Temperatur bei tiefen Frequenzen unterschiedlich schnell ab. Aufgrund der Messdaten kann nicht beurteilt werden, ob sich der Speichermodul bei tiefen Frequenzen  $\ll 0,1$  Hz einem endlichen Grenzwert  $> 0$  annähert.
- Der frequenzabhängige Speichermodul nähert sich bei hohen Frequenzen einem endlichen, temperaturabhängigen Grenzwert.

Das Standardmodell der linearen Viskoelastizitätstheorie besitzt keine Tempera-

turabhängigkeit. Die folgenden typischen Eigenschaften des temperaturabhängigen Speichermoduls sind feststellbar:

- Im Bereich des Glasübergangs ist eine stufenartige Abnahme des temperaturabhängigen Speichermoduls feststellbar.
- Unterhalb der Glasübergangstemperatur nähert sich der temperaturabhängige Speichermodul im untersuchten Frequenzbereich näherungsweise einem gemeinsamen Grenzwert.
- Oberhalb der Glasübergangstemperatur nähert sich der temperaturabhängige Speichermodul im untersuchten Frequenzbereich näherungsweise einem gemeinsamen Grenzwert.

### Schlussfolgerung

Die Messdaten des temperaturabhängigen Speichermoduls geben einen Einblick in die komplexe Wechselwirkung der Einflussfaktoren Zeit und Temperatur. Mit Hilfe dieser und weiterer Messdaten werden neue Ansätze erforscht, wie dieses Zusammenspiel modelliert werden kann. Solche Modelle ermöglichen neben der Steifigkeitsauslegung die Berechnung von Spannungen und Dehnungen bei verschiedenen Belastungszeiten und Temperaturen.

### Kontakt

IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung  
 Prof. Dr. Pierre Jousset  
 Fachbereich Verbindungstechnik  
 Oberseestrasse 10  
 CH-8640 Rapperswil  
 +41 55 222 40 53  
 pierre.jousset@hsr.ch  
 www.iwk.hsr.ch

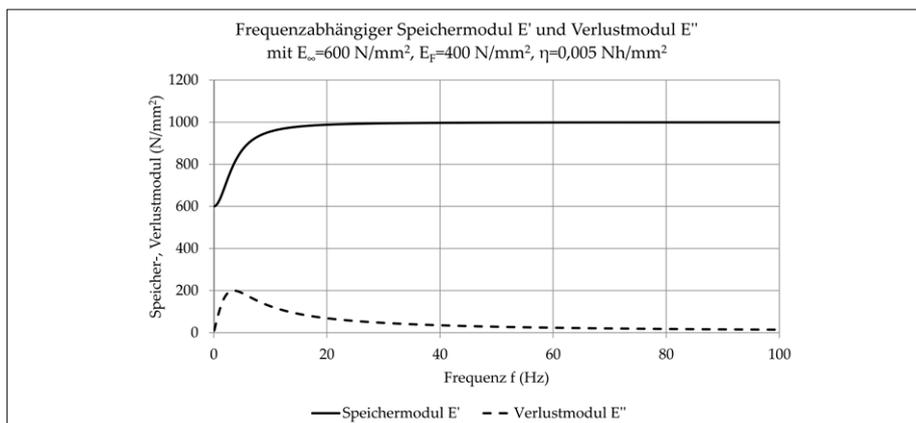


Bild 3: Darstellung des frequenzabhängigen Speicher- und Verlustmoduls der linearen Viskoelastizitätstheorie.