

Mechanische Charakterisierung eines PUR-Schaums mittels DMA

– Statisch und dynamisch kein Problem!

Dr. Wiebold Wurpts

Einleitung

Schäume haben aufgrund ihrer geringen Dichte ein breites Anwendungsfeld. So werden weiche Schäume beispielsweise als Polstermaterial, zur akustischen Dämpfung oder auch als Klapperschutz verwendet. Hartschäume kommen insbesondere als Isolierwerkstoff, in Schuhsohlen oder beispielsweise als Füllschicht in Kompositstrukturen zum Einsatz. Wenn die thermische Dämmwirkung oder auch die Beständigkeit des Materials unter verschiedenen Umweltbedingungen im Vordergrund steht, werden meist geschlossenporige Schäume verwendet. Insbesondere weiche Schäumen sind hingegen meist offenporig, wodurch das Gas aus den einzelnen Zellen entweichen und der Schaum somit stärker elastisch komprimiert werden kann.

Grundsätzlich eignen sich viele Polymere als Ausgangsmaterial für Schäume. Weit verbreitet sind insbesondere expandiertes Polystyrol oder auch Schäume auf Basis von Polyurethan (PUR). Gerade PUR-Schäume weisen je nach Herstellung sehr unterschiedliche Eigenschaften auf. Durch die Menge des Treibmittels (Wasser), die Zugabe weiterer Additive und auch die Kettenlänge der Ausgangsstoffe variieren Dichte und Vernetzungsgrad der Schäume ausgesprochen stark und ermöglichen so eine weite Spanne von weichen bis zu sehr steifen Schäumen.

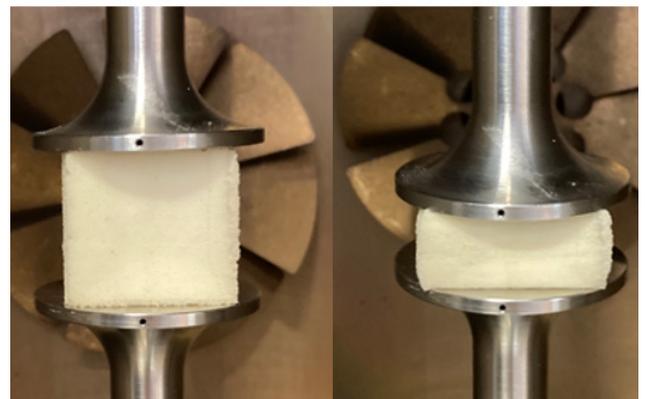
Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften ist insbesondere die Prüfung an klassischen Universal-Zugprüfgeräten etabliert. Häufig ist neben dem statischen Verformungsverhalten jedoch auch die Dämpfung des Schaumes von zentraler Bedeutung für die Anwendung. Hier kann die DMA einen wertvollen Beitrag leisten um das vollständige viskoelastische Verhalten der Schäume

zu erfassen. Dazu wird hier exemplarisch ein weicher, offenporiger PUR-Schaum untersucht.

Statische Prüfung

Bei der statischen (eigentlich quasistatische) Prüfung mit dem High Force DMA GABO EPLEXOR® 500 N wird wie bei einer Universalprüfmaschine eine langsam veränderliche Last aufgebracht, und die dabei auftretenden Kräfte und Verformungen gemessen. Entsprechend der üblichen Einbausituationen von Schäumen erfolgt die Messung üblicherweise im Druckmodus.

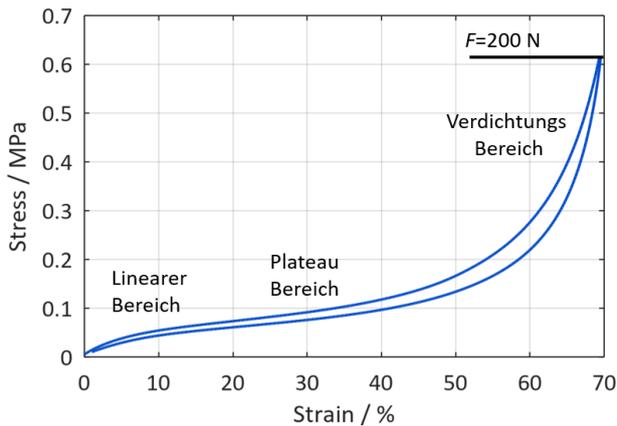
Abbildung 1 zeigt links die unbelastete und rechts die komprimierte Probe im EPLEXOR®. Auffällig ist, dass nur eine relativ geringe Querdehnung auftritt und man insofern in erster Näherung von einem vollständig kompressiblen Material ausgehen kann.



1 Verwendete PUR-Schaumprobe mit den Abmessungen 18 x 18 x 20 mm. Links im unbelasteten, rechts im komprimierten Zustand

APPLICATIONNOTE Mechanische Charakterisierung eines PUR-Schaums mittels DMA
 – Statisch und dynamisch kein Problem!

Zunächst werden die statischen Spannungs – Dehnungs-Verläufe aufgenommen. Um einmalige Effekte auszuschließen wird die Schaumprobe dabei typischerweise zweimal be- und entlastet, wobei in Abbildung 2 ausschließlich der zweite Belastungszyklus dargestellt ist.



2 Spannungs-Dehnungs-Diagramm der PUR-Schaumprobe im zweiten Belastungszyklus, $v=2 \text{ mm/s}$

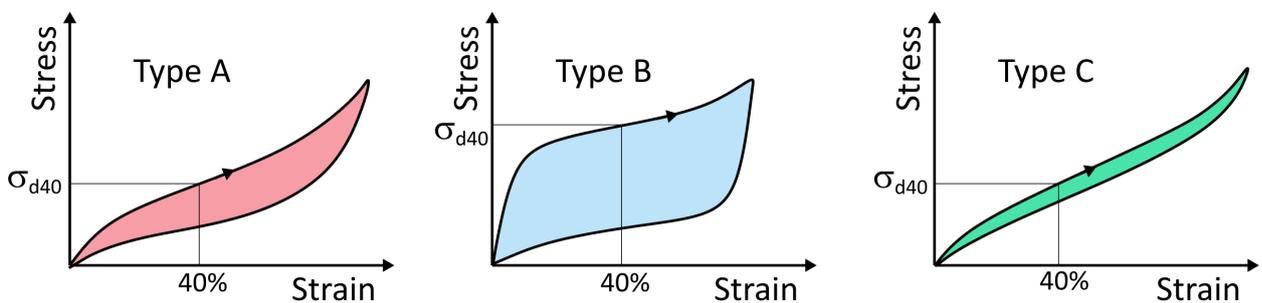
Dabei zeigt sich eine für weichelastische Schaumstoffe typische Dreiteilung des Spannungs- Dehnungsverlaufs, vgl. hierzu z.B. (Keller, 2019). Bei relativ kleinen Dehnungen werden die Zellen nur leicht deformiert und das Material verhält sich annähernd linear elastisch. Mit zunehmender Dehnung kollabieren dann die Zellen des

offenporigen Schaumes. Da dabei die Luft aus den Zellen entweichen muss, hängen die Ergebnisse entsprechend von der Verformungsgeschwindigkeit ab. In diesem Plateau-Bereich steigt die für die Verformung notwendige Spannung nur langsam. Bei sehr großen Dehnungen (hier ab ca. 50 %) werden die bereits kollabierten Zellen dann weiter verdichtet und die Spannung steigt wieder stärker an. Bei der anschließenden Entlastung sind aufgrund der zwischenzeitlichen Energiedissipation nur noch etwas geringere Spannungen notwendig und es stellt sich eine typische Hysterese ein.

In Anlehnung an ISO 3386 wird die Stauchhärte als notwendige Spannung bei einer ansteigenden Dehnung von 40 % ermittelt, hier beträgt die Stauchhärte $\sigma_{d40} = 0.12 \text{ MPa}$. Der Flächeninhalt der Hysterese erlaubt eine grobe Bewertung der Materialdämpfung. Dabei ist das Dämpfungsvermögen der PUR-Schäume sehr unterschiedlich.

In Abbildung 3 sind schematisch verschiedene Hystereseverläufe dargestellt. Entsprechend ihrem Dämpfungsvermögen lassen sich PUR-Schäume in mittelstark (Typ A), stark (Typ B) oder schwach (Typ C) dämpfend unterteilen. Die hier untersuchte Probe lässt sich demnach eher als Typ C kategorisieren.

Alternativ zur hier verwendeten vollflächigen Belastung werden häufig auch Eindringversuche an Schaumstoffen durchgeführt. Dabei wird anstelle des oberen Stempels ein kleinerer Körper in die Probe gedrückt. Die dafür notwendige Kraft wird dann als Eindrückhärte bezeichnet



3 Schematische Druckspannungs-Dehnungs-Diagramme von weich-elastischen PUR-Schaumstoffen (www.wiki.polymerservice-merseburg.de, 2022)

APPLICATIONNOTE Mechanische Charakterisierung eines PUR-Schaums mittels DMA – Statisch und dynamisch kein Problem!

Dynamische Prüfung

Bei einem statischen Sweep der DMA wird jeweils eine statische Last angefahren und dann ein dynamisches Schwingungsexperiment in diesem Zustand durchgeführt. Somit kann direkt der E-Modul in diesem Punkt gemessen werden und damit auch lokal eine Dämpfung bestimmt werden.

Die Schaumprobe wird stufenweise erneut bis zu 70 % statisch gedehnt, Abbildung 4. Dabei zeigt sich das gleiche Verhalten wie bereits in der statischen Prüfung: Für kleine Dehnungen verhält sich die Probe annähernd linear, entwickelt mit zunehmender Dehnung dann aber eine degressive Federkennlinie. Die abschließende Verdichtung ist dann wieder durch eine mit der statischen Dehnung zunehmende, also progressive Federsteifigkeit gekennzeichnet.

Mit der DMA kann aufgrund der dynamischen Schwingung in jedem Punkt ein E-Modul gemessen werden. Wie zu erwarten fällt der Modul im Bereich kleiner Dehnungen zunächst ab, ist dann relativ konstant und steigt erst mit zunehmender Verdichtung wieder an. Der mit der DMA gemessene Modul verhält sich also völlig analog zum Tangentenmodul nach der Auswertung einer statischen Prüfung

Mit mechanischen Prüfgeräten wird nicht direkt der E-Modul einer Probe gemessen, sondern anhand der messbaren Kräfte und Verformungen zunächst eine Steifigkeit bestimmt. Abhängig von der Geometrie der Probe und dem Materialmodell wird daraus dann der E-Modul berechnet. Da sich der Schaum weitgehend kompressibel verhält, ändert sich die Querschnittsfläche während der Verformung praktisch nicht. Entsprechend kann die in der Probe wirkende Spannung stets als

$$\sigma = F/A_0$$

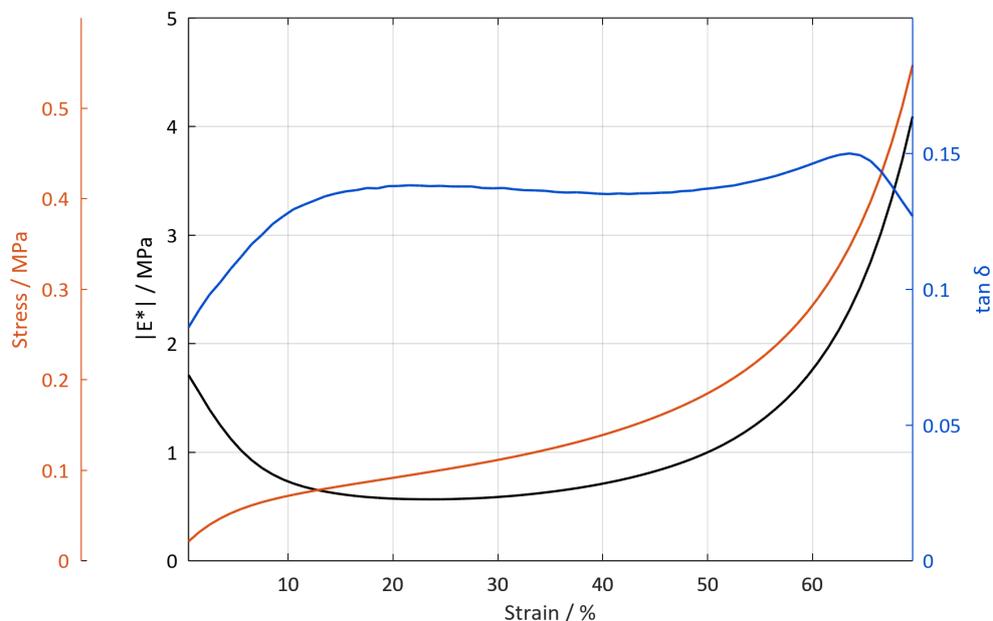
berechnet werden. Dabei ist F die Kraft und A_0 der nominelle Ausgangsquerschnitt.

Da sich die Länge der Probe stark ändert, sollte die dynamische Dehnung stets auf die aktuelle Probenlänge bezogen werden, also

$$\varepsilon = \Delta L/L_m$$

mit der Verformung ΔL und der aktuellen Probenlänge L_m . Damit ergibt sich der Geometriefaktor zur Berechnung des Moduls zu L_m/A_0 .

Dieser Faktor gilt generell für kompressible Materialien und kann direkt in der EPLEXOR®9-Software ausgewählt werden.



4 Statischer Sweep von 0,5 % bis 70 % Dehnung, dynamisch 0,5 % Dehnung bei 10 Hz

APPLICATIONNOTE Mechanische Charakterisierung eines PUR-Schaums mittels DMA – Statisch und dynamisch kein Problem!

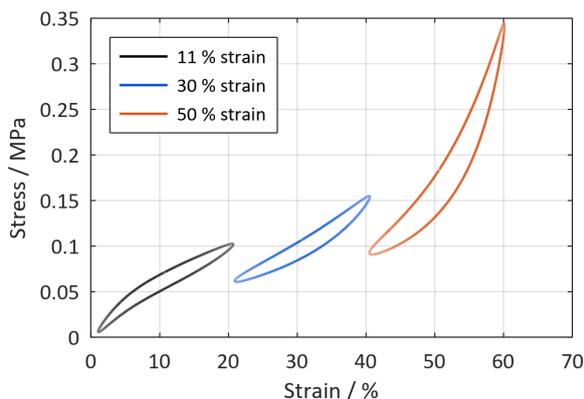
In der statischen Prüfung konnte das Dämpfungsvermögen des Schaums anhand der Hysterese der gesamten Verformung charakterisiert werden. Die DMA ermöglicht eine wesentlich genauere Charakterisierung, da zu jeder statischen Last eine lokale Dämpfung bestimmt werden kann. Es wird klar, dass der Schaum im Bereich kleiner Verformungen nur ein kleines Dämpfungsvermögen aufweist. Die Dämpfung (hier $\tan \delta$) bleibt im Plateaubereich dann relativ konstant und nimmt im Verdichtungsbereich dann erneut zu. Somit ermöglicht die DMA die korrekte Bestimmung des Dämpfungsvermögens im belasteten Zustand.

Das nichtlineare Materialverhalten zeigt sich völlig analog, wenn die dynamische Schwingamplitude erhöht wird. In Abbildung 5 sind jeweils die Hysteresen eines dynamischen Schwingenspiels (mit 10 % dynamischer Dehnungsamplitude) bei verschiedenen statischen Dehnungen dargestellt. Erneut ergibt sich der lokale E-Modul aus der Steigung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Es wird sichtbar, dass die Steifigkeit im Bereich kleiner statischer Dehnungen zunächst abnimmt (degressive Steifigkeit) und dann bei großen Dehnungen erneut ansteigt (progressive Steifigkeit). Bei großen dynamischen Amplituden zeigt sich dieses Verhalten auch in der Verformung der Hysterese. Die mit der statischen Vorlast gestiegene Dämpfung macht sich ebenfalls im größeren Flächeninhalt der Hysteresen bemerkbar

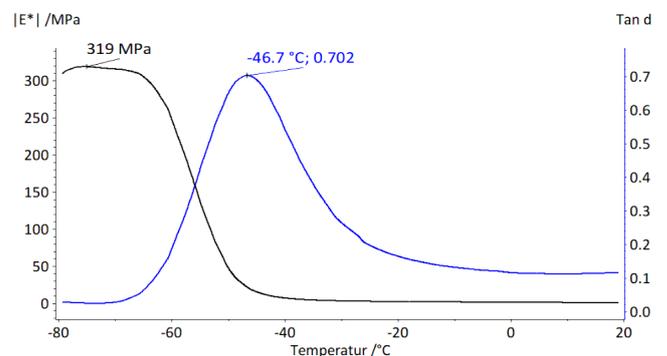
Temperaturverhalten

Der DMA Gabo EPLEXOR® ermöglicht neben der Messung des mechanisch nichtlinearen Materialverhaltens insbesondere auch die thermisch mechanische Analyse. So sind die zuvor durchgeführten Analysen auch bei erhöhten Temperaturen oder Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts möglich. Die thermische Charakterisierung erfolgt meist im linearen Bereich kleiner Amplituden. Aufgrund der stark isolierenden Wirkung des Schaums wurde eine niedrige Heizrate von 2 K/min gewählt.

Neben dem direkten Temperaturverhalten interessieren häufig auch die Materialeigenschaften bei Frequenzen, die messtechnisch nicht direkt zugänglich sind. Das betrifft beispielsweise die Verwendung von Schäumen zur akustischen Dämmung. Hier kann die Methode der Zeit-Temperatursuperposition genutzt werden, um Masterkurven zu erstellen. So sind auch Aussagen über das Materialverhalten bei weit höheren Frequenzen



5 Statischer Sweep von 0,5 % bis 50 % Dehnung, dynamisch 10 % Dehnung bei 10 Hz.



6 Temperatursweep mit einer dynamischen Amplitude von 0,2 % bei 1 Hz, einem statischen Proportionalitätsfaktor von 1,5 und einer Heizrate von 2 K/min

APPLICATIONNOTE Mechanische Charakterisierung eines PUR-Schaums mittels DMA – Statisch und dynamisch kein Problem!

Fazit

Der DMA Gabo EPLEXOR® 500 N bietet hinreichende Kraftreserven um Schäume in aussagekräftigen Probengrößen zu vermessen – so kann das nichtlineare und zeitabhängige mechanische Verhalten charakterisiert werden. Über die Aussagen des Spannungs-Dehnungsdiagramms hinaus kann mit der DMA die Steifigkeit und Dämpfung auch im gestauchten Zustand bestimmt werden. Weiterhin kann mit der DMA auch das Temperaturverhalten und mittels der Masterkurventechnik der E-Modul bei hohen Frequenzen mit nur einem Gerät bestimmt werden. Dies ermöglicht die Charakterisierung von Schäumen für vielfältige Anwendungsszenarien.

Literaturverzeichnis

- [1] Keller, J.-H., 2019. Hysteresismessungen an Partikelschäumen: Erstellung eines Modells zur Simulation der Mitteldehnung bei dynamischer Ermüdung. Bayreuth
- [2] www.wiki.polymerservice-merseburg.de, 2022. www.wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Stauchhärte. [Online].