

# Messung der dynamischen Steifigkeit von Dämmstoffen: Einfluss von statischer Last, Nichtlinearitäten und Strömungswiderstand

Heinrich Bietz, Volker Wittstock, Martin Schmelzer

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig [heinrich.bietz@ptb.de](mailto:heinrich.bietz@ptb.de)

## Einleitung

Die dynamische Steifigkeit eines Dämmstoffes ist ein erforderlicher Parameter, um die Schalldämmung mehrlagiger Konstruktionen abschätzen zu können. Beispiele dafür sind schwimmende Estriche oder Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS). Für Unterlagen von schwimmenden Estrichen ist die Messung der dynamischen Steifigkeit in DIN EN 29 052-1<sup>1</sup> beschrieben. Bei näherer Betrachtung der Norm tauchen einige Fragen auf, zu denen bereits in letzter Zeit Untersuchungen durchgeführt wurden<sup>2</sup>. In diesem Beitrag liegt der Schwerpunkt auf dem nunmehr realisierten alternativen Messaufbau für leichte Vorlasten. Weiterhin wird erneut auf die Fragestellungen der Abhängigkeit von der Anregungskraft und den Einfluss der im Dämmstoff eingeschlossenen Luft eingegangen.

## Genormtes Messverfahren

Der Prüfkörper mit den Maßen 200x200 mm<sup>2</sup> wird auf eine schwere (>100 kg) Basisplatte gelegt und mit einer Masse in Form einer Stahlplatte beaufschlagt, so dass ein Feder-Masse-System entsteht (Bild 1). Die Stahlplatte bildet eine Flächenlast  $m'_t$  von 200 kg/m<sup>2</sup>. Durch Anregung der Stahlplatte (Sinus mit konstanter Kraft oder Hammer) und Messung des Antwortsignals auf der Stahlplatte, z.B. mit einem Beschleunigungsaufnehmer, wird die Resonanzfrequenz  $f_r$  des Systems messtechnisch bestimmt. Die scheinbare flächenbezogene dynamische Steifigkeit  $s'_t$  ist dann bei der Resonanzfrequenz  $\omega_r$

$$s'_t = m'_t \omega_r^2 \quad (1)$$

Abhängig vom Strömungswiderstand des Probekörpers wird ggf. noch die dynamische Steifigkeit  $s'_a$  des enthaltenen Luftvolumens addiert.

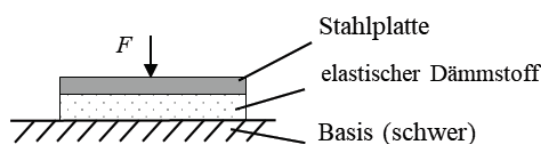


Bild 1: Prinzipieller Messaufbau Normverfahren

## Alternatives Messverfahren für leichte Vorlasten

### Messaufbau und Auswertung

Wird ein Dämmstoff in einem WDVS verwendet, ist die statische Vorlast erheblich kleiner. In DIN EN 29052-1 wird angemerkt, dass die mit einer Vorlast von 2 kPa gemessenen Werte um 10 bis 20% höher liegen als Werte, die mit einer geringeren Vorlast ermittelt werden, und der Einfluss deshalb von untergeordneter Bedeutung ist. Da der genormte Messaufbau für kleine Vorlasten nicht geeignet ist, wurde ein alternativer Messaufbau konzipiert. Dieser ist in Bild 1 schematisch dargestellt. Eine Grundplatte mit einer Masse  $m_1$  von 13 kg ist direkt auf einen Schwingerreger montiert, der hohe statische Lasten aufnehmen kann. Darauf folgen der Probekörper und als leichte Vorlast eine

steife Platte, deren Masse  $m_2$  zusammen mit der immer erforderlichen Ausgleichsschicht aus Gips ca. 0,3 kg beträgt. Das ganze System wird durch den Shaker mittels eines Gleitsinus-Signals angeregt, und die resultierenden Beschleunigungen  $a_1$  und  $a_2$  werden gemessen. Abschließend wird die komplexe Transferfunktion  $a_1/a_2$  berechnet. Bild 3 zeigt den realisierten Aufbau.

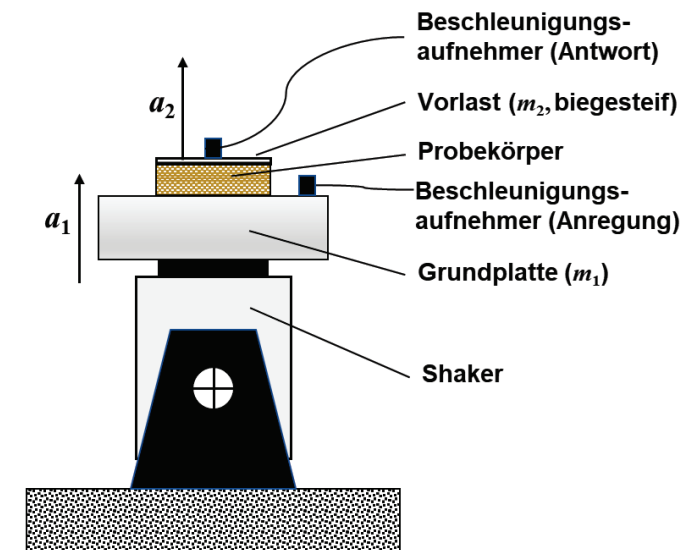


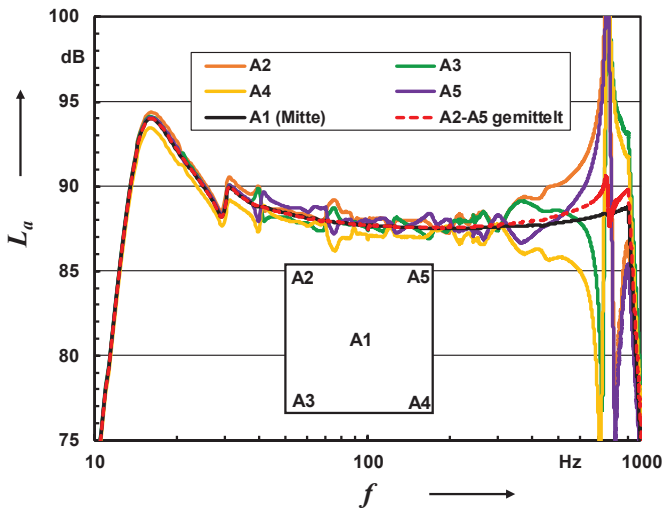
Bild 2: Prinzipskizze des alternativen Messaufbaus



Bild 3: Realisierter alternativer Messaufbau

Grundsätzlich ist es günstig, die Beschleunigung von Grundplatte und Vorlast in Plattenmitte zu messen, um unvermeidliche Taumel- und Kippbewegungen der Platten möglichst nicht mit zu erfassen. Dies ist jedoch bei der Grundplatte gar nicht möglich. Deshalb wird hier die Beschleunigung auf den Ecken der Platte gemessen, und die erhaltenen Beschleunigungsspektren werden anschließend komplex gemittelt. Wie aus Bild 4 ersichtlich ist, liefert dieses Verfahren über einen weiten Frequenzbereich einen nahezu identischen Frequenzgang wie die

Messung in Plattenmitte. Ab ca. 300 Hz setzt allmählich eine Abweichung ein, wahrscheinlich, weil hier die Grundplatte nicht mehr als starrer Körper schwingt.



**Bild 4:** Spektrum der Beschleunigung auf der Grundplatte, gemessen in Plattenmitte und an den Ecken

Die dynamische Steifigkeit kann nun abhängig von der Frequenz  $\omega$  bestimmt werden. Der einfachste Ansatz hierzu ist ein Masse-Feder-Masse System mit verlustloser Feder:

$$s'_t = m'_2 \omega^2 \frac{1}{1 - a_1/a_2} \quad (2)$$

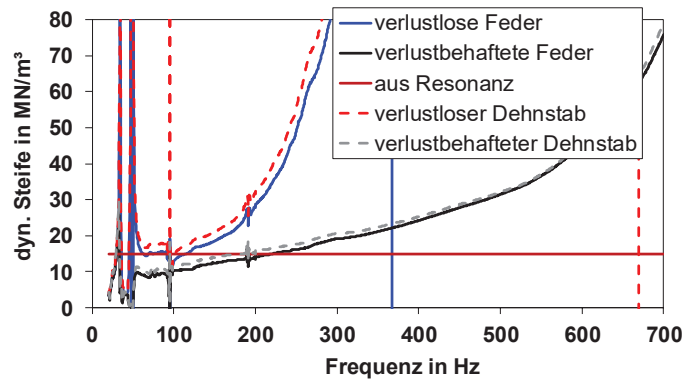
Im Resonanzfall geht der Wert des Bruchs auf der rechten Seite gegen 1, und wir erhalten die aus dem Normverfahren bekannte Gleichung (1). Allerdings muss die Resonanzfrequenz  $\omega_t$  aus der Transferfunktion  $a_1/a_2$  und nicht aus  $a_2$  entnommen werden, da abweichend vom Normverfahren die Grundplatte nicht als ruhend angenommen werden kann. Realistischer ist es, den Dämmstoff als verlustbehaftete Feder anzusetzen. Letztlich ergibt sich dann für die dynamische Steifigkeit

$$s'_t = m'_2 \omega^2 \frac{1 - v_1/v_2 \cos \varphi}{(1 - a_1/a_2 \cos \varphi)^2 + (a_1/a_2 \sin \varphi)^2} \quad (3).$$

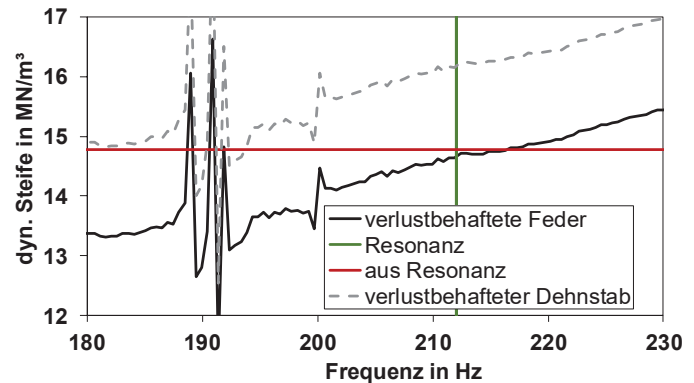
Beide Ansätze gehen von konzentrierten Bauteilen (reine Massen und Federn) aus. Da bei leichten Vorlasten die Masse des Probekörpers nicht mehr vernachlässigbar ist, kommt auch eine Modellierung des Dämmstoffes als verlustfreier oder verlustbehafteter Dehnstab in Betracht. Die resultierenden Gleichungen lassen sich nur noch numerisch unter der Wahl geeigneter Startparameter lösen und sollen hier nicht näher beschrieben werden.

**Messergebnisse**

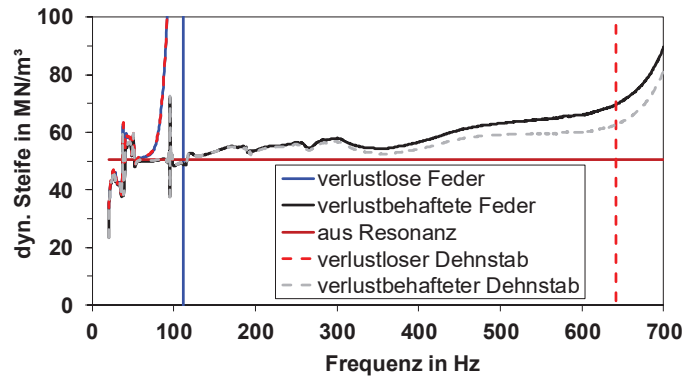
Es wurden bisher nur an einer Probe Messungen durchgeführt (EPS 80 mm, siehe auch Bild 3). Hier wurden neben der leichten Vorlast auch eine Zusatzmasse von 2,5 kg sowie die bei den Normmessungen verwendete Stahlplatte eingesetzt (Bild 9). Als Anregungssignal wurde ein Sinus-Sweep verwendet. Die Berechnung der dynamischen Steifigkeit aus der Transferfunktion  $a_1/a_2$  wurde sowohl frequenzabhängig nach den vorstehend beschriebenen Ansätzen als auch bei der Resonanzfrequenz nach Gleichung (1) durchgeführt. In Bild 5 bis Bild 8 ist eine Auswahl der Ergebnisse für 0,3 kg Vorlast und 8 kg Vorlast dargestellt.



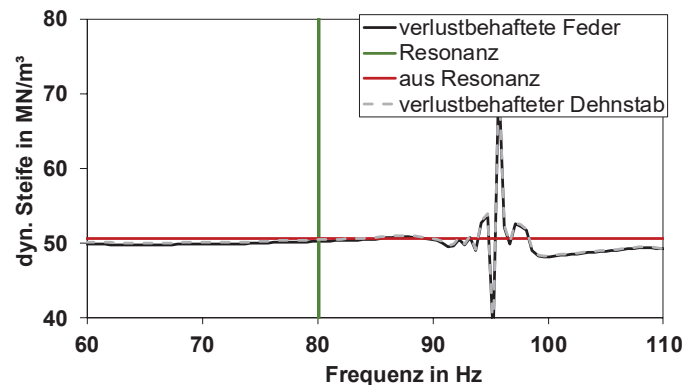
**Bild 5:** Messung ohne Zusatzmasse ( $m_2 = 0,3 \text{ kg}$ )



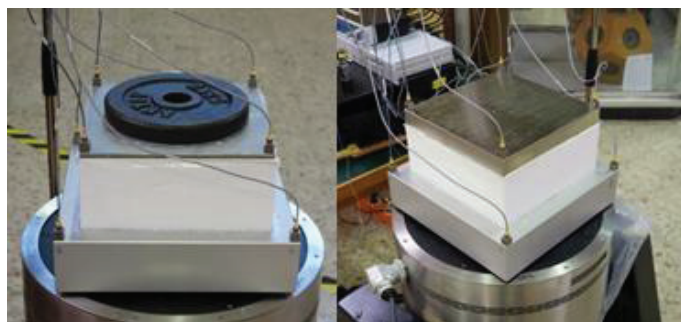
**Bild 6:** Vergrößerter Ausschnitt aus Bild 5



**Bild 7:** Messung mit Stahlplatte ( $m_2 = 8,0 \text{ kg}$ )



**Bild 8:** Vergrößerter Ausschnitt aus Bild 7



**Bild 9:** Messaufbau mit 2,5 kg Zusatzmasse (li) und Stahlplatte (re)

Insbesondere bei der Messung mit der Stahlplatte liefern die verlustlosen Ansätze in weiten Bereichen keine sinnvollen Ergebnisse. Dagegen liefern die verlustbehafteten Auswertungen nicht nur plausible und in weiten Frequenzbereichen sehr ähnliche Werte, es wird auch bei der Resonanzfrequenz der mit Gleichung (1) ermittelte Wert sehr gut getroffen. Gerade im Falle der leichten Vorlast würde man allerdings erwarten, dass der Dehnstab den Wert aus der Resonanzfrequenz besser trifft. Allerdings liegen die Kurven für Feder und Dehnstab nicht so weit auseinander, und natürlich ist auch die Bestimmung der Resonanzfrequenz mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Ziel des alternativen Messaufbaus ist die Klärung der Abhängigkeit der dynamischen Steife von der Vorlast. Für das hier untersuchte Material stellt sich diese bei konstanter Anregungsstärke (d.h. in den Shaker eingespeisten Strom) wie folgt dar:

**Tabelle 1:** Abhängigkeit der dynamischen Steife von der Vorlast, EPS 80 mm

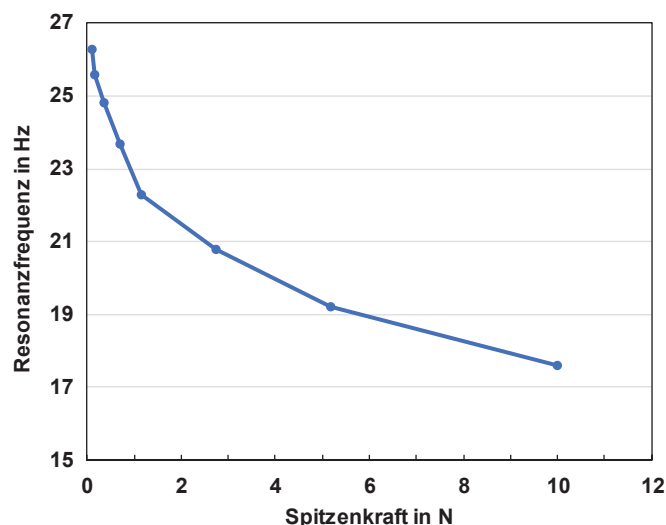
$m_2$ in kg	0,3	2,8	8,0
$f_{res}$ in Hz	212,0	95,7	80,1
$s_t'$ in MN/m <sup>3</sup>	14,8	25,6	50,7

Die dynamische Steifigkeit ist hier bei kleiner Vorlast im Vergleich zur genormten Vorlast mehr als einen Faktor drei niedriger. Dies steht zunächst im Widerspruch zu der Angabe in der Norm, dass eine Abweichung von 10 bis 20% zu erwarten ist. Natürlich ist dies nur ein Einzelergebnis, dem weitere Untersuchungen folgen müssen.

### Einfluss der Anregenden Kraft

Bei den meisten verwendeten Dämmstoffen ist bei der Messung der dynamischen Steifigkeit eine Abhängigkeit von der anregenden Wechselkraft zu beobachten. Für diesen Fall schreibt die Norm je nach Steifigkeit (größer oder kleiner 50 MN/m<sup>3</sup>) bei Anregung mit Sinussignal vor, die Anregekraft in einem Intervall von  $0,2 \text{ N} \leq F \leq 0,8 \text{ N}$  bzw.  $0,1 \text{ N} \leq F \leq 0,4 \text{ N}$  zu variieren, wobei durch Messung an jeweils mindestens drei Punkten innerhalb des jeweiligen Intervalls und Extrapolation auf 0 N die gesuchte Resonanzfrequenz zu ermitteln ist. In der Norm wird keine Angabe gemacht, ob es sich bei den Kräften um Spitzen- oder Effektivwerte handelt. Da die Steifigkeit mit zunehmender Anregekraft üblicherweise abnimmt, liefert die Extrapolation auf 0 N einen konservativen Wert. Problematisch ist, dass der Verlauf der Resonanzfrequenz über die anregende Kraft in Nullpunktnähe sehr steil sein kann, wie das in Bild 1 gezeigte Beispiel veranschaulicht. Darüber hinaus ist eine Realisierung insbesondere im Intervall von  $0,1 \text{ N} \leq F \leq 0,4 \text{ N}$  messtechnisch anspruchsvoll, und letztlich ist eine Anregung mit 0 N kein realistischer Fall. Hieraus resultiert der pragmatische Vorschlag<sup>2</sup>, die Messung mit einer Kraft von 1 N (Spitzenwert)

durchzuführen. Dabei ergab sich die Fragestellung, wie groß dabei die Abweichung zur Extrapolation auf 0 N üblicherweise ist. Tabelle 2 zeigt eine entsprechende Auswertung, die für in der PTB gemessene Dämmstoffe vorgenommen wurde.



**Bild 10:** Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der anregenden Kraft; Mineralwolle 40 mm

**Tabelle 2:** Vergleich Extrapolation auf 0 N vs. Messung bei 1 N

Material	$d$ in mm	$s'_{t,0N}$ in MN/m <sup>3</sup>	$s'_{t,1N}$ in MN/m <sup>3</sup>
XPS	30	295	290
Mineralwolle 1	40	3,4	2,7
Mineralwolle 2	40	34,8	29,1
Mineralwolle 3	40	5,7	4,5
Kokosfaser	35	3,5	2,7

Erwartungsgemäß liefert die Messung mit 1 N bis zu 30 % niedrigere Werte als die Extrapolation auf 0 N. Da jedoch auch eine Kraft von 1 N am unteren Rand der in der Praxis zu erwartenden Werte liegt (siehe hierzu auch <sup>2</sup>), ist auch dies als konservative Schätzung anzusehen. In Anbetracht der bereits diskutierten Probleme bei der Extrapolation auf 0 N könnte also eine Anregung mit 1 N durchaus in Betracht gezogen werden. Noch offen ist die Frage, wie hinsichtlich der anregenden Kraft bei der ebenfalls möglichen Impulsanregung verfahren werden soll, hierzu finden sich in der Norm auch keine Angaben.

### Einfluss der Luftfeder

Bei einem schwimmenden Estrich erfolgt an den Rändern eine Abdichtung mit einem Randdämmstreifen. Das in dem Dämmstoff eingeschlossene Luftvolumen wirkt somit bei einer dynamischen Anregung des Estrichs als Feder. Deren Steifigkeit wird bei der Messung, abhängig vom Strömungswiderstand der Probe, nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt, da die Probe an den Seiten offen ist. Hierzu beschreibt die Norm einen Korrekturterm  $s_a'$ , der in den meisten Fällen über eine einfache Zahlenwertgleichung abgeschätzt werden kann. Ob dieser zu  $s_t'$  hinzuaddiert wird oder nicht, hängt dann vom längenbezogenen Strömungswiderstand  $r$  der Probe ab, welcher lateral, also quer zur Anregungsrichtung, gemessen sein muss. Interessanterweise beinhaltet die Norm ein nationales Vorwort, in dem als Wert für

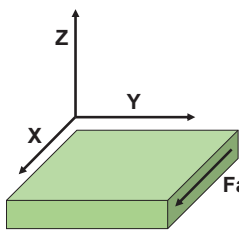
einen „hohen“ Strömungswiderstand 1000 kPa s/m<sup>2</sup> statt 100 kPa s/m<sup>2</sup> gefordert wird, was aber in der Norm nicht berücksichtigt wurde. Diese Forderung basiert auf einer Publikation von KRAAK<sup>3</sup> und ist physikalisch plausibel. Allerdings beginnt auch hier der Bereich des „mittleren“ Strömungswiderstandes erst bei  $r < 100$  kPa s/m<sup>2</sup>, so dass der Bereich zwischen 1000 kPa s/m<sup>2</sup> und 100 kPa s/m<sup>2</sup> quasi ausgeklammert wird. Darüber hinaus kann für „kleine“ Strömungswiderstände ( $r < 10$  kPa s/m<sup>2</sup>)  $s'$  nur dann bestimmt werden, wenn  $s'_a$  gegenüber  $s'_t$  vernachlässigbar ist. Tabelle 1 ist ein Versuch, diese Sachverhalte übersichtlich darzustellen.

**Tabelle 3:** Bestimmung der dynamischen Steifigkeit  $s'$  in Abhängigkeit vom längenbezogenen Strömungswiderstand  $r$ , der in Rot gedruckte Eintrag bezieht sich auf das nationale Vorwort in DIN EN 29052-1

Strömungswiderstand in kPa s/m <sup>2</sup>	Luftfeder in MN/m <sup>3</sup>	dyn. Steifigkeit in MN/m <sup>3</sup>
$r \geq 1000$	-	$s' = s'_t$
$r \geq 100$	-	$s' = s'_t$
$100 > r > 10$	-	$s' = s'_t + s'_a$
$r < 10$	$s'_a \ll s'_t$	$s' = s'_t$
$r < 10$	$s'_a \approx s'_t$	keine Angabe

Diese Herangehensweise impliziert einige praktische Probleme. Eine Bestimmung des Strömungswiderstandes ist mit den meisten verwendeten Messapparaturen nur in orthogonaler Richtung möglich, weshalb Werte für laterale Messungen kaum zu finden sind. Nun gibt es aber bei vielen Materialien fertigungsbedingt eine erhebliche Abhängigkeit von der Messrichtung, wie Tabelle 4 anhand eines Ergebnisses für ein handelsübliches Material zeigt:

**Tabelle 4:** Strömungswiderstand eines Faserdämmstoffes in Abhängigkeit von der Messrichtung

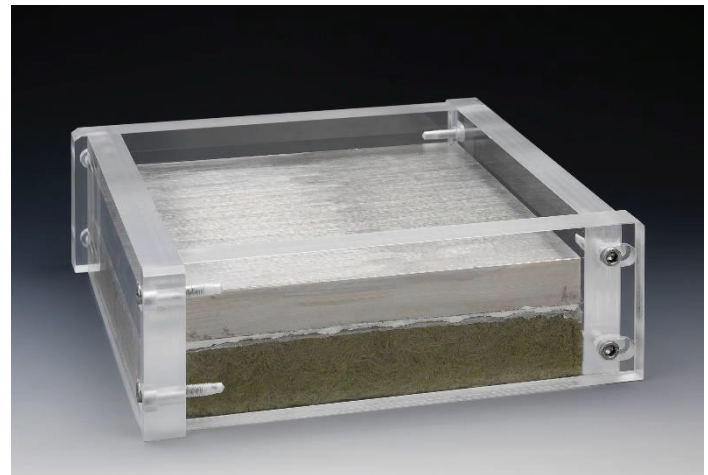


$r(X)$	$r(Y)$	$r(Z)$
7 kPa s/m <sup>2</sup>	7 kPa s/m <sup>2</sup>	15 kPa s/m <sup>2</sup>
$s'_t = 3,9$ MN/m <sup>3</sup>		$s'_a = 2,8$ MN/m <sup>3</sup>

Setzt man den orthogonal (Z-Richtung) gemessenen Wert für  $r$  an, ergibt sich nach Tabelle 3 eine dynamische Steifigkeit  $s'$  von 6,7 MN/m<sup>3</sup>, diese wird auch vom Hersteller in dieser Größenordnung angegeben. Verwendet man hingegen den (von der Norm geforderten) Wert in lateraler Richtung, ist die Angabe eines Messwertes gar nicht möglich!

Ein alternativer Ansatz könnte darin bestehen, die Ränder der Probe bei der Messung abzudichten. Dies entspricht in etwa einer realen Einbausituation, unter der Voraussetzung, dass der Estrich als starre Platte schwingt. In der PTB wurde der in Bild 11 dargestellte Versuchsaufbau mit einem verstellbaren

Rahmen aus Acrylglas realisiert.



**Bild 11:** Aufbau mit Rahmen zur seitlichen Abdichtung

Der Wert für  $s'_t$  betrug ohne Rahmen 3,7 MN/m<sup>3</sup>. Addiert man die Steifigkeit der Luftfeder, ist  $s' = 6,5$  MN/m<sup>3</sup>. Die Messung mit Rahmen liefert  $s' = 5,0$  MN/m<sup>3</sup>. Da aufgrund des Strömungswiderstandes der Probe in lateraler Richtung für die in der Norm beschriebene Prozedur eigentlich gar kein Wert für  $s'$  angegeben werden kann, könnte die Abdeckung der Seiten einen gangbaren Weg darstellen, aber auch hierzu sind noch weitere Untersuchungen erforderlich.

### Zusammenfassung

Ein alternativer Messaufbau zur Bestimmung der dynamischen Steifigkeit von Dämmstoffen bei kleiner Vorlast wurde erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen. Eine erste Messung zeigt eine erhebliche Abhängigkeit der dynamischen Steifigkeit von der statischen Vorlast für den untersuchten Dämmstoff. Hinsichtlich des Einflusses der anregenden Kraft auf die Steifigkeit konnte gezeigt werden, dass eine Messung mit 1 N Anregekraft eine praxisgerechte Alternative zur Extrapolation auf 0 N darstellt. Die Schwierigkeiten bei der Berücksichtigung der Federsteife der eingeschlossenen Luft wurden erneut dargelegt. Eine mögliche Lösung könnte in der Abdeckung der Seitenflächen bestehen.

### Ausblick

Zu allen behandelten Themen sind weitere Untersuchungen erforderlich. Der Messaufbau für kleine Vorlasten kann technisch noch verbessert werden, insbesondere der verwendete schwere Shaker ist nicht unproblematisch. Letztlich sollen die Ergebnisse dieser Untersuchungen bei der anstehenden Überarbeitung der ISO 9052-1 mit einfließen.

<sup>1</sup> DIN EN 29 052-1: 1992 Akustik - Bestimmung der dynamischen Steifigkeit. Teil1: Materialien, die unter schwimmenden Estrichen in Wohngebäuden verwendet werden.

<sup>2</sup> Bietz, H.; Wittstock, V.: Investigations to determine the dynamic stiffness of elastic insulating materials, Euronoise 2018, Tagungsband

<sup>3</sup> Kraak, W.: Der Einfluss des Strömungsstandwerts bei der Bestimmung der dynamischen Steifigkeit poröser Dämm-Materialien. Hochfrequenztechnik und Elektroakustik Band 67 (1959)