

Untersuchungen zur Bestimmung der dynamischen Steifigkeit elastischer Dämmstoffe

Heinrich Bietz, Volker Wittstock

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig heinrich.bietz@ptb.de

Einleitung

Nach DIN 4109¹ kann die bewertete Trittschallminderung eines schwimmenden Estrichs rechnerisch abgeschätzt werden. Ein dafür benötigter Parameter ist die dynamische Steifigkeit der elastischen Unterlage, welche nach EN 29 052-1² bestimmt werden kann. In der PTB sollen im Rahmen eines Forschungsprojektes die dynamischen Steifigkeiten von Dämm-Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen bestimmt werden. Da das in der Norm beschriebene Messverfahren einige Fragen aufwirft, wurden zunächst grundlegende Untersuchungen hierzu angestellt, die wesentlicher Teil dieses Berichts sind. Weiterhin sind Überlegungen zu einem alternativen Messaufbau angestellt worden, der auch Messungen mit kleiner statischer Vorlast ermöglicht.

Messverfahren

Die zu charakterisierende Dämmstoffprobe mit den Maßen 200x200 mm² wird mit einer Masse in Form einer Stahlplatte beaufschlagt, so dass ein Feder-Masse-System entsteht. Die Stahlplatte ist so dimensioniert, dass sie einer Flächenlast m'_t von 200 kg/m² entspricht. Nun wird die Resonanzfrequenz f_t messtechnisch bestimmt. Die scheinbare dynamische Steifigkeit s'_t ist dann

$$s'_t = 4\pi^2 \cdot m'_t \cdot f_t^2 \quad (1).$$

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

Als bevorzugte Anregung wird ein Gleitsinus (Sweep) mit konstanter Kraft empfohlen. Ist s'_t kraftabhängig, soll der Messwert in einem festgelegten Intervall an mindestens drei Messpunkten bestimmt und das Ergebnis auf eine Kraft von 0 N extrapoliert werden. In der Norm ist nicht angegeben, ob es sich bei den Kräften um Spitzen- oder Effektivwerte handelt. Die Verwendung von Rauschsignalen und Impulsanregung ist ebenfalls möglich, hier werden aber keine Vorgaben hinsichtlich der Anregungskräfte gemacht.

Abschätzung realistischer Anregekräfte

Wenn die dynamische Steifigkeit abhängig von der anregenden Kraft ist, stellt sich die Frage, ob eine Extrapolation auf 0 N sinnvoll ist. Zur Abschätzung tatsächlich auftretender Kräfte wird ein elektromechanisches Modell herangezogen. Der in Bild 1 gezeigte Messaufbau wird im Modell (Bild 2) durch eine Kraft F angeregt, die parallel auf die Masse m der Auflast und die Feder mit der Konstanten k wirkt. Letztere hängt direkt von der dynamischen Steifigkeit s' und der Oberfläche A des Prüfkörpers ab und berechnet sich aus

$$k = s' A \quad (2).$$

Die tatsächlich einwirkende Kraft kann während der Messung mittels eines Kraftaufnehmers bestimmt werden. Das Verhältnis

zwischen Schnelle v und Kraft F ergibt sich dann direkt aus

$$\frac{v}{F} = \frac{j \omega / k}{1 - \omega^2 m / k} \quad (3).$$

Verluste werden in diesem einfachen Modell nicht berücksichtigt, dies könnte aber recht einfach durch die Einführung einer komplexen Federkonstante k erfolgen.

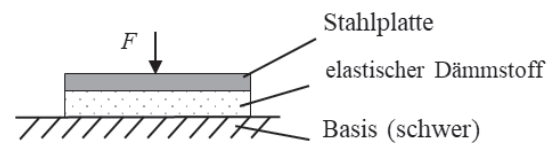


Bild 1: Schematischer Messaufbau

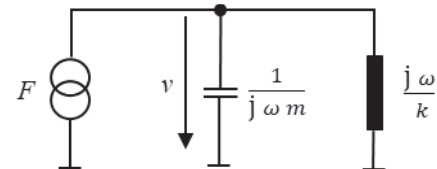


Bild 2: Elektromechanisches Ersatzschaltbild des Messaufbaus

In situ wird die Stahlplatte durch einen Estrich ersetzt, der durch einen Geher oder ein Normhammerwerk angeregt wird. Zur Modellierung dienen hier die Kurzschlusskraft F_S und die Mobilität Y_S der Quelle, die Mobilität Y_{ff} des Estrichs und die Feder (Bild 3). Das Verhältnis von Schnelle v zu Quellkraft F_S ist dann

$$\frac{v}{F_S} = \frac{j \omega Y_S Y_{ff} / k}{Y_S Y_{ff} + j \omega (Y_S + Y_{ff}) / k} \quad (4).$$

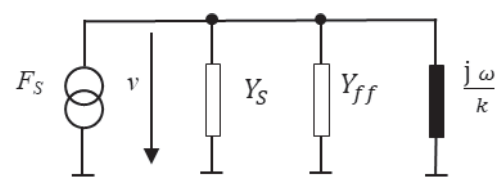


Bild 3: Ersatzschaltbild für in situ Bedingungen

Für eine realistische Anregung des Testaufbaus müssen die Schnellen in beiden Fällen gleich sein, somit gilt für F

$$F = F_S \frac{1 - \omega^2 m / k}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{k} \frac{Y_S + Y_{ff}}{Y_S Y_{ff}}\right)^2 + 1}} \quad (5).$$

Quellparameter für menschliche Geher und Hammerwerke finden sich z.B. in³. Die Mobilität des Estrichs ergibt sich aus der Annahme der Punktmobilität einer unendlich großen Betonplatte mit 35 bis 60 mm Dicke. Bei Gehern wird für Impulsdauern zwischen 0,01 und 0,1 s eine Kraft von 1 bis 30 N abgeschätzt. Für Hammerwerke liegt die Kraft zwischen 150 und 1000 N.

Messungen

Um einige der Fragestellungen näher zu untersuchen, wurden eine Reihe von Messungen durchgeführt. Als Probekörper kamen solche aus Hart- und Weichschaum (XPS, EPS, PU) sowie faserförmige Dämmstoffe (Glaswolle, Steinwolle und Kokosfaser) zum Einsatz. Als Basis diente eine elastisch gelagerte Betonplatte von ca. 400 kg. Die Schwingung der Stahlplatte wurde mit einem nahe der Plattenmitte angebrachten Beschleunigungsaufnehmer gemessen. Für Impulsanregung wurde ein Modalhammer mit auswechselbaren Spitzen (Gummi, Plastik, Stahl) verwendet. Der für Sweepanregung verwendete Shaker wurde auf einem Hubwagen montiert (Bild 4), da ein Aufbau direkt auf der Basis zu unerwünschten Rückwirkungen führte.

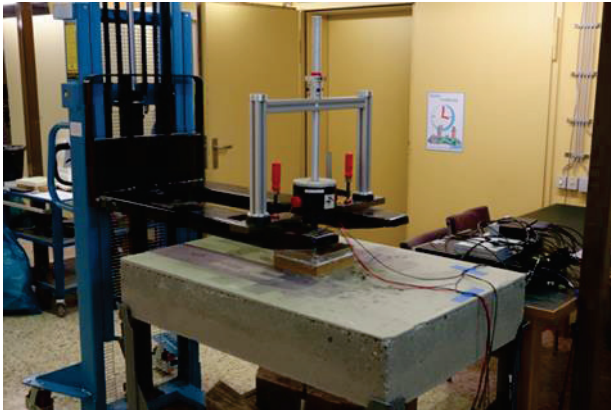


Bild 4: Messaufbau für Anregung mit Sweep

Auswertung von Sweeppmessungen

Grundsätzlich kann hier die Auswertung auch im Zeitbereich erfolgen, indem das Maximum des Antwortsignals bestimmt und die zugehörige Frequenz ermittelt wird. Da jedes natürliche System aber eine Gruppenlaufzeit besitzt, entsteht dabei je nach Anstiegsrate der Sweeppfrequenz ein mehr oder weniger großer Fehler. Bild 5 zeigt ein Beispiel für eine Mineralwolleprobe. Hier wurden verschieden lange Sweeps mit jeweils gleicher Abtastrate und Frequenzintervall verwendet. Während die Auswertung im Frequenzbereich schon recht früh ein stabiles Ergebnis liefert, sind für die Auswertung im Zeitbereich sehr lange Signale erforderlich.

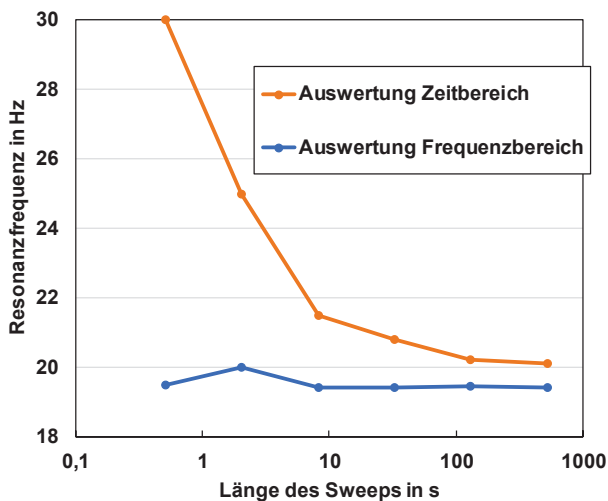


Bild 5: Resonanzfrequenz f_s mit verschiedenen Sweeplängen gemessen, Auswertung in Zeit- und Frequenzbereich

Weitere Vorteile der Auswertung im Frequenzbereich sind die Möglichkeit, den Verlustfaktor des Materials zu bestimmen und die gemessene Beschleunigung auf die anregende Kraft zu normieren. Per Definition erhält man die Resonanzkurve bei konstanter Anregekraft, dies ist aber bei Shakeranregung nur begrenzt realisierbar. Indem man das Antwortsignal im Frequenzbereich durch die Kraft teilt, erhält man die korrekte Resonanzkurve, wie in Bild 6 gezeigt

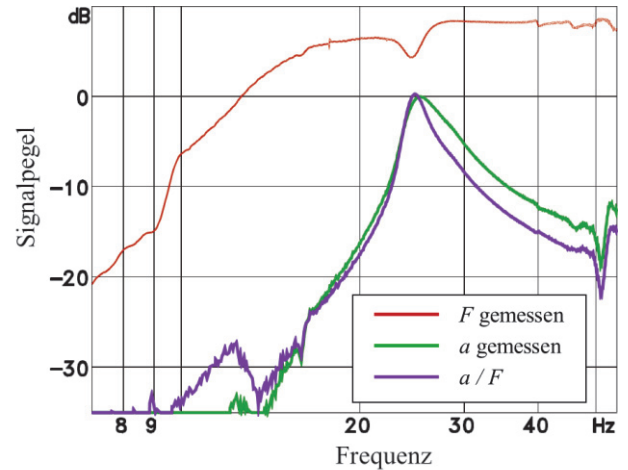


Bild 6: Resonanzkurve wie gemessen und auf Kraft normiert

Messergebnisse

Bild 7 und Bild 8 zeigen Messergebnisse für zwei verschiedene Materialien (Hartschaum und Mineralwolle), bei denen die Anregung sowohl mit Hammer als auch mit Shaker erfolgte. Bei beiden Anregungsarten wurde ein Bereich von Kräften verwendet, der recht gut das mit der verwendeten Ausrüstung technisch machbare abbildet. In Bild 9 und Bild 10 sind weitere Ergebnisse von Faserdämmstoffen gezeigt. Alle untersuchten Materialien zeigen eine deutliche Abhängigkeit der dynamischen Steifigkeit von der anregenden Kraft. Mit zunehmender Anregungsstärke sinkt die Resonanzfrequenz und somit die nach (1) berechnete dynamische Steifigkeit bei gleichzeitig zunehmendem Verlustfaktor des Feder-Masse-Systems.

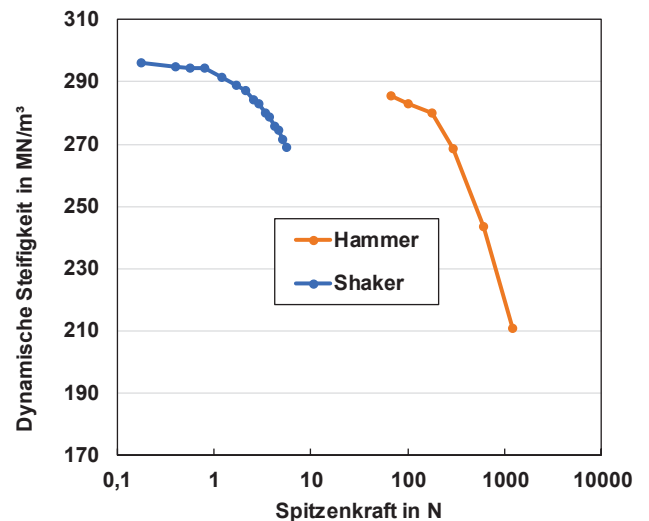


Bild 7: Dynamische Steifigkeit s'_t , 30 mm XPS Schaum

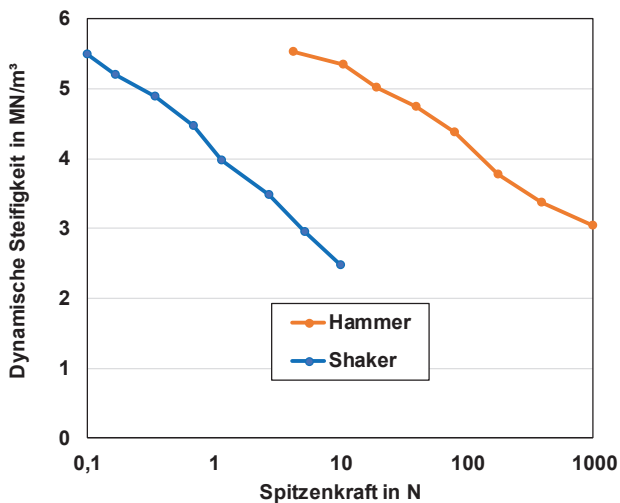


Bild 8: Dynamische Steifigkeit s'_t , 40 mm Mineralwolle Typ 3

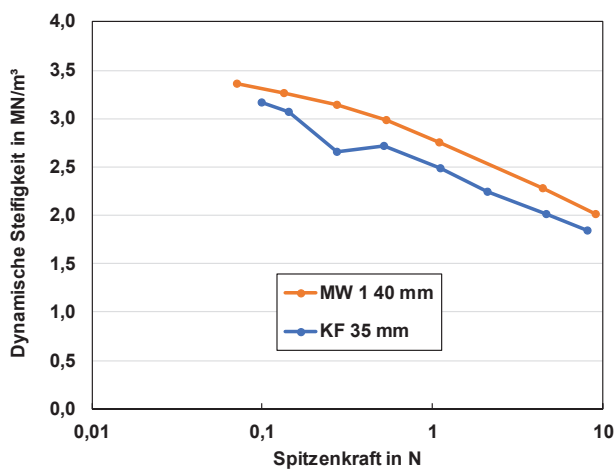


Bild 9: Dynamische Steifigkeit s'_t , 40 mm Mineralwolle Typ 1 und 35 mm Kokosfaser, Shakeranregung

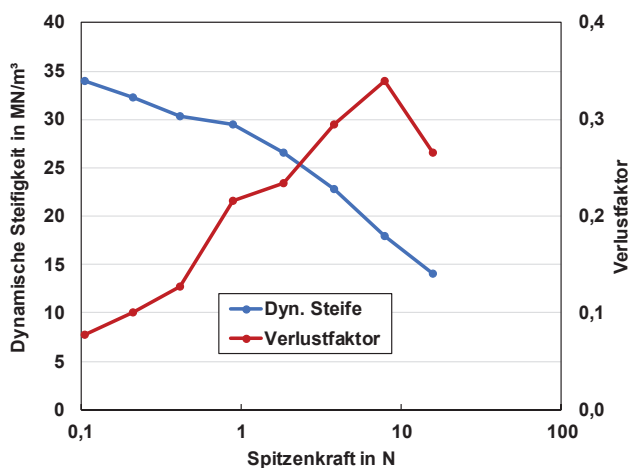


Bild 10: Dynamische Steifigkeit s'_t und Verlustfaktor, 40 mm Mineralwolle Typ 2, Shakeranregung

Alle faserförmigen Dämmstoffe zeigen hinsichtlich der Kraftabhängigkeit ein ähnliches Verhalten. Wird die Kraftachse logarithmisch skaliert, ergibt sich annähernd ein linearer Verlauf. Der gemessene Schaum verhält sich prinzipiell anders, hier ergibt sich bei linearer Kraftachse eher eine Gerade. Die Ergebnisse zeigen auch, dass Hammer und Shaker prinzipiell vergleichbare Ergebnisse über den jeweils möglichen Dynamikbereich liefern. Problematisch ist hier, dass die Spitzenkraft eines

Hammerimpulses natürlich nicht mit der Spitzenkraft bei Sinusanregung vergleichbar ist.

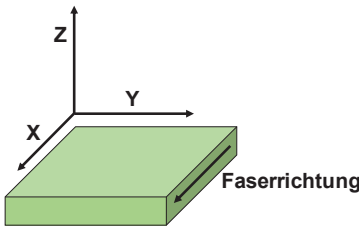
In der Messnorm sind für den Fall, dass die Steifigkeit von der Anregungskraft abhängt, einige Vorgaben gemacht. Abhängig von der zu erwartenden Steifigkeit soll bei Sinusanregung in einem Bereich zwischen 0,2 N und 0,8 N (s größer 50 MN/m³) bzw. zwischen 0,1 N und 0,4 N (s kleiner 50 MN/m³) gemessen und letztlich das Ergebnis durch Extrapolation auf 0 N ermittelt werden. Hinsichtlich der Frage, ob es sich bei den angegebenen Kräften um Spitzen- oder Effektivwerte handelt, und in welcher Form die Extrapolation erfolgen soll, sind in der Norm leider keine weiteren Angaben enthalten. Ebenfalls offengelassen wird, wie mit dieser Vorgabe bei Hammeranregung umzugehen ist. Vor dem Hintergrund der hier aufgeführten Betrachtungen zu realistischen Kräften für in situ Situationen erscheint diese Vorgehensweise zumindest fragwürdig. Als ersten pragmatischen Ansatz wird eine Anregekraft von 1 N (Spitze) vorgeschlagen, dies entspricht ungefähr 100 N (Spitze) bei Verwendung eines Impulshammers mit Gummispitze.

Abhängig vom längenbezogenen Strömungswiderstand r der verwendeten Probe, gemessen in Querrichtung, sieht die Norm einen Korrekturterm s'_a für die Steifigkeit des eingeschlossenen Luftvolumens vor. Diese hängt vom statischen Luftdruck, der Dicke und der Porosität des Dämmmaterials ab und kann für übliche Randbedingungen mit der Zahlenwertgleichung

$$s'_a = 111/d \quad (6)$$

abgeschätzt werden, wobei die Dicke d in mm einzusetzen ist. Diese Korrektur wird für den Fall, dass r im Bereich von 100 kPa s/m² bis 10 kPa s/m² liegt, zu s'_t addiert. Liegt r über 100 kPa s/m², wird sie vernachlässigt. Schwierig wird es, wenn r unter 10 kPa s/m² liegt. Ist in diesem Fall s'_t groß gegenüber s'_a , wird s'_a ebenfalls vernachlässigt. Sind beide Steifigkeiten dagegen in der gleichen Größenordnung, kann die tatsächliche dynamische Steifigkeit s' des Probekörpers nach der EN 29 052-1 nicht bestimmt werden. Nun liegen für viele Proben Messwerte für den Strömungswiderstand aber nur für die Messrichtung senkrecht zur Plattenebene vor, da übliche Messeinrichtungen eine Messung in Querrichtung nicht ermöglichen. Es ist aber zu erwarten, dass bei vielen Materialien, z.B. Mineralwollen, durchaus eine Richtungsabhängigkeit vorliegt, da die Decklagen der Platten oft dichter sind als der Kern. In der PTB wurde eine Messapparatur entwickelt, mit der die Messung in allen Richtungen möglich ist. Tabelle 1 zeigt ein typisches Beispiel für eine handelsübliche Trittschall-Dämmplatte aus Mineralfaser. Während der Strömungswiderstand für beide Richtungen in Plattenebene 7 kPa s/m² beträgt, wird senkrecht zur Platte ein mehr als doppelt so hoher Wert gemessen. Da s'_a hier in der selben Größenordnung ist wie s'_t , kann hinsichtlich der dynamischen Steifigkeit eigentlich nach EN 29 052-1 gar kein Messwert angegeben werden. Weiterhin gilt s'_a nur für die Annahme, dass ein eingebauter Estrich am Rand luftdicht abgeschlossen ist und die Estrichplatte als starrer Körper senkrecht zur Fußbodenebene schwingt. Hier liegt insgesamt eine äußerst unbefriedigende Situation vor, die in Zukunft diskutiert werden sollte.

Tabelle 1: Strömungswiderstand r einer Mineralwolleprobe für verschiedene Messrichtungen



$r(X)$	$r(Y)$	$r(Z)$
7 kPa s/m ²	7 kPa s/m ²	15 kPa s/m ²
$s'_t = 3,9 \text{ MN/m}^3$ ($F_{\text{peak}} = 1 \text{ N}$)		$s'_a = 2,8 \text{ MN/m}^3$

Zusammenfassung

Im Rahmen eines laufenden Forschungsvorhabens wurden verschiedene Aspekte der Messung der dynamischen Steifigkeit nach EN 29 052-1 untersucht. Verschiedene Materialien wurden mit dem genormten Verfahren getestet. Die früher übliche Auswertung der Resonanzkurve im Zeitbereich wird nicht empfohlen. Die Auswertung im Frequenzbereich bietet darüber hinaus die Möglichkeit, das Spektrum der anregenden Kraft zu kompensieren, was zu einer plausibleren Resonanzkurve führt. Alle untersuchten Materialien zeigen eine Abhängigkeit der dynamischen Steifigkeit von der anregenden Kraft. Die hierfür in der Norm vorgeschlagene Messung bei sehr kleinen Kräften mit anschließender Extrapolation auf 0 N muss vor dem Hintergrund zu erwartender Anregungskräfte in situ kritisch betrachtet werden. Es wurde ein erster Vorschlag für eine realistischere Anregung gemacht. Auch können mit einem Impulshammer plausible Ergebnisse gewonnen werden, wobei der Vergleich der Anregungskraft zu Sinusanregung problematisch ist. Ein großes Problem ist, dass bei Heranziehung des Strömungswiderstandes in Querrichtung die Messnorm auch für übliche Materialien eigentlich nicht angewendet werden kann.

Ausblick

Die in der Norm vorgegebene statische Vorlast von 200 N/m² ist für den Einbau eines Dämmstoffes unter schwimmenden Estrichen realistisch. Bei Einsatz in einem Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) wird der Dämmstoff dagegen im Wesentlichen nur durch die Massenträgheit der Außenhaut (z.B. einer Putzlage) belastet. Da die zu erwartenden Resonanzfrequenzen deutlich höher liegen werden, muss eine alternative Auflage nicht nur leicht, sondern auch sehr steif sein, um nicht bereits Eigenschwingungen aufzuweisen. Die geforderten Eigenschaften könnten mit Verbundmaterialien erreicht werden. Da hier eine direkte Anregung der Auflast aus technischen Gründen vielleicht nicht möglich ist, zeigt Bild 11 einen Entwurf für einen Messaufbau mit indirekter Anregung. Darüber hinaus sind weitere Untersuchungen hinsichtlich realistischer Anregekräfte sowie zur Berücksichtigung des eingeschlossenen Luftvolumens erforderlich.

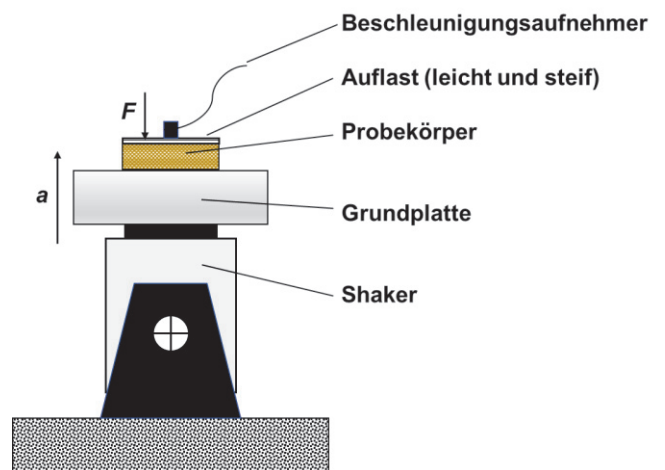


Bild 11: Entwurf für einen Messaufbau mit kleiner Auflast

Danksagung

Die vorgestellten Untersuchungen wurden gefördert durch Mittel des Bundesministeriums für Landwirtschaft und Ernährung aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Förderung erfolgt über die Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V.. Weiterhin bedanken sich die Autoren bei der Firma Saint-Gobain Isover G+H AG für die Bereitstellung von Materialproben.

¹ DIN 4109: 2016 Schallschutz im Hochbau

² EN 29 052-1: 1992 Akustik - Bestimmung der dynamischen Steifigkeit

³ Bietz, H.; Wittstock, V.: In-Situ Charakterisierung menschlicher Geher mit dem Zwei-Platten-Verfahren. DAGA 2010, CDROM