

Lutz Weber, Sven Öhler

# **Akustisch wirksame Kleb- und Dichtstoffe für den Einsatz in Gebäuden**

F 2915

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9495-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

IBP-Bericht B-BA 2/2013

## Akustisch wirksame Kleb- und Dichtstoffe für den Einsatz in Gebäuden

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SF - 10.08.18.7-11.30 / II 3-F20-09-1-273)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Der Bericht umfasst

90 Seiten Text

4 Tabellen

72 Abbildungen

Dr. Lutz Weber

Dipl.-Ing. Sven Öhler

Stuttgart, 5. Mai 2014

Institutsleiter

Abteilungsleiter

Bearbeiter

Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
K. Sedlbauer

Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
P. Leistner

Dr.  
L. Weber

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>8</b>
3.1	Elastizitätsmodul und Poissonzahl	8
3.2	Verlustfaktor	11
3.3	Messung von Elastizitätsmodul und Verlustfaktor	11
3.4	Formfaktor	14
3.5	Einfügungsdämmung	16
3.6	Bewertete Einfügungsdämmung	20
3.7	Bedämpftes Masse-Feder-System	22
3.8	Schallübertragungswege bei Sanitärinstallationen	24
<b>4</b>	<b>Handelsübliche Fugendichtstoffe</b>	<b>25</b>
4.1	Versuchsaufbau	26
4.2	Validierung des Messverfahrens	28
4.3	Probenherstellung	30
4.4	Untersuchte Dichtstoffe	32
4.5	Messergebnisse	32
4.5.1	Elastizitätsmodul und Verlustfaktor	32
4.5.2	Bewertete Einfügungsdämmung	35
4.5.3	Aushärtung	36
4.6	Resümee	37
<b>5</b>	<b>Akustisch optimierte Fugendichtstoffe</b>	<b>38</b>
5.1	Versuchsaufbau	39
5.2	Validierung des Messverfahrens	41
5.3	Probenherstellung	46
5.4	Untersuchte Dichtstoffe	47
5.5	Messergebnisse	48
5.5.1	Elastizitätsmodul	50
5.5.2	Verlustfaktor	53
5.5.3	Frequenzgemittelte akustische Materialeigenschaften	56
5.5.4	Bewertete Einfügungsdämmung	57
5.6	Vorhersage der bewerteten Einfügungsdämmung	58
5.7	Resümee	59

<b>6</b>	<b>Akustischer Einfluss der Fugengeometrie</b>	<b>60</b>
6.1	Versuchsaufbau	61
6.2	Probenherstellung	64
6.3	Einfluss von Fugenhöhe und -breite	64
6.4	Modell zur Berücksichtigung der Fugengeometrie	66
6.5	Fugenbänder	68
6.6	Resümee	71
<b>7</b>	<b>Elastisch verklebte Bodenbeläge</b>	<b>71</b>
7.1	Versuchsaufbau	72
7.2	Probenherstellung	75
7.3	Untersuchte Proben	76
7.4	Messergebnisse	78
7.5	Resümee	82
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>83</b>
<b>9</b>	<b>Literatur</b>	<b>86</b>
<b>10</b>	<b>Danksagung</b>	<b>89</b>

# 1 Einleitung

Kleb- und Dichtstoffe haben in den letzten Jahren erhebliche technische Verbesserungen erfahren und kommen inzwischen in fast allen Bereichen des Bauwesens zum Einsatz. Ebenso vielfältig wie die verschiedenen Produkte sind auch die Anwendungsmöglichkeiten, die vom Verschließen von Öffnungen und Fugen bis hin zur elastischen oder auch starren Verbindung von Bauteilen reichen. Obgleich die akustischen Eigenschaften von Kleb- und Dichtstoffen bei der technischen Anwendung zumeist eher im Hintergrund stehen, sind sie in einigen Bereichen für den baulichen Schallschutz von zentraler Bedeutung. Dies trifft vor allem dann zu, wenn die Schallübertragung von der Quelle ins Bauwerk vorwiegend durch Körperschall erfolgt, wie es z. B. bei haustechnischen Anlagen und Installationen häufig der Fall ist. Hier stellen vor allem Fugendichtungen einen maßgebenden Schallübertragungsweg dar, der - bei ansonsten guter Körperschallisolation der Installation - vielfach pegelbestimmende Geräuschanteile hervorrufen kann.

Wegen der hohen Störwirkung von Installationsgeräuschen in Verbindung mit zunehmenden Ansprüchen der Nutzer an den baulichen Schallschutz wurden die gesetzlichen Schallschutzanforderungen für haustechnische Anlagen vor einigen Jahren deutlich verschärft [1]. In anderen europäischen Staaten, wie z. B. der Schweiz, gelten sogar noch strengere Anforderungen als in Deutschland [2]. Um die Einhaltung dieser Anforderungen zu gewährleisten, ist eine fachgerechte Ausführung der Verbindungsstellen zwischen Installation und Bauwerk unter Einsatz akustisch geeigneter Kleb- und Dichtstoffe erforderlich. Im Hinblick auf die verwendeten Materialien besteht hier derzeit noch beträchtliches Verbesserungspotenzial, wobei akustisch optimierte Dichtstoffe einerseits zur Verbesserung des Schallschutzes beitragen und andererseits die hohe Fehleranfälligkeit bei der Herstellung der Dichtungen am Bau vermindern können.

Während zu den primären technischen Eigenschaften von Kleb- und Dichtstoffen, wie z. B. Reißfestigkeit, Dehnbarkeit und Temperaturbeständigkeit, von Seiten der Hersteller im allgemeinen geeignete Angaben verfügbar sind, ist dies hinsichtlich der akustisch relevanten Eigenschaften leider nicht der Fall. Dies erschwert die Planung und Auslegung von körperschallisolierenden Klebeverbindungen und Abdichtungen erheblich und hat häufig Schallschutzmängel zur Folge. Der erste Schritt des durchgeführten Forschungsvorhabens bestand deshalb darin, die akustischen Eigenschaften bauüblicher Dichtstoffe (dies sind im wesentlichen der dynamische Elastizitätsmodul, der Verlustfaktor sowie - mit nachrangiger Bedeutung - die Poisson-Zahl) zu ermitteln und die Auswirkungen dieser Eigenschaften auf die Körperschallübertragung von Fugendichtungen zu untersuchen. Ausgehend von den hierbei gewonnenen Erkenntnissen wurden anschließend in Zusammenarbeit mit einem Partner aus der chemischen Industrie erste Schritte zur Entwicklung akustisch optimierter Kleb- und Dichtstoffe unternommen und die akustische Wirkung der entwickelten Materialien messtechnisch überprüft.

Die zentralen Ziele des durchgeführten Forschungsvorhabens lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Erweiterung der Wissensbasis zu den schall- und schwingungstechnischen Eigenschaften von Kleb- und Dichtstoffen,
- Entwicklung akustisch optimierter Kleb- und Dichtstoffe einschließlich der zugehörigen Applikationstechniken,
- praktische Erprobung der neu entwickelten Produkte.

Bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens kristallisierten sich als Schwerpunkte vor allem die ersten beiden der oben genannten Ziele heraus. Der dritte Punkt konnte aus zeitlichen wie auch aus praktischen Gründen nur eingeschränkt bearbeitet werden, da die praktische Erprobung u. a. Versuche zu Belastbarkeit und Dauerhaftigkeit beinhaltet, die mit den vorhandenen Versuchseinrichtungen und im verfügbaren Zeitrahmen nicht durchführbar waren.

Wegen des breiten Spektrums marktüblicher Kleb- und Dichtstoffe mit unterschiedlicher chemischer Beschaffenheit und der Vielzahl möglicher Einsatzmöglichkeiten am Bau musste sich das Forschungsvorhaben zwangsläufig auf einen Ausschnitt aus den verfügbaren Produkten und auf einige typische bauliche Anwendungen beschränken. Die Auswahl der untersuchten Bausituationen erfolgte im Hinblick auf die Häufigkeit des Auftretens sowie die Bedeutung für den baulichen Schallschutz. Ausgehend von diesen Kriterien wurde der Untersuchungsschwerpunkt vor allem auf den Bereich haustechnischer Anlagen und Installationen mit den dort eingesetzten Dichtstoffen auf der Basis von Silikon, Acryl und Polyurethan gelegt. Als bauliche Anwendung wurde die Versiegelung von Fugen betrachtet, da Fugendichtungen als sogenannte "Körperschallbrücken" häufig die Ursache für bauliche Schallschutzmängel bilden.

Ein weiteres Untersuchungsthema bildete die elastische Verklebung von Bodenbelägen und Fliesen auf der Deckenoberfläche, die derzeit als mögliche Maßnahme zur Verbesserung der Trittschalldämmung diskutiert wird. Zwar sind bei der üblichen Verlegung auf einem schwimmenden Estrich den vorliegenden Erkenntnissen zufolge nur geringe akustische Verbesserungen zu erwarten [3, 4]. Befindet sich der Belag jedoch auf einer Rohdecke oder einem Verbundestrich, wie dies im Altbau und in Funktionsbauten nicht selten der Fall ist, so liefert er einen bedeutsamen Beitrag zum Trittschallschutz, der durch elastische Verklebung möglicherweise noch gesteigert werden kann. Die elastische Verklebung von Bodenbelägen konnte aus zeitlichen Gründen nicht mit gleicher Intensität wie bei den Fugendichtungen untersucht werden. Die durchgeführten Untersuchungen ergaben jedoch zumindest einen Überblick, in welchem Umfang sich die Trittschalldämmung handelsüblicher Bodenbeläge durch elastische Verklebung verbessern lässt.

## 2 Stand der Forschung

Zu den akustischen Eigenschaften von Kleb- und Dichtstoffen existieren bislang nur sehr wenige Untersuchungen. Dies gilt sowohl von Seiten der Hersteller, die nur ausnahmsweise über entsprechende Produktangaben verfügen, als auch für die akustische Forschung, die das Thema Kleb- und Dichtstoffe - möglicherweise wegen seiner stark

praxisbezogenen Ausrichtung und des fehlenden Bezugs zu den üblichen akustischen Themenfeldern - bislang nur am Rande aufgegriffen hat. Eine im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführte Literatur- und Patentrecherche erbrachte deshalb nur wenige verwertbare Erkenntnisse. Zu den in dem Vorhaben bearbeiteten Themenbereichen wurden bislang keine Patente angemeldet.

Systematische Untersuchungen zu den akustischen Eigenschaften von Kleb- und Dichtstoffen sind vor allem aus dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik bekannt [5, 6]. Bei diesen Untersuchungen, bei denen der dynamische Elastizitätsmodul handelsüblicher Fugendichtstoffe gemessen wurde, zeigten sich große Unterschiede zwischen den einzelnen Produkten. Der Elastizitätsmodul der verschiedenen Dichtstoffe unterschied sich um etwa den Faktor 20, wobei zwar Stoffgruppen mit ähnlichen akustischen Eigenschaften vorhanden waren, innerhalb dieser Gruppen in einzelnen Fällen jedoch zum Teil beträchtliche Abweichungen auftraten. Belastbare Aussagen zur Schallschutzwirkung in der baulichen Praxis ließen sich aus den Messergebnissen aufgrund der Besonderheiten des verwendeten Messaufbaus zum damaligen Zeitpunkt noch nicht ableiten.

Zur Körperschallübertragung über Fugendichtungen im Sanitärbereich liegen mehrere Untersuchungen vor [7 - 10]. Aus den darin beschriebenen Ergebnissen geht hervor, dass die Ausführung der Fuge (insbesondere Material und Geometrie) erheblichen Einfluss auf den resultierenden Installations-Schallpegel hat. Die veröffentlichten Ergebnisse beschränken sich jedoch hauptsächlich auf anwendungstechnische Fragen, während die systematische akustische Optimierung von Fugendichtungen nur ansatzweise Erwähnung findet. Weitere Untersuchungen, die gleichfalls für das hier durchgeführte Forschungsvorhaben herangezogen wurden, beschäftigen sich mit dem Einfluss der Fugegeometrie auf die Körperschallübertragung und der Entwicklung eines verbesserten Messverfahrens zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls und des Verlustfaktors von Kleb- und Dichtstoffen [11, 12].

Da die Kenntnis der akustischen Materialeigenschaften eine grundlegende Voraussetzung zur schalltechnischen Optimierung von Fugendichtungen bildet, kommt der Entwicklung geeigneter Messverfahren zur Bestimmung dieser Eigenschaften im Rahmen des durchgeführten Forschungsvorhabens eine große Bedeutung zu. Frühere Untersuchungen zu diesem Thema zeigen, dass zur Messung des dynamischen Elastizitätsmoduls von Kleb- und Dichtstoffen in Abhängigkeit von der Frequenz ein spezieller Messaufbau erforderlich ist [13 - 15]. Die in den erwähnten Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse fließen in das durchgeführte Forschungsvorhaben ein, müssen aber an die geänderte Fragestellung angepasst sowie erheblich aktualisiert und erweitert werden. Gleiches gilt auch für das in [15] vorgestellte akademische Verfahren zur Bestimmung der Einfügungsdämmung von Fugendichtungen, das für die bauliche Praxis in seiner derzeitigen Form nicht brauchbar ist.

Wichtige Hinweise zum Aufbau einer geeigneten Versuchseinrichtung zur Messung der akustischen Materialeigenschaften sind auch der Normenreihe DIN EN ISO 10846 [16 - 19] zu entnehmen, in der die Messung der vibro-akustischen Transfereigenschaften elastischer Elemente beschrieben ist. Die Normenreihe DIN EN ISO 6721 [20 - 23] beschäftigt sich mit der Bestimmung der dynamisch-mechanischen Eigenschaften von Kunst-

stoffen, wobei viele Gemeinsamkeiten mit dem für das durchgeführte Forschungsvorhaben benötigten Messverfahren bestehen. Als wichtige Informationsquellen sind in diesem Zusammenhang auch DIN 53513 [24] über die Messung der visko-elastischen Eigenschaften von Elastomeren sowie DIN EN 29052-1 [25] zu nennen. Die letztgenannte Norm ist zwar eigentlich für die Messung der dynamischen Steifigkeit von Trittschalldämmstoffen bestimmt, kann jedoch Vergleichswerte zur Validierung der an Kleb- und Dichtstoffen durchgeführten Materialuntersuchungen liefern.

Messtechnische Hinweise allgemeiner Art sind in den bauakustischen Lehrbüchern von Cremer / Heckl [26] und Schirmer [27] sowie in den Artikeln von Veit [28] und Jaouen et. al. [29] enthalten. Die in [26] aufgeführten Messdaten zu Elastizitätsmodul und Verlustfaktor von Kunststoffen sind zwar teilweise nicht mehr aktuell, jedoch immerhin als Anhalts- und Vergleichswerte nützlich. Die von Sinambari entwickelten Berechnungsmodelle [30 - 32] geben einen guten Einblick in das grundlegende akustische Verhalten körperschallisolierender Befestigungselemente, sind jedoch für die hier untersuchte Problematik elastischer Fugendichtungen zu abstrakt und detailliert. Ein anschauliches Beispiel für die akustische Wirkung von elastischen Verklebungen im Bauwesen ist - am Beispiel einer leichten Deckenkonstruktion in Holzbauweise - in der Veröffentlichung von Ljunggren [33] dargestellt.

Da die Messung der akustischen Materialeigenschaften von Kleb- und Dichtstoffen an Proben mit endlichen Abmessungen erfolgt und das Messergebnis durch Maße und Geometrie der Probe beeinflusst wird, weicht das aus der Messung ermittelte Ergebnis vom tatsächlichen Elastizitätsmodul der Probe ab. Um den tatsächlichen Elastizitätsmodul zu erhalten, muss man den Messwert daher durch einen geometrischen Formfaktor dividieren. Die Berechnung des erforderlichen Formfaktors ist mathematisch recht anspruchsvoll. Abschätzungen für Proben mit beliebiger Geometrie sind aus dem Buch von Battermann und Köhler [34] sowie der Veröffentlichung von Payne [35] zu entnehmen. Ein exakte Berechnung für zylindrische Proben wurde von Becker [36] durchgeführt.

Zur elastischen Verklebung von Bodenbelägen auf Decken sind nach dem derzeitigen Stand des Wissens - abgesehen von einigen im Herstellerauftrag erstellten Prüfzeugnissen - keine wissenschaftlichen Vorarbeiten verfügbar. Zu nennen ist hier lediglich die Untersuchung von Schwarz [37], die sich jedoch vor allem auf beidseitig mit Bodenbelag und Decke verklebte Dämmschichten konzentriert. Da die akustischen Eigenschaften derartiger Aufbauten weniger vom Klebstoff als vielmehr vor allem von der verwendeten Dämmschicht bestimmt werden, sind die Untersuchungsergebnisse für die im vorliegenden Forschungsvorhaben untersuchten Fragestellungen nur bedingt verwendbar.

Ein weiteres Thema, das in Zusammenhang mit den durchgeführten Untersuchungen steht, ist die Körperschalldämpfung von Bauteilen. Hierbei wird auf das schwingende Bauteil (zumeist ein Blech oder eine dünne Platte) ein Belag aus körperschalldämpfendem Material geklebt, wobei zwischen der Bauteiloberfläche und dem Belag eine vollflächige feste Verbindung bestehen muss. Durch die resultierende mechanisch verlustreiche Scherverformungen des Belags wird dem Bauteil Schwingungsenergie entzogen,

was zu einer Absenkung des resultierenden Schnellepegels führt. Herkömmliche Dichtstoffe sind zwar zu weich, um sie für Körperschalldämpfende Beläge oder Beschichtungen zu verwenden; sie können jedoch - bei ausreichend hohem Verlustfaktor des Materials - als Bestandteil geeigneter Verbund- oder Compound-Werkstoffe dienen, die gegenüber den derzeit überwiegend verwendeten Bitumenwerkstoffen eine verbesserte akustische Wirkung aufweisen. Die wichtigsten akustischen Grundlagen zum Thema Körperschalldämpfung sind in VDI 3727 [38, 39] dargestellt; aktuelle Messwerte für handelsübliche Dämpfungsbeläge sind den Untersuchungen in [40] zu entnehmen. Als weitere Quellen, die sich u. a. mit Messverfahren zur Bestimmung des Verlustfaktors von Dämpfungsbelägen sowie mit mechanischen Relaxationsvorgängen in den verwendeten Materialien beschäftigen, sind außerdem die Arbeiten von Oberst, Becker und Dietzel [41 - 44] zu nennen.

## 3 Grundlagen

### 3.1 Elastizitätsmodul und Poissonzahl

Der Elastizitätsmodul ist eine Materialeigenschaft und als solche von Abmessungen und Geometrie der betrachteten Probe unabhängig. Im linearen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie (alle folgenden Betrachtungen beschränken sich auf diesen Bereich) gilt das Hookesche Gesetz und der Elastizitätsmodul ist gemäß

$$E = \sigma / \varepsilon \quad [\text{N/m}^2] \quad (1)$$

mit  $\sigma$  = Spannung  $[\text{N/m}^2]$   
 $\varepsilon$  = Dehnung [-]

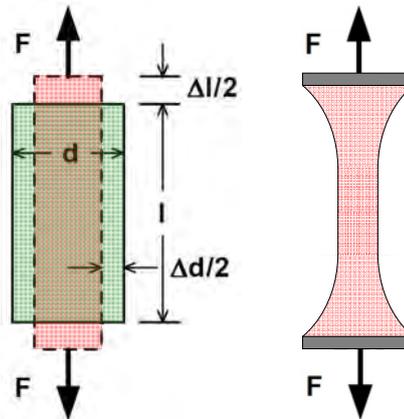
definiert. Bei anisotropen Strukturen ist der Elastizitätsmodul richtungsabhängig und wird durch einen Tensor beschrieben. Für isotrope Materialien, zu denen auch die hier betrachteten Kleb- und Dichtstoffe zählen, lässt er sich durch einen Skalar beschreiben und kann dann auf einfache Weise durch einen Zugversuch an einer stabförmigen Probe (s. Abb. 1) bestimmt werden:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta l/l} \quad [\text{N/m}^2] \quad (2)$$

mit  $F$  = Zugkraft  $[\text{N}]$   
 $S$  = Querschnittsfläche des Stabes  $[\text{m}^2]$   
 $l$  = Länge des Stabes  $[\text{m}]$   
 $\Delta l$  = Längenänderung  $[\text{m}]$

Die Anwendung von Gl. (2) setzt voraus, dass die Länge des Stabes sehr viel größer als sein Durchmesser ist, da die an den Enden des Stabes auftretenden Verformungen ansonsten zu einer Verfälschung der Messergebnisse führen. Die Verformungen sind auf die an den Stabenden befestigten Probenhalter zurückzuführen, die in diesem Bereich die Querkontraktion der Probe unterbinden. Dies hat zur Folge, dass das mit Gl. (2) ermittelte Ergebnis den tatsächlichen Elastizitätsmodul des Probenmaterials überschreitet

und mittels eines sogenannten Formfaktors korrigiert werden muss. Auf die Berechnung des Formfaktors wird später noch genauer eingegangen.

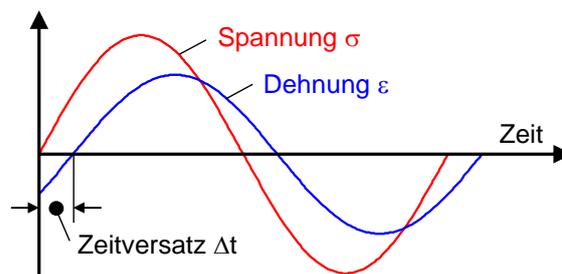


**Abb. 1:** Messung des Elastizitätsmoduls an einer zylindrischen Probe. Die im unbelasteten Zustand (grün) einwirkende Zugkraft  $F$  bewirkt eine Vergrößerung der Probenlänge  $l$  und eine Verminderung des Durchmessers  $d$  (rot). Idealisierter Zustand (für  $l \gg d$ ) auf der linken und tatsächliche Verformung der Probe (überzeichnet) auf der rechten Seite der Abbildung.

Wirkt statt einer statischen Belastung eine harmonische Wechselkraft auf die Probe ein, so tritt zwischen Spannung und Dehnung eine Phasenverschiebung auf (s. Abb. 2). Zur Beschreibung dieses Vorgangs stellt man den dynamischen Elastizitätsmodul,  $E_{\text{dyn}}$ , als komplexe Größe mit Real- und Imaginärteil dar:

$$E_{\text{dyn}} = E' + jE'' \quad [\text{N/m}^2] \quad (3)$$

mit  $E'$  = Speichermodul  $[\text{N/m}^2]$   
 $E''$  = Verlustmodul  $[\text{N/m}^2]$   
 $j$  = imaginäre Einheit



**Abb. 2:** Beispiel für den Zeitversatz zwischen Spannung und Dehnung bei Einwirkung einer harmonischen Wechselkraft. Zeitversatz  $\Delta t$  und Phasenverschiebung  $\delta$  sind über die Beziehung  $\delta = 2\pi f \Delta t$  verknüpft, wobei  $f$  die Frequenz der einwirkenden Kraft bezeichnet.

Der Realteil des komplexen Elastizitätsmoduls wird als Speichermodul bezeichnet, da er die in der Schwingung gespeicherte reversible Energie repräsentiert. Der Imaginärteil stellt ein Maß für die im Probenmaterial durch innere Reibung auftretenden Energieverluste dar und heißt deshalb Verlustmodul. Aus dem Verhältnis von Speicher- und Verlustmodul erhält man gemäß

$$\eta = E'' / E' = \tan(\delta) \quad [-] \quad (4)$$

mit  $\delta$  = Phasenverschiebung zwischen Spannung und Dehnung [-]

den Verlustfaktor  $\eta$  des Probenmaterials. Sowohl der Betrag des dynamischen Elastizitätsmoduls,  $|E_{\text{dyn}}| = (E'^2 + E''^2)^{1/2}$ , als auch die Phasenverschiebung  $\delta$  sind frequenzabhängige Größen. Da sich alle weiteren Betrachtungen im vorliegenden Bericht auf den Betrag des dynamischen Elastizitätsmoduls beziehen, wird der Betrag im folgenden vereinfachend mit  $E_{\text{dyn}}$  bezeichnet.

Bei großflächigen Matten oder Platten, bei denen die Pressung senkrecht zur Oberfläche erfolgt (dies ist z. B. bei Trittschalldämmstoffen unter schwimmenden Estrichen der Fall), verwendet man zur Kennzeichnung der elastischen Eigenschaften statt des dynamischen Elastizitätsmoduls zumeist die dynamische Steifigkeit  $s'$ . Zwischen dynamischem Elastizitätsmodul und dynamischer Steifigkeit besteht der Zusammenhang

$$s' = E_{\text{dyn}} / d_p \quad [\text{N/m}^3] \quad (5)$$

mit  $d_p$  = Plattendicke [m]

Wird eine Probe mechanisch belastet, so verformt sie sich sowohl längs als auch quer zur einwirkenden Kraft. Das Verhältnis der Verformungen in Längs- und Querrichtung ist eine Materialkonstante und wird als Querkontraktions- oder Poissonzahl  $\mu$  bezeichnet. Für die in Abb. 1 dargestellte zylindrische Probe ergibt sich die Poissonzahl gemäß

$$\mu = -(\Delta d / d) / (\Delta l / l) \quad [-] \quad (6)$$

mit  $(\Delta d / d)$  = relative Änderung des Probendurchmessers  $d$  [-]

$(\Delta l / l)$  = relative Änderung des Probenlänge  $l$  [-]

Die Poissonzahl ist eine wichtige bauakustische Größe, die insbesondere im Bereich von Körperschallübertragung und -isolation in zahlreichen Berechnungsformeln enthalten ist. Für übliche Baustoffe liegt die Poissonzahl zumeist im Bereich  $0,2 \leq \mu \leq 0,5$ .

In Materialien mit einer Poissonzahl von  $\mu = 0,5$  bleibt das Volumen der Probe bei Verformung durch eine äußere Kraft konstant. Dies ist z. B. bei allen inkompressiblen viskoelastischen Elastomeren, zu denen auch die hier untersuchten Dichtstoffe zählen, der Fall. Für die im vorliegenden Bericht untersuchten Materialien kann daher in guter Näherung von einer Poissonzahl von  $\mu = 0,5$  ausgegangen werden [13, 26]. Zur Überprüfung dieser Aussage wurde für einige der Materialien stichprobenhaft die Querkontraktion ermittelt. Obgleich die ermittelten Ergebnisse wegen der schwierigen experimentellen Bedingungen nur als Näherungswerte aufzufassen sind, konnte der Wert von  $\mu = 0,5$  im Rahmen der Messgenauigkeit bestätigt werden.

### 3.2 Verlustfaktor

Bei Ausbreitung von Schall in Festkörpern wird ein Teil der Schwingungsenergie durch innere Reibung in Wärme überführt, so dass eine Dämpfung der Schallwelle erfolgt. Der Verlustfaktor stellt ein Maß für die innere Dämpfung verschiedenartiger Materialien dar und ist als solches ein zentraler Kennwert im Bereich der Bauakustik. Die allgemeine Definition des Verlustfaktors lautet:

$$\eta = \frac{W_v}{2\pi W_r} \quad [-] \quad (7)$$

mit  $W_v$  = Verlustenergie je Schwingungsperiode [W]  
 $W_r$  = wiedergewinnbare (reversible) Schwingungsenergie [W]

Für handelsübliche Kleb- und Dichtstoffe bewegt sich der Verlustfaktor etwa im Bereich  $0,05 \leq \eta \leq 0,5$ .

Um den Verlustfaktor von Baustoffen zu bestimmen, stehen verschiedene Messverfahren zu Verfügung. In der Bauakustik gebräuchlich ist z. B. die Messung der Körperschall-Nachhallzeit  $T_s$ , aus der sich gemäß der Beziehung

$$\eta = \frac{2,2}{f T_s} \quad [-] \quad (8)$$

mit  $f$  = Frequenz [Hz]  
 $T_s$  = Körperschall-Nachhallzeit [s]

der Verlustfaktor bestimmen lässt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Abnahme des Schnellepegels einer fortschreitenden Biegewelle auf einer stabförmigen Probe zu bestimmen:

$$\eta = 0,073 \lambda \Delta L_v / \Delta x \quad [-] \quad (9)$$

mit  $\lambda$  = Wellenlänge der Biegewelle [m]  
 $\Delta L_v$  = Abnahme des Schnellepegels auf der Strecke  $\Delta x$  [dB]

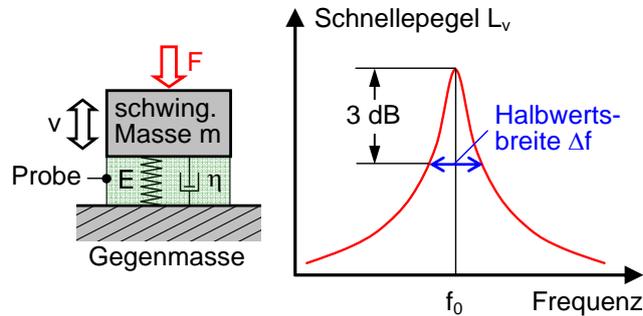
Die beiden beschriebenen Verfahren setzen jedoch ausreichend große Proben in der Form von Platten oder Stäben voraus und sind deshalb für Kleb- und Dichtstoffe weniger gut geeignet. Für derartige Materialien bieten sich statt dessen zwei andere Messverfahren an, die im nachfolgenden Abschnitt beschrieben werden.

### 3.3 Messung von Elastizitätsmodul und Verlustfaktor

In dem durchgeführten Forschungsvorhaben wurden zur Bestimmung der akustischen Materialeigenschaften zwei verschiedene Messverfahren eingesetzt, die im folgenden kurz beschrieben werden. Beim ersten der beiden Verfahren wird die untersuchte Probe in einen Einmassenschwinger eingesetzt und dient dort als Feder- und Dämpfungselement. Der Verlustfaktor ergibt sich gemäß

$$\eta = \Delta f / f_0 \quad [-] \quad (10)$$

aus der Resonanzfrequenz  $f_0$  und der Halbwertsbreite  $\Delta f$  der Resonanzkurve (s. Abb. 3).



**Abb. 3:** Bestimmung von Verlustfaktor und Elastizitätsmodul mittels eines Feder-Masse-Systems (schematisch). Die schwingende Masse  $m$  wird mit der konstanten Wechselkraft  $F$  angeregt und die resultierende Schnelle  $v$  in Abhängigkeit von der Frequenz gemessen. Die Halbwertsbreite der Resonanzkurve entspricht dem Abstand der beiden Frequenzen unter- und oberhalb der Resonanz, an denen der Schnellepegel gegenüber dem Maximalwert um je 3 dB abgeklungen ist.

Neben dem Verlustfaktor lässt sich mit dem in Abb. 3 dargestellten Messverfahren auch der dynamische Elastizitätsmodul der Probe bestimmen. Für den Elastizitätsmodul bei der Resonanzfrequenz  $f_0$  ergibt sich:

$$E_{\text{dyn}} (f = f_0) = \frac{4\pi^2 f_0^2 l m}{S} \quad [\text{N/m}^2] \quad (11)$$

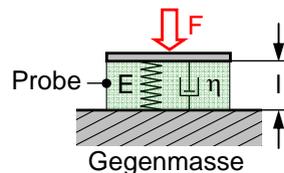
mit  $l$  = Länge der Probe [m]  
 $m$  = Probenmasse [kg]  
 $S$  = Querschnittsfläche der Probe [ $\text{kg/m}^2$ ]

Um den tatsächlichen Elastizitätsmodul des Probenmaterials zu erhalten, ist noch eine geometrische Korrektur des mit obiger Gleichung ermittelten Wertes erforderlich, indem der Wert durch den nach Abschnitt 3.4 ermittelten Formfaktor dividiert wird. Die Gründe für diese Korrektur wurden bereits in Abschnitt 3.1 erläutert.

Das beschriebene Messverfahren auf Grundlage eines Resonanzsystems ist einfach anzuwenden und liefert genaue Ergebnisse. Es hat jedoch den Nachteil, dass sich die gemessenen Werte ausschließlich auf die Resonanzfrequenz des Systems beziehen. Um Ergebnisse für weitere Frequenzen zu erhalten, ist zuvor ein Umbau der Messvorrichtung (z. B. durch Änderung der schwingenden Masse) erforderlich. Das nachfolgend beschriebene alternative Messverfahren vermeidet diesen Nachteil, da die Messung hier außerhalb des Resonanzbereichs erfolgt.

Bei dem alternativen Verfahren, das in Abb. 4 beschrieben ist, wird neben der auf die Probe einwirkenden Wechselkraft  $F$  die resultierende Änderung der Probenlänge  $\Delta l$

gemessen (in der Praxis wird die Längenänderung durch zweifache Integration der gemessenen Beschleunigung ermittelt). Aus den gemessenen Werten erhält man Spannung und Dehnung des Probenmaterials,  $\sigma = F / S$  und  $\epsilon = \Delta l / l$ , wobei  $S$  und  $l$  die Querschnittsfläche und die Länge der Probe bezeichnen. Unter Verwendung der zwischen Spannung und Dehnung gemessenen Phasenverschiebung  $\delta$  lassen sich daraus mit Gl. (2) und Gl. (4) der dynamische Elastizitätsmodul und der Verlustfaktor der Probe bestimmen. Ebenso wie beim Resonanzverfahren ist für den Elastizitätsmodul auch hier eine geometrische Korrektur mit dem entsprechenden Formfaktor erforderlich.



**Abb. 4:** Nicht-resonantes Messverfahren zur Ermittlung des Verlustfaktors und des Elastizitätsmoduls von Elastomeren. Bei diesem Verfahren ist eine phasentreue Erfassung der einwirkenden Wechselkraft  $F$  und der resultierenden Änderung der Probenlänge  $\Delta l$  erforderlich. Die Messung erfolgt mit einem Gleitsinus, der den gewählten Frequenzbereich kontinuierlich durchfährt, so dass nach Abschluss der Messung ein vollständiges Frequenzspektrum zur Verfügung steht.

Das beschriebene nicht-resonante Verfahren ermöglicht im Prinzip Messungen im gesamten bauakustischen Frequenzbereich von 50 - 5000 Hz. In der Praxis wird der nutzbare Frequenzbereich allerdings durch Eigenschwingungen der Probe nach oben begrenzt. Bei den Eigenschwingungen handelt es sich um stehende Longitudinal- bzw. Dehnwellen, die sich in Längsrichtung (also in Richtung der äußeren Kraft) innerhalb der Probe ausbilden. Die Bedingung für die Entstehung derartiger stehender Wellen lautet

$$l = n \lambda_L / 4 \quad \text{mit } n = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

mit

- $l$  = Länge der Probe [m]
- $\lambda_L$  =  $c_L / f$  = Wellenlänge der Longitudinalwelle [m]
- $c_L$  =  $(E_{\text{dyn}} / \rho)^{1/2}$  = Longitudinalwellengeschwindigkeit [m/s]
- $\rho$  = Rohdichte des Probenmaterials [ $\text{kg/m}^3$ ]

Die erste Eigenschwingung (mit  $n = 1$ ) erfolgt demnach bei der Frequenz

$$f = \frac{\sqrt{E_{\text{dyn}} / \rho}}{4l} \quad [\text{Hz}] \quad (13)$$

Diese Frequenz, die sowohl von der Probenlänge als auch vom Elastizitätsmodul des untersuchten Materials abhängt, begrenzt den nutzbaren Frequenzbereich nach oben. Für die hier verwendeten scheibenförmigen Proben mit einer Dicke von  $l \cong 5$  mm liegt die Frequenz der ersten Eigenschwingung bei Untersuchungen an handelsüblichem Bau-

oder Sanitärsilikon typischerweise bei etwa 2000 - 3000 Hz. Durch die Verwendung dünnerer Proben lässt sich diese Frequenz zwar anheben, jedoch wird die Probenherstellung und die Bestimmung der Probendicke dadurch zunehmend schwieriger. Außerdem setzen oberhalb von etwa 4000 Hz weitere Resonanzen ein, die auf Eigenschwingungen der Probenhalter sowie auf Kontaktresonanzen an den Verbindungsstellen zwischen Schwingungsquelle, Probenhalter und Sensoren zurückzuführen sind.

### 3.4 Formfaktor

Zur Messung des Elastizitätsmoduls muss die untersuchte Probe beidseitig kraftschlüssig an Probenhaltern befestigt werden. Dies hat zwangsläufig zur Folge, dass die Querkontraktion der Probe im Bereich der Befestigungsstellen unterbunden wird. Aufgrund der hierdurch hervorgerufenen Versteifung ist der aus den Messergebnissen ermittelte Wert des Elastizitätsmoduls grundsätzlich höher als der tatsächliche Elastizitätsmodul des Probenmaterials. Der Effekt ist um so stärker ausgeprägt, je geringer die Probenlänge  $l$  im Verhältnis zum Durchmesser der Probe  $d$  ist.

Um den tatsächlichen Elastizitätsmodul zu erhalten, ist daher eine Korrektur der geometrischen Einflüsse erforderlich. Dies geschieht, indem der gemessene Wert durch einen dimensionslosen Formfaktor  $q$  (mit  $q \geq 1$ ) dividiert wird:

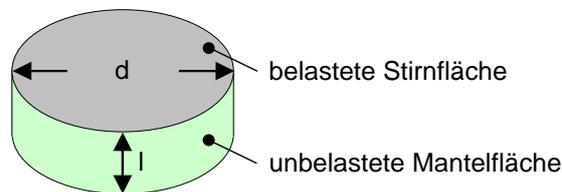
$$E_{\text{Material}} = E_{\text{Messung}} / q \quad [\text{N/m}^2] \quad (14)$$

mit  $q =$  geometrischer Formfaktor [-]

Die Berechnung des Formfaktors für Proben mit unterschiedlicher geometrischer Form ist mathematisch nicht einfach. Eine einfache Abschätzung für Proben mit beliebiger Geometrie ergibt sich nach Payne und Battermann [34, 35] durch folgenden Ausdruck:

$$q = 1 + r + r^2 \quad [-] \quad (15)$$

wobei  $r$  das Verhältnis zwischen der belasteten Stirnfläche der Probe zur unbelasteten Mantelfläche bezeichnet (s. Abb. 5). Die Stirnfläche wird hierbei nur einfach gezählt (also z. B. nur die Fläche auf der Oberseite der Probe).



**Abb. 5:** Bestimmung des Verhältnisses  $r$  zwischen Stirn- und Mantelfläche am Beispiel einer zylindrischen Probe mit der Länge  $l$  und dem Durchmesser  $d$ . Für das Verhältnis  $r$  ergibt sich im vorliegenden Fall der Ausdruck  $r = d / (4 l)$ .

Für die hier verwendeten zylindrischen Proben mit der Höhe  $l$  und dem Durchmesser  $d$  geht Gl. (15) somit in folgende Beziehung über:

$$q = 1 + \frac{d}{4l} + \frac{d^2}{16l^2} \quad [-] \quad (16)$$

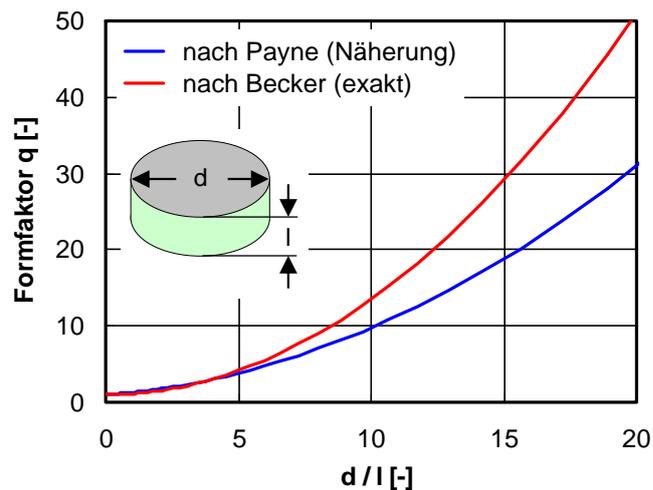
Eine exakte Berechnung für den Formfaktor zylindrischer Proben wurde von Becker [36] durchgeführt. Für das Ergebnis dieser Berechnung (genau gesagt handelt es sich um eine Näherung für die exakte Formel) ergibt sich der Ausdruck

$$q = 1 + \frac{3}{4} \frac{\mu^2}{1 + \mu} \frac{d^2}{l^2} \quad [-] \quad (17)$$

der für die hier untersuchten Kleb- und Dichtstoffe mit einer Poissonzahl von  $\mu = 0,5$  in die Beziehung

$$q = 1 + \frac{d^2}{8l^2} \quad [-] \quad (18)$$

übergeht. Ein Vergleich des vereinfachten Formfaktors nach Gl. (16) und des genauen Ausdrucks nach Gl. (18) ist in Abb. 6 dargestellt.



**Abb. 6:** Formfaktor einer zylindrischen Probe mit der Länge  $l$  und dem Durchmesser  $d$ . Die Berechnung erfolgte zum einen mit der Näherungsformel nach Payne (Gleichung 16) und zum anderen mit der genauen Formel nach Becker (Gleichung 18). Bei der Berechnung nach Becker wurde von einer Poissonzahl von  $\mu = 0,5$  für inkompressible Elastomere ausgegangen.

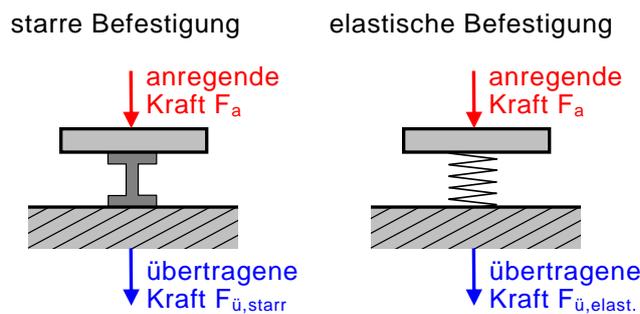
Für stabförmige Proben mit  $d/l \ll 1$  weist der Formfaktor  $q$  bei beiden Formeln erwartungsgemäß den Wert 1 auf. Mit zunehmendem Verhältnis  $d/l$  steigt  $q$  dann kontinuierlich an, wobei die beiden Formeln zunächst noch übereinstimmen. Merkliche Abweichungen sind erst oberhalb von  $d/l \cong 6$  zu verzeichnen, was ungefähr dem Wert einer typischen Probe, wie sie in dem durchgeführten Forschungsvorhaben verwendet wurde, entspricht.

Soweit es sich um zylindrische bzw. scheibenförmige Proben handelte, wurde die geometrische Korrektur des gemessenen Elastizitätsmoduls in allen Fällen mit dem Formfaktor nach Becker (Gleichung 18) durchgeführt. Bei allen übrigen Proben (rechteckige Stäbe und Platten) kam hingegen die Formel nach Payne (Gleichung 15) zum Einsatz, da der Ausdruck von Becker hierfür nicht anwendbar ist.

### 3.5 Einfügungsdämmung

Die Einfügungsdämmung bildet den wichtigsten Kennwert, um die akustischen Eigenschaften von Fugendichtungen zu beschreiben. Sie kann auf unterschiedliche Weise gemessen werden, wobei zwischen den mit verschiedenen Verfahren ermittelten Ergebnissen z. T. geringe Unterschiede bestehen. Im vorliegenden Bericht wird ein praxisorientiertes Messverfahren eingesetzt, bei dem die Einfügungsdämmung  $D_e$  gemäß Abb. 7 aus dem logarithmischen Verhältnis der bei starrer und elastischer Befestigung in den Baukörper übertragenen Kräfte ermittelt wird:

$$D_e = 20 \lg \left( \frac{F_{\ddot{u},starr}}{F_{\ddot{u},elast.}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (19)$$



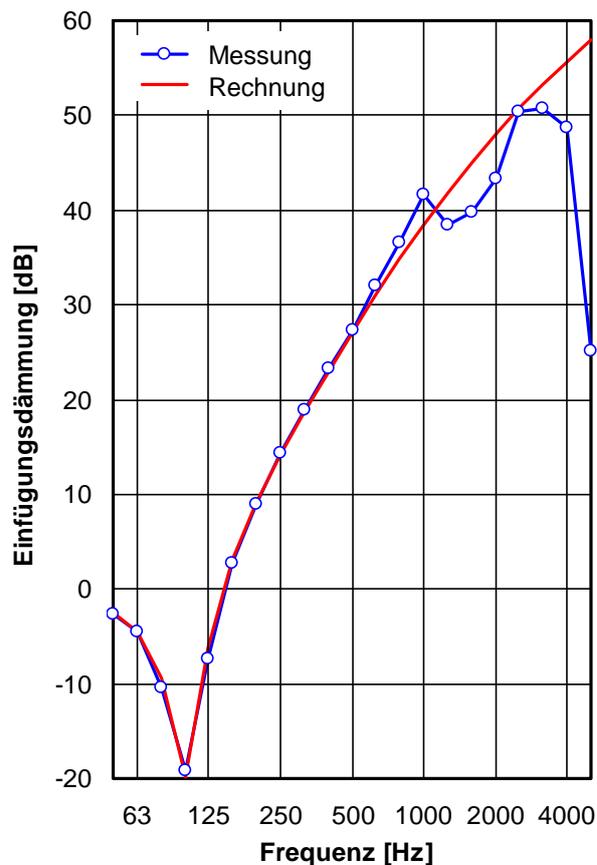
**Abb. 7:** Prinzipdarstellung zur Messung der Einfügungsdämmung elastischer Dichtungs- und Befestigungselemente. Die untersuchte Probe (rechts im Bild als Feder dargestellt) wird auf möglichst praxisnahe Weise zwischen zwei Bauteile eingesetzt, von denen das eine als Sende- und das andere als Empfangsstruktur dient. Bei gleichbleibender Anregung der Sendestruktur mit der konstanten Wechselkraft  $F_a$  wird jeweils die in die Empfangsstruktur eingeleitete Kraft  $F_{\ddot{u}}$  gemessen, wobei die Kraftübertragung zum einen über eine starre Verbindung (links) und zum anderen über die untersuchte Probe (rechts) erfolgt.

Da die in der Empfangsstruktur hervorgerufene Schnelle proportional zur einwirkenden Kraft ist, erfolgt hier in der Praxis zumeist eine Schnelle- oder Beschleunigungsmessung. Um sicherzustellen, dass die Messungen bei starrer und elastischer Verbindung unter genau gleichen Anregungsbedingungen stattfinden, wird auch die anregende Kraft  $F_a$  gemessen und mit in die Auswertung einbezogen. In Pegelschreibweise ergibt sich hierdurch folgender Ausdruck:

$$D_e = (L_{v,starr} - L_{F,starr}) - (L_{v,elast.} - L_{F,elast.}) \quad [\text{dB}] \quad (20)$$

mit  $L_{v,starr}$  und  $L_{v,elast.}$  = Schnellepegel der Empfangsstruktur bei starrer und bei elastischer Verbindung [dB]  
 $L_{F,starr}$  und  $L_{F,elast.}$  = Pegel der in die Sendestructur eingeleiteten Kraft bei starrer und bei elastischer Verbindung [dB]

Messungen der Einfügungsdämmung am Bau sind schwierig und ungenau, da undefinierte akustische Randbedingungen und äußere Störungen die Messergebnisse beeinträchtigen. Im Normalfall erfolgen die Messungen daher mit einem speziellen Versuchsaufbau unter idealisierten akustischen Randbedingungen. Ein solcher Aufbau wurde auch in dem durchgeführten Forschungsvorhaben verwendet. Ein Beispiel für eine mit diesem Aufbau durchgeführte Messung ist in Abb. 8 dargestellt.



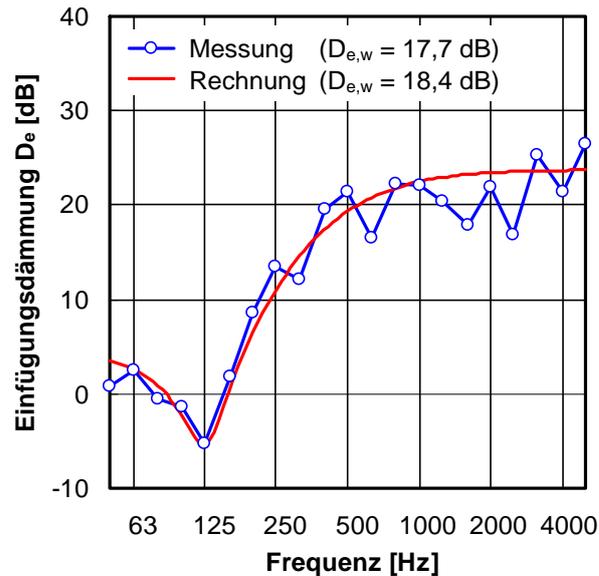
**Abb. 8:** Beispiel für die Einfügungsdämmung einer Fugendichtung aus Silikon (Probenmaterial S2). Die Messung erfolgte mit dem in Abschnitt 4 beschriebenen Versuchsaufbau. Neben den Messwerten ist auch eine mit dem Modell eines bedämpften Einmassenschwingers (s. Abschnitt 3.7) berechnete Kurve dargestellt. Abgesehen von hohen Frequenzen, in denen erste Eigenschwingungen des Messaufbaus einsetzen, stimmen Messung und Rechnung gut überein.

Der zur Messung der Einfügungsdämmung verwendete Versuchsaufbau liefert genaue und gute reproduzierbare Ergebnisse, aus denen sich unter Verwendung der Gleichungen (10) und (11) auch der dynamische Elastizitätsmodul und der Verlustfaktor des

Probenmaterials ableiten lassen. Allerdings lässt sich die ermittelte Einfügungsdämmung - obgleich die verwendeten Proben realen Fugendichtungen so weit wie möglich nachempfunden waren - nicht ohne weiteres auf normale bauliche Verhältnisse übertragen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Einfügungsdämmung von Fugendichtungen neben der Beschaffenheit der Dichtung selbst außerdem in erheblichem Maße von den akustischen Eigenschaften der mit der Dichtung verbundenen baulichen Strukturen abhängt. Bei dem verwendeten Versuchsaufbau sind dies zwei starre Massen, am Bau hingegen z. B. eine Wanne und eine Wand, so dass sich die im Labor und am Bau gemessene Einfügungsdämmung erheblich unterscheidet.

Da das Ziel des durchgeführten Forschungsvorhaben vor allem darin bestand, die akustischen Eigenschaften von Dichtstoffen unter praxisnahen baulichen Bedingungen zu untersuchen, wurde ein alternatives Verfahren zur Bestimmung der Einfügungsdämmung von Fugendichtstoffen am Bau entwickelt. Hierbei wurde folgendermaßen vorgegangen:

- a) Mit dem in Abschnitt 6 beschriebenen Messaufbau, der als bestmögliche Nachbildung einer realen Bausituation im Rahmen der vorhandenen experimentellen Möglichkeiten anzusehen ist, wurden Messungen an mehreren unterschiedlichen Fugendichtungen durchgeführt. Der Messaufbau repräsentiert eine bautypische Dichtung aus dem Sanitärbereich (Fugendichtung zwischen einer Badewanne aus Stahl und einer Massivwand).
- b) Zur Ermittlung repräsentativer Kurven wurde die für mehrere gleichartige oder ähnliche Proben gemessene Einfügungsdämmung durch gewichtete Mittelung zusammengefasst. Ein Beispiel für einen solchen repräsentativen Kurvenverlauf ist in Abb. 9 dargestellt.
- c) Ausgehend vom Modell eines bedämpften Masse-Feder-Systems wurde ein semiempirisches Verfahren entwickelt, mit dem sich die bautypische Einfügungsdämmung von Fugendichtungen aus dem dynamischen Elastizitätsmodul und dem Verlustfaktor des verwendeten Dichtstoffs berechnen lässt. Das Verfahren wurde so angepasst, dass sich im Mittel die bestmögliche Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ergab. Die Einzelheiten des entwickelten Berechnungsverfahrens sind in Gl. (21) beschrieben. Die Berechnungsergebnisse beziehen sich auf eine Fugendichtung mit einer quadratischen Querschnittsfläche von 10 mm x 10 mm.



**Abb. 9:** Einfügungsdämmung einer typischen Fugendichtung aus dem Sanitärbereich (Querschnitt ca. 10 mm x 10 mm) bezogen auf übliche bauliche Randbedingungen (Probe R. aus Abschnitt 5, neutral vernetzendes Silikon). Die rote Kurve wurde mit dem in Gl. (21) dargestellten Verfahren aus dem dynamischen Elastizitätsmodul und dem Verlustfaktor des Probenmaterials berechnet. Die in der Legende angegebenen  $D_{e,w}$ -Werte bezeichnen die bewertete Einfügungsdämmung nach Abschnitt 3.6.

Um die Einfügungsdämmung einer bauüblichen Fugendichtungen aus dem dynamischen Elastizitätsmodul  $E_{\text{dyn}}$  und dem Verlustfaktor  $\eta$  des Dichtstoffs zu ermitteln, muss zunächst die Resonanzfrequenz und das Dämpfungsmaß für die Dichtung berechnet werden. Diese Werte werden dann in das Modell eines bedämpften Masse-Feder-Systems nach Abschnitt 3.7 eingesetzt, aus dem sich schließlich nach Abzug von 5 dB die Einfügungsdämmung der Fugendichtung ergibt. Das beschriebene Verfahren ist in der nachfolgenden Gleichung zusammengefasst:

$$D_e = D_{e, \text{MF}}(f_0, D) - 5,0 \text{ dB} \quad [\text{dB}] \quad (21)$$

$$\text{mit } f_0 = 120 \text{ mm s}^{-1} \text{ N}^{-1/2} E_{\text{dyn}}^{1/2} = \text{Resonanzfrequenz [Hz]}$$

$$D = \eta / 2 + 0,11 = \text{angepasstes Lehr'sches Dämpfungsmaß [-]}$$

$$D_{e, \text{MF}}(f_0, D) = \text{Einfügungsdämmung eines bedämpften Masse-Feder-Systems nach Gl. (24), berechnet für die oben ermittelten Werte von } f_0 \text{ und } D \text{ [dB]}$$

Da der dynamische Elastizitätsmodul und der Verlustfaktor von der Frequenz abhängen, müssten sie im Prinzip auch in Gl. (21) als frequenzabhängige Werte eingesetzt werden. Wie aus den in Abschnitt 5 dargestellten Messergebnissen hervorgeht, ist die Frequenzabhängigkeit von  $E_{\text{dyn}}$  und  $\eta$  bei den untersuchten Dichtstoffen jedoch in den meisten Fällen nur verhältnismäßig schwach ausgeprägt. Dies gilt insbesondere in dem für die akustische Wirkung maßgebenden Bereich tiefer Frequenzen (bei Installationsgeräuschen bis maximal etwa 1000 Hz). Für praktische Zwecke reicht es daher aus,

wenn in Gl. (21) frequenzgemittelte Werte des Elastizitätsmoduls und des Verlustfaktors eingesetzt werden. Im vorliegenden Bericht wurden hierfür durchgängig die im Frequenzbereich von 50 - 1000 Hz gebildeten Mittelwerte verwendet. Wie aus dem in Abb. 9 dargestellten Beispiel zu ersehen ist, ergibt sich auch bei Verwendung dieser Mittelwerte eine recht gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung.

Vergleicht man die in den Abbildungen 8 und 9 dargestellten Messkurven miteinander, so ist festzustellen, dass sich die mit einem idealisierten Versuchsaufbau gemessenen Werte erheblich von der Einfügungsdämmung von Fugendichtungen unter realen baulichen Verhältnissen unterscheiden. Die unter bauüblichen Bedingungen gemessenen Werte weisen erwartungsgemäß - vor allem bei mittleren und hohen Frequenzen - eine höhere Schwankungsbreite auf, was auf das "akustische Eigenleben" der durch die Fugendichtung verbundenen Bauteile zurückzuführen ist. Außerdem verläuft der Frequenzgang sowohl im negativen als auch im positiven Bereich deutlich flacher, was gleichfalls im Zusammenhang mit den angrenzenden Bauteilen steht. Die mit dem in Abschnitt 4 beschriebenen idealisierten Aufbau gemessenen Werte erlauben demnach keine direkte Aussage zur akustischen Wirkung von Fugendichtungen in der baulichen Praxis. Das neu entwickelte Verfahren zur Bestimmung der Einfügungsdämmung behebt dieses Problem, indem der dynamische Elastizitätsmodul und der Verlustfaktor der untersuchten Dichtstoffe gemessen und daraus mit Gl. (21) die Einfügungsdämmung unter praxisüblichen baulichen Bedingungen berechnet wird.

### 3.6 Bewertete Einfügungsdämmung

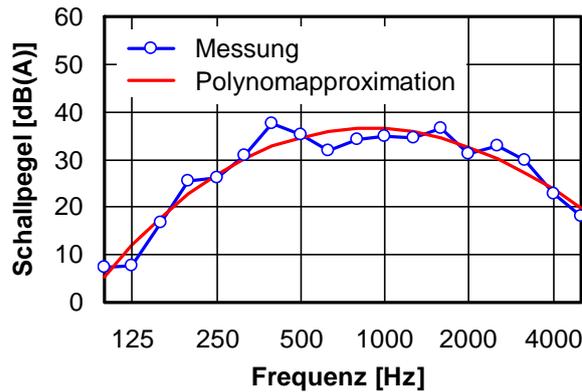
Die Einfügungsdämmung von Fugendichtungen hängt von der Frequenz ab und liegt deshalb normalerweise als Frequenzspektrum vor. Mit einem solchen Spektrum ist es jedoch nicht ohne weiteres möglich, die akustische Qualität verschiedener Fugendichtstoffe direkt miteinander zu vergleichen. Ein solcher Vergleich erfordert eine Einzahlangabe, die - ähnlich wie beim bewerteten Schalldämm-Maß für die Luftschalldämmung - aus dem Spektrum berechnet wird.

Da für die Einfügungsdämmung von elastischen Dichtungen und Befestigungselementen bislang keine genormte Einzahlangabe existiert, wurde eine neue Angabe entwickelt, die als bewertete Einfügungsdämmung bezeichnet wird. Das zugehörige Formelzeichen lautet  $D_{e,w}$ .

Den Ausgangspunkt zur Berechnung von  $D_{e,w}$  bildet ein typisches Geräusch aus dem Bereich haustechnischer Installationen (es handelt sich um das im Empfangsraum hervorgerufene Geräusch, das beim Aufprall des aus einer Handbrause austretenden Wasserstrahls auf eine Bade- oder Duschwanne entsteht). Zur Vereinfachung und besseren Handhabung wurde das Spektrum des Geräuschs unter Verwendung einer Polynomapproximation geglättet. Das in Abb. 10 dargestellte Polynom dient als Referenzspektrum  $L_{ref}$  zur Berechnung von  $D_{e,w}$ . Die Formel für das Polynom lautet:

$$L_{ref} = L = 3,54 \lg(f)^3 - 63,0 \lg(f)^2 + 278,6 \lg(f) - 328,0 \quad [\text{dB(A)}] \quad (22)$$

mit  $f$  = Frequenz [Hz]



**Abb. 10:** Geräuschspektrum zur Berechnung der bewerteten Einfügungsdämmung von Fugendichtungen. Neben dem Referenzspektrum in Form eines kubischen Polynoms ist auch das gemessene Spektrum des zugrundeliegenden Sanitärgeräuschs mit dargestellt. Der A-bewertete Gesamtpegel des Referenzspektrums beträgt 44,7 dB(A).

Die Berechnung von  $D_{e,w}$  erfolgt in folgenden Schritten:

- Terzweise Subtraktion der gemessenen Einfügungsdämmung  $D_e$  vom Referenzspektrum  $L_{ref}$ .
- Berechnung des A-bewerteten Gesamtpegels für die Differenz  $L_{ref} - D_e$ .
- Subtraktion der A-bewerteten Gesamtpegel für  $L_{ref}$  und  $L_{ref} - D_e$ .

Die entsprechende Berechnungsformel lautet:

$$D_{e,w} = 10 \lg \left( \sum_{i=1}^{18} 10^{L_{ref,i} / 10} \right) \text{ dB} \quad [dB] \quad (23)$$

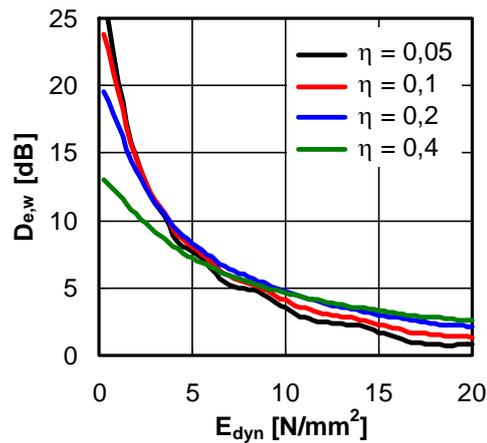
$$- 10 \lg \left( \sum_{i=1}^{18} 10^{(L_{ref,i} - D_{e,i}) / 10} \right) \text{ dB}$$

Die energetische Addition der Terzen (Index  $i = 1 - 18$  in obiger Gleichung) erfolgt dabei im Bereich von 100 - 5000 Hz.

Die bewertete Einfügungsdämmung  $D_{e,w}$  lässt sich als Verminderung eines typischen Sanitärgeräuschs durch eine elastische Fugendichtung gegenüber einer starren Verbindung zwischen Schallquelle und Bauwerk auffassen. Für die im durchgeführten Forschungsvorhaben untersuchten handelsüblichen Dichtstoffe ergab sich eine bewertete Einfügungsdämmung im Bereich von etwa 2 - 20 dB.

Die in Abb. 11 dargestellten Kurven veranschaulichen exemplarisch, wie die bewertete Einfügungsdämmung bauüblicher Fugendichtungen vom dem dynamischen Elastizitätsmodul und dem Verlustfaktor des verwendeten Dichtstoffes abhängen. Eine wirksame Körperschallisolierung mit  $D_{e,w} \geq 15$  dB lässt sich nur bei Verwendung von Dichtstoffen mit ausreichend geringer Steifigkeit ( $E_{dyn} \leq 2$  N/mm<sup>2</sup>) erreichen. Der Verlustfak-

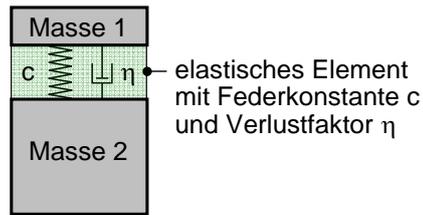
tor des Dichtstoffs sollte hingegen niedrig sein, da eine hohe Körperschalldämpfung in diesem Bereich eine erhebliche Verschlechterung der bewerteten Einfügungsdämmung bewirkt. Mit zunehmender Steifigkeit des Dichtstoffs fällt  $D_{e,w}$  rasch ab und liegt bereits bei  $E_{dyn} = 10 \text{ N/mm}^2$  unterhalb von 5 dB. Der Verlustfaktor spielt hier als akustische Einflussgröße nur noch eine untergeordnete Rolle. Bei einem dynamischen Elastizitätsmodul von  $E_{dyn} \geq 15 \text{ N/mm}^2$  beträgt  $D_{e,w}$  nur noch ca. 3 dB oder weniger und ist damit für den praktischen Schallschutz so gut wie bedeutungslos. Interessanterweise kehrt die Dämpfung in diesem Steifigkeitsbereich ihre Wirkung um (d. h. eine Erhöhung des Verlustfaktors bewirkt eine Zunahme der bewerteten Einfügungsdämmung). Dies ist aber ein rein akademischer Effekt, der in der Praxis wie erwähnt nicht nutzbar ist.



**Abb. 11:** Einfluss des dynamischen Elastizitätsmoduls  $E_{dyn}$  und des Verlustfaktors  $\eta$  des verwendeten Dichtstoffes auf die bewertete Einfügungsdämmung bauüblicher Fugendichtungen. Die Berechnung der dargestellten Kurven erfolgte mit den Gleichungen 21 (Berechnung von  $D_e$  als Funktion von  $E_{dyn}$  und  $\eta$ ) sowie 23 (Ermittlung von  $D_{e,w}$  aus dem Frequenzspektrum von  $D_e$ ).

### 3.7 Bedämpftes Masse-Feder-System

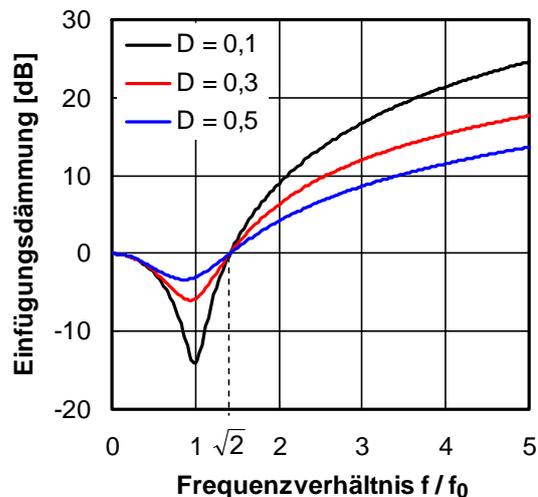
Das eindimensionale bedämpfte Masse-Feder-System ist ein grundlegendes akustisches Modell, das in vielen Bereichen der Bauakustik Verwendung findet. Da es auch im durchgeführten Forschungsvorhaben eine wichtige Rolle spielt, soll es im Folgenden kurz beschrieben werden. Das Masse-Feder-System besteht aus zwei frei beweglichen Massen, die über ein elastisches Element, das sowohl als Feder als auch als Dämpfer wirkt, miteinander verbunden sind. Der Einfachheit halber geht man zumeist - ohne wesentliche Beschränkung der Allgemeinheit - davon aus, dass die eine der beiden Massen sehr viel größer als die andere ist. Das beschriebene Modell ist in Abb. 12 schematisch dargestellt.



**Abb. 12:** Bedämpftes Feder-Masse-System als universelles Modell zur vereinfachten Beschreibung des Schwingungsverhaltens elastischer Elemente. Das akustische Verhalten des Systems wird durch seine Resonanzfrequenz  $f_0 = 1/2\pi (c/m_2)^{1/2}$  (für  $m_2 \gg m_1$ ) und das Lehr'sche Dämpfungsmaß  $D = \eta/2$  bestimmt. Die Federkonstante ergibt sich aus der Querschnittsfläche  $S$  und der Höhe  $l$  des Elements gemäß  $c = E_{dyn} S/l$ .

Die Einfügungsdämmung eines bedämpften Feder-Masse-Systems hängt neben der Frequenz  $f$  lediglich von der Resonanzfrequenz  $f_0$  und dem Lehr'schen Dämpfungsmaß  $D$  ab ( $f_0$  und  $D$  sind im Text zu Abb. 12 beschrieben). Für die Berechnungsformel ergibt sich folgender Ausdruck:

$$D_{e,MF} = 20 \lg \left( \sqrt{\frac{(1 - (f/f_0)^2)^2 + 4D^2 (f/f_0)^2}{1 + 4D^2 (f/f_0)^2}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (24)$$



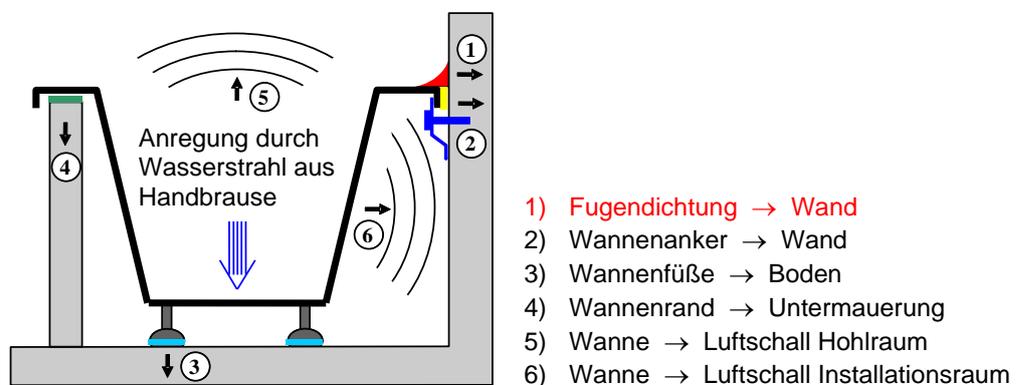
**Abb. 13:** Einfügungsdämmung eines bedämpften Masse-Feder-Systems in Abhängigkeit vom Frequenzverhältnis  $f / f_0$ . Positive Werte bedeuten eine Verminderung, negative eine Verstärkung der Schallübertragung. Neben der Resonanzfrequenz hat die Dämpfung des Systems maßgebenden Einfluss auf das akustische Verhalten.

Der Frequenzverlauf der nach Gl. (24) berechneten Einfügungsdämmung ist in Abb. 13 veranschaulicht. Im Bereich der Resonanz ist grundsätzlich eine verstärkte Schallübertragung (gleichbedeutend mit einem negativen Wert der Einfügungsdämmung) zu ver-

zeichnen. Eine Verminderung der Körperschallübertragung erfolgt erst für Frequenzen mit  $f > f_0 \cdot 2^{1/2}$ . Die Steigung des Frequenzverlaufs wird vom Dämpfungsmaß  $D$  bestimmt. Je größer die Dämpfung, desto geringer der Einbruch im Resonanzbereich, desto niedriger aber auch die Verbesserung bei hohen Frequenzen. Welche Kombination von  $f_0$  und  $D$  in akustischer Hinsicht am günstigsten ist, hängt von der jeweiligen Anwendung (insbesondere dem Frequenzspektrum des einwirkenden Schalls) ab und muss individuell für den Einzelfall ausgelegt werden.

### 3.8 Schallübertragungswege bei Sanitärinstallationen

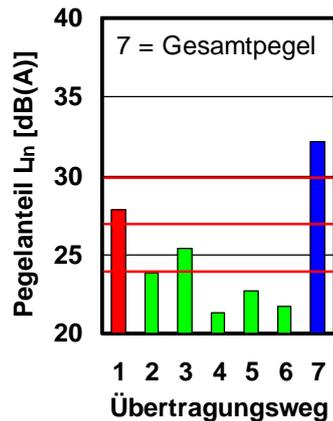
Es wurde bereits mehrfach darauf hingewiesen, dass Fugendichtungen insbesondere im Sanitärbereich einen maßgebenden Schallübertragungsweg darstellen, über den Körperschall aus der Installation ins Bauwerk gelangt. In Abb. 14 ist dies am Beispiel einer Badewanne veranschaulicht.



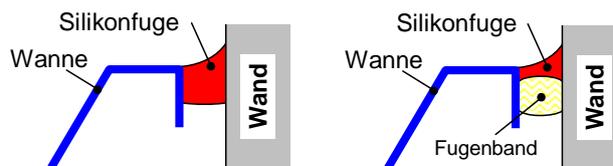
**Abb. 14:** Schallübertragungswege von einer Badewanne in den Baukörper. Obgleich auch Luftschallübertragung stattfindet, sind die maßgebenden Geräuschanteile normalerweise auf die Übertragung von Körperschall zurückzuführen.

Um den akustischen Einfluss der in Abb. 14 dargestellten Schallübertragungswege zu untersuchen, wurde die Wanne in praxismäßiger Weise mit einer Handbrause ange-regt. Anschließend wurden die verschiedenen Übertragungswege nacheinander unterbrochen und jeweils die resultierende Pegeländerung im Empfangsraum gemessen. Aus den ermittelten Messwerten ergeben sich die in Abb. 15 dargestellten Geräuschanteile (Beiträge der einzelnen Wege zu dem im Empfangsraum vorhandenen Gesamtpegel).

Bei einer Wanne mit fachmännisch ausgeführter Körperschallisolation (Wannenfüße mit Elastomerunterlage, entkoppelte Wandanker und Trennschicht aus weichem Schaumstoff zwischen Wannenrand und Baukörper), die mittlerweile als Stand der Technik anzusehen ist, stellt die Fugendichtung zwischen Wanne und Installationswand den wichtigsten Schallübertragungsweg dar. Durch akustisch günstige Formgebung der Fuge (z. B. durch Verwendung sogenannter Fugenbänder) und durch Einsatz geeigneter Dichtstoffe lässt sich die Schallübertragung über die Fuge beträchtlich reduzieren. Hierauf wird später noch genauer eingegangen. Zwei Beispiele für akustisch günstige und ungünstige Fugengeometrie sind in Abb. 16 dargestellt.



**Abb. 15:** Beiträge der in Abb. 14 dargestellten Schallübertragungswege zu dem im Empfangsraum hervorgerufenen Installations-Schallpegel  $L_{in}$  (rechter blauer Balken). Bei ansonsten guter Körperschallisolation liefert die Fugendichtung (linker roter Balken) den pegelbestimmenden Geräuschanteil. Die horizontalen roten Linien bezeichnen die gesetzlichen Schallschutzanforderungen an Installationsgeräusche ( $L_{in} \leq 30$  dB(A)), sowie die Pegelstufen, die in diesem Bereich in etwa einer Halbierung der wahrgenommenen Lautstärke entsprechen.



**Abb. 16:** Beispiel für die akustisch günstige (rechts) und ungünstige (links) geometrische Gestaltung einer Fugendichtung. Als Faustregel gilt: je weniger Dichtstoff sich in der Fuge befindet, desto weniger Körperschall wird übertragen. Um das übermäßige Eindringen von Dichtstoff in die Fuge zu unterbinden, hat sich der Einsatz von Fugenbändern aus weichem elastischem Schaumstoff bewährt.

## 4 Handelsübliche Fugendichtstoffe

Als Ausgangspunkt für die nachfolgenden Bearbeitungsschritte des durchgeführten Forschungsvorhabens war es zunächst erforderlich, einen Überblick über die auf dem Markt verfügbaren Fugendichtstoffe zu gewinnen und ihre akustischen Eigenschaften zu bestimmen. Ausgehend von den hierbei gewonnenen Erkenntnissen konnten dann geeignete Schallschutzmaßnahmen ausgelegt und akustisch optimierte Dichtstoffe entwickelt werden.

Akustische Untersuchungen an handelsüblichen Dichtstoffen wurden bereits vor einigen Jahren im Fraunhofer-Institut für Bauphysik im Rahmen einer Diplomarbeit vorgenommen [5]. Für die Verwendung im Rahmen des durchgeführten Forschungsvorha-

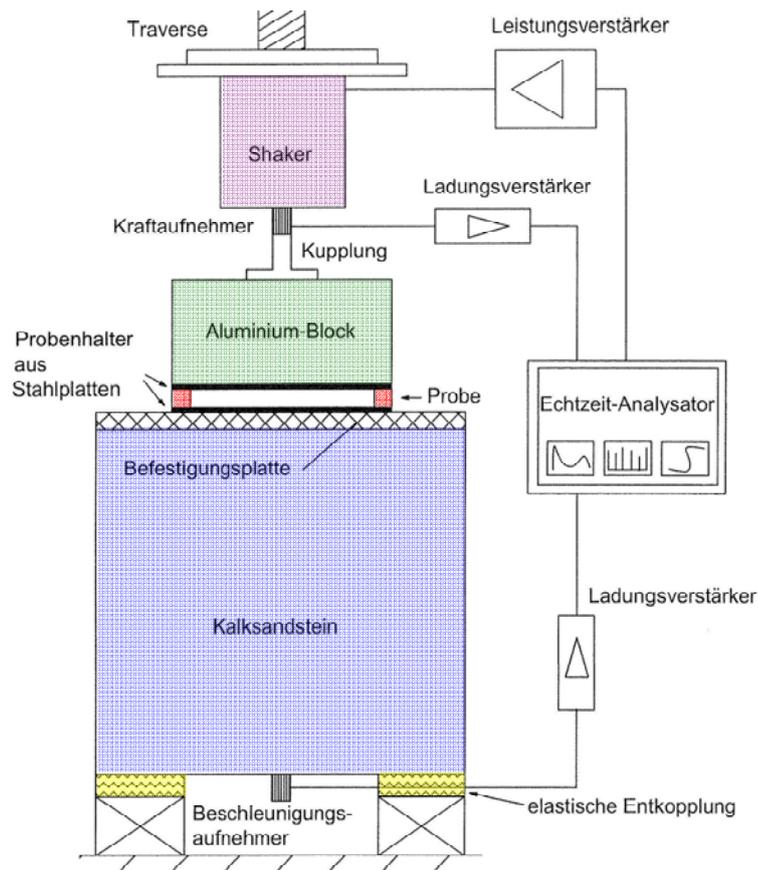
bens mussten die Ergebnisse der Diplomarbeit jedoch neu ausgewertet und vollständig neu aufbereitet werden. Aus den vorhandenen Rohdaten wurden dabei zusätzliche akustische Informationen gewonnen, die in der zugrundeliegenden Diplomarbeit nicht enthalten waren. Beispiele hierfür sind der Verlustfaktor der untersuchten Dichtstoffe sowie die Ableitung von praxisbezogenen Werten für die bewertete Einfügungsdämmung.

Die in der erwähnten Diplomarbeit enthaltenen Messdaten bilden somit wichtigen Bestandteil des durchgeführten Forschungsvorhabens. Der verwendete Messaufbau und die aus den Messungen ermittelten Untersuchungsergebnisse werden deshalb im folgenden genauer beschrieben.

#### **4.1 Versuchsaufbau**

Um die akustischen Eigenschaften verschiedenartiger Dichtstoffe zu untersuchen, wurde eine Messvorrichtung auf Grundlage eines Masse-Feder-Masse Systems verwendet, bei der die beiden beweglichen Massen (ein Aluminium-Block und ein elastisch gelagerter Kalksandstein) durch die untersuchte Probe federnd miteinander verbunden waren. Der Aluminium-Block und der Kalksandstein waren so ausgelegt, dass sie im untersuchten Frequenzbereich keine Eigenschwingungen aufwiesen. Die Körperschallanregung erfolgte durch einen am Aluminium-Block angebrachten elektrodynamischen Schwingerreger; gemessen wurde der resultierende Beschleunigungspegel auf dem Stein. Als grundlegende Messgröße diente die Einfügungsdämmung der Probe, die aus der Differenz der Beschleunigungspegel bei starrer und elastischer Verbindung ermittelt wurde. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit wurde zusätzlich die in den Aluminium-Block eingeleitete Kraft ermittelt, so dass Schwankungen des Anregungssignals rechnerisch kompensiert werden konnten. Zur Berechnung der Einfügungsdämmung aus den ermittelten Messwerten wurde Gl. (20) herangezogen.

Wegen der verhältnismäßig langen Aushärtezeit der untersuchten Dichtstoffe erfolgten die Messungen mittels separater Probenhalter, die aus zwei quadratischen Platten aus 1,5 mm dickem Stahlblech mit jeweils 10 cm Kantenlänge bestanden. Die obere und die untere Platte des Probenhalters waren im Randbereich durch zwei quaderförmige Proben aus dem untersuchten Dichtstoff miteinander verbunden. Form und Abmessungen der beiden Probenquader ( $L \times B \times H = 100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ) waren bauüblichen Fugendichtungen aus dem Sanitärbereich nachempfunden. Beim Einbau in die Messvorrichtung wurden die Oberseite des Halters mit dem Aluminium-Block und die Unterseite mit dem Stein verschraubt, wodurch sich einheitliche und reproduzierbare Messbedingungen ergaben. Eine Skizze des verwendeten Versuchsaufbaus mit Probenhalter und Probe ist in Abb. 17 dargestellt.

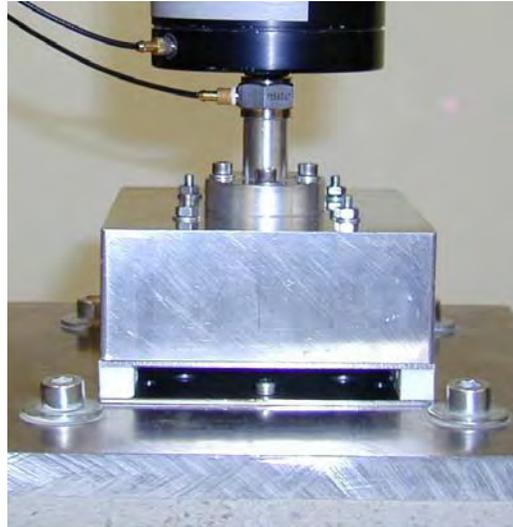


**Abb. 17:** Prinzipskizze des zur Messung der Einfügungsdämmung von Fugendichtungen verwendeten Versuchsaufbaus. Der Aufbau basiert auf dem Prinzip eines Masse-Feder-Masse-Systems, wobei der Aluminium-Block und der Kalksandstein als bewegliche Massen und die Probe als Feder- und Dämpfungselement fungieren. Der Aluminium-Block mit den Abmessungen 100 mm x 100 mm x 40 mm hat eine Masse von 1,1 kg. Der Kalksandstein (L x B x H = 200 mm x 200 mm x 200 mm) wiegt 14,2 kg.

Weitere Einzelheiten des Versuchsaufbaus sind aus dem Foto in Abb. 18 zu ersehen. Dargestellt ist der obere Teil des Messaufbaus mit dem elektrodynamischen Schwingerregger (schwarz) und dem quadratischen Aluminium-Block. Zwischen dem Schwingerregger und dem Aluminium-Block ist der zur Kontrolle der Anregungskraft verwendete piezoelektrische Kraftaufnehmer erkennbar. An der Oberseite des Kalksandsteins (nur ausschnittsweise am unteren Bildrand erkennbar) ist eine 15 mm dicke Aluminium-Platte angebracht, in der sich Gewindebohrungen zur Befestigung des Probenhalters befinden. Das Oberteil des Probenhalters ist mit dem Aluminium-Block, das Unterteil mit der Aluminium-Platte auf der Oberseite des Steins verschraubt, wobei die Befestigung jeweils mit vier Schrauben erfolgt.

Als Anregungssignal zur Messung der Einfügungsdämmung diente rosa Rauschen. Die Messung erfolgte frequenzabhängig in Terzen, wobei ein Echtzeit-Analysator vom Typ Norsonic RTA 840 eingesetzt wurde. Die für die Referenzmessung erforderlich starr Verbindung zwischen Aluminium-Block und Kalksandstein wurde realisiert, indem der

Aluminium-Block direkt auf die Oberseite des Steins (bzw. auf die dort angebrachte Aluminium-Platte) aufgesetzt und dort mittels Schrauben befestigt wurde.



**Abb. 18:** Oberer Teil des Versuchsaufbaus zur Messung der Einfügungsdämmung von Fugendichtungen. Von oben nach unten sind Schwingerreger, Kraftaufnehmer, Aluminium-Block, Probenhalter mit Probe (weißes Silikon) sowie die Oberseite des Kalksandsteins mit der darauf befestigten Aluminium-Platte erkennbar. Die Befestigung der Aluminium-Platte auf der Steinoberfläche erfolgte mit Klebstoff sowie zusätzlich mit Schrauben und Dübeln. Die Köpfe der verwendeten Inbus-Schrauben sind gleichfalls auf dem Bild erkennbar.

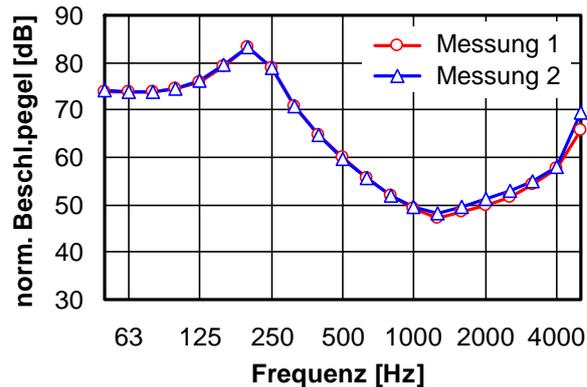
Wie bereits in Abschnitt 3.5 erläutert, ist die mit dem beschriebenen Versuchsaufbau gemessene Einfügungsdämmung eine für diesen Aufbau spezifische Messgröße, die sich nur eingeschränkt auf übliche bauliche Verhältnisse übertragen lässt. Die ermittelten Messwerte konnten deshalb in dem durchgeführten Forschungsvorhaben nicht direkt verwendet werden. Statt dessen wurden aus dem Frequenzverlauf der gemessenen Einfügungsdämmung (Resonanzfrequenz und Halbwertsbreite der Messkurve) unter Verwendung der Gleichungen 10 und 11 der dynamische Elastizitätsmodul und der Verlustfaktor des Probenmaterials abgeleitet. Aus diesen beiden Werten wurde dann mittels Gl. (21) eine praxisbezogene Angabe für die bewertete Einfügungsdämmung ermittelt, die dann in allen weiteren Untersuchungen Verwendung fand.

## 4.2 Validierung des Messverfahrens

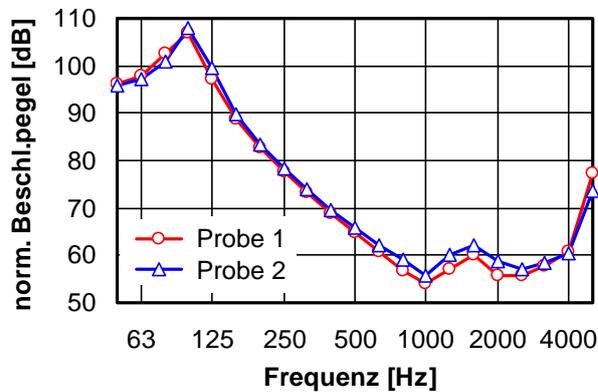
Aus dem in Abb. 8 dargestellten Beispiel, in dem eine mit dem verwendeten Versuchsaufbau ermittelte Messkurve mit dem theoretisch berechneten Verlauf der Einfügungsdämmung verglichen wird, geht hervor, dass sich der Aufbau in einem weiten Frequenzbereich nahezu ideal wie ein eindimensionales bedämpftes Masse-Feder-System verhält. Die bei hohen Frequenzen vorhandenen Abweichungen sind auf Eigenschwingungen und Kontaktresonanzen innerhalb der Konstruktion zurückzuführen und bei derartigen Aufbauten mehr oder weniger unvermeidlich. Auf die hier durchgeführ-

ten Untersuchungen, für die vor allem die tiefen Frequenzen bedeutsam sind, wirken sie sich nicht störend aus.

Wegen der guten Übereinstimmung der Messergebnisse mit dem theoretisch erwarteten Verlauf, sind auch in Bezug auf die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messwerte gute Ergebnisse zu erwarten. Diese Erwartung wird durch die in den Abbildungen 19 und 20 dargestellten Messkurven bestätigt. Sowohl bei Wiederholungsmessungen an derselben Probe als auch bei Messungen an zwei Proben aus dem gleichen Material stimmen die gemessenen Werte sehr gut überein.



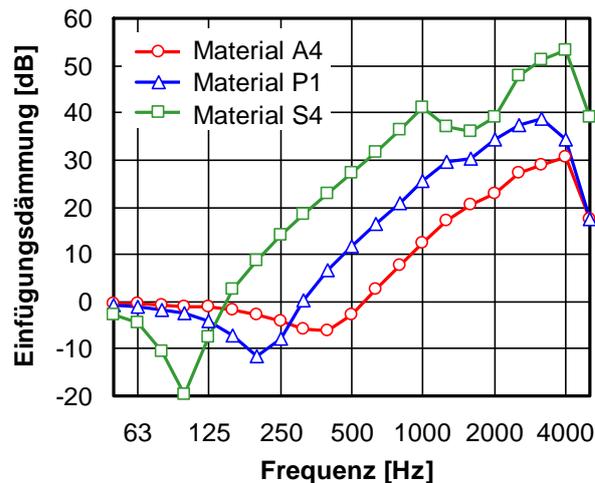
**Abb. 19:** Wiederholungsmessung an derselben Probe (nach Ausbau und erneutem Einbau in die Messvorrichtung). Die Messung erfolgte an Probe P1 (Polyurethan). Dargestellt ist der normierte Beschleunigungspegel auf dem Kalksandstein in Abhängigkeit von der Frequenz.



**Abb. 20:** Messungen an zwei unterschiedlichen Proben aus dem gleichem Material (Probe N5, Silikon neutral vernetzend). Dargestellt ist der normierte Beschleunigungspegel auf dem Kalksandstein in Abhängigkeit von der Frequenz.

Um die Unterschiede zwischen den untersuchten Materialien zu veranschaulichen, sind in Abb. 21 Messwerte für drei unterschiedliche Proben im Vergleich dargestellt. Die drei Proben wurden so ausgewählt, dass sie hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften (dynamischer Elastizitätsmodul und Verlustfaktor) das gesamte Spektrum der betrachte-

ten Materialien repräsentieren. Bei der Probe S4, einem sauer vernetzenden Silikon mit niedrigem Elastizitätsmodul und geringem Verlustfaktor, weist die gemessenen Einfügungsdämmung bei einer Frequenz von 100 Hz - dies entspricht der Resonanzfrequenz des Masse-Feder-Systems - ein ausgeprägtes Minimum auf. Für die Probe A4, die aus steifem Acryl mit hoher innerer Dämpfung besteht, verschiebt sich das Minimum in der Messkurve zu deutlich höheren Frequenzen, wobei gleichzeitig eine starke Abflachung des Kurvenverlaufs erfolgt. Die Werte für die dritte Probe (Probe P1, Polyurethan) bewegen sich im Zwischenbereich. Für die Resonanzfrequenz der untersuchten Proben ergibt sich ein Wertebereich von etwa 100 - 400 Hz, der auch für alle anderen untersuchten Materialien gültig ist.

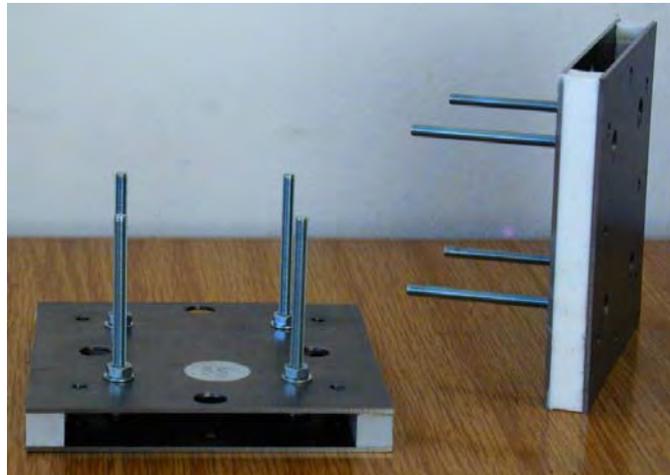


**Abb. 21:** Vergleich der Messergebnisse für drei typische Dichtstoffe. Aufgetragen ist jeweils die Einfügungsdämmung in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Kennwerte für die drei ausgewählten Proben betragen:  
 Probe A4: Acryl ( $E_{\text{dyn}} = 22,7 \text{ N/mm}^2$ ,  $\eta = 0,48$ ),  
 Probe P1: Polyurethan ( $E_{\text{dyn}} = 5,5 \text{ N/mm}^2$ ,  $\eta = 0,22$ ),  
 Probe S4: sauer vernetzendes Silikon ( $E_{\text{dyn}} = 1,5 \text{ N/mm}^2$ ,  $\eta = 0,07$ ).

### 4.3 Probenherstellung

Aufgrund der langen Aushärtedauer der untersuchten Dichtstoffe und der großen Anzahl der untersuchten Materialien war es erforderlich, alle benötigten Proben parallel in einem Zeitraum von nur wenigen Tagen anzufertigen. Die Dichtstoffe wurden hierbei jeweils in Probenhalter eingebracht, die nach dem Aushärten des Probenmaterials in die Messvorrichtung eingesetzt und dort mit Schrauben befestigt wurden. Die verwendeten Probenhalter bestanden aus zwei quadratischen Stahlblechen ( $L \times B \times H = 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm}$ ), die im Randbereich durch zwei quaderförmige Dichtstoffproben miteinander verbunden waren. Die Probenquader hatten eine Länge von 100 mm (also ebenso lang wie der Probenhalter) und eine Querschnittsfläche von 10 mm x 10 mm. Sie entsprachen damit näherungsweise einer bauüblichen Fugendichtung.

Bei der Probenherstellung wurden zwischen die beiden Stahlplatten des Probenhalters zwei Distanzleisten aus Aluminium geschraubt. Die Distanzleisten hatten zum einen die Aufgabe, den Abstand zwischen den beiden Stahlplatten auf den erforderlichen Wert von 10 mm einzustellen, zum anderen dienten sie als Schalung für den in viskosem Zustand in den Zwischenraum eingebrachten Dichtstoff. Der Dichtstoff wurde aus der Kartusche in den Randbereich des Probenhalters eingespritzt, so dass das Volumen zwischen Stahlplatten und Distanzleisten vollständig mit Probenmaterial gefüllt war. Durch diese Vorgehensweise ergab sich eine feste Verklebung zwischen Dichtstoff und Stahlplatten, während an den Distanzleisten, die vor dem Einbau mit Öl benetzt worden waren, keine Anhaftung des Dichtstoffs erfolgte. Hierdurch konnten die Distanzleisten nach Aushärten des Probenmaterials problemlos aus dem Halter entnommen werden. Nach dem Entfernen außen überstehender Dichtstoffreste durch Abschneiden mit einem scharfen Messer, waren Ober- und Unterseite des Halters, wie in Abbildung 22 dargestellt, an der Außenseite durch zwei Dichtstoffquader mit genau definierten und einheitlichen Maßen miteinander verbunden.



**Abb. 22:** Foto von zwei Probenhaltern mit Dichtstoffproben (weißes Silikon). Mit den auf der Oberseite angebrachten Gewindestäben wurden die Halter am Aluminium-Block der Messvorrichtung befestigt. Die Bohrungen an der Unterseite dienen zur Befestigung am Kalksandstein (durch Verschraubung mit der an der Oberseite des Steins angebrachten Aluminium-Platte).

Die Aushärtedauer der Proben vor Beginn der akustischen Messungen betrug bei allen untersuchten Dichtstoffen einheitlich ca. 30 Tage. Eine Ausnahme hiervon bildeten lediglich die Untersuchungen zum Aushärteverhalten der Proben (Abhängigkeit des dynamischen Elastizitätsmoduls von der Dauer der Aushärtung). Hierbei wurde die erste Messung bereits nach einer Aushärtedauer von nur 10 Tagen durchgeführt und danach in regelmäßigen Zeitabständen über einen Zeitraum von mehreren Wochen wiederholt. Für den Formfaktor der verwendeten Proben ergibt sich nach Gl. 15 ein Wert von  $q = 1,66$ .

## 4.4 Untersuchte Dichtstoffe

Die untersuchten Dichtstoffe wurden dem Fraunhofer-Institut von Herstellerunternehmen aus der chemischen Industrie zur Verfügung gestellt. Die Untersuchungen umfassten 18 verschiedene Materialien von 9 deutschen Herstellern. Bezeichnungen und technische Daten der Dichtstoffe sind - soweit aus den technischen Datenblättern der Hersteller zu entnehmen - im Fraunhofer-Institut vorhanden. Die Produktbezeichnung und die chemische Zusammensetzung werden auf Wunsch der Hersteller jedoch vertraulich behandelt. Die Kennzeichnung der Proben erfolgt deshalb im Rahmen der jeweiligen Produktgruppe mit einer laufenden Nummer. Für die Bearbeitung des Forschungsvorhabens ist dies ausreichend, da es in dieser Phase des Vorhabens zunächst nur um eine Bestandsaufnahme zur Palette der marktüblichen Produkte und dem Wertebereich ihrer akustischen Eigenschaften geht. Eine Übersicht über alle untersuchten Dichtstoffe mit den verwendeten Kennzeichnungen ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen:

Proben-Nr.	Dichtstoff	Härtung / Vernetzung
A1	Acryl	Dispersion
A2	Acryl	Dispersion
A3	Acryl	Dispersion
A4	Acryl	Dispersion
P1	Polyurethan	Hydrolyse
S1	Silikon	sauer vernetzend / Acetoxy
S2	Silikon	sauer vernetzend / Acetoxy
S3	Silikon	sauer vernetzend / Acetoxy
S4	Silikon	sauer vernetzend / Acetoxy
S5	Silikon	sauer vernetzend / Acetoxy
S6	Silikon	sauer vernetzend / Acetoxy
S7	Silikon	sauer vernetzend / Acetoxy
S8	Silikon	sauer vernetzend / Acetoxy
N1	Silikon	neutral vernetzend / Alkoxy
N2	Silikon	neutral vernetzend / -
N3	Silikon	neutral vernetzend / Oxim
N4	Silikon	neutral vernetzend / -
N5	Silikon	neutral vernetzend / Oxim

**Tab. 1:** Übersicht über alle im Rahmen der akustischen Bestandsaufnahme handelsüblicher Dichtstoffe untersuchten Probenmaterialien. Zur Kennzeichnung der Proben wird der Anfangsbuchstaben der jeweiligen Produktgruppe (z. B. A für Acryl) gefolgt von einer fortlaufenden Nummer verwendet.

Die 18 untersuchten Dichtstoffe umfassten 4 Proben aus Acryl, 1 Probe aus Polyurethan sowie 13 Silikon-Proben. Bei den Silikon-Proben war zwischen sauer vernetzenden Materialien (8 Proben) und neutral vernetzenden Produkten (5 Proben) zu unterscheiden.

## 4.5 Messergebnisse

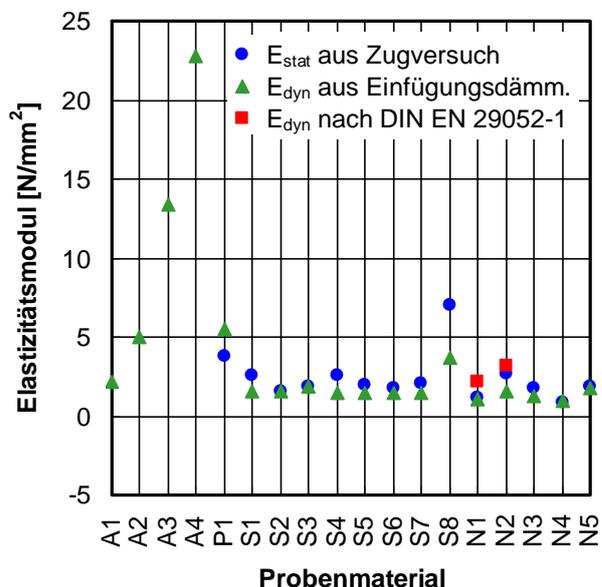
### 4.5.1 Elastizitätsmodul und Verlustfaktor

Der dynamische Elastizitätsmodul und der Verlustfaktor der untersuchten Dichtstoffe wurden nach den Gleichungen 10 und 11 aus der Resonanzfrequenz und der Halb-

wertsbreite der gemessenen Einfügungsdämmung bestimmt. Bei den Proben aus Acryl erwies sich dieses Verfahren wegen der hohen inneren Dämpfung und des damit verbundenen flachen Verlaufs der Messkurve allerdings als schwierig. Deshalb wurde hier zur Bestimmung von  $E_{\text{dyn}}$  und  $\eta$  alternativ die in Gl. (24) aufgeführte Formel für ein bedämpftes Masse-Feder-System verwendet. Die Eingangswerte der Formel (Resonanzfrequenz  $f_0$  und Lehr'sches Dämpfungsmaß  $D = \eta/2$ ) wurden hierbei so angepasst, dass sich die bestmögliche Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ergab. Aus den auf diese Weise für  $f_0$  und  $D$  ermittelten Werten wurden dann unter Verwendung der in Abb. 12 aufgeführten Beziehungen  $E_{\text{dyn}}$  und  $\eta$  bestimmt.

Die auf die oben beschriebene Art und Weise für  $E_{\text{dyn}}$  und  $\eta$  ermittelten Werte beziehen sich auf die Resonanzfrequenz der jeweiligen Messkurve, die sich abhängig vom Probenmaterial im Bereich von etwa 100 - 400 Hz bewegt. Angaben zur Frequenzabhängigkeit der akustischen Materialeigenschaften lassen sich aus den vorliegenden Messdaten nicht entnehmen. Für die weiteren Betrachtungen ist dies allerdings auch nicht unbedingt notwendig, da die Frequenzabhängigkeit im maßgebenden Bereich tiefer Frequenzen nur verhältnismäßig schwach ausgeprägt ist. Die Abhängigkeit des dynamischen Elastizitätsmoduls und des Verlustfaktors von der Frequenz wird Abschnitt 5 unter Verwendung eines anderen Messverfahrens genauer untersucht.

Die für den dynamischen Elastizitätsmodul der untersuchten Dichtstoffe ermittelten Messwerte sind in Abb. 23 dargestellt. Bei einigen der Proben wurde zum Vergleich zusätzlich der statische Elastizitätsmodul ermittelt (zugehöriger Messaufbau siehe Abb. 24) und es wurden Messungen nach DIN EN 29052-1 [25], einem Verfahren zur Bestimmung der dynamischen Steifigkeit von Trittschalldämmstoffen, durchgeführt. Die entsprechenden Messergebnisse sind gleichfalls in Abb. 23 enthalten.



**Abb. 23:** Dynamischer Elastizitätsmodul der untersuchten Dichtstoffe. Neben den aus der gemessenen Einfügungsdämmung ermittelten Werten sind außerdem soweit vorhanden auch Messergebnisse für den statischen Elastizitätsmodul

(blaue Kreise) sowie zwei weitere Werte, die alternativ mit dem in DIN EN 29052-1 beschriebenen Messverfahren ermittelt wurden (rote Quadrate), eingezeichnet. Die Messungen nach DIN EN 29052-1 erfolgten an plattenförmigen Proben mit den Abmessungen  $L \times B \times H = 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ . Der Messaufbau zur Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls ist in Abb. 24 beschrieben.



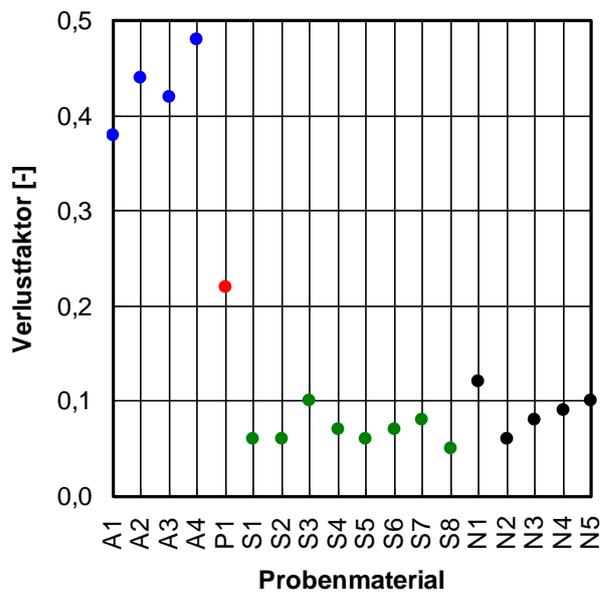
**Abb. 24:** Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls der untersuchten Dichtstoffe mittels eines Zugversuchs. Die Messungen erfolgten an Probenstreifen mit den Maßen  $L \times B \times H = 300 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ . Gemessen wurde die Dehnung der Probe infolge einer am unteren Ende einwirkenden Zugkraft, wobei die Abstandsänderung zwischen zwei im mittleren Teil der Probe (mit ausreichendem Abstand von den Halterungen) angebrachten Markierungen ermittelt wurde. Selbstverständlich erfolgten die Messungen im linearen Bereich der Federkennlinie.

Aus den in Abb. 23 dargestellten Messergebnissen ergeben sich für den dynamischen Elastizitätsmodul folgende Erkenntnisse:

- Die mit unterschiedlichen Verfahren gemessenen Werte stimmen weitgehend überein. Dies gilt auch beim Vergleich von dynamischem und statischem Elastizitätsmodul, wobei die statischen Werte zumeist ein wenig höher liegen.
- Zwischen den unterschiedlichen Dichtstoffen bestehen erhebliche Unterschiede. Der Wertebereich für den dynamischen Elastizitätsmodul umfasst einen Bereich von  $\text{ca. } 1 \text{ N/mm}^2 \leq E_{\text{dyn}} \leq 23 \text{ N/mm}^2$ .
- Die höchsten Werte von  $E_{\text{dyn}}$  ergeben sich erwartungsgemäß bei Acryl. Allerdings bestehen zwischen verschiedenen Sorten von Acryl große Unterschiede (2 - 23

N/mm<sup>2</sup>). Bei Silikon findet man - mit Ausnahme der Probe S8 - hingegen recht einheitliche Werte (ca. 1 - 2 N/mm<sup>2</sup>).

Für den Verlustfaktor der untersuchten Dichtstoffe (siehe Abb. 25) ergibt sich aus den durchgeführten Messungen und einfaches Bild: Die höchste innere Dämpfung findet man mit  $0,38 \leq \eta \leq 0,48$  bei Acryl. Der Verlustfaktor der Silikon-Proben ist demgegenüber bedeutend niedriger und liegt - mit Ausnahme der Probe N1, für die sich ein etwas höherer Wert ergibt - einheitlich im Bereich von  $0,05 \leq \eta \leq 0,1$ . Zwischen sauer und neutral vernetzenden Silikon sind dabei - ähnlich wie auch beim dynamischen Elastizitätsmodul - keine systematischen Unterschiede erkennbar. Der für Polyurethan gemessene Wert bewegt sich mit  $\eta = 0,22$  im Zwischenbereich



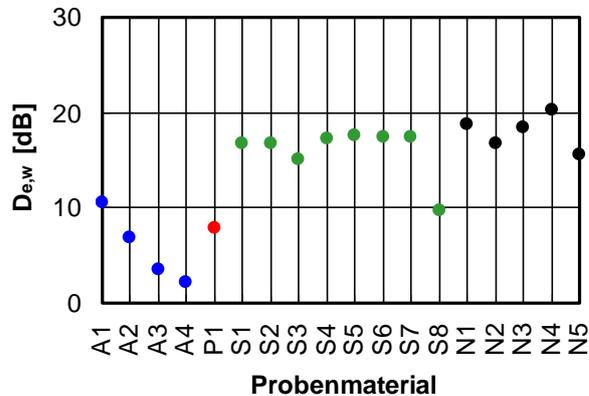
**Abb. 25:** Verlustfaktor der untersuchten Dichtstoffe. Die Farbe der dargestellten Messpunkte kennzeichnet die Zugehörigkeit zur jeweiligen Stoffgruppe (blau für Acryl, rot für Polyurethan, grün für sauer vernetzendes und schwarz für neutral vernetzendes Silikon).

#### 4.5.2 Bewertete Einfügungsdämmung

Die bewertete Einfügungsdämmung wurde mit den Gleichungen 21 und 23 aus dem dynamischen Elastizitätsmodul und dem Verlustfaktor der untersuchten Dichtstoffe berechnet. Die in Abb. 26 dargestellten Werte lassen sich als Maß für die Schallschutzwirkung von Fugendichtungen unter praxisüblichen baulichen Bedingungen auffassen.

Die niedrigsten Werte für die bewertete Einfügungsdämmung ergeben sich mit etwa  $2 \text{ dB} \leq D_{e,w} \leq 10 \text{ dB}$  erwartungsgemäß für Fugendichtungen aus Acryl. Der Wert für die Polyurethan-Probe liegt mit  $D_{e,w} \cong 8 \text{ dB}$  ungefähr im gleichen Bereich. Eine wesentlich bessere Körperschallisolation erreichen hingegen Fugendichtungen aus Silikon. Die bewertete Einfügungsdämmung liegt hier durchgängig im Bereich von etwa  $15 \text{ dB} \leq D_{e,w} \leq 20 \text{ dB}$ . Die einzige Ausnahme hiervon bildet die Silikon-Probe S8, für die sich wegen

ihrer außergewöhnlich hohen Steifigkeit eine bewertete Einfügungsdämmung von nur  $D_{e,w} \cong 10$  dB ergibt. Abgesehen davon, dass die Proben aus neutral vernetzendem Silikon eine etwas größere Schwankungsbreite aufweisen und dass sich für sie im Mittel eine geringfügig (um ca. 1 dB) höhere Einfügungsdämmung ergibt, sind zwischen den sauer und neutral vernetzenden Silikonen keine systematischen akustischen Unterschiede erkennbar.

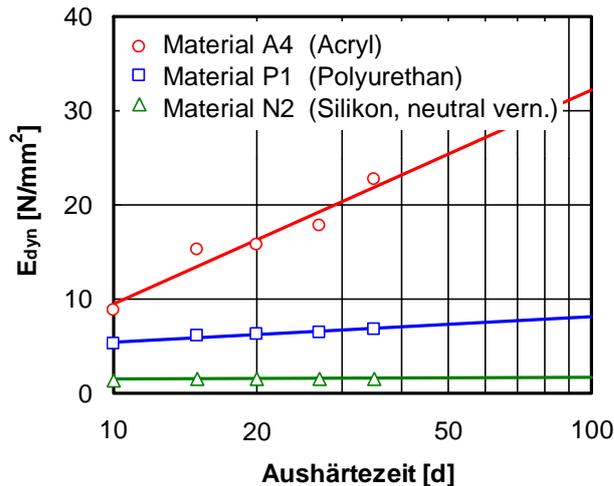


**Abb. 26:** Bewertete Einfügungsdämmung der untersuchten Dichtstoffe. Die Farbe der dargestellten Messpunkte kennzeichnet die Zugehörigkeit zur jeweiligen Stoffgruppe (blau für Acryl, rot für Polyurethan, grün für sauer vernetzendes und schwarz für neutral vernetzendes Silikon). Die niedrige Einfügungsdämmung der Probe S8 ist auf den - im Vergleich zu den übrigen Silikonen - außergewöhnlich hohen Wert für die dynamische Steifigkeit zurückzuführen.

### 4.5.3 Aushärtung

Im Zuge der Aushärtung verändern sich der Elastizitätsmodul und damit auch die akustische Wirkung von Dichtstoffen. Für die praktische Anwendung ist es daher zu wichtig, zu wissen, nach welcher Zeit der dynamische Elastizitätsmodul von Fugendichtungen seinen Endwert erreicht hat.

Um dies zu untersuchen, wurden an mehreren Proben akustische Wiederholungsmessungen durchgeführt. Die erste Messung fand nach einer Aushärtedauer von 10 Tagen statt. Danach wurden die Messungen im Abstand von einigen Tagen bis zu einem Alter von 35 Tagen wiederholt. Den in Abb. 27 dargestellten Ergebnissen ist zu entnehmen, dass der dynamische Elastizitätsmodul mit zunehmendem Alter der Probe ansteigt. Dabei folgt er wie zu erwarten einem exponentiellen Zeitverlauf. Die Zeitkonstante des Anstiegs ist bei den verschiedenen Dichtstoffen allerdings unterschiedlich. Bei Fugendichtungen aus Silikon ist die Aushärtung - zumindest für die bei den durchgeführten Messungen vorhandene Probengeometrie - nach 10 Tagen bereits nahezu abgeschlossen. Auch bei Polyurethan zeigen sich nach 10 Tagen Aushärtedauer nur noch geringe Veränderungen. Bei Acryl findet hingegen ein lang andauernder Aushärteprozess statt, der auch nach 35 Tagen noch keineswegs abgeschlossen ist.



**Abb. 27:** Dynamischer Elastizitätsmodul von drei Dichtstoffen in Abhängigkeit von der Aushärtezeit der Proben in Tagen. Die erste Messung fand nach 10 Tagen, die letzte nach 35 Tagen statt. Wegen des exponentiellen Zeitverlaufs des Aushärtevorgangs wurde für die Abszissen-Achse eine logarithmische Skalierung gewählt.

#### 4.6 Resümee

Aus den im vorliegenden Abschnitt beschriebenen Untersuchungen, die eine repräsentative Auswahl handelsüblicher Dichtstoffe umfassten, ergaben sich wichtige Erkenntnisse für die weitere Bearbeitung des Forschungsvorhabens. So konnte der akustische Wertebereich der derzeit verfügbaren Produkte abgesteckt und das vorhandene Verbesserungspotenzial ausgelotet werden. Im Detail sind vor allem folgende Ergebnisse von Bedeutung:

- Aus den Untersuchungen an 18 bauüblichen Fugendichtstoffen auf Acryl-, Polyurethan- und Silikonbasis ergab sich für den dynamischen Elastizitätsmodul der Materialien ein breiter Wertebereich von  $E_{dyn} = 1 - 23 \text{ N/mm}^2$ .
- Mit der bewerteten Einfügungsdämmung  $D_{e,w}$  steht eine geeignete Einzahlangabe zur Beurteilung der Schallschutzwirkung von Fugendichtungen in der baulichen Praxis zur Verfügung. Sie wird rechnerisch aus dem dynamischen Elastizitätsmodul und dem Verlustfaktor des verwendeten Dichtstoffs ermittelt und gibt an, welche Minderung ein typisches Installationsgeräusch erfährt, wenn die Körperschallübertragung statt über ein starres Element über die betrachtete Fugendichtung erfolgt.
- Für handelsübliche Dichtstoffe liegt  $D_{e,w}$  im Bereich von etwa 2 - 20 dB. Durch den Einsatz optimierter Materialien erscheint es möglich, diesen Wert bis auf maximal etwa 25 dB zu verbessern.
- Als Faustregel zur Auslegung von Fugendichtung gilt allgemein der Grundsatz: Je weicher der Dichtstoff, desto besser die Körperschallisolierung. Ein hoher Verlustfaktor ist hierbei hinderlich und wirkt sich negativ auf die akustische Wirkung der Fuge aus.

- Fugendichtung mit wirksamer Körperschallisolation sind nur durch den Einsatz weicher Dichtstoffe mit  $E_{dyn} \leq 1 - 2 \text{ N/mm}^2$  realisierbar. Diese Voraussetzung erfüllen im wesentlichen nur Materialien auf der Basis von Silikon. Acryl und Polyurethan sind hierfür normalerweise zu hart.

Mit den beschriebenen Ergebnissen stehen die erforderlichen Grundlagen zur Entwicklung akustisch optimierter Dichtstoffe bereit. Dies erfolgt im nächsten Schritt des Forschungsvorhabens, der im nachfolgenden Abschnitt beschrieben wird.

## 5 Akustisch optimierte Fugendichtstoffe

Nachdem die erforderlichen akustischen Grundlagen als Ergebnis der durchgeführten Vorarbeiten bereitstanden, wurde mit der akustischen Optimierung der Dichtstoffe begonnen. Den ersten Schritt hierzu bildete die Formulierung von Entwicklungszielen. Hierbei standen vor allem zwei Ziele im Vordergrund:

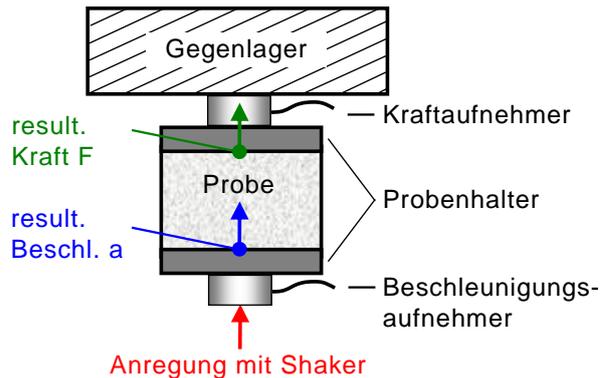
- a) Entwicklung eines Fugendichtstoffs mit einem möglichst niedrigen dynamischen Elastizitätsmodul. Um eine gute Körperschallisolation zu gewährleisten, darf der Verlustfaktor dieses Materials nicht zu hoch sein. Da als Ausgangsmaterial jedoch ohnehin nur Stoffe auf der Basis von Silikon infrage kommen, die von sich aus eine niedrige innere Dämpfung aufweisen, kann die zweite Bedingung bei der Materialentwicklung zunächst außer Betracht bleiben. Neben seinen verbesserten akustischen Eigenschaften muss das neue Material selbstverständlich auch die üblichen Anforderungen an Dichtstoffe, z. B. im Hinblick auf Haftung, Belastbarkeit und Beständigkeit, erfüllen.
- b) Entwicklung eines Materials mit hohem Verlustfaktor, vorzugsweise auf der Basis von Acryl. Für den Bereich der Körperschallisolation ist ein solches Material zwar nicht geeignet; es kann jedoch als Basis körperschalldämpfender Beschichtungen und Beläge dienen, wie sie z. B. zur Bedämpfung schwingender Bleche eingesetzt werden. Da diese Thematik außerhalb des Schwerpunkts des durchgeführten Forschungsvorhabens liegt, beschränkten sich die hierzu durchgeführten Untersuchungen im wesentlichen auf Messungen des Verlustfaktors und den Vergleich mit handelsüblichen Dämpfungsmaterialien.

Die eigentliche Materialentwicklung, d. h. die geeignete Modifikation der chemischen Zusammensetzung und die Herstellung der akustisch optimierten Dichtstoffe, wurde von dem am Projekt beteiligten Partner aus der chemische Industrie, der Henkel AG, übernommen. Die Aufgabe des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik bestand vor allem darin, die akustischen Materialeigenschaften der neu entwickelten Materialien zu bestimmen und die Materialien im Hinblick auf ihre Eignung als körperschallisolierende Fugendichtstoffe zu bewerten. Für die hierzu erforderlichen Messungen musste eine neue Messvorrichtung aufgebaut werden, die es erlaubt, die akustischen Eigenschaften der untersuchten Materialien in Abhängigkeit von der Frequenz zu messen. Mit der in Abschnitt 4 beschriebenen bislang verwendeten Versuchsanordnung war dies nicht möglich, so dass vor allem die Wissenslücken in Bezug auf die Frequenzabhängigkeit des dynamischen Elastizitätsmoduls einen erheblichen Unsicherheitsfaktor bei der Beur-

teilung der akustischen Eigenschaften von Fugendichtungen darstellten. Die zur Bestimmung der frequenzabhängigen Materialeigenschaften aufgebaute Messvorrichtung und die damit ermittelten Messergebnisse werden im folgenden beschrieben.

## 5.1 Versuchsaufbau

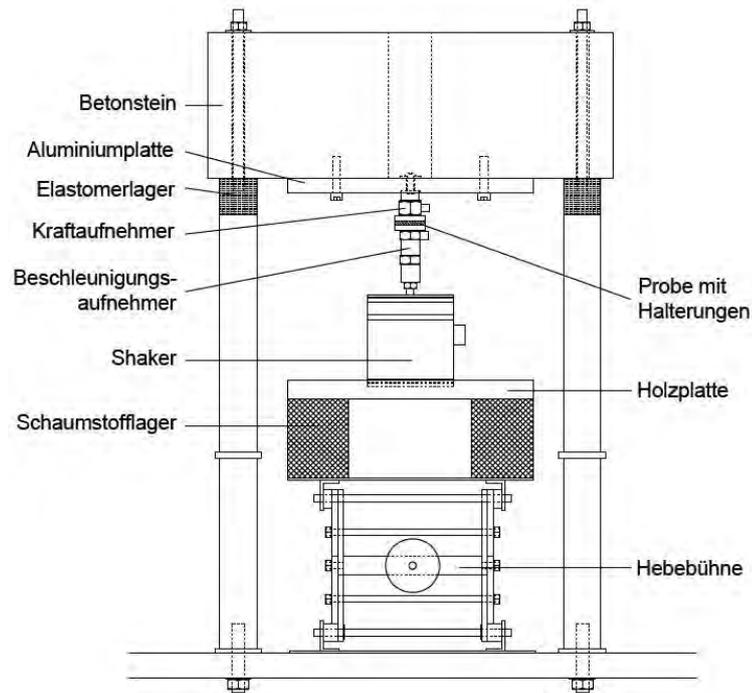
Die Grundzüge des zur frequenzabhängigen Bestimmung der akustischen Materialeigenschaften verwendeten Messverfahrens wurden bereits in Abschnitt 3.3 erläutert. In der nachfolgenden Abb. 28 ist das Messprinzip nochmals genauer dargestellt:



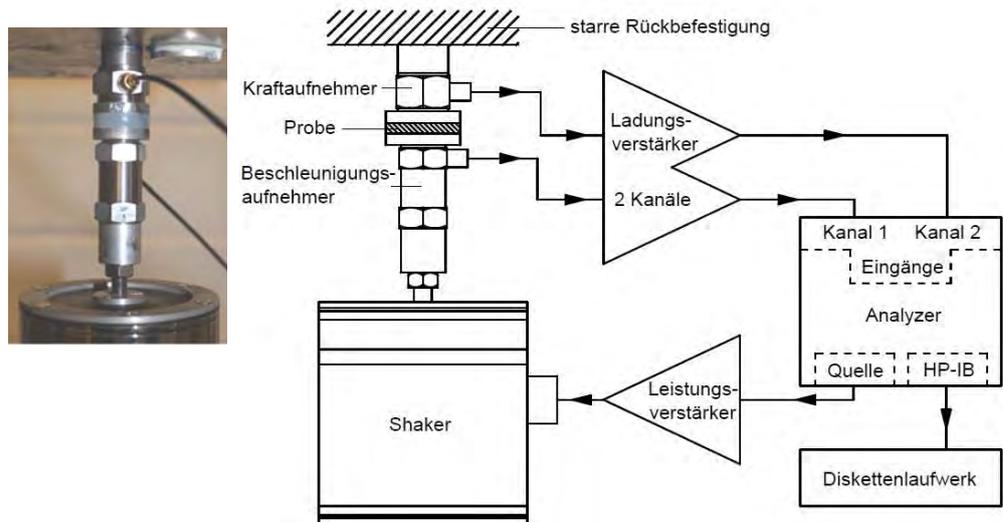
**Abb. 28:** Schematische Darstellung des verwendeten Messverfahrens. Messgrößen sind die Kraft auf der Ober- und die Beschleunigung auf der Unterseite der Probe sowie die zwischen diesen beiden Signalen vorhandene Phasendifferenz.

Die untersuchte Probe besteht aus einer runden Scheibe, die an der Ober- und Unterseite durch Verklebung an zwei Probenhaltern befestigt ist. Die Probenhalter sind aus Aluminium gefertigt und haben den gleichen Durchmesser wie die Probe. Im Zentrum der beiden Probenhalter befindet sich jeweils eine Gewindebohrung, die zur Anbringung eines Kraft- und eines Beschleunigungsaufnehmers dient. Die Oberseite der Probe ist starr an einem Gegenlager befestigt, die Unterseite hingegen frei beweglich.

Bei der Messung wird die Probe von der Unterseite her mit einem elektrodynamischen Schwingerreger in Bewegung versetzt, wobei sie sich in axialer Richtung verformt. Gemessen wird die einwirkende Kraft, die resultierende Änderung der Probenlänge (durch zweimalige Integration des gemessenen Beschleunigungspegels) sowie die Phasenbeziehung zwischen den beiden Mess-Signalen. Aus den gemessenen Werten können anschließend auf einfache Weise mit den Gleichungen (2) und (4) der dynamische Elastizitätsmodul und der Verlustfaktor ermittelt werden. Zur Messung der Frequenzabhängigkeit von  $E_{\text{dyn}}$  und  $\eta$  wird ein Gleitsinus verwendet. Eine Gesamtansicht der Messeinrichtung ist in Abb. 29 dargestellt. Aus Abb. 30 sind die wichtigsten Details der Messanordnung sowie der Aufbau der elektronischen Messkette zu ersehen.



**Abb. 29:** Aufbau zur Messung des dynamischen Elastizitätsmoduls und des Verlustfaktors von Elastomerproben in Abhängigkeit von der Frequenz. Der dynamische Schwingerreger (es handelt sich um einen Inertial-Shaker vom Typ Data Physics IV40 mit einer Masse von ca. 1,5 kg) ist in eine elastisch gelagerte Holzplatte eingelassen, um Taumelbewegungen der Messanordnung zu vermeiden und eine rein axiale Verformung der Probe sicherzustellen. Die Hebebühne (Scherentisch) dient als Hilfsvorrichtung beim Ein- und Ausbau der Probe und trägt das Gewicht des Shakers, so dass die Probe keiner statischen Vorlast ausgesetzt ist. Das Gegenlager zur Aufnahme der in die Probe eingeleiteten Kraft bildet ein Betonstein mit einer Masse von ca. 25 kg.



**Abb. 30:** Detaildarstellung des verwendeten Messaufbaus. Um Eigenschwingungen des Aufbaus zu unterbinden (bzw. die vorhandenen Eigenschwingungen in einen Bereich oberhalb der für die Untersuchungen bedeutsamen Frequenzen zu verschieben) sind alle bewegten Komponenten (Sensoren, Adapter und Probenhalter) fest miteinander verschraubt. Die untersuchten Proben weisen normalerweise einen Durchmesser von 20 mm und eine Dicke von etwa 5 mm auf. Die Dicke der beiden aus Aluminium bestehenden Probenhalter (mit gleichem Durchmesser wie die Probe) beträgt jeweils 4 mm.

Das Kernstück der elektronischen Messkette bildete ein Signalanalysator vom Typ Hewlett Packard 3562A. Das Gerät diente wohl als Signalgenerator als auch zur Erfassung und Speicherung der Messdaten. Nach der Messung wurden die Rohdaten auf einen Rechner übertragen und dort in das Tabellenkalkulationsprogramm Excel eingelesen, wo die weitere Auswertung und die Darstellung der Ergebnisse in Form von Tabellen und Grafiken erfolgte.

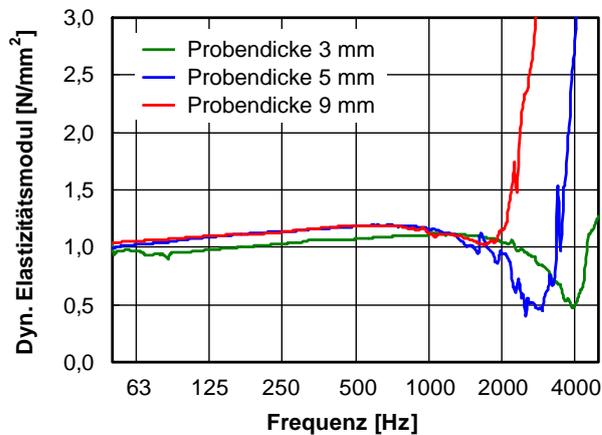
## 5.2 Validierung des Messverfahrens

Empfindlichkeit und Genauigkeit des oben beschriebenen Messverfahrens entsprechen nicht ganz dem in Abschnitt 4 dargestellten Versuchsaufbau. Das Verfahren ermöglicht aber dennoch zuverlässige Messungen des dynamischen Elastizitätsmoduls und des Verlustfaktors in einem weiten Frequenzbereich. Ein typisches Beispiel für den gemessenen Elastizitätsmodul ist in Abb. 31 dargestellt. Im Bereich tiefer und mittlerer Frequenzen ergibt sich eine glatte Messkurve, die zunehmender Frequenz leicht ansteigt. Dann folgen zunächst ein Minimum und danach ein steiler Anstieg der dargestellten Werte. In diesem Bereich liefert das verwendete Messverfahren keine brauchbaren Ergebnisse mehr.

Einen ähnlichen Kurvenverlauf wie in Abb. 31 findet man - in unterschiedlicher individueller Ausprägung und mit unterschiedlicher Lage der charakteristischen Frequenzen - für alle untersuchten Proben. Das Minimum, das den nutzbaren Frequenzbereich der Messanordnung zu hohen Frequenzen hin begrenzt, ist auf eine Dickenresonanz inner-

halb der Probe zurückzuführen. Dabei handelt es sich um eine stehende Longitudinal- bzw. Dehnwelle, die einen Schwingungsknoten am oberen (festen) Ende der Probe und einen Schwingungsbauch am unteren (beweglichen) Ende aufweist. Wie in Abb. 32 schematisch dargestellt, entspricht die Wellenlänge der Dehnwelle hierbei der vierfachen Probendicke.

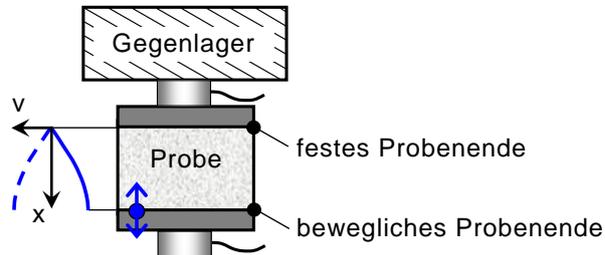
Die Frequenz der beschriebenen Dickenresonanz lässt sich mit Gl. (13) berechnen und stimmt recht gut mit den in Abb. 31 dargestellten Werten überein. Weitere Resonanzen höherer Ordnung (in Abb. 31 nicht sichtbar) sind bei ganzzahlig vielfachen Werten der Grundfrequenz zu erwarten. Da sich die Resonanzen - wie in Abb. 31 gut zu erkennen - mit zunehmender Probendicke zu tiefen Frequenzen hin verschieben, sind zuverlässige Messungen bei hohen Frequenzen nur mit ausreichend dünnen Proben möglich. Dies gilt insbesondere für Proben mit geringem Elastizitätsmodul, bei denen die Resonanzfrequenz besonders niedrig liegt.



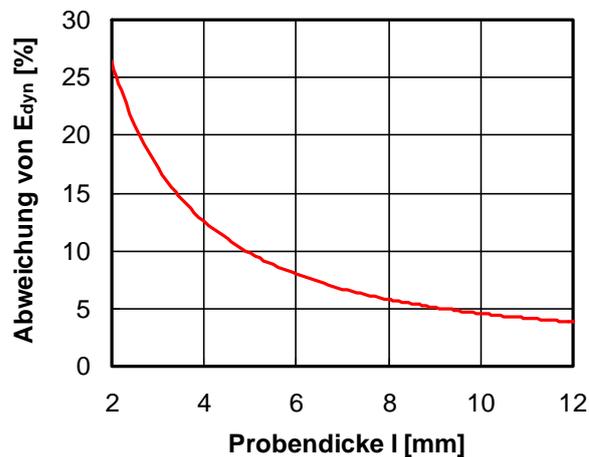
**Abb. 31:** Dynamischer Elastizitätsmodul eines typischen Dichtstoffs (neutral vernetzendes Silikon) in Abhängigkeit von der Frequenz. Die dargestellten Messungen erfolgten an demselben Material, jedoch für unterschiedlich dicke Proben (Probendurchmesser jeweils 30 mm). Abgesehen vom oberen Frequenzbereich, wo eine Störung der Messung durch Dickenresonanzen erfolgt, stimmen die Messergebnisse für die verschiedenen Proben ungefähr überein. Dies bestätigt, dass sich der Einfluss der Probengeometrie auf das Messergebnis durch Anwendung des mit Gl. (18) berechneten Formfaktors - zwar nicht vollständig aber doch zumindest größtenteils - eliminieren lässt.

Als Konsequenz aus den obigen Ergebnissen wäre zu überlegen, zur Vermeidung von Dickenresonanzen für die Messungen grundsätzlich möglichst dünne Proben zu verwenden. Dies hätte jedoch Probleme bei der Herstellung der Proben zur Folge und würde sich außerdem negativ auf die Genauigkeit auswirken, mit der sich die Probendicke bestimmen lässt. Da die Probendicke über die Gleichungen (2) und (18) unmittelbar in den gemessenen Elastizitätsmodul einfließt, wirkt sie sich in starkem Maße auf die absolute Genauigkeit der Messergebnisse aus. Aus der in Abb. 33 dargestellten Kurve, die den Zusammenhang zwischen der Probendicke und der Messgenauigkeit rechnerisch veranschaulicht, ist deutlich zu erkennen, dass sich die Genauigkeit des gemessenen Elastizitätsmoduls mit abnehmender Dicke der Probe deutlich vermindert.

In der Praxis stellt die Wahl der günstigsten Probendicke deshalb einen Kompromiss dar. Für viele untersuchte Materialien erhält man mit einer Dicke von etwa 5 mm gute Ergebnisse. Eine einheitliche Probendicke hat überdies den Vorteil, dass eine bestmögliche Vergleichbarkeit der für unterschiedliche Dichtstoffe ermittelten Messergebnisse gewährleistet ist.

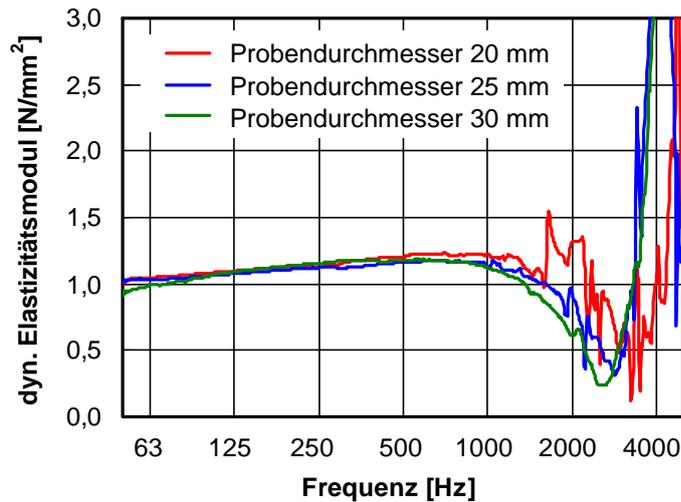


**Abb. 32:** Veranschaulichung der Ausbildung einer stehenden Dehnwelle in axialer Richtung der Probe. Der Schwingungsknoten befindet sich am oberen, der Schwingungsbauch am unteren Ende der Probe, so dass die Probendicke einer viertel Wellenlänge entspricht.



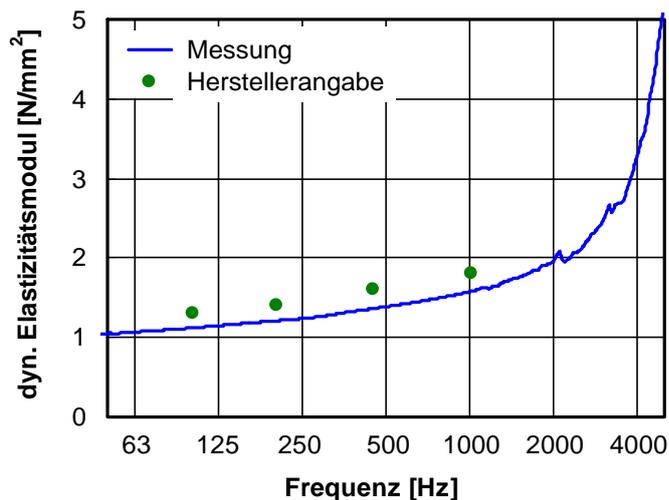
**Abb. 33:** Einfluss der Probendicke auf die Genauigkeit des gemessenen Elastizitätsmoduls. Bei der Berechnung der dargestellten Kurve wurde von einem Messfehler von jeweils  $\pm 0,15$  mm bei der Bestimmung von Probendicke und Probendurchmesser ausgegangen.

Neben der Probendicke hat auch der Durchmesser der Probe Einfluss auf den gemessenen Elastizitätsmodul (siehe Abb. 34). Die Auswirkungen auf das Messergebnis sind aber erheblich geringer als bei der Probendicke und werden durch den geometrischen Formfaktor bei der Berechnung weitgehend kompensiert. Im Gegensatz zum dynamischen Elastizitätsmodul besteht zwischen dem gemessenen Verlustfaktor und der Probegeometrie kein direkter Zusammenhang.



**Abb. 34:** Dynamischer Elastizitätsmodul eines typischen Dichtstoffs (neutral vernetzendes Silikon) in Abhängigkeit von der Frequenz. Die dargestellten Messungen erfolgten an demselben Material, jedoch für Proben mit unterschiedlichem Durchmesser. Die Probendicke betrug einheitlich etwa 5 mm.

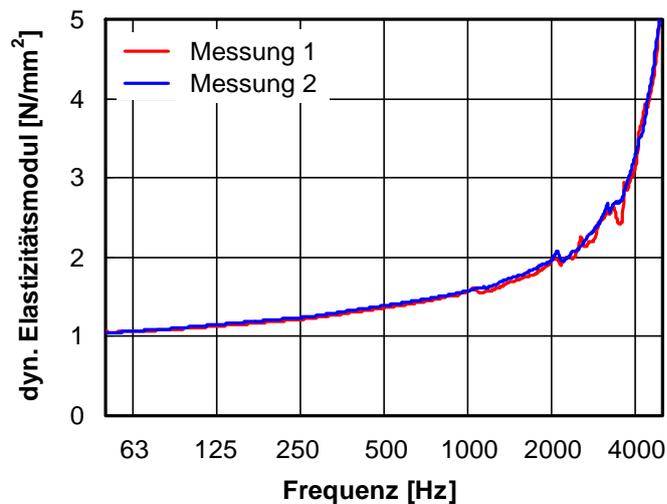
Zur Validierung des Messaufbaus wurden neben den Messungen an den untersuchten Dichtstoffen außerdem Vergleichsmessungen an einem Material mit bekannten akustischen Eigenschaften durchgeführt. Als Vergleichsmaterial wurde ein Werkstoff der Firma Getzner (gemischtzelliger Schaumstoff aus Polyetherurethan, Bezeichnung Sylomer L) ausgewählt, der für den Einsatz im Bereich elastischer Lagerungen bestimmt ist und für den von Seiten des Herstellers - im Gegensatz zu vielen anderen Produkten aus diesem Bereich - gut dokumentierte und zuverlässige technische Daten zur Verfügung stehen. Ein Vergleich des für dieses Material gemessenen Elastizitätsmoduls mit den entsprechenden Herstellerangaben ist in Abb. 35 dargestellt.



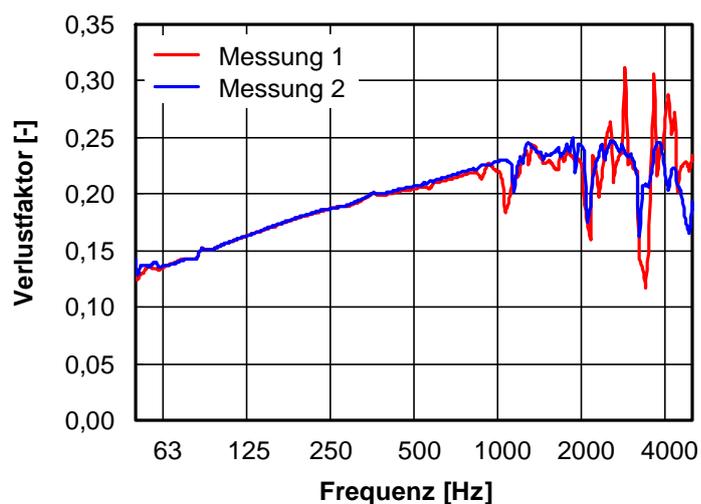
**Abb. 35:** Dynamischer Elastizitätsmodul des Elastomermaterials Sylomer L (Hersteller Getzner, kennzeichnende Farbe grün) in Abhängigkeit von der Frequenz. Die eingezeichneten Herstellerangaben (grüne Punkte) wurden den vorhan-

denen Produktunterlagen entnommen. Die Messungen erfolgten an einer Probe mit 4 mm Dicke und 30 mm Durchmesser.

Wie aus Abb. 35 zu ersehen ist, stimmen die für Sylomer L ermittelten Messergebnisse recht gut mit den Herstellerangaben überein, wobei die Messwerte allerdings systematisch ein wenig niedriger liegen. Über die Ursachen der systematischen Abweichung lassen sich nur Vermutungen anstellen. Möglicherweise entsprach das untersuchte Material nicht genau den Herstellerangaben (Abweichungen in den Materialeigenschaften wurden auch in der Vergangenheit schon festgestellt) oder - dies erscheint am wahrscheinlichsten - zur Berücksichtigung der Probengeometrie wurde vom Hersteller ein anderes (stärker vereinfachtes) Verfahren als in der vorliegenden Arbeit verwendet.



**Abb. 36:** Wiederholungsmessung an derselben Probe (nach Ausbau und erneutem Einbau in die Messvorrichtung). Dargestellt ist der dynamische Elastizitätsmodul von Sylomer L in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Messungen erfolgten an einer Probe mit 4 mm Dicke und 30 mm Durchmesser.



**Abb. 37:** Wiederholungsmessung an derselben Probe (nach Ausbau und erneutem Einbau in die Messvorrichtung). Dargestellt ist der Verlustfaktor von Sylomer

L in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Messungen erfolgten an einer Probe mit 4 mm Dicke und 30 mm Durchmesser.

Was die Reproduzierbarkeit der ermittelten Messergebnisse betrifft, so ergaben die hierzu durchgeführten Untersuchungen gute Werte. Dies gilt sowohl für den dynamischen Elastizitätsmodul als auch für den Verlustfaktor und ist in den Abbildungen 36 und 37 anhand von Messkurven, die gleichfalls für das Material Sylomer L ermittelt wurden, dokumentiert.

Alles in allem ist festzustellen, dass das entwickelte Messverfahren - abgesehen von kleineren Problemen in Bezug auf den akustischen Einfluss der Probengeometrie - zuverlässige und gut reproduzierbare Ergebnisse liefert. Für die hier durchgeführten Untersuchungen - die für alle betrachteten Proben unter gleichen oder zumindest sehr ähnlichen geometrischen Bedingungen erfolgten - sind die erwähnten Probleme ohne Belang.

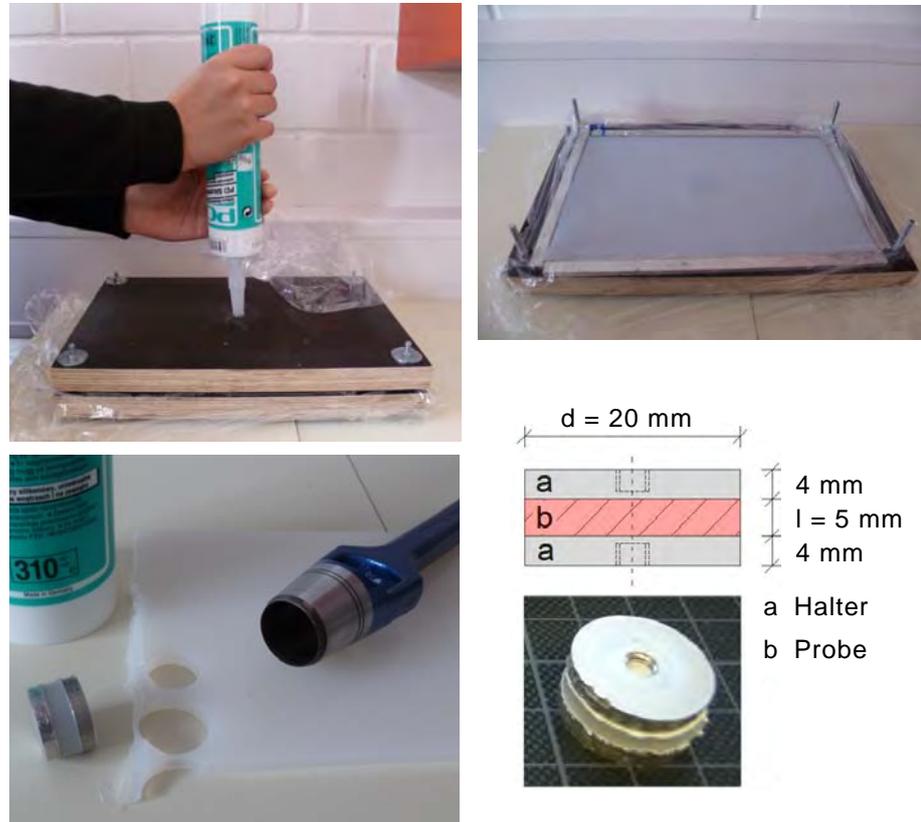
### 5.3 Probenherstellung

Wie bei allen derartigen Messungen hat die Qualität der verwendeten Proben auch bei den hier durchgeführten Untersuchungen großen Einfluss auf die Messgenauigkeit. Der Herstellung des Probenmaterials und dem Einbau der Proben in die Messvorrichtung kamen deshalb im Rahmen des Forschungsvorhabens große Bedeutung zur. Die Probenherstellung erfolgte in folgenden Arbeitsschritten:

- a) Um runde Scheiben aus dem untersuchten Dichtstoff zu erhalten, wurde das Material zunächst in viskosem Zustand in den Spalt zwischen zwei planparallelen Platten (Spaltbreite ca. 5 mm) eingespritzt. Die Platten verfügten über eine glatte ebene Oberfläche, die - um ein Anhaften des Dichtstoffs zu vermeiden - vor dem Einbringen des Probenmaterials mit einer dünnen Folie bekleidet wurde. Nachdem der Aushärtvorgang ein Stück weit fortgeschritten war, wurde die obere Abdeckplatte entfernt, so dass die restliche Härtung unter vollem Luftzutritt erfolgte. Die gesamte Aushärtedauer betrug ca. 3 Wochen. Bei den von der Henkel AG bereitgestellten Proben entfiel dieser Arbeitsschritt, da die gelieferten Proben aus fertig ausgehärteten Dichtstoffstreifen bestanden.
- b) Nach dem Aushärten wurden aus den vorhandenen Dichtstoffplatten oder -streifen mit einem Lochseisen runde Scheiben ausgestanzt. Der Durchmesser der Proben (Im Normalfall 20 mm) stimmte mit den Abmessungen der als Probenhalter verwendeten Aluminium-Scheiben überein. Die beiden Aluminium-Scheiben, die jeweils über ein zentrales Innengewinde zur Befestigung in der Messvorrichtung verfügten, wurden auf die Ober- und die Unterseite der Probe aufgeklebt, wobei als Klebstoff soweit möglich das gleiche Material, aus dem auch die Proben selbst bestanden, verwendet wurde. Wichtig hierbei war vor allem eine vollflächige feste Verbindung zwischen Probe und Halter sowie eine möglichst dünne und gleichmäßige Klebstoffschicht.
- c) Der letzte Arbeitsschritt bestand im Einbau der fertigen Probe in die Messvorrichtung. Der Einbau wurde so durchgeführt, dass einerseits eine feste Verbindung zu

dem Schwingerreger und dem Gegenlager bestand, die Probe aber andererseits keinen Spannungen und keiner Vorlast ausgesetzt war.

Der Herstellungsprozess und die Geometrie der untersuchten Proben sind in Abb. 38 veranschaulicht:



**Abb. 38:** Herstellung der für die Untersuchungen verwendeten Dichtstoffproben.  
 Links oben: Einspritzen des viskosem Probenmaterials in den Spalt zwischen zwei planparallelen Platten.  
 Rechts oben: Aushärtung des Dichtstoffs nach dem Entfernen der oberen Abdeckplatte.  
 Links unten: Ausstanzen von Probenscheiben aus der fertig ausgehärteten Dichtstoffplatte.  
 Rechts unten: Fertige Probe mit beidseitig aufgeklebten Probenhaltern.

## 5.4 Untersuchte Dichtstoffe

Entwicklung und Herstellung der untersuchten akustisch optimierten Dichtstoffe erfolgten durch die Henkel AG auf der Grundlage gemeinsam formulierter materialtechnischer Zielvorgaben. Nach der Herstellung wurden die Proben dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik zur Durchführung der erforderlichen akustischen Messungen (Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmodul und des Verlustfaktors) zur Verfügung gestellt. Die genaue chemische Zusammensetzung der Materialien ist nur Henkel bekannt und deshalb in der nachfolgenden Tabelle nicht angegeben. Aufgeführt sind lediglich

die jeweilige Stoffgruppe sowie eine Proben-Nummer zur Kennzeichnung des entsprechenden Materials. Da nicht alle vorgesehenen Materialien zur Verfügung standen, ist die ansonsten durchlaufende Nummerierung der Proben an zwei Stellen lückenhaft (die Nummern 6 und 8 fehlen). Einschließlich der in der untersten Tabellenzeile aufgeführten Referenzprobe, die zu Vergleichszwecken mit in das Untersuchungsprogramm aufgenommen wurde, umfasste das Programm insgesamt 18 verschiedene Materialien.

Proben-Nr.	Dichtstoff	Bemerkungen
1	Acetat-Silikon	optimiert
2	Acetat-Silikon	optimiert
3	Acetat-Silikon	optimiert
4	Acetat-Silikon	optimiert
5	Acetat-Silikon	optimiert
7	Acetat-Silikon	optimiert
9	Siliconemulsion	optimiert
10	Alkoxy-Silikon, hochmodulig	optimiert
11	Alkoxy-Silikon, niedermodulig	optimiert
12	Alkoxy-Silikon, gefüllt	optimiert
13	Silan modifiziertes Polymer, niedermodulig	optimiert
14	Silan modifiziertes Polymer, mittelmodulig	optimiert
15	Silan modifiziertes Polymer, hochmodulig	optimiert
16	Silan modifiziertes Polymer, ungefüllt	optimiert
17	Acrylat, weichelastisch	optimiert
18	Acrylat, mittelelastisch	optimiert
19	Acrylat, weichelastisch	optimiert
R.	Silikon, neutral vernetzend	Referenz

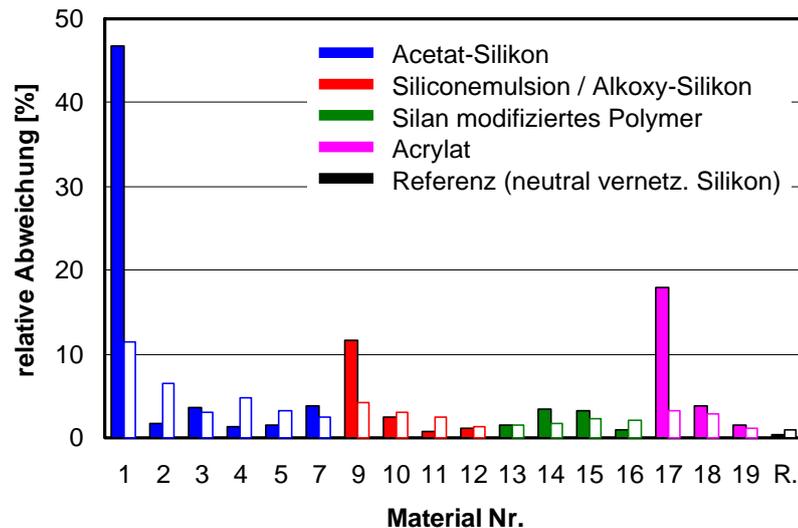
**Tab. 2:** Übersicht über die im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelten akustisch optimierten Dichtstoffe. Materialien aus verschiedenen Stoffgruppen sind in unterschiedlichen Farben dargestellt. Bei der Probe in der untersten Tabellenzeile (Probe R.) handelt es sich um eine Referenzprobe, die zum Vergleich mit in das Messprogramm aufgenommen wurde und zur Verbesserung der Übersicht in allen Diagrammen eingezeichnet ist. Die Referenzprobe besteht aus einem handelsüblichen neutral vernetzenden Silikon, das hinsichtlich seiner Materialeigenschaften ( $E_{\text{dyn}} = 1,13 \text{ N/mm}^2$ ,  $\eta = 0,12$ ) zwar nicht als Spitzenprodukt, aber doch als akustisch hochwertiger Dichtstoff einzustufen ist.

## 5.5 Messergebnisse

Für die im vorangehenden Abschnitt aufgeführten Proben wurden jeweils der dynamische Elastizitätsmodul und Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Frequenz gemessen. Der Frequenzbereich, für den das Messverfahren sinnvolle Ergebnisse liefert, ist je nach Probe etwas unterschiedlich. Im Bereich von 50 Hz - 1000 Hz sind für sämtliche Proben zuverlässige Ergebnisse vorhanden. Bei manchen Proben reicht der nutzbare Frequenz-

bereich jedoch bis 2000 Hz oder darüber hinaus. Dies wurde bei der Darstellung der Messwerte in den Diagrammen entsprechend berücksichtigt.

Von jedem untersuchten Dichtstoff wurden zwei separate Proben entnommen und jeweils individuell gemessen. Für die meisten Materialien stimmen die Messwerte für die beiden Proben bis auf eine Abweichung von wenigen Prozent (also im Rahmen der Messgenauigkeit) überein. Bei den Materialien Nr. 1, 9 und 17 waren hingegen größere Unterschiede vorhanden, was möglicherweise - vor allem bei Material 1 - auf eine Streuung der Produkteigenschaften innerhalb der hergestellten Materialcharge hinweist. Auf jeden Fall sind die Ergebnisse für diese Proben mit einer gewissen Vorsicht zu bewerten. Die prozentualen Abweichungen zwischen den beiden untersuchten Proben sind in Abb. 39 für alle untersuchten Materialien dargestellt.



**Abb. 39:** Relative prozentuale Abweichung zwischen den für jedes untersuchte Material entnommenen beiden Proben. Die ausgefüllten Balken beziehen sich auf den dynamischen Elastizitätsmodul, die weißen Balken auf den Verlustfaktor. Die Werte gelten jeweils für den Mittelwert der Ergebnisse im Frequenzbereich von 50 - 1000 Hz.

Die gemessenen Frequenzspektren sind in den nachfolgenden Abschnitten 5.5.1 (für den Elastizitätsmodul) und 5.5.2 (für den Verlustfaktor) zusammengestellt. Wegen der Vielzahl der untersuchten Materialien mussten die Messergebnisse auf mehrere Diagramme aufgeteilt werden. Dabei wurden jeweils Materialien der gleichen Stoffklasse (also z. B. alle Elastomere auf Basis von Acetat-Silikon) in einer einzigen Abbildung zusammengefasst. Die Skalierung der Abszissen-Achse (Frequenz) ist dabei immer gleich. Für die Ordinaten-Achse wurden je nach Bedarf unterschiedliche Maßstäbe verwendet.

Für die akustische Bewertung der untersuchten Dichtstoffe sind vor allem die beiden Diagramme in Abschnitt 5.5.3 maßgebend. Dort sind die frequenzgemittelten Werte des Elastizitätsmoduls und des Verlustfaktors für alle Materialien zusammengestellt. Die Mittelung erfolgte jeweils über den für Installationsgeräusche maßgebenden Frequenzbereich von 50 - 1000 Hz. Für die Schallschutzwirkung (Körperschallisolierung) bei haus-

technischen Anlagen ist wie bereits erwähnt vor allem der Elastizitätsmodul entscheidend. Je niedriger der dynamische Elastizitätsmodul, d. h. je weicher das Material, desto besser die akustische Wirkung.

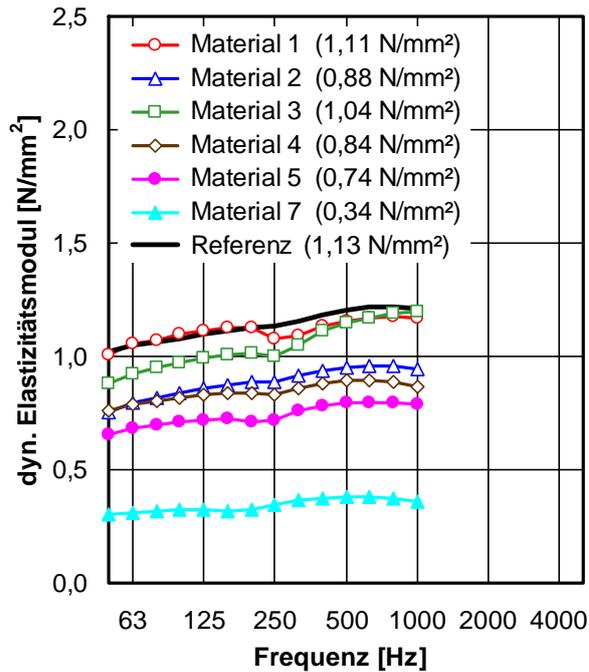
Zur Beurteilung der akustischen Wirkung in der baulichen Praxis wird wie schon zuvor in Abschnitt 4 die bewertete Einfügungsdämmung  $D_{e,w}$  der untersuchten Dichtstoffe herangezogen. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abschnitt 5.5.4 zusammengestellt.

### 5.5.1 Elastizitätsmodul

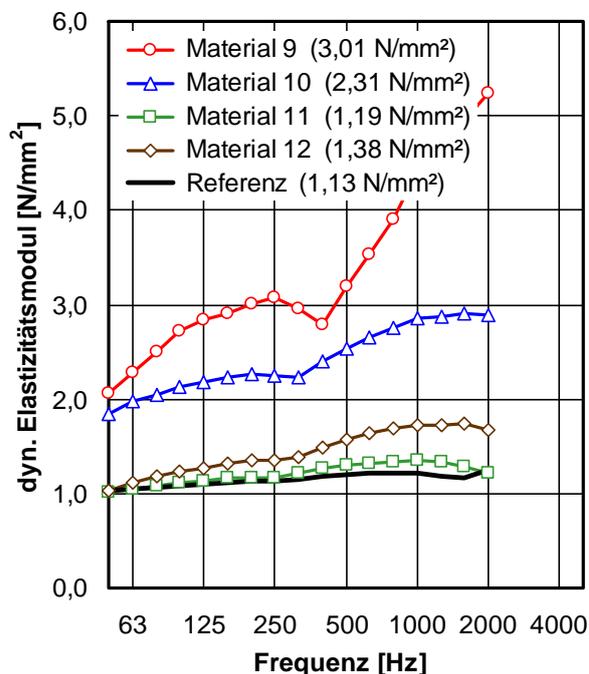
Der dynamische Elastizitätsmodul der untersuchten Dichtstoffe wurde im Frequenzbereich von 50 - 1000 Hz oder - sofern die Dickenschwingungen der Proben dies zuließen - im erweiterten Bereich bis 2000 Hz gemessen. Die ermittelten Messergebnisse sind in den Abbildungen 40 bis 43 aufgetragen. Materialien, die der gleichen Stoffgruppe angehören, sind jeweils im gleichen Diagramm dargestellt. Zur besseren Orientierung sind in allen Diagrammen zusätzlich die Messwerte für eine Referenzprobe aus handelsüblichem Silikon (durchgezogene schwarze Linie) eingezeichnet.

Die in Abb. 40 gezeigten Dichtstoffe aus der Gruppe Acetat-Silikon weisen von allen untersuchten Materialien den niedrigsten Elastizitätsmodul auf. Besonders das Material Nr. 7 ist außergewöhnlich weich. Der Kurvenverlauf ist bei allen Proben ähnlich und steigt mit zunehmender Frequenz leicht an. Wegen der geringen Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Frequenz (die Änderung im untersuchten Frequenzbereich beträgt weniger als 40 %) kann die Frequenzabhängigkeit bei den durchgeführten akustischen Berechnungen, wie z. B. der Ermittlung der bewerteten Einfügungsdämmung, näherungsweise vernachlässigt werden. Die Berechnungen erfolgen statt dessen mit einem frequenzgemittelten Wert, wobei die Mittelung in Übereinstimmung mit dem für haustechnische Anlagen maßgebenden Frequenzbereich im Intervall von 50 - 1000 Hz erfolgt. Die Mittelwerte für die einzelnen Materialien sind in der Legende der Diagramme in Klammern angegeben.

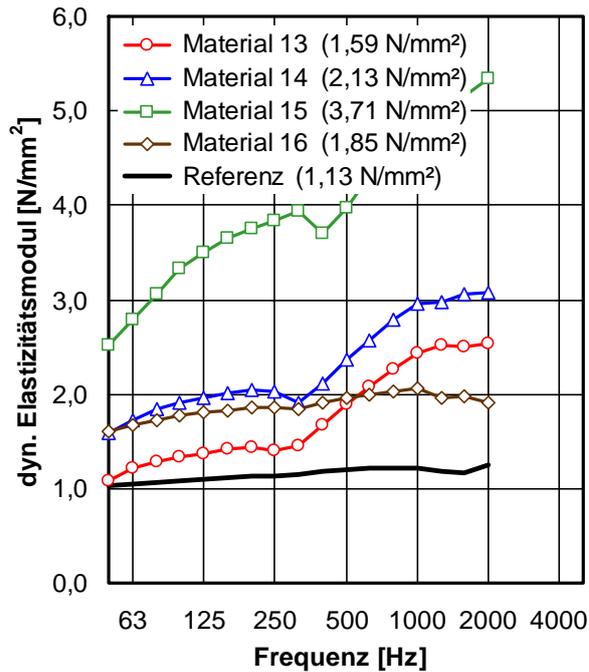
Der Anstieg des dynamischen Elastizitätsmoduls mit zunehmender Frequenz ist ein universeller Effekt, der mehr oder weniger deutlich bei allen untersuchten Dichtstoffen vorhanden ist. Der Anstieg verläuft zwar nicht immer stetig, d. h. es gibt auch Bereiche in denen er sich abflacht oder sogar umkehrt, aber in der Tendenz steigt der Elastizitätsmodul zu hohen Frequenzen hin grundsätzlich an. Ein besonders starker Anstieg ist bei den Acrylaten in Abb. 43 zu verzeichnen. Hier nimmt der Elastizitätsmodul im Frequenzbereich von 50 - 1000 Hz teilweise um den Faktor 5 zu (bei Material Nr. 18). Bei einer derart starken Frequenzabhängigkeit ist die Verwendung frequenzgemittelter Werte natürlich nicht mehr ohne weiteres möglich. Andererseits kommen die betreffenden Materialien wegen ihrer hohen Steifigkeit ohnehin nicht für den Einsatz im Bereich der Körperschallisolation infrage, so dass der durch Verwendung des Mittelwertes bei der Berechnung der Einfügungsdämmung entstehende Fehler hier keine Rolle spielt. In solchen Fällen ist der hier verwendete frequenzgemittelte Elastizitätsmodul nicht als präzise akustische Größe, sondern lediglich als Maß für die Steifigkeit des untersuchten Dichtstoffs anzusehen.



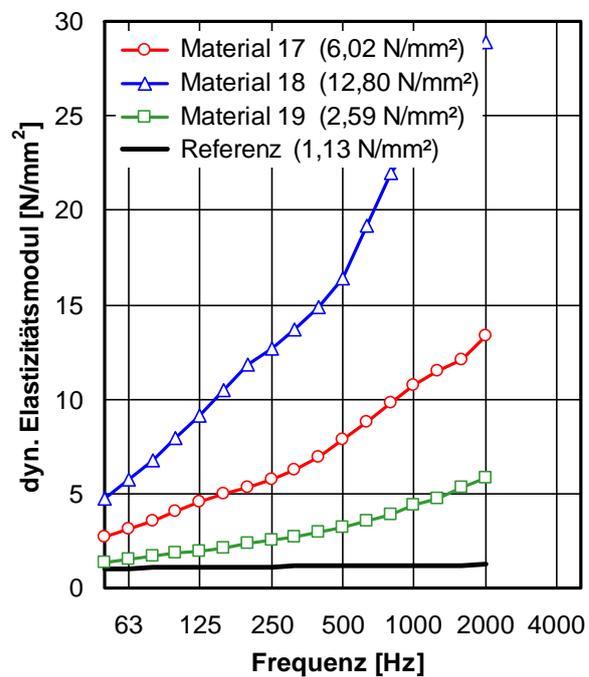
**Abb. 40:** Dynamischer Elastizitätsmodul der Materialien Nr. 1 - 7 (Acetat-Silikon) in Abhängigkeit von der Frequenz. Bei den in der Legende in Klammern angegebenen Werten handelt es sich jeweils um den Mittelwert des Elastizitätsmoduls im Frequenzbereich von 50 - 1000 Hz.



**Abb. 41:** Dynamischer Elastizitätsmodul der Materialien Nr. 9 (Siliconemulsion) und Nr. 10 - 12 (Alkoxy-Silikon) in Abhängigkeit von der Frequenz. Bei den in der Legende in Klammern angegebenen Werten handelt es sich jeweils um den Mittelwert des Elastizitätsmoduls im Frequenzbereich von 50 - 1000 Hz.



**Abb. 42:** Dynamischer Elastizitätsmodul der Materialien Nr. 13 - 16 (Silan modifiziertes Polymer) in Abhängigkeit von der Frequenz. Bei den in der Legende in Klammern angegebenen Werten handelt es sich jeweils um den Mittelwert des Elastizitätsmoduls im Frequenzbereich von 50 - 1000 Hz.



**Abb. 43:** Dynamischer Elastizitätsmodul der Materialien Nr. 17 - 19 (Acrylat) in Abhängigkeit von der Frequenz. Bei den in der Legende in Klammern angegebenen Werten handelt es sich jeweils um den Mittelwert des Elastizitätsmoduls im Frequenzbereich von 50 - 1000 Hz.

Ein weiterer universeller Effekt, der aus den in Abb. 43 dargestellten Messkurven hervorgeht, ist, dass zwischen dem Betrag des Elastizitätsmoduls und seiner Frequenzabhängigkeit ein deutlicher Zusammenhang besteht. Je steifer sich das untersuchte Material verhält, desto stärker steigt der Elastizitätsmodul mit zunehmender Frequenz an. Dies gilt nicht nur für die in Abb. 43 aufgeführten Acrylate, sondern auch für alle anderen Dichtstoffe, wie z. B. die Siliconemulsion und die Alkoxy-Silikone in Abb. 41 sowie die Silan modifizierten Polymere in Abb. 42. Bei den letztgenannten Materialien weist der gemessene Elastizitätsmodul recht uneinheitliche Werte auf, die sich aber zumeist zwischen den für die Acrylate und die Acetat-Silikone ermittelten Ergebnissen bewegen.

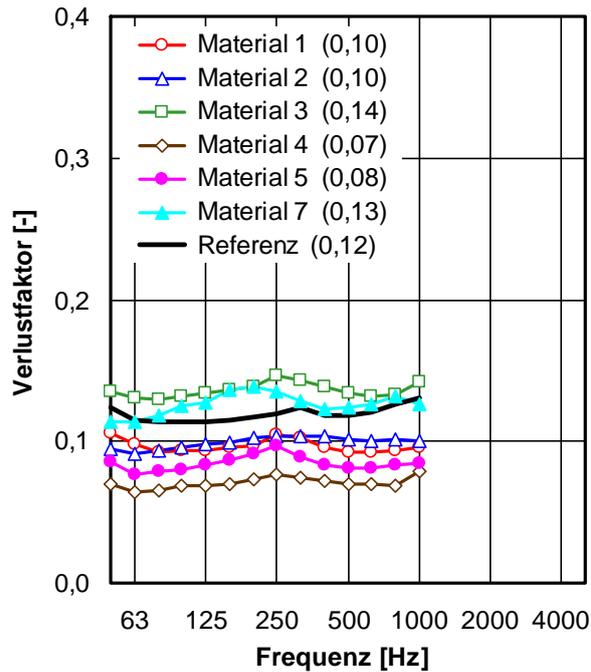
Alles in allem ist festzustellen, dass sich die auf der Basis von Acetat-Silikon hergestellten Probenmaterialien hinsichtlich ihres dynamischen Elastizitätsmoduls am besten zur Herstellung körperschallisierender Fugendichtungen eignen. Dies gilt insbesondere für das Material Nr. 7, das den weitaus niedrigsten Elastizitätsmodul aller untersuchten Proben aufweist. Wegen der schwachen Frequenzabhängigkeit des Elastizitätsmoduls können akustische Berechnungen für derartige Materialien in guter Näherung unter Verwendung eines frequenzgemittelten Wertes (Mittelungsbereich 50 - 1000 Hz) durchgeführt werden.

### 5.5.2 Verlustfaktor

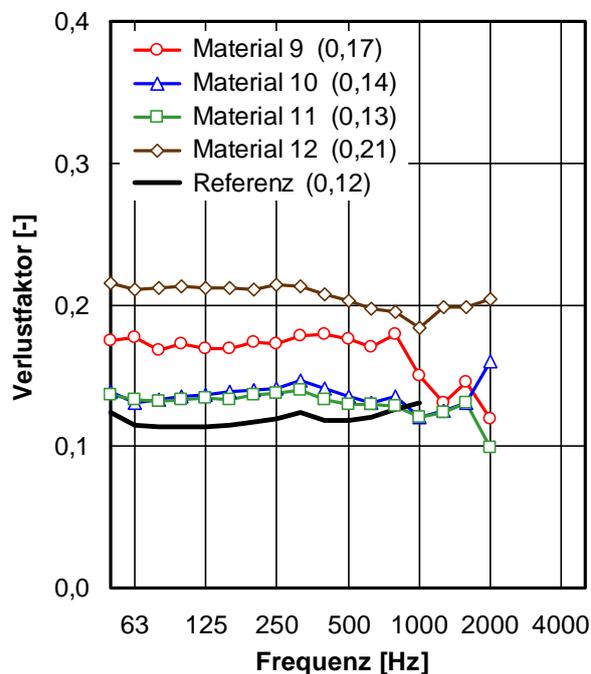
Der für die untersuchten Proben ermittelte Verlustfaktor ist in den Abbildungen 44 bis 47 in Abhängigkeit von der Frequenz aufgetragen. Darstellung und Zuordnung der Messwerte erfolgen analog zu dem im vorangehenden Abschnitt untersuchten Elastizitätsmodul. Die in allen Diagrammen vorhandene durchgezogene schwarze Linie repräsentiert auch hier die Referenzprobe.

Im Vergleich zum Elastizitätsmodul weist der gemessene Verlustfaktor eine deutlich schwächere Frequenzabhängigkeit auf, so dass die akustischen Berechnungen hier problemlos mit frequenzgemittelten Werten durchgeführt werden können. Die niedrigsten Werte des Verlustfaktors findet man bei den Acetat-Silikonen (Abb. 44), die höchsten erwartungsgemäß bei den Acrylaten (Abb. 47). Eine Ausnahme bildet das Material Nr. 16 (Silan modifiziertes Polymer, Abb. 46), dessen Verlustfaktor mit einem mittleren Wert von 0,08 gleichfalls sehr gering ist.

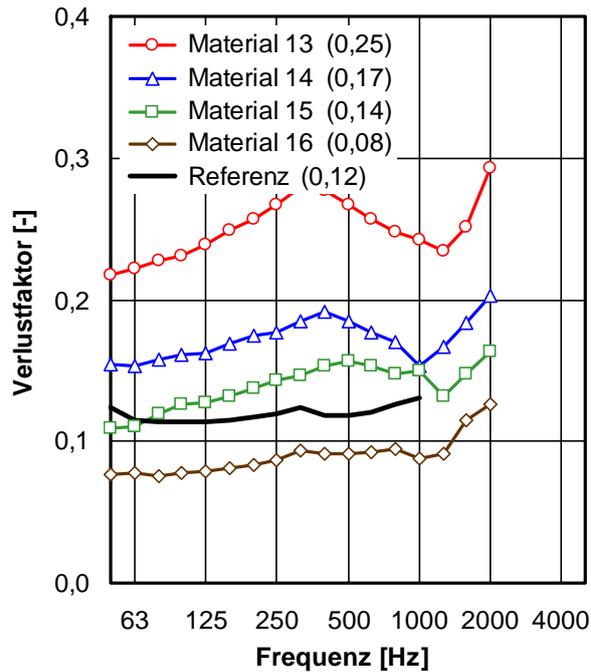
Ebenso wie beim dynamischen Elastizitätsmodul ist auch beim Verlustfaktor die Abhängigkeit der Messwerte von der Frequenz am geringsten, wenn das untersuchte Material eine hohe innere Dämpfung und somit einen niedrigen Verlustfaktor aufweist. Vergleich man die Messwerte für den Elastizitätsmodul und den Verlustfaktor miteinander, so lässt sich die Tendenz erkennen, dass bei weichen Dichtstoffen in der Regel ein niedriger Verlustfaktor zu verzeichnen ist, während sich für steife Materialien vielfach ein vergleichsweise hoher Wert ergibt. Allerdings ist dies keine Regel ohne Ausnahme und es gibt durchaus auch weiche Dichtstoffe mit hoher innerer Dämpfung. Ein Beispiel hierfür ist das Material Nr. 19 (es handelt sich um ein Acrylat), das trotz seines vergleichsweise niedrigen Elastizitätsmoduls von  $E_{\text{dyn}} = 2,6 \text{ N/mm}^2$  einen sehr hohen Verlustfaktor von  $\eta = 0,55$  aufweist.



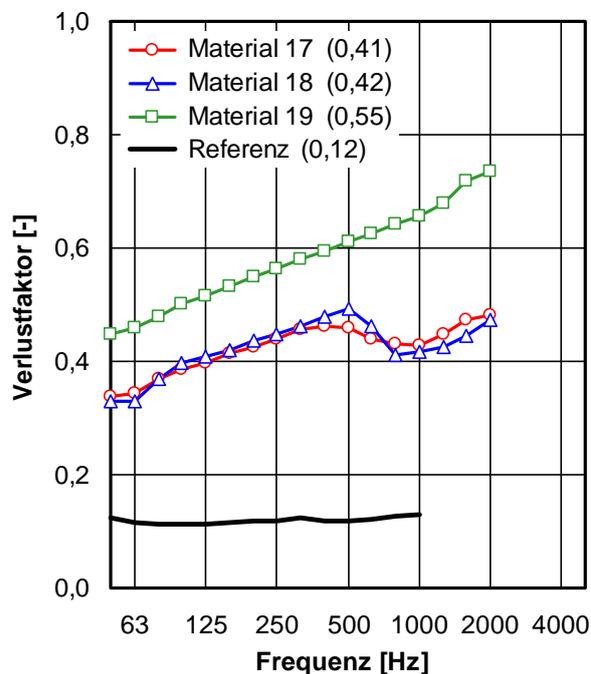
**Abb. 44:** Verlustfaktor der Materialien Nr. 1 - 7 (Acetat-Silikon) in Abhängigkeit von der Frequenz. Bei den in der Legende in Klammern angegebenen Werten handelt es sich jeweils um den Mittelwert des Verlustfaktors im Frequenzbereich von 50 - 1000 Hz.



**Abb. 45:** Verlustfaktor der Materialien Nr. 9 (Siliconemulsion) und Nr. 10 - 12 (Alkoxy-Silikon) in Abhängigkeit von der Frequenz. Bei den in der Legende in Klammern angegebenen Werten handelt es sich jeweils um den Mittelwert des Verlustfaktors im Frequenzbereich von 50 - 1000 Hz.



**Abb. 46:** Verlustfaktor der Materialien Nr. 13 - 16 (Silan modifiziertes Polymer) in Abhängigkeit von der Frequenz. Bei den in der Legende in Klammern angegebenen Werten handelt es sich jeweils um den Mittelwert des Verlustfaktors im Frequenzbereich von 50 - 1000 Hz.

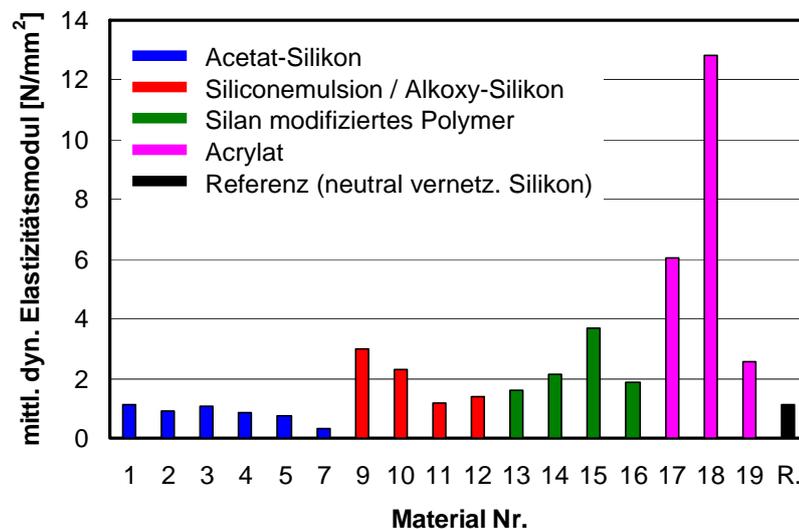


**Abb. 47:** Verlustfaktor der Materialien Nr. 17 - 19 (Acrylat) in Abhängigkeit von der Frequenz. Bei den in der Legende in Klammern angegebenen Werten handelt es sich jeweils um den Mittelwert des Verlustfaktors im Frequenzbereich von 50 - 1000 Hz.

### 5.5.3 Frequenzgemittelte akustische Materialeigenschaften

Die in den beiden vorangehenden Abschnitten dargestellten Frequenzspektren enthalten umfangreiche Detailinformation über die Materialeigenschaften der untersuchten Dichtstoffe. Für den direkten Vergleich und zur Bewertung der akustischen Qualität der Proben sind sie aber nur bedingt geeignet. Aus diesem Grund sind in den beiden nachfolgenden Diagrammen die frequenzgemittelten Werte des Elastizitätsmoduls und des Verlustfaktors für alle untersuchten Proben zusammengestellt. Es handelt sich um die gleichen Werte, die auch schon in den vorangehenden Diagrammen (in der Legende zu den Messkurven) mit angegeben sind.

Wegen der großen Vielfalt der untersuchten Probenmaterialien umfassen die Mittelwerte sowohl beim Elastizitätsmodul als auch beim Verlustfaktor einen breiten Bereich. Die Werte für den dynamischen Elastizitätsmodul liegen zwischen  $0,34 \text{ N/mm}^2 \leq E_{\text{dyn}} \leq 12,8 \text{ N/mm}^2$ ; der Wertebereich für den Verlustfaktor beträgt  $0,07 \leq \eta \leq 0,55$ . Die große Spannbreite der Werte hängt auch damit zusammen, dass einige der Materialien (insbesondere die Acrylate) weniger zur Verwendung als elastischer Fugendichtstoff, als vielmehr hauptsächlich für den Einsatz im Bereich der Körperschalldämpfung konzipiert wurden. Die schon im vorangehenden Abschnitt erwähnte Tendenz, dass weiche Dichtstoffe zumeist einen niedrigen Verlustfaktor, steife Materialien hingegen hohe innere Verluste aufweisen, ist auch beim Vergleich der frequenzgemittelten Werte gut erkennbar.



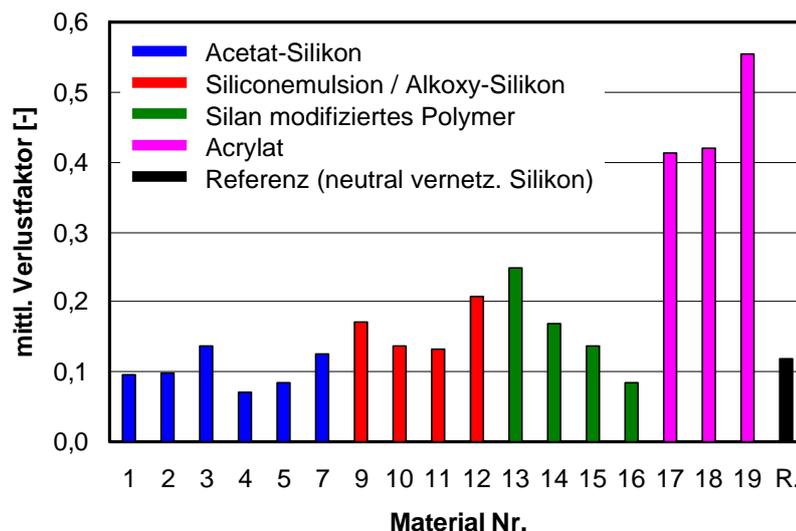
**Abb. 48:** Gemittelter dynamischer Elastizitätsmodul (Mittelwert im Frequenzbereich von 50 - 1000 Hz) für alle untersuchten Materialien.

Da die Körperschallisolation von Fugendichtungen in erster Linie vom dynamischen Elastizitätsmodul des Dichtstoffs abhängt und eine wirksame Isolation nur für einen Elastizitätsmodul von weniger als 1 - 2 N/mm<sup>2</sup> gewährleistet ist, erfüllen nur wenige der untersuchten Materialien die Anforderungen an ein akustisch optimiertes Produkt. Um eine möglichst hohe Körperschallisolation zu erreichen, sollte der Dichtstoff so weich wie möglich sein. Wie sich aus Abb. 48 zu entnehmen lässt, weisen im Wesentlichen nur

die Materialien aus Acetat-Silikon (blaue Balken) eine ausreichend niedrige dynamische Steifigkeit auf. Besonders hervorzuheben ist hierbei das Material Nr. 7, dessen Elastizitätsmodul mit  $E_{\text{dyn}} = 0,34 \text{ N/mm}^2$  deutlich unter den Werten für handelsübliche Silikon-Dichtstoffe (ca. 1 - 2  $\text{N/mm}^2$ ) liegt.

Der Verlustfaktor der untersuchten Materialien (s. Abb. 49) liegt bei den Proben aus Acetat-Silikon im Bereich von 0,07 bis 0,13 und ist damit ausreichend niedrig, um eine Beeinträchtigung der Isolationswirkung auszuschließen. Dies gilt selbstverständlich auch für das oben erwähnte akustisch vorteilhafte Material Nr. 7.

Im Gegensatz zu körperschallisolierenden Dichtstoffen, bei denen der Elastizitätsmodul und der Verlustfaktor möglichst niedrige Werte aufweisen sollten, sind für körperschalldämpfende Materialien, wie sie z. B. bei der Entdröhnung von Blechen zum Einsatz kommen, hohe innere Verlust erforderlich. Den höchsten Verlustfaktor der untersuchten Materialien erreicht mit  $\eta = 0,55$  das Acrylat mit der Proben-Nummer 19. Mit dem genannten Wert übertrifft das Material andere derzeit verfügbare Produkte (der höchste Verlustfaktor der in Abschnitt 4 untersuchten handelsüblichen Acryl-Dichtstoffe liegt bei 0,48) und stößt bereits in den Bereich spezieller Dämpfungsmaterialien (z. B. auf Bitumenbasis) vor [40].



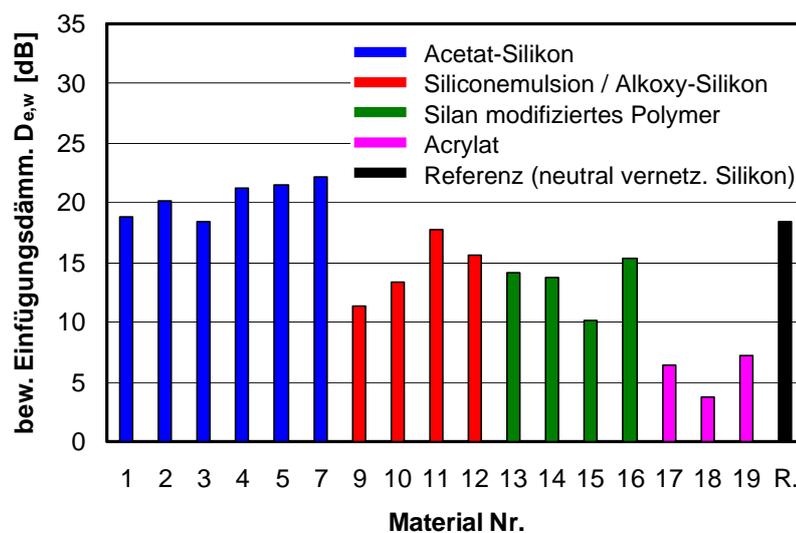
**Abb. 49:** Gemittelter Verlustfaktor (Mittelwert im Frequenzbereich von 50 - 1000 Hz) für alle untersuchten Materialien.

#### 5.5.4 Bewertete Einfügungsdämmung

Die bewertete Einfügungsdämmung bildet den wichtigsten Maßstab, um die untersuchten Materialien hinsichtlich ihrer Eignung als körperschallisolierender Fugendichtstoff zu bewerten. Sie gibt an, welche Verminderung ein typisches Sanitärgeräusch erfährt, wenn die Körperschallübertragung zwischen Quelle und Bauwerk anstatt über eine starre Verbindung über eine elastische Fugendichtung erfolgt und stellt damit ein geeignetes Maß für die Schallschutzwirkung von Fugendichtungen unter praxisüblichen baulichen Bedingungen dar.

Die bewertete Einfügungsdämmung der untersuchten Proben wurde mit den Gleichungen 21 und 23 aus den frequenzgemittelten Werten des dynamischen Elastizitätsmoduls und des Verlustfaktors berechnet und ist in Abb. 50 aufgetragen. Die ermittelten Ergebnisse bewegen sich im Bereich von  $3,8 \text{ dB} \leq D_{e,w} \leq 22,2 \text{ dB}$ . Das Material Nr. 7, das über den niedrigsten Elastizitätsmodul aller untersuchten Dichtstoffe verfügt, weist hierbei mit  $D_{e,w} = 22,2 \text{ dB}$  erwartungsgemäß die höchste Einfügungsdämmung auf. Die bewertete Einfügungsdämmung handelsüblicher Dichtstoffe ist im Vergleich dazu deutlich geringer. Das beste Material aus dem Sortiment der in Abschnitt 4 untersuchten marktüblichen Dichtstoffe erreicht  $D_{e,w} = 20,2 \text{ dB}$ ; im Mittel beträgt die bewertete Einfügungsdämmung der verschiedenen Produkte sogar nur  $16,8 \text{ dB}$  (ohne Berücksichtigung der Dichtstoffe aus Acryl und Polyurethan).

Wie aus dem Vergleich dieser Werte hervorgeht, weist der neu entwickelte Dichtstoff Nr. 7 gegenüber den bisher eingesetzten Produkten deutlich verbesserte akustische Eigenschaften auf. Dies macht sich unter entsprechenden Bedingungen auch in der baulichen Praxis bemerkbar und wird als merkliche Verminderung der von haustechnischen Anlagen übertragenen Geräusche wahrgenommen. Der vorhandene Optimierungsspielraum mit einer Obergrenze von schätzungsweise etwa  $D_{e,w} = 25 \text{ dB}$  ist zwar noch nicht völlig ausgeschöpft, das neue Material stellt aber dennoch einen erfolgreichen Beitrag zur Verbesserung des baulichen Schallschutzes dar.

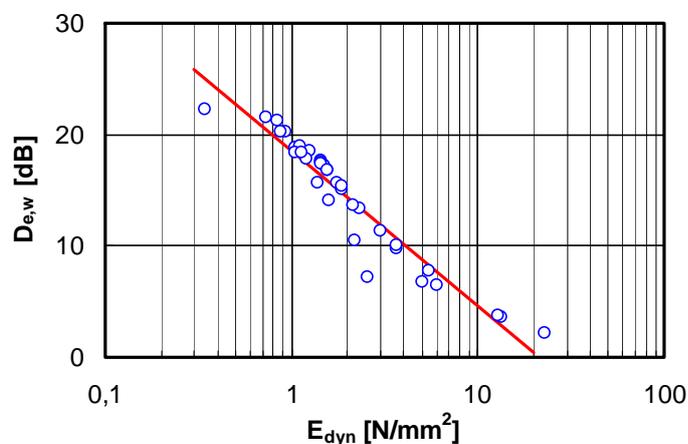


**Abb. 50:** Bewertete Einfügungsdämmung  $D_{e,w}$  für alle untersuchten Materialien. Die bewertete Einfügungsdämmung stellt ein Maß für die Körperschallisolation von Fugendichtungen unter praxisüblichen baulichen Verhältnissen (Körperschallübertragung von Bade- und Duschwannen ins Bauwerk) dar. Je höher der Wert von  $D_{e,w}$ , desto besser die akustische Wirkung.

## 5.6 Vorhersage der bewerteten Einfügungsdämmung

Trägt man die bewertete Einfügungsdämmung aller untersuchten Dichtstoffe (d. h. sowohl der marktüblichen Produkte aus Abschnitt 4 als auch der optimierten Materialien aus Abschnitt 5) als Funktion des dynamischen Elastizitätsmoduls auf und wählt eine

logarithmische Skalierung der Abszissen-Achse, so ergibt sich gemäß Abb. 51 ein einfacher linearer Zusammenhang. Dies erscheint zunächst überraschend, da die bewertete Einfügungsdämmung sowohl vom Elastizitätsmodul als auch vom Verlustfaktor abhängt und der Verlustfaktor in der Abbildung gar nicht berücksichtigt ist. Andererseits stellt bei Fugendichtungen der Elastizitätsmodul die maßgebende akustische Einflussgröße dar und der Verlustfaktor wirkt sich gemäß der in Abb. 11 dargestellten Zusammenhänge nur bei weichen Dichtstoffen mit  $E_{\text{dyn}} \leq 1 - 2 \text{ N/mm}^2$  in deutlich sichtbarer Weise auf das Ergebnis aus. Da fast alle weichen Dichtstoffe einen niedrigen Verlustfaktor in etwa gleicher Höhe aufweisen, kommt der Einfluss der inneren Dämpfung auch hier nicht zur Geltung. Eine Ausnahme bilden weiche Acrylate, die im Vergleich zu den anderen Materialien über einen ausgesprochen hohen Verlustfaktor verfügen und deshalb ein unterschiedliches akustisches Verhalten zeigen. Die beiden "Ausreißer" in Abb. 51 (bei  $E_{\text{dyn}} = 2,2 \text{ N/mm}^2$  und  $E_{\text{dyn}} = 2,6 \text{ N/mm}^2$ ) sind auf Proben aus weichem Acryl zurückzuführen.



**Abb. 51:** Bewertete Einfügungsdämmung aller untersuchten Dichtstoffe (18 marktübliche Produkte, 17 optimierte Materialien und eine Referenzprobe) in Abhängigkeit vom dynamischen Elastizitätsmodul. Die Gleichung für die eingezeichnete Regressionsgerade lautet  $D_{e,w} = [-14,0 \times \lg(E_{\text{dyn}}) + 18,6] \text{ dB}$ , wobei  $E_{\text{dyn}}$  in der Einheit  $\text{N/mm}^2$  in die Gleichung einzusetzen ist.

Die in Abb. 51 angegebene Berechnungsformel ermöglicht eine Abschätzung der bewerteten Einfügungsdämmung auch dann, wenn nur der Elastizitätsmodul des verwendeten Dichtstoffs bekannt ist (ist auch der Verlustfaktor bekannt, so ist kann unter Verwendung der Gleichungen 21 und 23 eine genaue Berechnung der bewerteten Einfügungsdämmung erfolgen). Wegen der geringen Frequenzabhängigkeit der elastischen Eigenschaften kann bei weichen Dichtstoffen anstatt des dynamischen Elastizitätsmoduls - für den nur ausnahmsweise Herstellerangaben vorliegen - zur Abschätzung der Einfügungsdämmung ersatzweise auch der statische Elastizitätsmodul verwendet werden.

## 5.7 Resümee

Der Schwerpunkt der in Abschnitt 5 durchgeführten Untersuchungen bestand in der Entwicklung akustisch optimierter Dichtstoffe. Neben der Formulierung geeigneter aku-

stischer Beurteilungskriterien wurde hierzu eine neue Messvorrichtung zur Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls und des Verlustfaktors der untersuchten Materialien aufgebaut. Entwicklung und Herstellung der Materialien erfolgten durch die Henkel AG. Die wichtigsten Untersuchungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die entwickelte Messvorrichtung ermöglicht eine genaue und gut reproduzierbare Bestimmung der akustisch maßgebenden Materialeigenschaften von elastischen Dichtstoffen.
- Je niedriger der dynamische Elastizitätsmodul und je geringer der Verlustfaktor des verwendeten Dichtstoffs, desto besser die Körperschallisolation der Fugendichtung. Maßgebend ist hierbei vor allem der Elastizitätsmodul. Bei der akustischen Optimierung von Dichtstoffen kommt es daher vor allem auf die Entwicklung möglichst weicher Materialien an.
- Bei der durchgeführten Materialentwicklung standen zwei unterschiedliche Ziele im Vordergrund: die Herstellung eines Dichtstoffs mit niedrigem Elastizitätsmodul und die Entwicklung eines Materials mit hoher innerer Dämpfung (letzteres ist zur Dämpfung von Körperschall bestimmt). Beide Ziele wurden erreicht.
- Das für die Körperschallisolation entwickelte Material (Probe Nr. 7 aus Acetat-Silikon) weist einen Elastizitätsmodul von  $E_{\text{dyn}} = 0,34 \text{ N/mm}^2$  auf. Dieser Wert ist deutlich niedriger als bei herkömmlichen Dichtstoffen ( $E_{\text{dyn}} = \text{ca. } 1 - 2 \text{ N/mm}^2$ ). Der resultierende Wert für die bewertete Einfügungsdämmung beträgt  $D_{\text{e,w}} = 22,2 \text{ dB}$ , was gegenüber marktüblichen Produkten mit  $D_{\text{e,w}} = 20,2 \text{ dB}$  bzw.  $16,8 \text{ dB}$  eine deutliche akustische Verbesserung darstellt (die beiden letztgenannten Angaben beziehen sich auf das Maximum und den Mittelwert der bislang untersuchten Produkte).
- Bei der Entwicklung eines körperschalldämpfenden Materials wurde ein Verlustfaktor von  $\eta = 0,55$  erreicht (Probe Nr. 19, Acrylat). Dies liegt über den Ergebnissen für handelsübliche Produkte (der höchste bislang gemessene Wert beträgt  $\eta = 0,48$ ) und reicht bereits an körperschalldämpfende Werkstoffe auf Bitumenbasis heran.
- Die zur Entwicklung optimierter Dichtstoffe durchgeführten Untersuchungen erbrachten beträchtliche akustische Verbesserungen. Im Bereich körperschallisolierende Dichtstoffe ist jedoch noch weiterer Optimierungsspielraum vorhanden, indem der Elastizitätsmodul und der Verlustfaktor der Materialien noch weiter herabgesetzt werden.

## 6 Akustischer Einfluss der Fugengeometrie

Die Körperschallübertragung von Fugendichtungen hängt neben den elastischen Eigenschaften des Dichtstoffs in starkem Maße von der Geometrie der Fuge ab (insbesondere von Fugenhöhe und -breite). Bei ungünstiger geometrischer Form der Fuge ist selbst bei Einsatz akustisch hochwertiger Dichtstoffe keine wirksame Körperschallisolation erreichbar. Da zu diesem Thema bislang keine gesicherten Forschungsergebnisse vorliegen, wurde es im Rahmen des durchgeführten Forschungsvorhabens näher untersucht.

Die Ausführung und die akustischen Eigenschaften von Fugendichtungen sind vom jeweiligen Anwendungsbereich, wie etwa Art und Form der Bauteile, zwischen denen sich die Fuge befindet, abhängig. Um den akustischen Einfluss der Fugegeometrie zu untersuchen, wurde deshalb ein möglichst praxisnaher Versuchsaufbau gewählt. Als Vorbild für den Aufbau diente eine zwischen dem Rand einer Bade- oder Duschwanne und der angrenzenden Wand angeordnete Fugendichtung. Diese Dichtung stellt einen wichtigen Schallübertragungswege im Bereich von Sanitärinstallationen dar und ist deshalb gut geeignet, um die akustischen Eigenschaften von Fugendichtungen unter repräsentativen und praxisnahen Bedingungen zu untersuchen.

Die verwendete Messanordnung entsprach in ihren Grundzügen dem in Abschnitt 4 beschriebenen Aufbau, bei dem sich die untersuchte Fuge zwischen zwei elastisch gelagerten schwingenden Strukturen befand und der durch die Körperschallübertragung der Fuge in der Empfangsstruktur erzeugte Schallpegel gemessen wurde. Im Gegensatz zu Abschnitt 4, wo die Schalleinleitung in die Fuge über eine starre Masse erfolgte, wurde als Sendestruktur im vorliegenden Fall jedoch ein U-Profil aus Stahlblech verwendet, das dem Randbereich einer Wanne nachempfunden war.

Im Sinne eines möglichst praxisnahen Aufbaus wurde zunächst versucht, die Messungen in einem Empfangsplattenprüfstand nach DIN EN 15657-1 [45] durchzuführen, wobei eine der elastisch gelagerten Wandplatten des Prüfstands die Empfangsstruktur bildete. Hierbei zeigte sich jedoch, dass der von der Sendestruktur in den Prüfstand abgestrahlte Luftschall zu einer so starken Anregung der Empfangsplatte führte, dass der über die Fugendichtung in die Platte eingeleitete Körperschall nicht mehr mit ausreichender Genauigkeit gemessen werden konnte. Um den Einfluss des Luftschalls zu vermindern, war daher eine Modifikation der Messvorrichtung erforderlich. So wurde statt der Empfangsplatte ein elastisch gelagerter Stein verwendet, der aufgrund seiner kompakten Abmessungen weniger empfindlich gegenüber Luftanschallanregung war. Des Weiteren wurde die Sendestruktur, die wie schon erwähnt aus einem Blechprofil bestand, teilflächig mit einem körperschalldämpfenden Belag versehen, um auf diese Weise den abgestrahlten Luftschall zu vermindern.

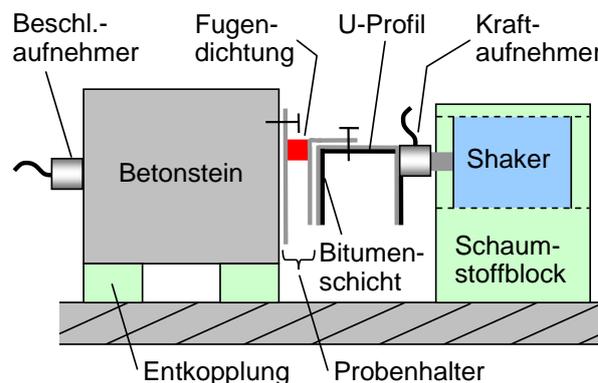
Nach Fertigstellung und Erprobung des Versuchsaufbaus wurde eine systematische Mess-Serie zur Untersuchung des akustischen Einflusses der Fugegeometrie vorgenommen. Dabei bestanden alle untersuchten Dichtungen aus dem gleichen Material und unterschieden sich lediglich hinsichtlich ihrer Geometrie. Neben diesen Messungen wurden außerdem Untersuchungen zur Auswirkung verschiedenartiger Fugenbänder auf die Körperschallübertragung durchgeführt. Der Versuchsaufbau und die Messergebnisse sind in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

## 6.1 Versuchsaufbau

Um den Einfluss der Probengeometrie auf die Körperschallübertragung von Fugendichtungen zu untersuchen, wurde ein Versuchsaufbau mit enger Anlehnung an praxisüblichen bauliche Verhältnissen verwendet. Der Versuchsaufbau ist in den Abbildungen 52 und 53 dargestellt. Die Körperschallanregung erfolgt mit einem dynamischen Schwinngerreger (Inertial-Shaker Data Physics IV40, Masse ca. 1,5 kg), der im Ausschnitt eines

weichelastischen Schaumstoffblocks beweglich gelagert war. Der Shaker war über einen Kraftaufnehmer mit einem U-förmigen Profil aus Stahlblech (Dicke 2 mm, Maße  $L \times B \times H = 440 \text{ mm} \times 45 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ) verbunden, das in dem beschriebenen Aufbau als Sendestruktur für den über die Fuge übertragenen Körperschall diente. Das U-Profil war innenseitig sowie auf der dem Shaker zugewandten Seite mit einem körperschalldämpfenden Belag auf Bitumenbasis beklebt, um auf diese Weise - analog zu der von vielen Herstellern durchgeführten Bedämpfung von Wannen - die Luftschallabstrahlung des Profils herabzusetzen. Als Empfangsstruktur innerhalb des Versuchsaufbaus diente ein elastisch gelagerter Betonstein ( $L \times B \times H = 500 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ ), an dessen Rückseite mittig ein Beschleunigungsaufnehmer angebracht war.

Zwischen der Sendestruktur (U-Profil) und der Empfangsstruktur (Betonstein) befanden sich der Probenhalter und die als Probe verwendete Fugendichtung. Der Probenhalter bestand aus zwei Stahlprofilen (Dicke jeweils 2 mm), die über die beidseitig haftende Probe miteinander verbunden waren. Das linke plattenförmige Profil ( $L \times H = 440 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ) wurde am Betonstein befestigt. Das rechte Profil hatte eine abgewinkelte Form mit den Maßen  $L \times B \times H = 440 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  und wurde am U-Profil angebracht. Die Befestigung erfolgte jeweils durch drei gleichmäßig über die Länge des Probenhalters angeordnete Verschraubungen. Der Probenhalter ist in Abb. 54 schematisch dargestellt. Wie bei den vorangehenden Untersuchungen wurde die Probenherstellung auch hier außerhalb der Messvorrichtung durchgeführt. Die fertigen Proben mit den Haltern wurden dann zur Messung in die Versuchsvorrichtung eingebaut.



**Abb. 52:** Messaufbau zur Untersuchung des Einflusses der Probengeometrie auf die Körperschallübertragung von Fugendichtungen. Die verwendete Messvorrichtung war einer praxisüblichen Einbausituation aus dem Sanitärbereich (Fugendichtung zwischen Wanne und Wand) nachempfunden.

Bei der Messung wurden die vom Shaker im U-Profil angeregten Schwingungen über die untersuchte Fugendichtung auf den Betonstein übertragen. Gemessen wurde die resultierende Schnelle auf der Rückseite des Steins, sowie - zur Berücksichtigung eventueller Schwankungen des Anregungssignals - die vom Shaker in das U-Profil eingeleitete Kraft. Aus diesen Daten konnte anschließend im Vergleich zu den für eine starre Befestigung ermittelten Messwerten nach Gl. (20) die Einfügungsdämmung der untersuchten Fugendichtung ermittelt werden. Aus dem Frequenzspektrum der Einfügungsdämmung wurde schließlich nach Gl. (23) die bewertete Einfügungsdämmung der

Dichtung bestimmt. Zur Herstellung einer starren Befestigung wurden die beiden Blechprofile des Probenhaltes nach Entfernen der Probe vollflächig starr miteinander verklebt.



**Abb. 53:** Foto des verwendeten Versuchsaufbaus. Im oberen Bild ist der gesamte Aufbau in der Vorderansicht zu sehen (von oben nach unten: Betonstein, Probenhalter mit Probe, U-Profil mit Dämpfungsbelag und Shaker im Schaumstoffblock). Das untere Bild zeigt einen Ausschnitt des Aufbaus in seitlicher Ansicht.



**Abb. 54:** Schnittzeichnung von Probenhalter und Probe (links) und Vorrichtung zur Herstellung von Fugendichtungen mit definierter geometrischer Form

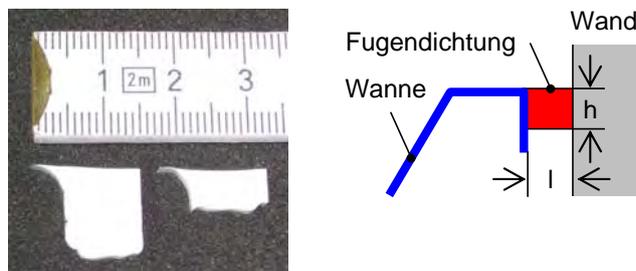
(rechts). Da jeweils mehrere Proben gleichzeitig hergestellt wurden, wurden auch entsprechend viele Probenhalter benötigt.

## 6.2 Probenherstellung

Alle untersuchten Fugendichtungen bestanden aus dem gleichen Dichtstoff, der schon in Abschnitt 5 als Referenzmaterial Verwendung fand. Es handelt sich um ein selbsthaftendes, elastisches, neutralvernetzendes Silikon auf Silikonkautschukbasis mit der Bezeichnung PCI Silcoferm S (Hersteller: PCI). Die bei diesem Material für den dynamischen Elastizitätsmodul und den Verlustfaktor ermittelten Werte betragen  $E_{\text{dyn}} = 1,1 \text{ N/mm}^2$  und  $\eta = 0,12$ .

Zur Herstellung der untersuchten Fugendichtungen wurden die beiden Profile des Probenhalters in einer dazu aus Spanplatten hergestellten Halterung parallel zueinander fixiert (s. Abb. 54). Um den erforderlichen Abstand zwischen den Profilen einzustellen, wurde eine beschichtete Holzleiste als Abstandshalter zwischen die Profile eingeschoben. Die Leiste diente zugleich als untere Begrenzung für den in die Fuge eingebrachten Dichtstoff, wobei durch die Beschichtung eine Anhaftung des Probenmaterials vermieden wurde.

Nach Fixierung der Profile und des Abstandshalters gemäß der gewünschten Fugen­geometrie wurde der Dichtstoff aus der Kartusche von oben in den zwischen den Profilen und dem Abstandshalter verbliebenen Spalt eingespritzt. Durch Abstreichen des überschüssigen Dichtstoffs und Glättung der Oberfläche ergab sich eine Fugendichtung mit definierten Abmessungen und annähernd rechteckigem Querschnitt. Beispiele für auf diese Weise hergestellte Proben und eine Skizze mit den zur Beschreibung der Fugen­geometrie verwendeten Bezeichnungen sind in Abb. 55 dargestellt.



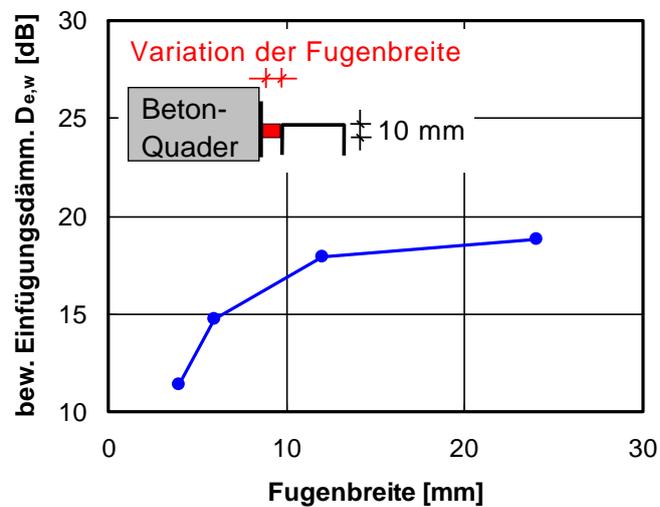
**Abb. 55:** Querschnitt von zwei mit der oben beschriebenen Vorrichtung hergestellten Fugendichtung (links) und verwendete geometrische Bezeichnungen (rechts). Die Fugenbreite wird - in Übereinstimmung mit der in den vorangehenden Abschnitten verwendeten Nomenklatur - mit dem Buchstaben  $l$  bezeichnet, für die Fugenhöhe wird der Buchstabe  $h$  verwendet.

## 6.3 Einfluss von Fugenhöhe und -breite

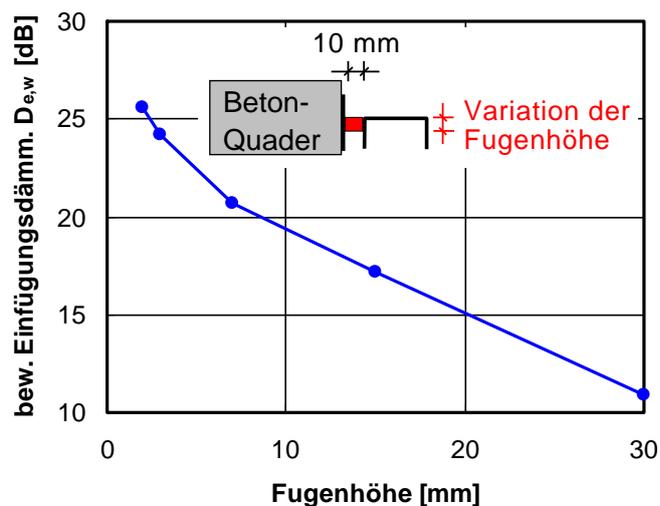
Die Höhe und Breite von Fugendichtungen hat wie schon erwähnt erheblichen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften der Dichtungen. Nach den für marktübliche Dichtstoffe vorhandenen Herstellerempfehlungen sollte die Fugenbreite - aus Gründen der

Belastbarkeit und Abrissfestigkeit - normalerweise etwa im Bereich von  $l = 5 - 30$  mm liegen. Für die Fugenhöhe wird ein Mindestwert von  $h = 5$  mm und Höchstwert  $h = l/2$  empfohlen. Leider wird dieser Höchstwert in der Praxis häufig beträchtlich überschritten, was zu einer erhöhten Körperschallübertragung der Fugendichtung und nicht selten zu baulichen Schallschutzmängeln führt.

Die in den durchgeführten Untersuchungen betrachteten Fugengeometrien orientierten sich an den obigen Überlegungen. Es wurden zwei verschiedene Mess-Serien durchgeführt. In der ersten Serie wurde die Breite der Fuge bei einer konstanten Fugenhöhe von  $h = 10$  mm im Bereich von  $l = 4$  mm - 24 mm variiert. Die zweite Serie erfolgte mit einer konstanten Fugenbreite von  $l = 10$  mm bei einer variablen Fugenhöhe von  $h = 2$  mm - 30 mm. Die Ergebnisse der beiden Mess-Serien sind in den Abbildungen 56 und 57 dargestellt.



**Abb. 56:** Bewertete Einfügungsdämmung einer rechteckigen Fugendichtung mit einer konstanten Höhe von  $h = 10$  mm in Abhängigkeit von der Fugenbreite.



**Abb. 57:** Bewertete Einfügungsdämmung einer rechteckigen Fugendichtung mit einer konstanten Breite von  $l = 10$  mm in Abhängigkeit von der Fugenhöhe.

Die in den Abbildungen 56 und 57 dargestellten Ergebnisse entsprechen im Wesentlichen den Erwartungen (Zunahme der Einfügungsdämmung bei Erhöhung der Fugenbreite und Verminderung der Fugenhöhe). Interessant ist jedoch die Höhe der Zunahme:

- Bei Vergrößerung der Fugenbreite von  $l = 4$  mm auf  $l = 24$  mm steigt die bewertete Einfügungsdämmung von  $D_{e,w} = 11,4$  dB auf  $D_{e,w} = 18,8$  dB (also um 7,4 dB) an.
- Bei Vergrößerung der Fugenhöhe von  $h = 2$  mm auf  $h = 30$  mm nimmt die bewertete Einfügungsdämmung von  $D_{e,w} = 25,6$  dB auf  $D_{e,w} = 10,9$  dB (also um 14,7 dB) ab.

Die bewertete Einfügungsdämmung bei offener Fuge (nach vollständiger Entfernung der Fugendichtung) liegt bei  $D_{e,w} = 31,7$  dB (gemessen für eine Fugenbreite von  $l = 10$  mm). Dieser Wert ergibt sich durch Schallübertragung über die innerhalb der Messeinrichtung vorhandenen Nebenwege (hauptsächlich Luftschallübertragung) und stellt die Obergrenze des nutzbaren Messbereichs dar.

#### 6.4 Modell zur Berücksichtigung der Fugengeometrie

Im vorangehenden Abschnitt wurde die Einfügungsdämmung von Fugendichtungen mit rechteckigem Querschnitt in Abhängigkeit von der Fugenhöhe und -breite untersucht. Der Einfluss von Höhe und Breite wurde dabei jeweils separat betrachtet. Im Sinne einer einheitlichen Darstellung und als Planungshilfe für die Praxis bietet es sich an, die ermittelten Ergebnisse in einer gemeinsamen Formel zusammenzuführen. Den Grundstein hierzu bildet die Überlegung, dass die Körperschallübertragung über eine Fugendichtung vor allem von der elastischen Federkonstante  $c$  der Dichtung abhängt. Handelt es sich um eine lange Dichtung (d. h. gilt wie im vorliegenden Fall, dass Höhe und Breite der Dichtung sehr viel kleiner als ihre Länge  $L$  sind), so kann man  $c$  durch die längenbezogene Federkonstante  $c/L$  ersetzen. Dividiert man diesen Ausdruck noch durch den dynamischen Elastizitätsmodul des Dämmstoffs  $E_{dyn}$ , so erhält man einen Ausdruck, der nur noch von der Geometrie der Fuge abhängt. Da es in der Literatur dafür bisher noch keine Bezeichnung gibt, wird der Ausdruck im folgenden als elastischer Geometriefaktor  $G = c / (L \times E_{dyn})$  bezeichnet.

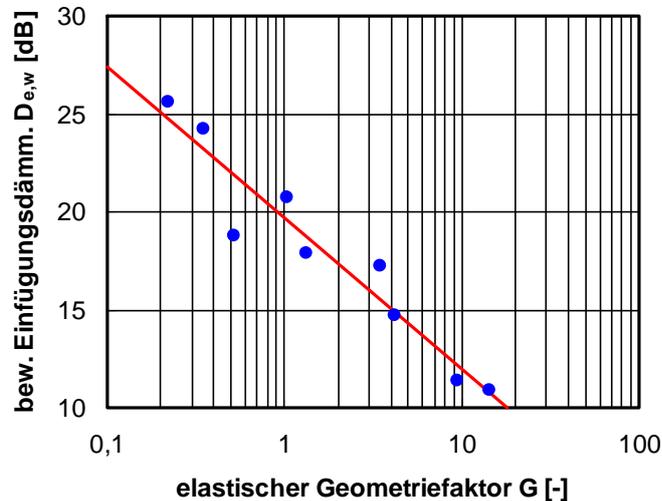
Für eine Fugendichtung mit rechteckigem Querschnitt lässt sich der elastische Geometriefaktor auf einfache Weise (mit Gl. (2), Gl. (14) und den Erläuterungen zu Abb. 12) berechnen und man erhält:

$$G = \frac{c}{LE_{dyn}} = \frac{h}{l} \left( 1 + \frac{h}{2l} + \frac{h^2}{4l^2} \right) \quad [-] \quad (25)$$

mit  $h$  = Fugenhöhe [mm]  
 $l$  = Fugenbreite [mm]

Der Ausdruck in Klammern ergibt sich hierbei aus dem nach Gl. (15) berechneten Formfaktor.

Trägt man die Messwerte aus den Abbildungen 56 und 57 über dem mit Gl. (25) berechneten elastischen Geometriefaktor auf, so lassen sich die Messwerte bei logarithmischer Skalierung der Abszissen-Achse in recht guter Näherung durch eine Regressionsgerade beschreiben (s. Abb. 58). Die Formel für die Regressionsgerade ist in der Abbildung angegeben.



**Abb. 58:** Bewertete Einfügungsdämmung einer rechteckigen Fugendichtung in Abhängigkeit von dem elastischen Geometriefaktor  $G$ . Die dargestellten Messwerte wurden den Abbildungen 56 und 57 entnommen. Die Formel für die dargestellte Regressionsgerade lautet:  $D_{e,w} [\text{dB}] = -7,7 \lg(G) + 19,7$ . Für eine Dichtung mit quadratischem Querschnitt gilt  $G = 1,75$ , so dass sich aus der Regressionsgerade für die bewertete Einfügungsdämmung ein Wert von  $D_{e,w} = 17,8$  dB ergibt.

Aus dem in Abb. 58 dargestellten Zusammenhang zwischen dem elastischen Geometriefaktor und der bewerteten Einfügungsdämmung lässt sich - sofern der dynamische Elastizitätsmodul und der Verlustfaktor des Dichtstoffs bekannt sind - die bewertete Einfügungsdämmung von rechteckigen Fugendichtungen mit beliebigen Abmessungen berechnen. Die Berechnung erfolgt in folgenden Schritten:

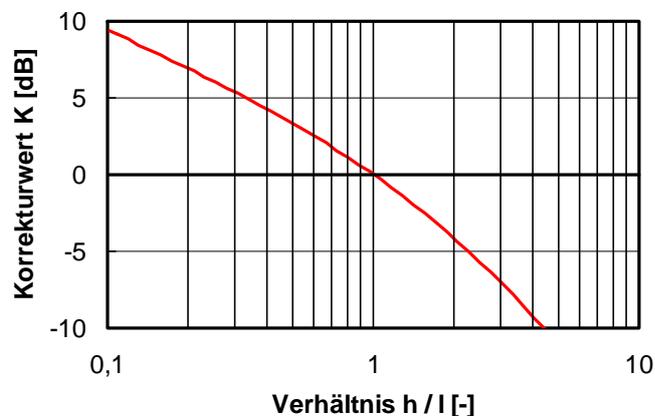
1. Aus dem dynamische Elastizitätsmodul  $E_{\text{dyn}}$  und der Verlustfaktor  $\eta$  des Dichtstoffs wird zunächst mittels Gl. (21) die Einfügungsdämmung  $D_e$  berechnet. Das Berechnungsergebnis bezieht sich auf eine Fuge einem quadratischem "Standardquerschnitt" von  $l \times b = 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  (da der elastische Geometriefaktor bei quadratischem Fugenquerschnitt nicht von den Abmessungen der Fuge abhängt, spielen die genauen Maße im Prinzip keine Rolle).
2. Aus der Einfügungsdämmung  $D_e$  wird mit Gl. (23) die bewertete Einfügungsdämmung  $D_{e,w}$  ermittelt.
3. Zur Berücksichtigung der Fugengeometrie wird zu dem in Schritt 2 berechneten Wert für die bewertete Einfügungsdämmung ein Korrekturwert  $K$  addiert. Unter

Verwendung der in Abb. 58 beschriebenen Regressionsgerade berechnet sich der Korrekturwert gemäß:

$$K = -7,7 \lg \left( \frac{h}{l} \left( 1 + \frac{h}{2l} + \frac{h^2}{4l^2} \right) \right) + 1,9 \quad [\text{dB}] \quad (26)$$

mit  $h$  = Fugenhöhe [mm]  
 $l$  = Fugenbreite [mm]

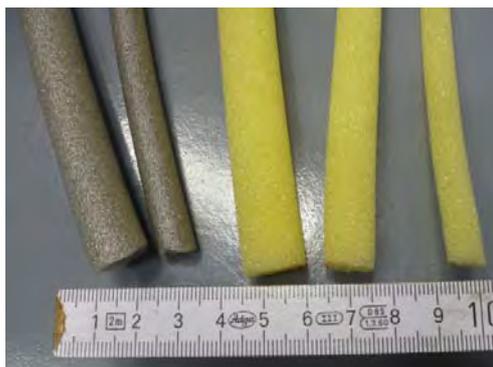
Die Abhängigkeit des Korrekturwerts vom Verhältnis zwischen Fugenhöhe und -breite  $h/l$  ist in Abb. 59 veranschaulicht. In der Praxis liegt das Verhältnis zumeist im Bereich von etwa  $0,2 \leq h/l \leq 3$ , was einem Korrekturwert von  $-7,0 \text{ dB} \leq K \leq +6,9 \text{ dB}$  entspricht.



**Abb. 59:** Korrekturwert zur Berücksichtigung des Einflusses der Fugengeometrie auf die bewertete Einfügungsdämmung bei Fugendichtungen mit rechteckigem Querschnitt. Die dargestellte Kurve wurde mit Gl. (26) berechnet und hängt vom Verhältnis zwischen Fugenhöhe  $h$  und Fugenbreite  $l$  ab. Den Bezugswert bildet eine Fugendichtung mit quadratischem Querschnitt, für die sich definitionsgemäß  $K = 0$  ergibt.

## 6.5 Fugenbänder

Bei Fugenbändern handelt es sich um Profile aus elastischem Schaumstoff, die vor dem Einbringen des viskosen Dichtstoffs in die offene Fuge eingeschoben werden, um ein zu tiefes Eindringen des Dichtstoffs in den Hohlraum zu vermeiden. Nach dem Aushärten des Dichtstoffs bleiben die Bänder in der Art einer verlorenen Schalung unterhalb der Dichtung zurück. Fugenbänder sind auf dem Markt in unterschiedlicher Ausführung und in verschiedener Größe und Form erhältlich. Den Normalfall bilden Bänder mit rundem Querschnitt (s. Abb. 60). Durch ihre Elastizität sind die Bänder in der Lage, sich an unterschiedliche Fugenbreiten anzupassen, wobei der vom Hersteller vorgegebene Bereich, der sich an der Kompressibilität des Schaumstoffs bemisst - allerdings nicht überschritten werden darf.



**Abb. 60:** Aufnahme der im Forschungsvorhaben verwendeten Fugenbänder aus Polyurethan-Weichschaum. Die grauen Bänder wiesen eine verhaute geschlossene Oberfläche auf, die gelben Bänder bestanden aus offenzelligem Material. Der Durchmesser der Bänder betrug 10 mm, 15 mm und 20 mm.

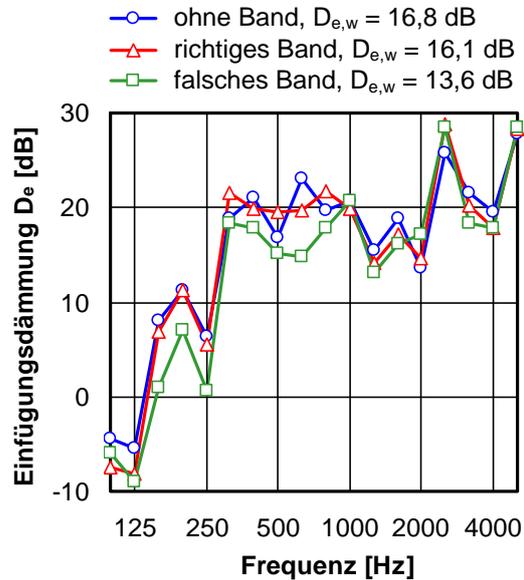
Der Hauptzweck von Fugenbändern besteht darin, die Menge des zur Versiegelung der Fuge benötigten Dichtstoffs zu vermindern. Daneben haben die Bänder jedoch auch eine wichtige akustische Funktion, indem sie die Menge des in der Fuge befindlichen Dichtstoffs begrenzen und dadurch die Körperschallübertragung herabsetzen. Außerdem können die Bänder auch dazu genutzt werden, der Fuge eine akustisch vorteilhafte Form zu geben. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 61 dargestellt.



**Abb. 61:** Verbesserung der Körperschallisolierung einer elastischen Fugendichtung durch den Einsatz eines runden Fugenbandes. Gegenüber der praxisüblichen - schalltechnisch ungünstigen - Ausführung der Fuge (links im Bild) vermindert das Band die Fugenhöhe und damit die Körperschallübertragung erheblich. Die auf der rechten Seite abgebildete Situation entspricht in praktischer und akustischer Hinsicht nahezu dem Idealfall, da einerseits die auf Wanne und Wand vorhandene Klebefläche groß genug ist, um einen Fugenabriss zu vermeiden, die geringe Höhe der Dichtstoffschicht in der Fugenmitte jedoch andererseits die Körperschallübertragung wirksam unterbindet.

Was den Materialverbrauch und die Formgebung bei der Herstellung von Fugendichtungen betrifft, so ist die akustisch vorteilhafte Wirkung von Fugenbändern unbestritten und braucht nicht weiter untersucht zu werden. Da das Band jedoch nach Fertigstellung der Dichtung in der Fuge verbleibt, ist nicht auszuschließen, dass auch über das Band selbst - parallel zur Dichtung - Körperschall übertragen wird. Um dies zu untersuchen, wurden in den Spalt unter einer ausgehärteten Fugendichtung nachträglich Fugenbänder eingeschoben. Die Dichtung war zuvor mit der in Abschnitt 6.3 beschriebenen Vorrichtung unter Verwendung einer Abstandsleiste hergestellt worden und wies

einen rechteckigen Querschnitt mit einer Breite von 8 mm und einer Höhe von 10 mm auf. In den vorhandenen Spalt wurde zunächst (bis direkt unter die Dichtung) ein hierfür geeignetes und vorgesehenes Band mit einem Durchmesser von 10 mm eingeschoben. Nach der Messung wurde das Band wieder entfernt und durch ein ungeeignetes Produkt mit zu großem Durchmesser ( $d = 20$  mm) ersetzt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abb. 62 aufgetragen.



**Abb. 62:** Einfügungsdämmung einer Fugendichtung mit und ohne Fugenband in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Dichtung hatte einen rechteckigen Querschnitt mit einer Breite von 8 mm und einer Höhe von 10 mm. In den 8 mm breiten Spalt unter der Dichtung wurde zunächst ein Fugenband mit 10 mm Durchmesser (richtiges Band) und anschließend ein Band mit 20 mm Durchmesser (falsches Band) eingeschoben. Der zugehörige Wert für die bewertete Einfügungsdämmung ist jeweils in der Legende zu den Kurven vermerkt.

Wie aus den in Abb. 62 dargestellten Ergebnissen zu entnehmen ist, hängt die Körperschallübertragung von Fugenbändern in starkem Maße davon ab, wie stark das Band beim Einschieben in die Fuge komprimiert wird. Ist die Durchmesser des Bandes auf die Fugenbreite abgestimmt, so ist die Verformung nur gering und die Schallübertragung über das Fugenband spielt im Vergleich zum dem Weg über die Dichtungsmasse nur eine untergeordnete Rolle. Bei Bändern, deren Durchmesser erheblich größer als die Fugenbreite ist, erfolgt hingegen eine starke Verdichtung des Materials, so dass eine Körperschallbrücke zwischen Wannensrand und Wand entsteht. In einem solchen Fall kann das Fugenband die Körperschallisolation der elastischen Fugendichtung erheblich herabsetzen. In dem in Abb. 62 dargestellten Beispiel, bei dem allerdings eine sehr starke Verdichtung des Fugenbandes vorlag, betrug die resultierende Verminderung der bewerteten Einfügungsdämmung ca. 3 dB. Es kommt also auch hier, ebenso wie bei der Herstellung der Fugendichtung, auf den richtigen Einsatz des verwendeten Materials und die fachmännische Ausführung der Arbeit an.

## 6.6 Resümee

Zur Untersuchung des Einflusses der Fugengeometrie auf die Körperschallübertragung von Fugendichtungen wurde eine Messvorrichtung aufgebaut, die den realen Verhältnissen am Bau im Rahmen der vorhandenen messtechnischen Anforderungen möglichst eng nachempfunden war. Die Messungen erfolgten an Fugendichtungen mit rechteckigem Querschnitt, wobei sowohl die Breite als auch die Höhe der Dichtung variiert wurden. Ein weiteres Untersuchungsthema bildete der akustische Einfluss elastischer Fugenbänder. Die wichtigsten Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sind:

- Die Körperschallisolation von Fugendichtungen hängt in starkem Maße von ihrer geometrischen Form ab. Die akustische Wirkung ist um so besser, je geringer die Steifigkeit des von der Fuge gebildeten elastischen Verbindungselementes ist. Durch geeignete Formgebung, wie. z. B. Verminderung der Fugenhöhe und Erhöhung der Fugenbreite, ist daher - im Rahmen der vorhandenen baulichen Vorgaben - eine deutliche Verbesserung der Körperschallisolation erreichbar. Bezogen auf die bewertete Einfügungsdämmung ergibt sich hierbei im Vergleich zu einer bauüblich ausgeführten Fugendichtung ein akustischer Spielraum von etwa  $\pm 7$  dB.
- Auf Grundlage der ermittelten Messergebnisse konnte ein Vorhersagemodell entwickelt werden, das den Einfluss der geometrischen Form auf die bewertete Einfügungsdämmung rechteckiger Fugendichtungen rechnerisch berücksichtigt.
- Elastische Fugenbänder stellen ein gut geeignetes Hilfsmittel zur akustisch günstigen Formgebung von Fugendichtungen dar. Es ist jedoch darauf zu achten, die Bänder beim Einbau nicht zu stark zu komprimieren, da ansonsten ein zusätzlicher Schallübertragungsweg entsteht, der die Körperschallisolation von Fugendichtungen erheblich herabsetzen kann.

## 7 Elastisch verklebte Bodenbeläge

Über die Verbesserung der Trittschalldämmung von verklebten Bodenbelägen durch den Einsatz elastischer Klebstoffe wird in der Fachwelt immer wieder diskutiert. Systematische Untersuchungen zu diesem Thema gibt es bislang jedoch noch nicht. Vorversuche, die vor einigen Jahren im Fraunhofer-Institut für Bauphysik an Fliesen durchgeführt wurden, lassen vermuten, dass die elastische Verklebung von Bodenbelägen ein nicht unbeträchtliches akustisches Verbesserungspotenzial birgt. Allerdings lassen sich die Ergebnisse der Vorversuche nicht direkt in die Praxis übertragen, da weder die Messbedingungen noch die verwendeten Klebstoffe (es handelte sich um weiche Dichtstoffe anstatt der bauüblichen Fliesenkleber) praxisgerechten Bedingungen entsprechen.

Dies war der Anlass, um das Thema im Rahmen des durchgeführten Forschungsvorhabens genauer zu untersuchen. Dabei wurden zunächst nur handelsübliche Klebstoffe und Applikationstechniken betrachtet, um diese Weise im Sinne einer Bestandsaufnahme die Grundlage für zukünftige Entwicklungs- und Optimierungsmaßnahmen zu

legen. Handelsübliche Klebstoffe sind auch deshalb von Interesse, weil einige Hersteller für ihre Produkte mit einer hohen trittschalldämmenden Wirkung werben und bislang noch nicht überprüft wurde, inwieweit sich diese Aussagen in der Praxis verifizieren lassen. Die hierzu durchgeführten Untersuchungen werden im folgenden beschrieben.

## 7.1 Versuchsaufbau

Die Trittschallminderung von Deckenauflagen wird normalerweise nach DIN EN ISO 10140-1 und -3 [46, 47] gemessen. Dabei wird der zu prüfende Bodenbelag auf eine massive Stahlbetondecke gelegt (bzw. - abhängig von der jeweiligen Einbauweise - mit der Decke verklebt) und der durch Anregung mit einem Norm-Hammerwerk im Raum unter der Decke erzeugte Schallpegel gemessen. Die Messung erfolgt sowohl auf der Rohdecke (Messwert  $L_{n0}$ ) als auch auf dem geprüften Belag (Messwert  $L_n$ ), so dass sich aus der Differenz der gemessenen Werte gemäß

$$\Delta L = L_{n0} - L_n \quad [\text{dB}] \quad (27)$$

die Trittschallminderung  $\Delta L$  des Bodenbelags ergibt. Da die Trittschallminderung von der Frequenz abhängt, wird sie als Terzspektrum angegeben. Als Beurteilungs- und Vergleichsmaßstab für die akustische Wirkung von Bodenbelägen dient die bewertete Trittschallminderung  $\Delta L_w$ , die nach DIN EN ISO 717-2 [48] aus dem gemessenen Terzspektrum berechnet wird.

Das Problem bei verklebten Bodenbelägen besteht darin, dass sich die Beläge nach beendeter Messung zumeist nicht mehr rückstandsfrei entfernen lassen, so dass vor dem Einbau des nächsten Belags zunächst eine Sanierung der Deckenoberfläche erforderlich ist. Da weiche Beläge auch teilflächig geprüft werden dürfen, bestünde hier zwar die Möglichkeit, mehrere Beläge an unterschiedlichen Stellen der Decke aufzukleben. Da die Messergebnisse jedoch - wenn auch nur verhältnismäßig schwach - von der Position des Belags auf der Decke abhängen, wäre eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse hierbei nicht mehr in vollem Umfang gewährleistet.

Aus diesem Grund wurde bei den hier durchgeführten Untersuchungen ein anderer Weg beschritten und eine Versuchsanordnung verwendet, mit der alle untersuchten Beläge an derselben Stelle der Decke gemessen werden konnten. Dies erfolgte mittels eines zweiteiligen Probenhalters, dessen Unterteil - durch Verklebung und zusätzliche Verschraubung - fest mit der Decke verbunden war. Im Unterteil des Probenhalters befanden sich 6 versenkte Einschlagmutter mit einem Gewindedurchmesser von 8 mm, mit deren Hilfe das Unterteil und das abnehmbare Oberteil des Probenhalters, auf dem der untersuchte Bodenbelag aufgeklebt war, kraftschlüssig miteinander verschraubt werden konnten (s. Abb. 63).

Ober- und Unterteil des Probenhalters bestanden aus zwei gleichartigen Schichtholzplatten mit beidseitiger Phenolharz-Beschichtung (Abmessungen  $L \times B \times H = 400 \text{ mm} \times 190 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ ), wobei die eine Seite der Platten über eine glatte, die andere (infolge des zur Herstellung verwendeten Siebdruckverfahrens) hingegen über eine raue Oberfläche verfügte. Bei der Verschraubung von Ober- und Unterteil des Probenhalters,

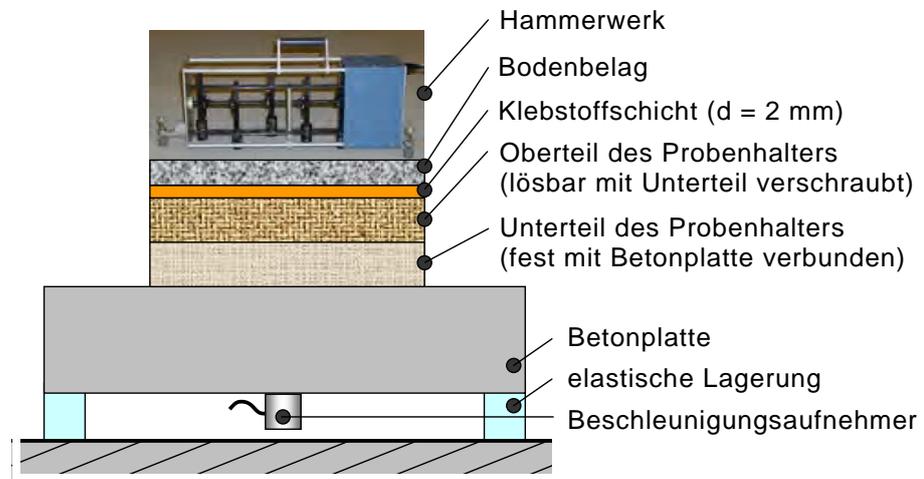
die zur besseren Reproduzierbarkeit mit einem Drehmomentschlüssel erfolgte, lagen die glatten Seiten der beiden Platten aufeinander, so dass sich eine großflächige feste Verbindung ergab. Die rauen Seiten der Platten stellten wegen ihrer guten Haftfähigkeit einen geeigneten Untergrund zum Aufkleben der untersuchten Bodenbeläge dar. Durch die Phenolharz-Beschichtung konnte die im Klebstoff enthaltene Feuchtigkeit nicht in die Platten eindringen. In Voruntersuchungen wurde nachgewiesen, dass durch den Probenhalter keine Veränderung des Trittschallpegels erfolgte. Allerdings galt dies nur bis zu einer Frequenz von etwa 1600 Hz. Oberhalb von 1600 Hz ergaben sich Abweichungen, auf die später noch genauer eingegangen wird.

Im Unterschied zu einer normalen Prüfstandsmessung wurde für die durchgeführten Untersuchungen eine Messvorrichtung nach DIN EN ISO 16251-1 [49] eingesetzt. Hierbei befindet sich die Probe statt auf einer Stahlbetondecke auf einer 20 cm dicken elastisch gelagerten Betonplatte und statt des Schallpegels im Raum unterhalb der Decke wird der resultierende Beschleunigungspegel auf der Betonplatte gemessen. Ansonsten stimmt das Messverfahren nach DIN EN ISO 16251-1 weitgehend mit dem üblichen Verfahren nach DIN EN ISO 10140-1 und -3 überein.

Ein weiterer Unterschied gegenüber einer normalen Messung bestand darin, dass zur Trittschallanregung statt des Norm-Hammerwerks, bei dem fünf Hämmer reihum durch einen Exzenter angehoben werden und dann durch ihr Eigengewicht auf die Decke herabfallen, ein MIDI-Hammerwerk der Firma Stratenschulte Messtechnik eingesetzt wurde. Das MIDI-Hammerwerk, das über einen geregelten elektrodynamischen Antrieb verfügt, erzeugt den gleichen Trittschallpegel wie das Normhammerwerk, hat aber nur einen Hammer und weist dadurch eine deutlich kleinere Aufstellfläche von nur 30 cm x 12 cm auf. Dies erwies sich für die durchgeführten Messungen als sehr vorteilhaft, da die Fläche der untersuchten Beläge entsprechend reduziert werden konnte (Probenfläche 31 cm x 13 cm). Für die Vergleichsmessung ohne Belag - zur Bestimmung des Referenzpegels  $L_{n0}$  nach Gl. (27) - wurde das MIDI-Hammerwerk direkt auf das Oberteil des Probenhalters gestellt. Eine schematische Skizze der verwendeten Messvorrichtung ist Abb. 63 dargestellt. Um den Transport zu erleichtern, befand sich die Vorrichtung, wie auf dem Foto in Abb. 64 zu erkennen ist, auf einem Rollwagen.

Obgleich sich mit dem oben beschriebenen Probenhalter gut reproduzierbare Messergebnisse ergaben (bei wiederholtem Ein- und Ausbau derselben Probe war fast kein Unterschied zwischen den Messwerten festzustellen), wurden die Untersuchungen durch ein grundlegendes messtechnisches Problem beeinträchtigt, das auf eine Resonanz des Versuchsaufbaus im Bereich des Probenhalters (die genaue Ursache konnte nicht geklärt werden) zurückzuführen war. Wie in Abb. 67 zu erkennen ist, lag die Resonanzfrequenz - unabhängig von der untersuchten Probe - bei allen Messungen einheitlich bei 2500 Hz. Aufgrund der Resonanz waren oberhalb von etwa 1600 Hz keine zuverlässigen Messungen mehr möglich, so dass es erforderlich war, die Auswertung der Messdaten auf den Frequenzbereich von 100 Hz - 1600 Hz zu beschränken. Dies betraf auch die bewertete Trittschallminderung  $\Delta L_w$ , die normalerweise für die Frequenzen von 100 Hz - 3150 Hz berechnet wird. Um dieses Problem zu umgehen, musste die in DIN EN ISO 717-2 angegebene Berechnungsformel entsprechend modifiziert werden, was zu Folge hatte, dass die für  $\Delta L_w$  berechneten Werte teilweise nicht ganz den für

derartige Beläge üblichen Ergebnissen entsprachen. Die Vergleichbarkeit der Messwerte untereinander wird hierdurch jedoch nicht beeinträchtigt, so dass die Ergebnisse innerhalb des Forschungsvorhabens uneingeschränkt verwendet werden konnten.



**Abb. 63** Messvorrichtung zur Bestimmung der Trittschallminderung von Bodenbelägen auf einer massiven Stahlbetondecke. Als Ersatz für die Decke diente eine elastisch gelagerte Stahlbetonplatte mit den Abmessungen  $L \times B \times H = 120 \text{ cm} \times 80 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  an deren Unterseite ein Beschleunigungsaufnehmer befestigt war (Messanordnung nach DIN EN ISO 16251-1). Die Befestigung des geprüften Bodenbelags auf der Betonplatte erfolgte mittels eines zweiteiligen Probenhalters. Im Gegensatz zu dem in der Abbildung dargestellten Norm-Hammerwerk erfolgte die Trittschallanregung des Bodenbelags mit einem MIDI-Hammerwerk.



**Abb. 64:** Gesamtansicht der verwendeten Messvorrichtung mit MIDI-Hammerwerk, Bodenbelag, Probenhalter und elastisch gelagerter Betonplatte. Zum besseren Transport befindet sich die Vorrichtung auf einem Rollwagen.

Neben den Messungen auf der oben abgebildeten Betonplatte wurde außerdem auf einer Holzbalkendecke sowie auf einem Trockenestrich und einem schwimmenden Estrich mit mineralischer Bodenplatte gemessen. Aus diesen Messungen ergeben sich jedoch keine für das durchgeführte Forschungsvorhaben wesentlichen Erkenntnisse, weshalb auf ihre Darstellung verzichtet wird.

## 7.2 Probenherstellung

Bei der Herstellung der Proben wurden die Beläge wie schon erwähnt außerhalb der Messvorrichtung auf das Oberteil des Probenhalters geklebt. Da Messungen an einer großen Zahl von Proben erfolgten (es wurden insgesamt 22 Proben untersucht), wurde auch das Oberteil des Probenhalters in entsprechend großer Anzahl benötigt. Alle untersuchten Beläge hatten die gleichen Abmessungen ( $L \times B = 31 \text{ cm} \times 13 \text{ cm}$ ). Nach Fertigstellung der Proben und einer Wartezeit von mindestens drei Tagen (danach waren alle verwendeten Klebstoffe ausgehärtet) wurden die Proben dann in die Messvorrichtung eingebaut, indem Ober- und Unterteil des Probenhalters miteinander verschraubt wurden.

Um einheitliche Messbedingungen zu schaffen und einen direkten Vergleich zwischen unterschiedlichen Klebstoffen zu ermöglichen, erfolgte die Verklebung sämtlicher Beläge - unabhängig von den Anwendungshinweisen der Hersteller- mittels einer 2 mm dicken vollflächigen Klebstoffschicht. Wenn sich zwischen Belag und Probenhalter eine schalldämmende Unterlage befand, wurde zweifach verklebt (zwischen Belag und Unterlage und zwischen Unterlage und Probenhalter), wobei die Klebstoffdicke jeweils 2 mm betrug. Ein Beispiel für eine solche Probe ist in Abb. 65 dargestellt.



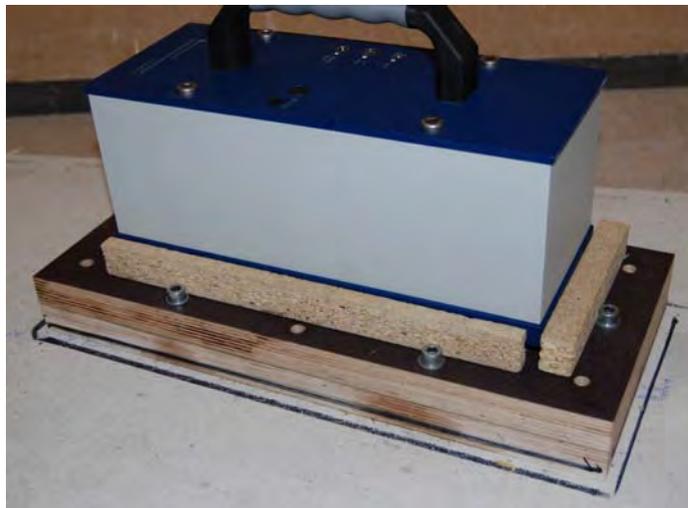
**Abb. 65:** Beispiel für einen der untersuchten Bodenbeläge (Fliese mit schalldämmender Unterlage Damtec Standard) in seitlicher Ansicht. Zu sehen sind (von oben nach unten):

- Fliese ( $d = 9 \text{ mm}$ ),
- Klebstoff Okamul PU-K ( $d = 2 \text{ mm}$ ),
- schalldämmende Unterlage Damtec Standard ( $d = 3 \text{ mm}$ ),
- Klebstoff Okamul PU-K ( $d = 2 \text{ mm}$ ),
- Oberteil Probenhalter ( $d = 22 \text{ mm}$ ).

Die Herstellung der Klebstoffschicht erfolgt mit einer Schablone aus 2 mm dickem Stahlblech, in der sich ein rechteckiger Ausschnitt von gleicher Größe wie die untersuchten Bodenbeläge ( $31 \text{ cm} \times 13 \text{ cm}$ ) befand. Die Schablone war so geformt, dass sie

sich passgenau über den Probenhalter schieben ließ, so dass an der Stelle der Oberfläche, an der später der Belag zu liegen kam, eine 2 mm tiefe Wanne entstand. Diese Wanne wurde gleichmäßig mit Klebstoff gefüllt. Nachdem das überschüssige Material mit einem Abzieher entfernt worden war, wurde der Belag auf das Klebstoffbett aufgelegt und vorsichtig angedrückt. Danach wurde die Schablone entfernt und die fertige Probe bis zum Aushärten des Klebstoffs auf einer waagerechten Fläche gelagert.

Nachdem der Klebstoff vollständig ausgehärtet war, wurde das Oberteil des Probenhalters mit der darauf befindlichen Probe auf das Unterteil des Halters aufgesetzt. Die Verschraubung von Ober- und Unterteil erfolgte mit sechs Inbus-Schrauben, die jeweils mit einem Drehmomentschlüssel angezogen wurden. Hierdurch war gewährleistet, dass alle Messungen unter gleichen Befestigungsbedingungen stattfanden, was durch wiederholten Ein- und Ausbau derselben Probe bestätigt werden konnte. Ein Foto der fertig eingebauten Probe mit dem zur Trittschallanregung verwendeten MIDI-Hammerwerk ist in Abb. 66 dargestellt.



**Abb. 66:** Versuchsaufbau (Ausschnitt) in betriebsbereitem Zustand. Ober- und Unterteil des Probenhalters sind mit den im Foto erkennbaren Inbus-Schrauben miteinander verschraubt. Auf dem Probenhalter mit dem untersuchten Bodenbelag befindet sich das MIDI-Hammerwerk. Die Sicht auf den Bodenbelag wird durch die auf dem Probenhalter aufliegenden Abstandsleisten aus Press-Span verdeckt. Die Abstandsleisten dienen als Hilfsmittel bei der Positionierung des Hammerwerks und stellen sicher, dass die Anregung der Beläge immer an genau der gleichen Stelle erfolgt. Die Leisten werden vor Beginn der Trittschallmessung entfernt.

### 7.3 Untersuchte Proben

Das durchgeführte Messprogramm umfasste vier bauübliche Bodenbeläge: einen Teppichboden, einen PVC-Belag, eine Fliese und einen Laminatboden. Jeder dieser Beläge wurde mit mehreren verschiedenen Klebstoffen auf der Decke (genauer gesagt auf dem Oberteil des an der Decke angebrachten Probenhalters) befestigt, so dass das Ver-

suchsprogramm (einschließlich der Messungen in unverklebtem Zustand) aus insgesamt 22 Einzelmessungen bestand. Neben der direkten Verklebung der Beläge auf der Decke wurde auch untersucht, welchen Einfluss eine zwischen Belag und Decke befindliche schalldämmende Unterlage auf die Trittschallminderung der Beläge hat. Bei der hierzu verwendeten Dämmunterlage, die aus einem Gummi- und Korkgranulat bestand, handelte es sich nach Herstellerangabe um ein universell verwendbares Produkt, das gleichermaßen für alle Arten von Bodenbelägen geeignet war. Es war daher ausreichend, sich bei den Messungen auf nur eine Unterlage zu beschränken, was außerdem den Vorteil bot, dass sich die entsprechenden Messergebnisse für die verschiedenen Beläge direkt miteinander vergleichen ließen. Die wichtigsten Angaben zu den untersuchten Bodenbelägen und der verwendeten Dämmunterlage sind in Tab. 3 zusammengefasst.

Art des Belags	Dicke [mm]	Material	Bezeichnung	Hersteller
Teppichboden	5	Velour mit Textilrücken	Melange duraAir	Dura Flooring Systems
PVC	2	Linoleum	Marmoleum Real	Forbo Flooring Systems
Fliese	9	Glasiertes Feinsteinzeug	IGA Terrano	IGA Fliesen
Laminat	7	Hochdichte Faserplatte mit Deckschicht aus Melaminharz	Quick Step Classic	Unilin-Flooring
Dämmunterlage	3	Gummi- und Korkgranulat	Damtec Standard	Kraiburg

**Tab. 3:** Beschreibung der vier im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Bodenbeläge. Die unterste Zeile der Tabelle enthält die wichtigsten Angaben zu der verwendeten Dämmunterlage (die Unterlage wurde gleichermaßen bei allen Belägen eingesetzt). Für die bewertete Trittschallminderung der Unterlage gibt der Hersteller folgende Werte an:  $\Delta L_w = 29$  dB mit Textilbelag,  $\Delta L_w = 20$  dB mit Laminat und  $\Delta L_w = 18$  dB mit Fliesen. Hierbei bleibt unklar, auf welche Materialdicke sich diese Angaben beziehen (die Unterlage ist in Dicken von 2 - 6 mm erhältlich).

Da nicht jeder Klebstoff für jeden Bodenbelag geeignet ist, wurden für die Untersuchungen sechs verschiedene Produkte verwendet. Zwei dieser Produkte (die Klebstoffe MG-Flex von Sopro und Parkett-Elastik von MEM) werden von den Herstellern ausdrücklich als Schallschutzprodukte beworben. Dem Klebstoff MG-Flex wird dabei eine "hohe trittschalldämmende Wirkung in Verbindung mit keramischen Belägen" bescheinigt, mit Parkett-Elastik kann laut Hersteller "eine Trittschallverbesserung von bis zu 14 dB erreicht werden".

Neben den erwähnten Klebstoffen wurden außerdem auch zwei doppelseitige Klebebänder in die Untersuchungen einbezogen. Das Klebeband Bullran 45 von Uzin verfügt über eine ausgezeichnete Haftung auf fast allen Untergründen, hat aber wegen seines steifen Papierkerns und seiner geringen Dicke von nur ca. 0,5 mm fast keine trittschalldämmende Wirkung. Das Klebeband 9515 W von 3M haftet demgegenüber weniger

gut, ist aber wegen seines weichen Schaumstoffkerns und seiner Dicke von 1,5 mm erheblich elastischer, so dass hier von einer höheren Trittschalldämmung auszugehen ist. Da sich für das Band 9515 W auf den verwendeten Probenhaltern keine ausreichende Haftung ergab, wurde es bei den Messungen immer in Verbindung mit dem Band Bullran 45 verwendet. Hierbei wurde der Probenhalter zunächst mit Bullran 45 beklebt, dann folgten das Band 9515 W und schließlich der untersuchte Bodenbelag. Die verwendeten Klebstoffe und Klebebänder sind in Tab. 4 beschrieben.

Bezeichnung	Art des Klebstoffstoffs	Anwendungsbereich	Hersteller
K 188 E	Dispersionsklebstoff	PVC, textile Bodenbeläge	Thomsit
P 625	2K-Polyurethan-Klebstoff	Parkett, Laminat	Thomsit
Okatex 01	lösemittelfreier Dispersionsklebstoff	Teppichboden	Kiesel
Okamul PU-K	2K-Polyurethan-Klebstoff	Fliesen, Keramik	Kiesel
MG-Flex	zementärer, hochflexibler 1K-Dünnbettmörtel	Fliesen, Keramik, Steingut	Sopro
Parkett-Elastik	1K-Klebstoff auf SMP-Basis	Parkett, Laminat	MEM
Bullran 45	doppelseitiges Sockel-Klebeband mit Papierkern und Acrylatklebstoff, d = 0,5 mm	alle Oberflächen	Uzin
9515 W	doppelseitiges PE-Schaumklebeband mit Acrylatklebstoff, d = 1,5 mm	alle Oberflächen	3M

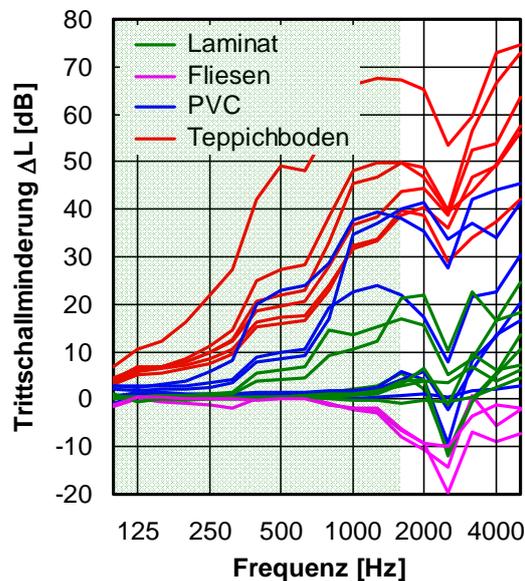
**Tab. 4:** Übersicht über alle bei den Untersuchungen verwendeten Klebstoffe und Klebebänder. Für den Klebstoff MG-Flex gibt der Hersteller eine "hohe trittschalldämmende Wirkung in Verbindung mit keramischen Belägen" an, mit dem Klebstoff Parkett-Elastik kann laut Hersteller "eine Trittschallverbesserung von bis zu 14 dB erreicht werden". Für die übrigen Produkte liegen keine akustischen Angaben oder Aussagen vor.

## 7.4 Messergebnisse

In Abb. 67 ist die Trittschallminderung aller untersuchten Proben in Abhängigkeit von der Frequenz aufgetragen. Die Abbildung veranschaulicht einerseits die große akustische Bandbreite der verschiedenen Konstruktionen. Andererseits weisen die für einen bestimmten Bodenbelag, wie z. B. die Fliesen, ermittelten Messwerte durchaus übereinstimmende Merkmale auf, die sich von den übrigen Belägen unterscheiden. So sind z. B. für die Fliesen im Gegensatz zu den meisten anderen Proben fast im gesamten Frequenzbereich negative Werte der Trittschallminderung zu verzeichnen, was in der Praxis einer Verschlechterung der Trittschalldämmung entspricht. Das bei einer Frequenz von 2500 Hz in den dargestellten Messkurven erkennbare Minimum ist bei allen Proben vorhanden und daher nicht auf die akustischen Eigenschaften der Proben, sondern auf eine Bauteilresonanz innerhalb der Messeinrichtung zurückzuführen.

Um einen besseren Vergleich der für die verschiedenen Proben ermittelten Messergebnisse zu ermöglichen, wurde für die in Abb. 67 dargestellten Frequenzspektren jeweils die bewertete Trittschallminderung berechnet. Die berechneten Werte sind in den Abbildungen 68 - 71 dargestellt, wobei jede der vier Abbildung die Ergebnisse für einen der vier untersuchten Bodenbeläge enthält. Auf der rechten Seite der Abbildungen befindet sich jeweils ein Balkendiagramm, in dem die bewertete Einfügungsdämmung sowohl in grafischer Darstellung als auch als Zahlenwert angegeben ist. Die linke Seite der Abbildungen enthält die zugehörige Legende, in der für jeden der eingezeichneten Balken der Aufbau der zugehörigen Probe in tabellarischer Form beschrieben ist. Alle Balkendiagramme sind im gleichen Maßstab dargestellt, so dass sich die Werte für die verschiedenen Beläge direkt miteinander vergleichen lassen. Bei der Berechnung der bewerteten Trittschallminderung wurde wegen der in Abschnitt 7.1 beschriebenen messtechnischen Grenzen des Versuchsaufbaus nur der eingeschränkte Frequenzbereich von 100 Hz - 1600 Hz berücksichtigt.

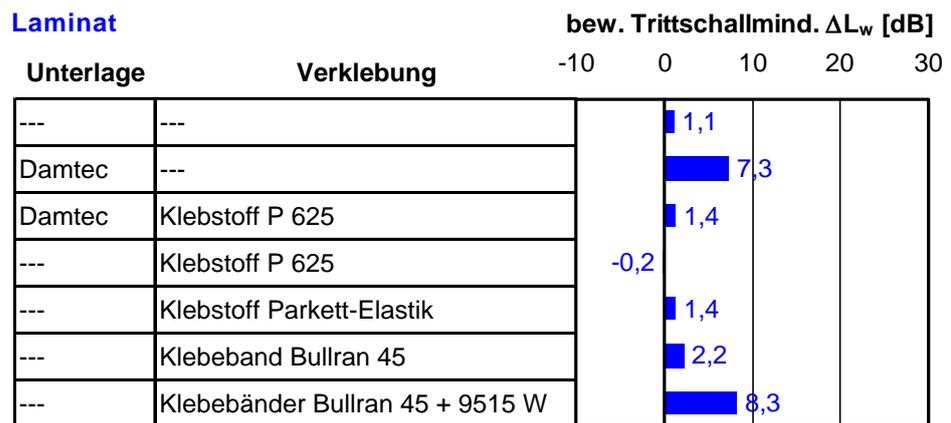
Die Legende zu den Balkendiagrammen umfasst die beiden Spalten "Unterlage" und "Verklebung". Ist in der Spalte "Unterlage" die Bezeichnung "Damtec" eingetragen, so wurde der untersuchte Bodenbelag auf der oben beschriebenen trittschalldämmenden Unterlage Damtec Standard verlegt. Enthält die Spalte hingegen einen Strich, so war keine Dämmunterlage vorhanden. In der Spalte "Verklebung" ist der zur Befestigung des Bodenbelags auf der Decke verwendete Klebstoff aufgeführt. Ein Strich in dieser Spalte bedeutet, dass keine Verklebung erfolgte und der Belag lose auf der Decke bzw. der Dämmunterlage auflag.



**Abb. 67:** Trittschallminderung aller untersuchten Proben in Abhängigkeit von der Frequenz. Das bei 2500 Hz erkennbare Minimum tritt - unabhängig von der Art des Bodenbelags und der Verklebung - in allen Kurven in Erscheinung und ist daher auf eine Resonanz innerhalb des Versuchsaufbaus zurückzuführen. Eine zuverlässige Messung in diesem Frequenzbereich ist nicht mög-

lich. Bei der Auswertung der Messdaten wird deshalb nur der Frequenzbereich von 100 Hz - 1600 Hz (im Bild grün hinterlegt) berücksichtigt.

Aus den in Abb. 68 für den untersuchten Laminatboden dargestellten Messergebnissen geht hervor, dass keiner der verwendeten Klebstoffe eine nennenswerte Trittschallminderung bewirkt. Dies gilt auch für den Klebstoff Parkett-Elastik, der laut Hersteller eine Trittschallminderung von bis zu 14 dB erreichen soll. Eine deutliche Verbesserung der bewerteten Trittschalldämmung in Höhe von ca. 7 - 8 dB ist nur bei Verwendung der Damtec-Unterlage oder bei Verklebung des Belags mit dem doppelseitigen Klebeband 9515 W, das über einen weichelastischen Schaumstoffkern verfügt, vorhanden. Die akustische Wirkung der Damtec-Unterlage bleibt hierbei allerdings - wie im übrigen auch bei allen anderen untersuchten Bodenbelägen - weit hinter den Angaben des Herstellers zurück. Außerdem beschränkt sie sich ausschließlich auf den unverklebten Zustand. Wird die Unterlage mit dem Belag und der Decke verklebt, ist so gut wie keine Wirkung mehr vorhanden. Dies deutet darauf hin, dass die durch die Unterlage bewirkte Trittschallminderung weniger auf die elastischen Eigenschaften des Materials, als vielmehr auf die Kontaktsteifigkeit an den Grenzflächen zwischen Belag und Unterlage sowie Unterlage und Decke zurückzuführen ist. Erläuterungen zur Entstehung der Kontaktsteifigkeit sind Abb. 72 zu entnehmen.



**Abb. 68:** Bewertete Trittschallminderung des untersuchten Laminatbodens für unterschiedliche Arten der Verlegung.

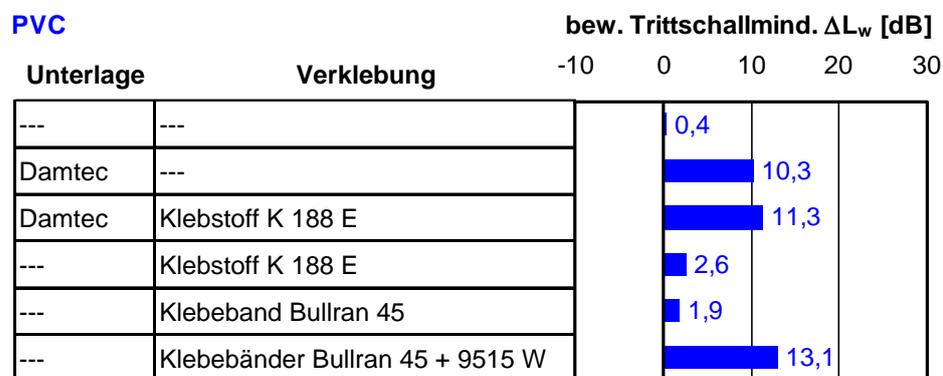
Beim Fliesenbelag in Abb. 69 sind die Ergebnisse noch eindeutiger als beim Laminat. Hier ist bei keinem der untersuchten Klebstoffe - auch nicht beim Klebstoff MG-Flex, der laut Hersteller eine hohe trittschalldämmende Wirkung aufweisen soll - auch nur die geringste Verbesserung der Trittschalldämmung vorhanden. Es tritt sogar im Gegenteil in allen Fällen eine leichte Verschlechterung ein, die allerdings so gering ist, dass sie in der Praxis nur eine untergeordnete Rolle spielt. Eine Befestigung mit Klebeband ist bei Fliesen nicht möglich, so dass hierfür keine Messergebnisse vorliegen. Gleiches gilt auch für die Verlegung in losem Zustand.



**Abb. 69:** Bewertete Trittschallminderung der untersuchten Fliesen für unterschiedliche Arten der Verlegung.

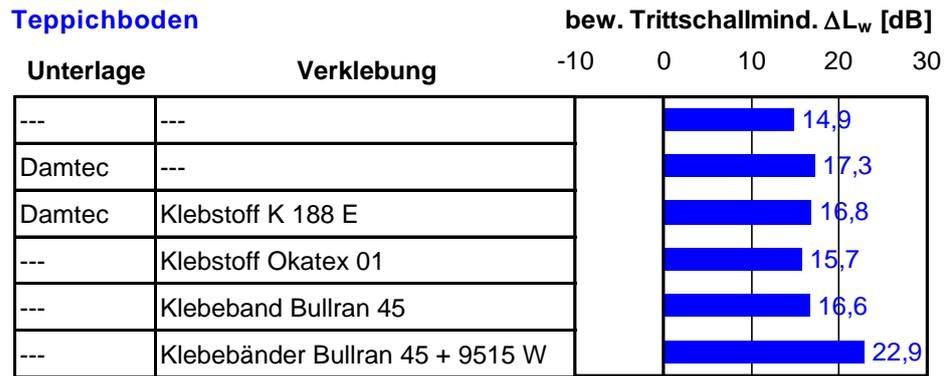
Ein wenig differenzierter stellt sich die Situation für den PVC-Belag in Abb. 70 dar. Bei direkter Verklebung des Belags mit der Decke ist zwar auch hier keine nennenswerte Trittschallminderung vorhanden. Die Damtec-Unterlage erreicht jedoch sowohl in un- verklebtem als auch in verklebtem Zustand eine bewertete Trittschallminderung von jeweils etwa 10 - 11 dB. Noch bessere Werte ergeben sich mit  $\Delta L_w \cong 13$  dB bei Verwendung des doppelseitigen Klebebands 9515 W.

Warum die Damtec-Unterlage im Gegensatz zum Laminat bei Verlegung unter dem PVC-Belag auch in verklebtem Zustand ihre akustische Wirkung beibehält, ist nicht völlig klar. Die Vermutung geht dahin, dass sich das Laminat bei Anregung mit dem Hammerwerk näherungsweise wie eine starre Platte verhält, so dass sich die auf die Dämmunterlage einwirkende Kraft mehr oder weniger gleichmäßig über die gesamte Auflagefläche verteilt. Beim PVC-Boden tritt beim Auftreffen des Hammers hingegen eine starke lokale Verformung ein. Dies führt dazu, dass die Unterlage nur in einem verhältnismäßig kleinen Bereich, jedoch mit entsprechend hoher Kraft belastet wird, wodurch ihre elastischen Eigenschaften besser zur Wirkung kommen.



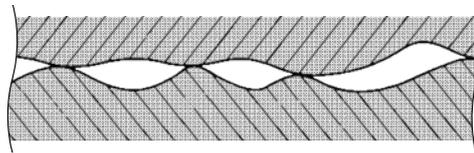
**Abb. 70:** Bewertete Trittschallminderung des untersuchten PVC-Belags für unterschiedliche Arten der Verlegung.

## Teppichboden



**Abb. 71** Bewertete Trittschallminderung des untersuchten Teppichbodens für unterschiedliche Arten der Verlegung.

Die Ergebnisse für den Teppichboden (s. Abb. 71) unterscheiden sich grundlegend von den anderen drei Belägen. Hier ist für sämtliche verwendeten Klebstoffe eine beträchtliche Trittschallminderung in Höhe von  $\Delta L_w \cong 15 - 17$  dB zu verzeichnen. Die Trittschallminderung ist jedoch im wesentlichen auf den Teppichboden selbst zurückzuführen, der so weich ist, dass es akustisch keinen Unterschied bedeutet, ob sich unter dem Teppichboden außerdem noch eine - mehr oder weniger elastische - Klebstoffschicht befindet. Die einzige Ausnahme hiervon bildet das Klebeband 9515 W, das wegen seines Schaumstoffkerns noch weicher als der Teppichboden ist, so dass die bewertete Trittschallminderung mit  $\Delta L_w \cong 23$  dB etwa 6 - 8 dB höher als bei den übrigen Messungen ausfällt.



**Abb. 72:** Entstehung einer Federwirkung zwischen zwei mikroskopisch rauen Oberflächen (Kontaktsteifigkeit). Da sich die Oberflächen nur punktwise berühren, kommt es beim Zusammenpressen an den Kontaktstellen zu lokalen Verformungen des Materials, die eine nichtlineare elastische Rückstellkraft hervorrufen. Hierdurch ergibt sich hinsichtlich der Trittschallübertragung ein ähnliches Verhalten, als wenn zwischen den Flächen eine elastische Dämmschicht vorhanden wäre. Der Effekt lässt sich analog zur dynamischen Steifigkeit von Dämmschichten durch eine der Grenzfläche zugeordnete Kontaktsteifigkeit beschreiben.

## 7.5 Resümee

Die zur Untersuchung der Trittschallminderung elastisch verklebter Bodenbeläge verwendete Messvorrichtung lieferte zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse. Allerdings ist der nutzbare Frequenzbereich auf maximal etwa 1600 Hz begrenzt, so dass auch die zur Berechnung der bewerteten Trittschallminderung verwendete Formel entsprechend modifiziert werden musste (normalerweise wird hierfür der Frequenzbereich

von 100 Hz - 3150 Hz verwendet). Aufgrund des unterschiedlichen Frequenzbereichs unterscheiden sich die ermittelten Ergebnisse teilweise ein wenig von den gewohnten Werten. Der Aussagekraft der Messungen tut dies jedoch keinen Abbruch, da im Rahmen des durchgeführten Forschungsvorhabens im Wesentlichen nur die Vergleichbarkeit der Messwerte untereinander von Bedeutung ist. Die wichtigsten Untersuchungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bei direkter Verklebung des Bodenbelags auf der Decke wurde für keinen der verwendeten Klebstoffe - einschließlich der von den Herstellern als Schallschutzmaterialien ausgewiesenen Produkte - eine nennenswerte Verbesserung der Trittschalldämmung festgestellt. Dies galt ausnahmslos für alle untersuchten Bodenbeläge (Laminat, Fliesen, PVC und Teppichboden).
- Die Verlegung des Bodenbelags auf einer trittschalldämmenden Unterlage ergab für Laminat und PVC eine bewertete Trittschallminderung von 7 bzw. 11 dB, wobei sich die akustische Wirkung der Unterlage bei Laminat ausschließlich auf den unverklebten Zustand beschränkte. Bei Teppichboden und bei Fliesen erwies sich die Unterlage als nahezu wirkungslos. Die gemessene Trittschallminderung blieb in allen Fällen weit hinter den Angaben des Herstellers zurück.
- Als überraschend vielseitiges und wirkungsvolles Schallschutzprodukt erwies sich das untersuchte doppelseitige Schaumstoffklebeband, obgleich es eigentlich gar nicht für die Verwendung im Bereich des baulichen Schallschutzes vorgesehen ist. Aufgrund der geringen Steifigkeit des weichelastischen Schaumstoffkernes wurde bei allen Belägen, die sich mit dem Band verkleben ließen (bei den Fliesen war der Einsatz des Bandes selbstverständlich nicht möglich), im Vergleich zu den anderen untersuchten Klebstoffen eine Verbesserung der bewerteten Trittschallminderung um ca. 6 - 11 dB erreicht.
- Die obigen Ausführungen beziehen sich auf die Verlegung des Bodenbelags auf einer massiven Rohdecke. Erfolgt die Verlegung statt dessen auf einer Decke in Leicht- oder Holzbauweise oder auf einem schwimmenden Estrich, fällt die Trittschallminderung des Belags unabhängig von der Art der Verlegung deutlich geringer aus.

## 8 Zusammenfassung

In dem durchgeführten Forschungsvorhaben wurden die schall- und schwingungstechnischen Eigenschaften elastischer Kleb- und Dichtstoffe untersucht. Den ersten Arbeitsschritt des Vorhabens bildeten eine Bestandsaufnahme der derzeit verfügbaren Produkte und die Entwicklung geeigneter Mess-, Bewertungs- und Prognoseverfahren. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse dienten als Ausgangspunkt zur Entwicklung verbesserter Applikationstechniken und akustisch optimierter Materialien, die anschließend einer akustischen Erprobung unterzogen wurden.

Die Vielzahl unterschiedlicher Kleb- und Dichtstoffe und ihr breiter Einsatzbereich in Technik und Bauwesen machten es erforderlich, die Untersuchungen exemplarisch auf repräsentative bauübliche Anwendungsfälle zu konzentrieren. Wegen ihrer Bedeutung

für den baulichen Schallschutz wurde der Untersuchungsschwerpunkt dabei vor allem auf Körperschallisolierende Fugendichtungen im Sanitärbereich (Dichtung zwischen Wanne und Installationswand) sowie die Trittschallminderung elastisch verklebter Bodenbeläge gelegt.

Die für das Forschungsvorhaben erforderlichen experimentellen Untersuchungen wurden unter Verwendung von vier verschiedenen Messvorrichtungen durchgeführt. Da spezielle messtechnische Anforderungen bestanden, zu denen noch keine Erfahrungen vorlagen, mussten die benötigten Versuchseinrichtungen größtenteils neu entwickelt und aufgebaut werden. Dies betraf zum einen die Bestimmung der akustisch maßgeblichen Materialeigenschaften der untersuchten Dichtstoffe und zum anderen die Messung der Körper- und Trittschallübertragung unter praxisnahen experimentellen Bedingungen.

Die mit den verschiedenen Aufbauten ermittelten Messergebnisse bildeten den Mittelpunkt der durchgeführten Untersuchungen, aus dem heraus die erforderlichen Beurteilungs- und Berechnungsverfahren entwickelt und Kriterien zur akustischen Optimierung der untersuchten Fugendichtungen abgeleitet wurden. In den Prozess der Optimierung wurden sowohl die Herstellung und die geometrische Form der Dichtungen als auch die verwendeten Dichtstoffe einbezogen. Die Entwicklung und Fertigung der akustisch optimierten Dichtstoffe erfolgten durch die Henkel AG, die als Industriepartner an dem Forschungsvorhaben beteiligt war. Die wichtigsten Ergebnisse des Vorhabens lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Mit der bewerteten Einfügungsdämmung  $D_{e,w}$ , einer im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelten Einzahlangabe, steht ein geeigneter Maßstab zur Beurteilung der Körperschallisolierenden Wirkung von Fugendichtungen in der baulichen Praxis zur Verfügung. Die bewertete Einfügungsdämmung wird rechnerisch aus dem dynamischen Elastizitätsmodul und dem Verlustfaktor des verwendeten Dichtstoffs ermittelt und gibt an, welche Minderung ein Installationsgeräusch erfährt, wenn die Körperschallübertragung statt über eine starre Verbindung über eine elastische Fugendichtung mit einem quadratischen Querschnitt von 10 mm x 10 mm erfolgt.
- Die Körperschallisolation von Fugendichtungen hängt sowohl von den elastischen Eigenschaften des verwendeten Dichtstoffs als auch von der geometrischen Form der Dichtung ab. Um eine hohe Körperschallisolation zu erreichen, ist daher sowohl ein geeigneter Dichtstoff als auch eine akustisch geeignete Formgebung erforderlich.
- Bei dem verwendeten Dichtstoff ist in erster Linie ein geringer dynamischer Elastizitätsmodul anzustreben. Ein niedriger Verlustfaktor ist akustisch gleichfalls vorteilhaft, hat aber gegenüber dem Elastizitätsmodul nur nachrangige Priorität.
- Die geometrische Form der Fugendichtung wirkt sich (bei annähernd rechteckigem Querschnitt) vor allem über das Verhältnis zwischen Höhe und Breite auf die Schallübertragung aus. Je kleiner dieses Verhältnis ist, desto weniger Körperschall wird übertragen. Natürlich sind der geometrischen Optimierung von Fugendich-

tungen in der Praxis durch die vorhandenen baulichen Randbedingungen Grenzen gesetzt.

- Der Einfluss der geometrischen Form auf die bewertete Einfügungsdämmung von Fugendichtungen wird durch ein auf Grundlage der ermittelten Messergebnisse entwickeltes Berechnungsmodell beschrieben. Die Anwendung des Modells setzt allerdings voraus, dass die Dichtung einen annähernd rechteckigen Querschnitt aufweist.
- Der dynamische Elastizitätsmodul marktüblicher Dichtstoffe liegt etwa im Bereich von  $E_{\text{dyn}} = 1 - 23 \text{ N/mm}^2$ , was einer bewerteten Einfügungsdämmung von  $D_{\text{e,w}} = 2 - 20 \text{ dB}$  entspricht. Durch den Einsatz akustisch optimierter Materialien mit niedrigem Elastizitätsmodul lässt sich dieser Wert bis auf maximal etwa 25 dB verbessern. Die hierzu erforderlichen Voraussetzungen erfüllen normalerweise nur Materialien auf der Basis von Silikon.
- Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein neuartiger Dichtstoff aus Acetat-Silikon entwickelt, der mit  $E_{\text{dyn}} = 0,34 \text{ N/mm}^2$  einen erheblich niedrigeren Elastizitätsmodul als herkömmliche Dichtstoffe aufweist. Der resultierende Wert für die bewertete Einfügungsdämmung beträgt  $D_{\text{e,w}} = 22,2 \text{ dB}$ , was einer Verbesserung von etwa 2 dB gegenüber dem höchsten bislang ermittelten Wert entspricht. Im Vergleich zu einem Silikon-Dichtstoff mit durchschnittlicher akustischer Qualität ergibt sich eine Verbesserung von mehr als 5 dB.
- Obgleich bei der Materialentwicklung beträchtliche akustische Fortschritte erzielt wurden, ist der vorhandene Optimierungsspielraum noch nicht völlig ausgeschöpft. Ein weitere Verbesserung der Körperschallisolation kann entweder durch erneutes Absenken des Elastizitätsmoduls oder durch Verminderung des mit  $\eta = 0,13$  noch recht hohen Verlustfaktors des entwickelten Dichtstoffs erfolgen.
- Elastische Fugenbänder stellen ein gut geeignetes Hilfsmittel dar, um bei der Herstellung von Fugendichtungen eine akustisch günstige Formgebung zu gewährleisten. Da die Bänder nach Fertigstellung der Dichtung in der Fuge verbleiben, ist jedoch darauf zu achten, sie beim Einbau nicht zu stark zu komprimieren. Ansonsten entsteht ein zusätzlicher Schallübertragungsweg, der die Körperschallisolation erheblich herabsetzen kann.
- Werden Bodenbeläge direkt auf die Decke aufgeklebt, so bringt die Verwendung elastischer Klebstoffe fast keine akustischen Vorteile. Dies gilt für alle untersuchten Bodenbeläge (Laminat, Fliesen, PVC und Teppichboden) sowie sämtliche verwendeten Klebstoffe, einschließlich der von den Herstellern als Schallschutzmaterialien ausgewiesenen Produkte.
- Zur wirksamen Verbesserung der Trittschalldämmung ist die Verlegung des Bodenbelags auf einer trittschalldämmenden Unterlage erforderlich. Allerdings gilt dies nicht für alle Arten von Belägen (so ist z. B. bei Teppichböden fast keine akustische Wirkung vorhanden) und die Angaben der Hersteller zur Trittschallminderung der Dämmunterlagen erscheinen vielfach zu hoch gegriffen.
- Als überraschend vielseitiges und wirkungsvolles Schallschutzprodukt erwies sich doppelseitiges Schaumstoffklebeband. Aufgrund der Nachgiebigkeit des weichelastischen Schaumstoffkernes verhält sich das Band in akustischer Hinsicht wie eine

schalldämmende Unterlage. Bei allen Bodenbelägen, die sich mit dem Band verkleben ließen (bei Fliesen war dies selbstverständlich nicht der Fall), lag die bewertete Trittschallminderung um ca. 6 - 11 dB über den Werten der anderen Klebstoffe.

Ogleich noch weiterer akustischer Optimierungsspielraum besteht, kann das Forschungsvorhaben im Bereich Körperschallisolierender Fugendichtungen in seinen wesentlichen Punkten als abgeschlossen angesehen werden. Die maßgebenden akustischen Einflussgrößen sind bekannt und es stehen geeignete Analyse- und Planungswerkzeuge sowohl für die Produktentwicklung als auch für den Einsatz in der baulichen Praxis zur Verfügung. Bei Anwendung aller vorgeschlagenen Verbesserungsmaßnahmen (Einsatz eines akustischen optimierten Dichtstoffs und akustisch geeignete Formgebung der Fugendichtung) ist gegenüber der derzeit üblichen Bauweise bezogen auf die bewertete Einfügungsdämmung eine Verbesserung der Körperschallisolation um ca. 5 - 8 dB erreichbar.

Der Bereich elastisch verklebter Bodenbeläge konnte nicht mit gleicher Ausführlichkeit bearbeitet werden, wie dies bei den Fugendichtungen der Fall war. Daher bestehen hier noch Kenntnislücken, die viele Fragen offen lassen. Die bisherigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich mit elastischen Klebstoffen normalerweise keine nennenswerte Verbesserung der Trittschalldämmung erreichen lässt. Andererseits wurden bislang nur vollflächig verklebte Beläge mit vergleichsweise geringer Dicke der Klebstoffschicht betrachtet. Durch Verminderung der Klebefläche und erhöhte Dicke der Klebstoffschicht lässt sich die akustische Wirkung möglicherweise verbessern. Zur Klärung dieser Frage sind jedoch noch weitere Untersuchungen erforderlich.

## 9 Literatur

- [1] DIN 4109/A1: Schallschutz im Hochbau - Anforderungen und Nachweise, Änderung A1 (Januar 2001).
- [2] SIA 181: Schallschutz im Hochbau (Schweizer Norm SN 520 181, Januar 2006).
- [3] Hermann, A.: Trittschalldämmung austauschbarer Bodenbeläge. Diplomarbeit an der Universität Stuttgart und am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (2012).
- [4] Koehler, M.: Trittschalldämmung austauschbarer Bodenbeläge - Vergleich der akustischen Wirkung bei Anregung mit unterschiedlichen praxisnahen Trittschallquellen mittels akustischer Messungen und Hörversuche. MOB Master-Thesis an der Universität Stuttgart und am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (2012).
- [5] Sarikaya, C.: Körperschallübertragung von Fugendichtstoffen. Diplomarbeit an der Universität Stuttgart und am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (2002).
- [6] Weber, L.; Sarikaya, C.; Öhler, S.; Mohr, J.; Spiegel, C.: Schallübertragung durch Silikonfugen. DAGA 2011, Tagungsband, S. 749 - 750.
- [7] Öhler, S.; Weber, L.: Leise duschen in der Ebene. TrockenBau Akustik 11.2010, S. 39 - 42.

- [8] Öhler, S.; Weber, L.; Spiegel, C.; Sarikaya, C.: Akustik aus den Sanitärfugen. TrockenBau Akustik 11.2011, S. 59 - 63.
- [9] Öhler, S.; Weber, L.: Leiser Duschen. Fliesen & Platten 2.2011, S. 42 - 45.
- [10] Öhler, S.; Weber, L.: Die Fuge als Lücke im System. Fliesen & Platten 9.2011, S. 28 - 33.
- [11] Spiegel, C.: Körperschallisolation elastischer Kleb- und Dichtstoffe. Bachelor-Thesis an der Hochschule für Technik, Stuttgart und am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (2011).
- [12] Kaltbeitzel, B.: Entwicklung einer Messvorrichtung für den dynamischen Elastizitätsmodul und den Verlustfaktor von Kunststoffen, Bachelor-Thesis an der Universität Stuttgart und am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (2012).
- [13] Stephenson, U.: Untersuchung der Eigenschaften dauerelastischer Dichtungsmaßnahmen zur Körperschallisolation von Fugenkonstruktionen im Hochbau. IBP Bericht BS 140/86, 2. Auflage, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (1988).
- [14] Stephenson, U.; Ertel, H.: Messung dynamischer Elastizitätsmodule viscoelastischer Stoffe - auch bei höheren Frequenzen. IBP-Mitteilung 120 (1986).
- [15] Stephenson, U.: Körperschallübertragung durch Fugendichtstoffe. IBP-Mitteilung 121 (1986).
- [16] DIN EN ISO 10846-1: Akustik und Schwingungstechnik - Laborverfahren zur Messung der vibro-akustischen Transfereigenschaften elastischer Elemente - Teil 1: Grundlagen und Übersicht (November 2008).
- [17] DIN EN ISO 10846-2: Akustik und Schwingungstechnik - Laborverfahren zur Messung der vibro-akustischen Transfereigenschaften elastischer Elemente - Teil 2: Direktes Verfahren zur Ermittlung der dynamischen Steifigkeit elastischer Stützelemente bei Anregung in translatorischer Richtung (November 2008).
- [18] DIN EN ISO 10846-3: Akustik und Schwingungstechnik - Laborverfahren zur Messung der vibro-akustischen Transfereigenschaften elastischer Elemente - Teil 3: Indirektes Verfahren für die Bestimmung der dynamischen Steifigkeit elastischer Elemente für translatorische Schwingungen (Juni 2003).
- [19] DIN EN ISO 10846-4: Akustik und Schwingungstechnik - Laborverfahren zur Messung der vibro-akustischen Transfereigenschaften elastischer Elemente - Teil 4: Bestimmung der dynamischen Transfersteifigkeit von elastischen Elementen mit Ausnahme elastischer Stützelemente für translatorische Schwingungen (Februar 2004).
- [20] DIN EN ISO 6721-1: Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundlagen (August 2011).
- [21] DIN EN ISO 6721-2: Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften - Teil 2: Torsionspendel-Verfahren (September 2008).

- [22] DIN EN ISO 6721-3: Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften - Teil 3: Biegeschwingung; Resonanzkurven-Verfahren (Dezember 1996).
- [23] ISO 6721-4: Plastics - Determination of dynamic mechanical properties - Part 4: Tensile vibration - Non-resonance method (Mai 2008).
- [24] DIN 53513: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren, Bestimmung der viskoelastischen Eigenschaften von Elastomeren bei erzwungenen Schwingungen außerhalb der Resonanz (März 1990).
- [25] DIN EN 29052-1: Akustik, Bestimmung der dynamischen Steifigkeit, Teil 1: Materialien, die unter schwimmenden Estrichen in Wohngebäuden verwendet werden (August 1992).
- [26] Cremer, L.; Heckl, M.: Körperschall - Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage (1996).
- [27] Schirmer, W. (Herausgeber): Technischer Lärmschutz: Grundlagen und praktische Maßnahmen zum Schutz vor Lärm und Schwingungen von Maschinen. Springer-Verlag, Berlin (2006).
- [28] Veit, I.: Elastizitätsmodul  $E$  und Verlustfaktor  $\eta$ . TrockenBau Akustik 10.2011, S. 34 - 37.
- [29] Jaouen, L.; Renault, A.; Deverge, M.: Elastic and damping characterizations of acoustical porous materials: Available experimental methods and applications to a melamine foam (Review). Applied Acoustics 69 (2008), S. 1129 - 1140.
- [30] Sinambari, G. R.: Körperschallisolierung unter Berücksichtigung der mechanischen Eingangsimpedanz. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 43 (1996), S. 45 - 49.
- [31] Sinambari, G. R.: Ein erweiterter Ansatz zur Schwingungs- und Körperschallisolierung, Teil 1: Schwingungsisolierung. Lärmbekämpfung 6 (2011), Nr. 2, S. 60 - 67.
- [32] Sinambari, G. R.: Ein erweiterter Ansatz zur Schwingungs- und Körperschallisolierung, Teil 2: Körperschallisolierung. Lärmbekämpfung 6 (2011), Nr. 3, S. 103 - 109.
- [33] Ljunggren, F.: Long-term effects of elastic glue in lightweight timber constructions. Tagungsband Forum Acusticum 2001, European Acoustics Association, ISBN: 978-84-694-1520-7, S. 1685 - 1688.
- [34] Battermann, W.; Köhler, R.: Elastomere Federung - Elastische Lagerungen, Grundlagen ingenieurmäßiger Berechnung und Konstruktion. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (1982).
- [35] Payne, A. R.: Shape Factors and Functions in Rubber Engineering. The Engineer, 06.03.1959, S. 368 - 370.
- [36] Becker, G. W.: Über das dynamisch-elastische Verhalten geschäumter Stoffe, Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Acustica Vol. 9 (1959), S. 135 - 143.

- [37] Schwarz, V.: Bewertung von Bodenbelagssystemen hinsichtlich Trittschallminderung und Abstrahlung von Gehschall in den Senderraum unter Berücksichtigung von keramischen Oberbelägen. MOB Master-Thesis an der Universität Stuttgart und am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (2012).
- [38] VDI 3727 Blatt 1: Schallschutz durch Körperschalldämpfung, Physikalische Grundlagen und Abschätzungsverfahren (Februar 1984).
- [39] VDI 3727 Blatt 2: Schallschutz durch Körperschalldämpfung, Anwendungshinweise (November 1984).
- [40] De Vos, J.: Körperschalldämpfung bei plattenförmigen Bauteilen aus unterschiedlichem Material. Master-Thesis an der Universität Stuttgart, an der TU Berlin und am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (2013).
- [41] Oberst, H.; Frankenfeld, K.: Über die Dämpfung der Biegeschwingungen dünner Bleche durch fest haftende Beläge. *Acustica* (1952), H. 4, S. AB181 - AB194.
- [42] Becker, G. W.: Mechanische Relaxationserscheinungen in nicht weichgemachten hochpolymeren Kunststoffen. *Kolloid-Zeitschrift*, Band 140 (1955), H. 1, S. 1 - 32.
- [43] Dietzel, R.: Zur Bestimmung des Verlustfaktors von eingezwängten Dämpfungsbelägen auf dünnen Blechen. *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik*, Band 76 (1967), H. 5, S. 151 - 162.
- [44] Dietzel, R.: Vergleichende Untersuchungen über den Verlustfaktor einfacher und eingezwängter Dämpfungsbeläge auf dünnen Blechen. *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik*, Band 76 (1967), H. 6, S. 189 - 197.
- [45] DIN EN 15657-1: Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden - Messung des Luft- und Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand - Teil 1: Vereinfachte Fälle in denen die Admittanzen der Anlagen wesentlich höher sind als die der Empfänger am Beispiel von Whirlwannen (Oktober 2009).
- [46] DIN EN ISO 10140-1: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 1: Anwendungsregeln für bestimmte Produkte (Dezember 2010).
- [47] DIN EN ISO 10140-3: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 3: Messung der Trittschalldämmung (Dezember 2010).
- [48] DIN EN ISO 717-2: Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 2: Trittschalldämmung (Juni 2013).
- [49] E DIN EN ISO 16251-1: Akustik - Labormessung der Trittschallminderung von Deckenauflagen auf kleinflächigen Prüfdeckennachbildungen - Teil 1: Schwere Masivdecke (Mai 2012).

## 10 Danksagung

Wir bedanken uns beim Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) für die finanzielle Förderung des durchgeführten Forschungsvorhabens. Die Untersuchungen erfolgten in Zusammenarbeit und mit Unterstützung der Henkel AG, bei der wir

uns für die technische Beratung zu Verarbeitung und Anwendung der untersuchten Dichtstoffe, die Entwicklung und Herstellung akustisch verbesserter Materialien sowie die Bereitstellung der für das Forschungsvorhaben benötigten Proben bedanken.