

# Bauakustische Dämpfungseffekte – Untersuchungen eines in-situ-Verfahrens zur Dämpfungsmessung an Bauteilen mittels Pulsen

Christoph Kling

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), 38116 Braunschweig, Deutschland, Email: Christoph.Kling@ptb.de*

## Einleitung

Der Einfluss von Dämpfungseffekten auf Messgrößen wie das Schalldämmmaß ist ein aktuelles Thema in der Bauakustik. Eine messtechnische Erfassung der Dämpfungsmechanismen gestaltet sich jedoch als schwierig, da nicht für alle Effekte Verfahren existieren, mit denen am eingebauten Bauteil ein Verlustfaktor oder Ähnliches gemessen werden kann. Insbesondere der Verlustfaktor für die Materialdämpfung und der Stoßstellenverlust können nur aus separaten Experimenten [1], Literaturangaben oder Modellrechnungen erlangt werden. Solche Quellen liefern oft keine verlässlichen Werte, geben keine Frequenzabhängigkeit im benötigten Bereich an oder gestatten nicht die Untersuchung an den vorliegenden Baumaterialien. Wünschenswert wäre daher ein Verfahren, das direkt am eingebauten Objekt die Messung von Materialdämpfung und Stoßstellendämpfung in situ erlaubt.

Im Ultraschallbereich werden mitunter kurze Wellenpulse eingesetzt, die durch das Prüfobjekt laufen und aus deren Laufzeit und Veränderung auf die Eigenschaften des Mediums geschlossen wird. Da die Frequenzen in der Bauakustik typischerweise um den Faktor 100 kleiner sind als im Ultraschall, wird die räumliche Ausdehnung eines Pulses so groß wie das Prüfobjekt selbst. Hinzu kommt, dass die für die Bauakustik wichtigen BiegeWellen Dispersion aufweisen.

Die vorliegende Arbeit stellt ein theoretisches Modell zur Behandlung von Pulsen in einem dispersiven Medium vor und zeigt in einem Experiment, dass mit der Beobachtung von Pulsen auch im bauakustischen Frequenzbereich Messungen von Gruppengeschwindigkeiten und Materialdämpfung möglich sind.

## Theoretisches Modell für die Pulsausbreitung

Die hier verwendeten Pulse besitzen Gaußform. Neben dem Vorteil einer einfachen mathematischen Behandlung, trifft ein gaußförmiger Puls das Minimum der Unschärferelation zwischen Pulsdauer im Zeitbereich und Bandbreite im Frequenzbereich.

Ausgangspunkt für die theoretische Betrachtung ist die Definition der Fouriertransformation eines Spektrums  $H(\omega)$ , ergänzt um einen Faktor  $e^{-ikx}$ , der die Ausbreitung des Wellenpulses in positive x-Richtung beschreibt:

$$h(x,t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) e^{i(\omega t - kx)} d\omega \quad (1)$$

Das Spektrum  $H(\omega)$  stellt einen Gaußpuls der Bandbreite  $\Delta\omega$  um die Mittenfrequenz  $\omega_0$  dar. Die in der Bauakustik vorherrschenden BiegeWellen weisen eine Dispersion  $k \sim \sqrt{\omega}$  auf. Da sich mit diesem Ansatz für die Wellenzahl das Integral aus Gleichung (1) einer einfachen Lösung entzieht, wird eine Näherung nach Taylor bis zum linearen Glied vorgenommen:

$$\begin{aligned} k(\omega) &\approx k(\omega_0) + \left. \frac{dk}{d\omega} \right|_{\omega_0} \cdot (\omega - \omega_0) \\ &= k_0 + k_1 \cdot \omega \end{aligned} \quad (2)$$

$\omega$  bezeichnet die um die Mittenfrequenz verschobene Frequenz eines um Null symmetrischen Gaußspektrums  $\Psi(\omega)$ . Mit der Berücksichtigung der Dämpfung durch eine komplexe Wellenzahl  $k = k' + ik''$  wird für  $k$  insgesamt folgender Ansatz getroffen:

$$k(\omega) \approx (k'_0 + ik''_0) + (k'_1 + ik''_1) \cdot \omega \quad (3)$$

Einsetzen von (3) in (1) liefert nach kurzem Umformen folgendes Bild des Pulses am Ort  $x$ :

$$h(x,t) = \frac{1}{2\pi} e^{i(\omega_0 t - k'_0 x)} \cdot e^{k''_0 x} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(\omega) e^{k'_1 \omega x} \cdot e^{i\omega(t - k''_1 x)} d\omega \quad (4)$$

Der erste Faktor in (4) beschreibt die Trägerwelle des Pulses. Der zweite Faktor gibt die Dämpfung des Pulses bei der Mittenfrequenz  $\omega_0$  wieder. Der Term  $t - k'_1 x$  im Exponenten der letzten Exponentialfunktion zeigt die Ausbreitung des Pulses mit der Geschwindigkeit  $c_g = 1/k'_1$ . Der Term  $e^{k''_1 \omega x}$  verformt das ursprüngliche Pulsspektrum  $\Psi(\omega)$ , und zwar um so mehr, je weiter der Puls sich vom Ausgangspunkt  $x = 0$  entfernt.

Gleichung (4) soll als Modell für die Pulsausbreitung für das folgende Experiment gelten. Die Dispersion der BiegeWelle wird darin nur insoweit berücksichtigt, als dass alle Frequenzen eines Gaußpulses sich mit der Gruppengeschwindigkeit der Pulsmitte ausbreiten. Dieser Ansatz ist tragbar, solange die Bandbreite im Verhältnis zur Änderung der Gruppengeschwindigkeit klein ist, sprich für schmale Pulse.

## Experiment an einem bekannten Stab

Als Prüfobjekt dient ein Stab aus Acrylglas von 25mm x 25mm x 3m, der waagrecht an dünnen Fäden aufgehängt und seitlich von einem Shaker angeregt wird. Der Stab zeigt keine zusätzliche Dämpfung durch geometrische Verdünnung wie eine Platte. Die frequenzabhängigen

Stoffeigenschaften des Acrylglases sind aus einem anderen Experiment [1] bekannt.

Eine Phalanx von vier Beschleunigungsaufnehmern, untereinander im Abstand von 10cm, ist auf dem Stab, 30cm vom Shaker entfernt, befestigt. An der Ankopplung des Shakers sitzt ein Referenzempfänger. Die gesamte Anordnung ist etwa in der Mitte des Stabes untergebracht.

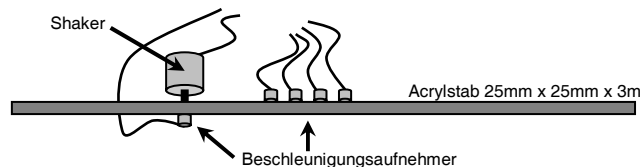


Abbildung 1: Skizze der Messanordnung auf dem Stab.

Anstatt direkt einen Gaußpuls mit dem Shaker durch den Stab zu schicken, wird die Impulsantwort unter Nutzung von Sweepsignalen vom Referenzaufnehmer zu den restlichen Aufnehmern gemessen. Nachträglich wird die Impulsantwort mit Gaußpulsen verschiedener Bandbreiten und Mittenfrequenzen gefaltet.

Von der gaußgefilterten Impulsantwort wird im weiteren nur die Einhüllende verwendet, die Trägerwelle aus Gleichung (4) also ausgeblendet. Die 3dB-Bandbreiten der Gaußfilter werden so gewählt, dass sie in etwa eine Terz abdecken. Der Direktpuls kann damit gut von den nachkommenden Reflexionen getrennt werden. Der isolierte Direktpuls wird mit einem Optimierungsalgorithmus nach Levenberg-Marquardt an einen Gaußpuls gefittet. Eine Berücksichtigung des Verformungstermes aus Gleichung (4) erweist sich als unnötig. Die Auswertung aller vier Aufnehmer mit demselben Gaußfilter liefert vier Pulse, die zeitlich verschoben sind und in der Amplitude abnehmen. Aus den je drei Parametern der vier angefitteten Gaußpulse können Gruppengeschwindigkeit und Verlustfaktor im Stab ermittelt werden.

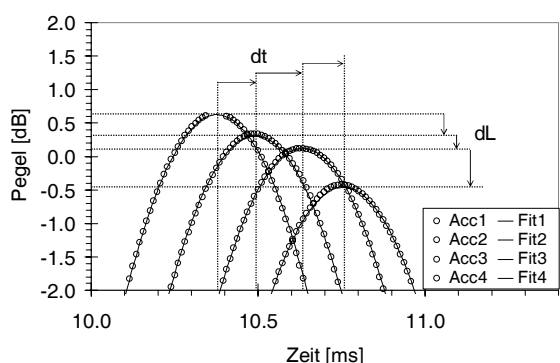


Abbildung 2: Fit und Auswertung der vier Gaußpulse zu der Aufnehmerphalanx am Beispiel der 2kHz-Terz.

Die Auswertung wurde für sechs Gaußpulse in Terzbandbreite um die Mittenfrequenzen 250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz und 8kHz vorgenommen. Zu höheren Frequenzen ist die eingesetzte Messtechnik nicht mehr zuverlässig. Die untere Frequenzgrenze ist durch die zunehmende räumliche Ausdehnung der Gaußpulse gegeben. Dem kann jedoch durch eine Erhöhung der Bandbreite des

Gaußpulses begegnet werden, so dass der gesamte bauakustische Frequenzbereich abgedeckt werden kann.

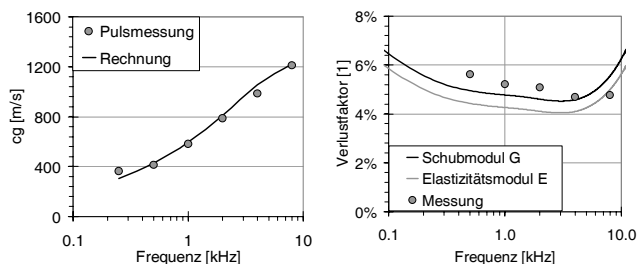


Abbildung 3: Vergleich der ermittelten Gruppengeschwindigkeiten (links) und Verlustfaktoren (rechts) mit einer Berechnung aufgrund von Materialdaten aus einem anderen Experiment.

Der Vergleich der ermittelten Gruppengeschwindigkeiten und Verlustfaktoren mit aus [1] berechneten Werten zeigt eine gute Übereinstimmung. Da hier zwei völlig unabhängige und verschiedene Experimente miteinander verglichen werden, kann das Ergebnis als Verifizierung des Messverfahrens gelten.

### Ausblick

Das Experiment am Stab zeigt, dass die Verfolgung von Biegewellen-Gaußpulsen und somit die Bestimmung der dynamischen Eigenschaften des Bauteils möglich ist. Das Verfahren sollte auf massive Platten übertragbar sein. Eine Abschätzung zeigt, dass die Biegeschwindigkeit auf einer 15cm dicken Betonplatte etwa dreimal größer ist. Geht man davon aus, dass die kleinste Kante einer solchen Platte nicht kürzer ist als der hier untersuchte Stab, so werden sich mit einer Erhöhung der Pulsbandbreite von Terzen auf ganze Oktaven die Reflexionen ebenso gut vom Direktpuls trennen lassen wie im vorgestellten Experiment. Außerdem bietet der hier benutzte Aufbau noch diverse Möglichkeiten zur Erweiterung des Frequenzbereichs und Verringerung der Messunsicherheit.

Ferner ist es denkbar, aus einem Vergleich von Gaußpulsen vor und nach einer Reflexion auf die Verluste an einer Reflexionsstelle zu schließen, ähnlich wie im Luftschall [2]. Im Stabexperiment ließ sich zum Teil die erste Reflexion noch recht gut von den späten diffus verlaufenden Reflexionen trennen. Hiermit ist die Grundlage für eine direkte Messung der Stoßstellendämpfung gegeben.

### Literatur

[1] Kling, C.; Schmelzer, M.: Ermittlung der Materialdämpfung mit Hilfe eines N-Parameter-Modells. Fortschritte der Akustik, DAGA 2006 München, Deutsche Gesellschaft für Akustik.

[2] Mommertz, E., Kock G.: In-situ-Absorptionsmessung von Lärmschutzwänden an Strecken der Deutschen Bahn AG. Fortschritte der Akustik, DAGA 1997, Deutsche Gesellschaft für Akustik.