

Berechnung der Luftschalldämmung von zweischaligen Bauteilen aus biegeweichen Schalen

Von Kühn + Blickle, Institut für Lärmschutz, Unterägeri ZG

Der nachstehende Bericht befasst sich mit einem teilweise neuartigen Berechnungsmodell, welches erlaubt, die Luftschalldämmung von beliebigen zweischaligen Bauteilen mit biegeweichen Schalen vorherzuberechnen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es mit relativ kleinem Berechnungsaufwand möglich ist, Luftschalldämmkurven doppelschaliger Trennwände mit ausreichender Genauigkeit zu berechnen. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, verschiedene Trennwände rasch miteinander zu vergleichen oder eventuell konstruktive Änderungen rechnerisch zu beurteilen.

Problemstellung

In Anbetracht der zunehmenden Lärmimmissionen und der steigenden Sensibilisierung des Menschen gegenüber Umwelteinflüssen jeglicher Art stellt sich immer häufiger die Frage, wie die einzelnen Gebäudeteile optimal zu konstruieren sind, damit der Mensch in seinen vier Wänden ausreichend geschützt wird. Es ist unmöglich, diese Frage mit ein paar konstruktiven Angaben zu beantworten. Was eindeutig angegeben werden kann, ist höchstens die erforderliche Schalldämmung, welche die Gebäudeteile aufweisen müssen, damit sich der Mensch ungestört und unbelästigt fühlt.

Die erforderliche Schalldämmung einer Fassade oder einer Trennwand zwischen zwei Räumen hängt in erster Linie von der auf das Bauteil einwirkenden Schallenergie (Immission) und dem allgemeinen Umgebungsgeräusch in dem zu schützenden Raum ab. Schlafzimmer müssen demnach einen weit höheren Schallschutz aufweisen als Räume, in denen gearbeitet wird. Steht die erforderliche Luftschalldämmung einmal fest, muss abgeklärt werden, mit was für einer Art raumteilenden Wänden oder Decken sie zu erreichen ist. Bei diesen Abklärungen sind nicht nur akustische, sondern auch wärmetechnische, statische usw. und natürlich auch wirtschaftliche Gesichtspunkte gleichermaßen zu berücksichtigen.

Eine optimale Auslegung der verschiedenen Bauteile unter Berücksichtigung obiger Gesichtspunkte kann nur unter Zuhilfenahme von Berechnungsmodellen erfolgen. Die Gegebenheiten dürfen dabei aber nicht zu stark idealisiert werden, ansonsten die Gefahr besteht, dass die Modelle unrealistische Berechnungsergebnisse liefern.

Mathematische Modelle zur Berechnung der Luftschalldämmung

Während die Theorie zur Berechnung der Luftschalldämmung einschaliger Bauteile

in den letzten Jahrzehnten so weit entwickelt worden ist, dass mit ihrer Hilfe sämtliche in der Praxis vorkommenden Fälle mit grosser Genauigkeit vorherberechnet werden können, ist das bei zweischaligen Bauteilen bei weitem nicht der Fall. Das liegt wohl an dem äusserst komplexen Übertragungsmechanismus, den zweischalige Bauteile aufweisen. Grundsätzlich muss bei Bauteilen, die aus zwei voneinander getrennten Schalen bestehen, zwischen zwei physikalisch völlig verschiedenen Schallübertragungswegen unterschieden werden.

Der erste und einfachere Übertragungsweg von einer Schale zur andern führt über das gemeinsame, dazwischenliegende Luftpolster. Er lässt sich durch ein Masse/Feder/Masse-System beschreiben. Die Schalen stellen dabei die Massen und das Luftpolster die Feder des Schwingensystems dar.

Der zweite und kompliziertere Übertragungsweg von einer Schale zur andern führt über das gemeinsame, dazwischenliegende Ständerwerk, an das die Schalen entweder linienförmig oder punktförmig befestigt sind. Dieser Weg ist von ausschlaggebender Bedeutung im Mittel- und Hochtonbereich, da er die Luftschalldämmung in diesem Bereich nach oben begrenzt.

Eines der ersten mathematischen Modelle zur Beschreibung der Luftschalldämmung von zweischaligen Bauteilen wurde von Wintergerst vor rund 50 Jahren ausgearbeitet. Bei seinem Berechnungsmodell wurden die beiden Schalen als träge Massen mit der Impedanz $Z_w = j\omega$ und das dazwischenliegende Luftpolster als Feder mit der Impedanz $Z_F = \frac{D}{j\omega}$ behandelt.

Bei dieser Darstellungsweise stellen die beiden Schalen mit dem dazwischenliegenden Luftpolster einen Schwingkreis mit der Eigenfrequenz ω_0 dar. Die Resonanzfrequenz ergibt sich dann zu (die Schalen sind parallel zueinander geschaltet; Gesamtwiderstand der beiden

Schalen in Reihe geschaltet zum Widerstand des Luftpolsters):

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} \quad \text{Hz} \quad (1)$$

Die entsprechende Formel für die Resonanzfrequenz ω_0 im geläufigeren technischen System lautet:

$$f_0 = 500 \sqrt{\frac{s'(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} \quad \text{Hz} \quad (2)$$

Darin bedeutet s' die dynamische Steifigkeit des bedämpften oder unbedämpften Luftpolsters in kp/cm^3 ; m_1 und m_2 die flächenbezogenen Massen der beiden Schalen in kg/m^2 . Der Faktor vor dem Wurzelzeichen ergibt sich aus der Verschiedenartigkeit der verwendeten Einheiten. Oberhalb der Resonanzfrequenz ω_0 bzw. f_0 nimmt dann die Luftschalldämmung theoretisch um 18 dB je Oktave zu.

Die Formeln (1) und (2) stimmen streng genommen nur bei unendlich ausgedehnten, biegeweichen Schalen und bei senkrechtem Schalleinfall. Diese Annahmen sind in der Praxis natürlich nur zum Teil erfüllt. Im Laufe der letzten Jahre wurden weitere Anstrengungen unternommen, das Berechnungsmodell zu verbessern.

Der ursprünglich zugrunde gelegte senkrechte Schalleinfall trifft in der Praxis nur sehr selten zu. Normalerweise hat man es mit einem über alle Winkel auftretenden, also mit einem diffusen Schalleinfall zu tun. Dieser Umstand wurde nun so in den Formeln (1) und (2) berücksichtigt, dass die Schalenimpedanz $Z_w = j\omega$ durch $Z_w = j\omega \cos 45^\circ$ ersetzt wurde.

$\varphi = 45^\circ$ stellt dabei die mittlere Schalleinfallrichtung dar. Mit dieser Korrektur ergibt sich dann die Resonanzfrequenz f_0 einer Doppelwand bei diffussem Schalleinfall zu.

$$f_0 = 500 \sqrt{\frac{s' \sqrt{2} (m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} \quad \text{Hz} \quad (3)$$

Durch diese Korrektur gelang es, die immer wieder festgestellte Diskrepanz zwischen berechneten und gemessenen Luftschalldämmverläufen zu eliminieren. Anhand eines Beispiels wird gezeigt, dass das Berechnungsmodell einen Schalldämmverlauf liefert, welcher mit den Messwerten sehr gut übereinstimmt. Die untersuchte Wand besteht aus zwei je 12,5 mm dicken Schalen aus Gipskartonplatten. Das dazwischenliegende Luftpolster ist 60 mm dick und vollständig mit Mineralfaserfilz ausgefüllt.

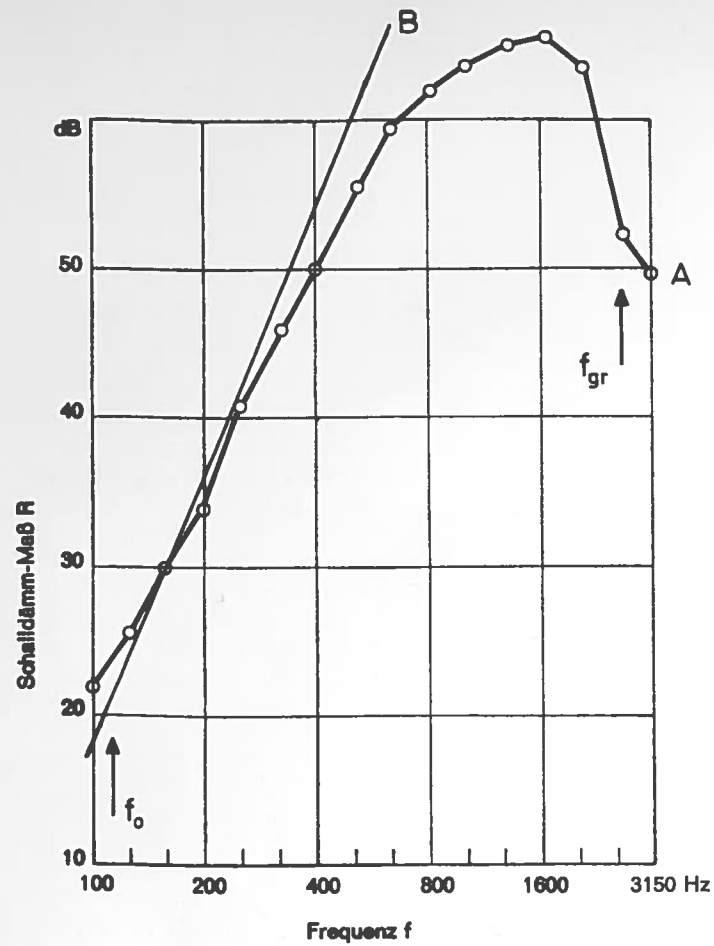


Diagramm 1: Luftschalldämmverlauf einer zweischaligen Trennwand aus Gipskartonplatten. Kurve A: Messkurve, Kurve B: berechnet nach Modell.

Wie weiter oben schon erwähnt, wurde bei dem Berechnungsmodell angenommen, dass die Trennwandschalen unendlich gross und ideal biegeweich sind. Dass diese Annahmen in der Praxis nicht zutreffen, manifestiert sich an den beiden Kurvenverläufen im Diagramm 1. Oberhalb einer bestimmten Frequenz fällt die Messkurve A wieder ab, um dann nach der sogenannten Grenzfrequenz f_{gr} wieder anzusteigen. Ursache für die Diskrepanz der gemessenen und der gerechneten Kurve liegt an dem Umstand, dass im Bereich der Grenzfrequenz f_{gr} und darüber nebst den unmittelbar auf den Schalen angeregten Körperschallbiegewellen auch die sekundär ausgelösten «freien» Biegewellen abgestrahlt werden können. Um einen solchen «Schalldämmeinbruch» zu vermeiden, müsste man Trennwandschalen verwenden, deren Grenzfrequenz weit oberhalb des Messbereichs liegt.

Vor einigen Jahren gelang es Gösele, ein Berechnungsmodell herzuleiten, welches auf der effektiv vorhandenen Luftschalldämmung der einzelnen Schalen aufbaut, d. h., die Erfassung der Schalen beschränkt sich nicht nur auf ihre träge Masse. Die elastischen Eigenschaften und die inneren Körperschallverluste werden gleichermassen berücksichtigt. Er geht dabei davon aus, dass die durch Luftschall auf der einen Seite angeregte Schale bestimmte Wegamplituden ausführt, welche vom Immissionspegel und vom Schalldämmmass R_1 der Schale abhängig sind. Diese Plattenbewegungen haben eine periodische Kompression und anschliessende Expansion der Luft im dahinterliegenden Polster zur Folge. Diese so erzeugten Druckschwankungen regen die zweite Trennwandschale wiederum zu Schwingungen an, deren Grösse von der Luftschalldämmung R_2 der Schale abhängt. Die aus diesem

Übertragungsmodell hergeleitete Formel lässt sich folgendermassen darstellen:

$$R = R_1 + R_2 + 20 \log \left(\frac{4 \pi f d}{c} \right) \text{ dB} \quad (4)$$

$\leq 6 \text{ dB}$

Darin bedeuten d die Dicke des Luftpolsters in m, c die Schallgeschwindigkeit in Luft in m/s und f die Messfrequenz. Die obige Formel setzt einen ausreichend bedämpften Hohlraum voraus.

Die Gültigkeit soll im folgenden Beispiel wiederum anhand einer gerechneten und gemessenen Schalldämm-Kurve dargestellt werden.

Ein Vergleich der beiden Kurven A und B im Diagramm 2 zeigt eine gute Übereinstimmung der berechneten und der gemessenen Luftschalldämmung. Sie wird auch im Bereich der Grenzfrequenz und darüber befriedigend wiedergegeben.

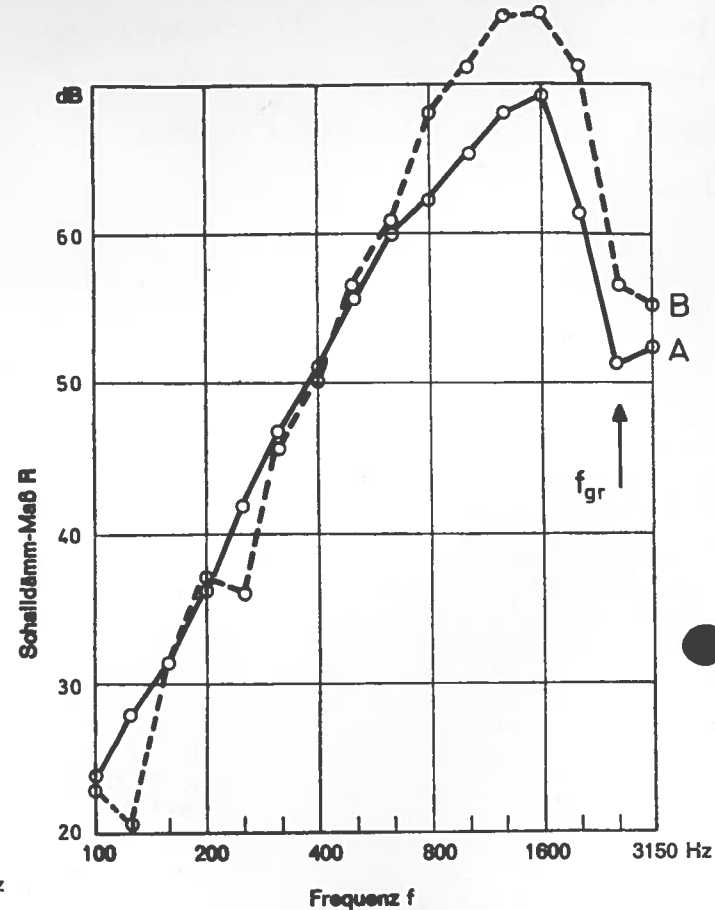


Diagramm 2: Luftschalldämmverlauf einer zweischaligen Trennwand aus Gipskartonplatten (Aufbau wie im vorigen Beispiel). Kurve A: Messkurve, Kurve B: berechnet nach Formel (4).

Bei einem weiteren, etwas komplizierteren Trennwandaufbau soll die Luftschalldämmung wiederum mit Hilfe der Formel (4) berechnet und mit der Messkurve verglichen werden. Der Trennwandaufbau besteht aus zwei 16 mm dicken Holzspanplatten, welche punktförmig über insgesamt zehn Unterlagsplättchen (ca. 20x20 mm²) je Schale auf einem gemeinsamen Holzständerwerk befestigt sind. Der Lufthohlraum zwischen den Schalen ist 55 mm dick und mit Mineralfaserfilz bedämpft. Das Ergebnis der Untersuchungen ist im Diagramm 3 dargestellt. Ein Vergleich der beiden Kurven A und B im Diagramm 3 zeigt eine gute Übereinstimmung der gemessenen mit der berechneten Luftschalldämmung im Tieftonbereich. Oberhalb 315 Hz steigt die berechnete Schalldämmkurve wesentlich steiler an als die gemessene Kurve A. Der Grund für die wachsende Diskrepanz oberhalb einer Frequenz von 315 Hz liegt an der zunehmenden Kör-

Diagramm 3: Luftschalldämmverlauf einer zweischaligen Trennwand aus Holzspanplatten. Kurve A: Messkurve, Kurve B: berechnet nach Formel (4).

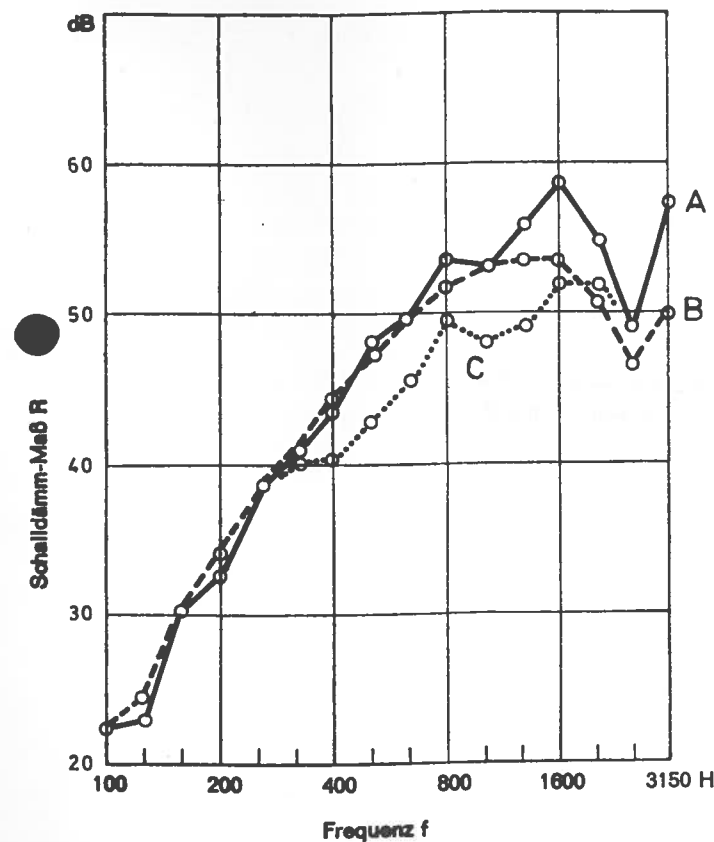


Diagramm 3: Luftschalldämmverlauf einer zweischaligen Trennwand aus Holzspanplatten. Kurve A: Messkurve, Kurve B: berechnete Kurve nach Formeln (4) und (6), Kurve C: Messkurve für Achsabstand $s = 0,22 \text{ m}$.

perschallübertragung von einer Schale zur andern über das gemeinsame Ständerwerk. Bei den bisherigen Berechnungsmodellen wurde stets vorausgesetzt, dass die Schallenergie von einer Trennwandschale zur andern nur über das gemeinsame, dazwischenliegende Luftpolster erfolgt. Dieses Schallübertragungsverhalten trifft in der Praxis nur in Ausnahmefällen zu; so zum Beispiel bei Trennwandaufbauten, bei denen jede Schale an einem gesonderten Ständerwerk befestigt ist. Bei den üblichen Trennwandaufbauten findet die Schallenergieübertragung von einer Schale zur andern sowohl über das gemeinsame Luftpolster — im Tieftonbereich — als auch über das gemeinsame Ständerwerk — im Hochtonbereich — statt. Im Mitteltonbereich sind beide Schallübertragungswege massgebend für die maximal erreichbare Luftschalldämmung. Bei einer weiteren Ergänzung bzw. Korrektur des Berechnungsmodells wurde

versucht, anhand der von Cremer und Heckl ausgearbeiteten Theorie der Luftschalldämmungsverbesserungen durch biegeweiche Vorsatzschalen, diesen Tatsachen Rechnung zu tragen. Die «Vorsatzschalentheorie» berücksichtigt den Umstand, dass die Schallübertragung nicht nur über das gemeinsame Luftpolster, sondern im Mittel- und Hochtonbereich auch über die Schalenbefestigung erfolgt. Bei der Berücksichtigung der Schallübertragung über das gemeinsame Ständerwerk, die übrigens eine reine Körperschallübertragung ist, muss unterschieden werden, ob die Schalen linienförmig, z. B. über Leisten o. ä., oder punktförmig, z. B. über Unterlagsplatten, am Ständerwerk montiert sind. Eine Produktverbindung wirkt sich günstiger aus als eine Linienverbindung, da der Übertragungsquerschnitt der ersteren wesentlich kleiner ist. Es hat sich gezeigt, dass die Berechnung des Luftschalldämmverlaufs in zwei Schritten durchgeführt werden muss.

Diagramm 4: Luftschalldämmverlauf einer zweischaligen Trennwand aus Holzspanplatten. Kurve A: Messkurve, Kurve B: berechnete Kurve nach Formeln (4) und (6), Kurve C: Messkurve für Achsabstand $s = 0,22 \text{ m}$.

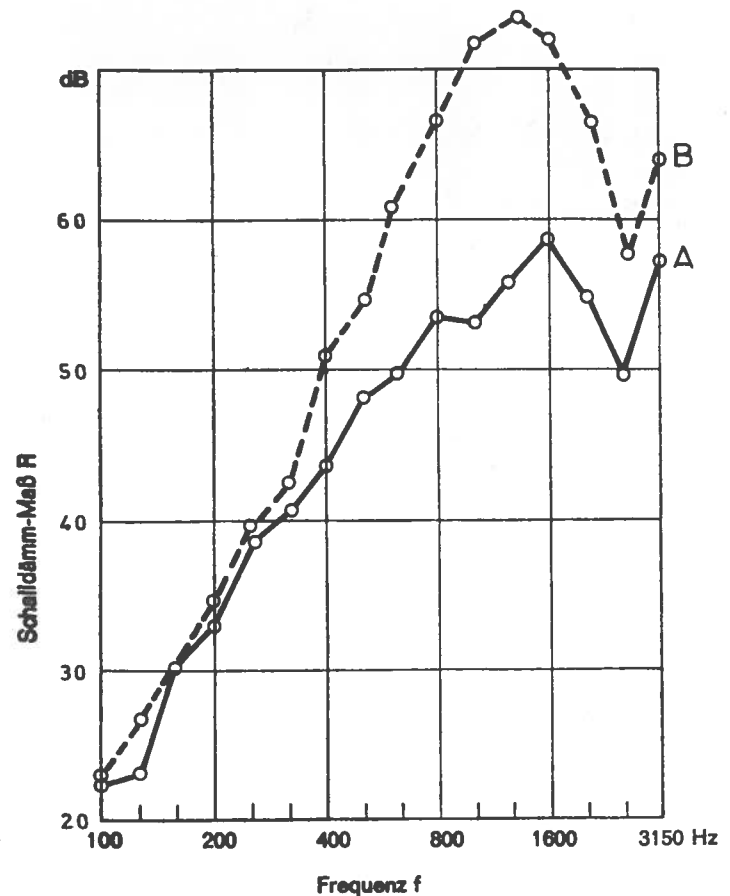


Diagramm 4: Luftschalldämmverlauf einer zweischaligen Trennwand aus Holzspanplatten. Kurve A: Messkurve, Kurve B: berechnete Kurve nach Formeln (4) und (6), Kurve C: Messkurve für Achsabstand $s = 0,22 \text{ m}$.

Die erste Teilberechnung ergibt dabei den Luftschalldämmverlauf im Tieftonbereich, während die zweite den Mittel- und Hochtonbereich erfasst.

Schritt 1: siehe Formel (4)

Schritt 2: bei linienförmiger Verbindung der Schalen am gemeinsamen Ständerwerk:

$$R = R_{1,2} + 10 \log\left(\frac{b \pi}{\lambda_{gr}}\right) \quad \text{dB} \quad (5)$$

bei punktförmiger Verbindung der Schalen am gemeinsamen Ständerwerk:

$$R = R_{1,2} + 10 \log\left(\frac{2 b s}{\lambda_{gr}^2}\right) \quad \text{dB} \quad (6)$$

Darin bedeuten b der horizontale Pfostenabstand des Ständerwerks, der Achsabstand zwischen zwei benachbarten Punktverbindungen auf dem Ständerwerk und λ_{gr} die Körperschallbiege-

wellenlänge auf den Trennwandschalen bei der Grenzfrequenz f_{gr} .

Bei der Berechnung der Luftschalldämmung nach dem obigen Modell wurde ein symmetrischer Trennwandaufbau zugrunde gelegt. Weiter wird angenommen, dass sich die linien- oder punktförmig montierten Schalen bei keiner Frequenz vom Ständerwerk akustisch abkoppeln. Ein Abkoppeln der Schalen wäre dann zu erwarten, wenn das verwendete Material für die Herstellung der linien- oder punktförmigen Verbindung einen wesentlich kleineren dynamischen Elastizitätsmodul aufweisen würde als das Material der Schalen und des Ständerwerks.

Der Luftschalldämmverlauf, der sich gemäss diesen zwei Schritten ergibt, soll nachstehend anhand eines weiteren Beispiels dargestellt werden. Als Trennwand wird wiederum der im vorigen Beispiel beschriebene Aufbau benützt. Der

Pfostenabstand beträgt $b = 1,0$ m, die Achsabstände der Punktverbindungen betragen $s = 0,60$ m. Die Übereinstimmung zwischen dem gerechneten und dem gemessenen Luftschalldämmverlauf ist sehr gut.

Zur weiteren Überprüfung des Modells wurde die selbe Trennwand nochmals gemessen, nachdem die Achsabstände zwischen je zwei benachbarten Punktverbindungen von $S_1 = 0,60$ m auf $S_2 = 0,22$ m reduziert wurden (siehe Kurve C in Diagramm 4). Es ergab sich eine deutliche Verschlechterung von $\Delta R = 4,2$ dB, was mit dem theoretischen Wert nach Formel (6) übereinstimmt.

Eine Reihe weiterer Messungen, die an ganz verschiedenartigen Aufbauten gewonnen wurden, zeigten immer eine gute Übereinstimmung von Theorie und Praxis.