

Zur Schalldämmung von Fenstern bei tieffrequenter, impulshaltiger Anregung

K.-W. HIRSCH, E. BUCHTA

(Inst. f. Lärmschutz, Düsseldorf)

Einleitung

Tieffrequente, hochintensive Schallimpulse mit Spitzenpegeln um 130 dB und höchster Energiedichte im Spektralbereich unter 40 Hz (z.B. Mündungsknalle schwerer Waffen in der Umgebung von Tr. Üb.Pl.) führen zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Wohnqualität. Neben einer Fülle von Belästigungsreaktionen wird der sekundär erzeugte Luftschall, das "Rappeln" und "Klirren", als besonders störend empfunden. Passive Schallschutzmaßnahmen müssen deshalb sowohl die gehörbezogene Lärmempfindung reduzieren als auch die Sekundärschallerzeugung verhindern.

Der Schalldurchgang durch ein Fenster bei Anregung durch einen tieffrequenten hochintensiven Knall unterscheidet sich wesentlich vom Schalldurchgang bei kontinuierlicher Rauschanregung im bauakustischen Frequenzbereich. Einerseits zeigen Fensterscheiben in diesem Frequenzbereich ausgeprägte Resonanzschwingungen, die zu schmalbandigen Einbrüchen des Dämmverlaufes über der Frequenz führen können. Andererseits liegen die Wellenlängen des Luft- und des angeregten Festkörperschalls in der gleichen Größenordnung wie die Abmessungen von Fenstern, Wänden und Decken und der Abmessungen des Raumes selbst, so daß Schalldruckmessungen allein nicht zu einer zuverlässigen Bewertung der Eigenschaften des Fensters selbst führen.

Einfache Modellbildung

Untersuchungen der Schwingungen und des Luftschalles an und in verschiedenen Gebäuden haben ergeben, daß der Schalldruck im Raum von sehr tiefen Frequenzen bestimmt wird, die von tieffrequenten Eigenmoden der Fenster und/oder Decken in den Raum eingekoppelt werden. Die Analyse der Schwingungsform zeigt durchweg, daß es sich hierbei um die Grundschwingung als Platte handelt, die durch eine komphase, zu den Rändern einbrechende Schnellverteilung gekennzeichnet ist. Der Schalldruck im Raum ist im Spektralbereich unterhalb der Grundschwingung der Baumpfandungsteile nahezu ortsunabhängig. Die konkrete Ausbildung der Schalldruckverteilung hängt von den Verhältnissen am einzelnen Objekt (Raum) und von der vorherrschenden Signalform des Anregungssignales ab.

Wegen der im Vergleich zur Schallgeschwindigkeit in Luft langsamen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Plattenbiegung in typischen Fenstern und Decken bei derart tieffrequenter Anregung ist der anregende Impuls als eine komphase Stoßanregung zu betrachten. Die Ortsverteilung der Anregung ist daher an die Schwingungsform des tiefsten Eigenmoden des Biegewellen-Spektrums besonders gut angepaßt. Zudem liegen die Resonanzfrequenzen dieses Eigenmoden typisch im Frequenzbereich von 10 - 60 Hz, d.h. auch frequenzmäßig im Bereich hoher spektraler Energiedichte des anregenden Signals.

Diese Randbedingungen erlauben eine einfache Modellbildung für Fenster, Decken und Wände im Bereich der tiefsten Platteneigenresonanz als linearer harmonischer Oszillator, der auf beiden Seiten an ein Luftvolumen angeschlossen ist. Der Oszillator wird nur durch drei Parameter, seine Trägheit, seine Steifigkeit und durch seinen Verlustkoeffizienten charakterisiert. Die Trägheit des Oszillatormodells ist durch den Massebelag m' des Bauteiles bestimmt. Der zugehörige Steifigkeitsbelag P läßt sich aus der Resonanzfrequenz des tiefsten Eigenmoden ermitteln. In Abb. 1 ist dieses einfache Modell skizziert.

Der äußere resultierende Druck auf den Oszillator ist die Differenz der Schalldruckamplituden auf beiden Seiten des Bauteiles, die sich ihrerseits aus der Summe der in beiden Bereichen hin- und herlaufen Wellenanteile zusammensetzt. Unter Berücksichtigung der Stetigkeit der Schnelle läßt sich das Druckgleichgewicht des Oszillators formulieren:

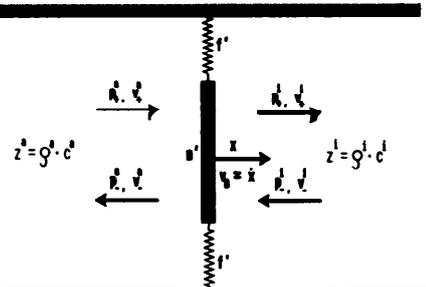


Abb. 1 Einfaches Modell eines Bauteiles im Bereich der tiefsten Eigenresonanz

$$m' \ddot{v}_b + \eta' \dot{v}_b + f' x = (p_-^a + p_+^a) - (p_-^i + p_+^i)$$

m'	Massebelag	x	Auslenkung des Bauteiles
P	Steifigkeit	v_b	Schnelle des Bauteiles
η'	Verlustkoeffizient	p	Schalldruckamplitude
ρ	Schallgeschwindigkeit	v	Schallschnelle
c	Dichte	a, i	kennzeichnet den Raumbereich
z	spez. Kennimpedanz	$+, -$	kennzeichnet die Ausbreitungsrichtung

Durch Verkettung von derartigen Modellen für alle Bauteile im Raum in Schallausbreitungsrichtung läßt sich der Eintritt eines tieffrequenten Knalles in einen Raum durch ein Bauteil unter Berücksichtigung von Rückwandreflexionen beschreiben. Dies ist ein sehr einfaches, eindimensionales Modell des Schalleintritts.

Zur Berechnung der resultierenden Schalldruck- und Schnelleverläufe bietet sich eine direkte numerische Simulation zur Lösung der Differentialgleichung an. Diese Methode hat einerseits den Vorteil, daß die errechnete Signalförmigkeit an jeder interessierenden Stelle dargestellt werden kann. Andererseits können beliebige Signalförmigkeiten, insbesondere experimentell aufgenommene Signale, direkt als Anregungssignal eingespielt werden.

Aus den Ergebnissen dieser groben Simulation lassen sich Hinweise zur Fensterauswahl unter Berücksichtigung der am Einsatzort vorherrschenden Signalförmigkeit und der dort gegebenen Geometrie ableiten. Das Modell liefert Entscheidungshilfe zu der Fragestellung, in wieviel überhaupt ein Bauteil an der Einkoppelung des Knalles in den Raum beteiligt ist.

Diskussion eines Beispiels

Das im folgenden betrachtete Haus liegt am Rande eines Truppenübungsplatzes, der betreffende Raum auf der schallzugewandten Seite. Das zweiflügelige Fenster wird senkrecht von Knallen getroffen. Der große Flügel des Fensters besteht aus einer Doppelscheibe 12GH/LZR20/10GH und zeigt die Grundresonanz bei 15 Hz. Die Rückwand, eine 0,12 m dicke Kalksandsteinmauer mit einer Resonanzfrequenz bei 25 Hz ist 3,5 m vom Fenster entfernt. Das eindimensionale Modell dieses Raumes ist in Abb. 2 skizziert. Alle Oszillatoren werden verlustfrei angenommen, ($\eta = 0$).

In Abb. 3 sind gemessene Zeitverläufe vor und in diesem Raum, in Abb. 4 die entsprechenden Zeitverläufe nach der Modellrechnung dargestellt. Die Abbildungen zeigen in A) den Schalldruck im Freifeld 17 m vor der Fensterscheibe (bzw. das in die Rechnung eingespielte Anregungssignal), in B) den Schalldruck 5 mm vor der Scheibe außen, in C) die Schnelle der Scheibe außen, in D) die Schnelle der Scheibe innen, in E) den Schalldruck 5 mm nach der Scheibe innen, in F) den Schalldruck in Raummitte, in G) die Schnelle der Rückwand und in G) die Schnelle der Decke (nur Abb. 3).

Der Vergleich der jeweiligen Signale zeigt die Unzulänglichkeiten des eindimensionalen Modells. Die maximale Schnelleamplitude der Scheibe unterscheidet sich um einen Faktor 2. Das ist im wesentlichen darauf zurückzuführen, daß die Schnelle im Zentrum der Scheibe - am Ort der maximalen Schnelle der Plattenschwingung - aufgenommen wurde, während das Modell die über die Scheibenfläche zu mittellnde Schnelle wiedergibt.

Die Schalldruckamplituden im Raum werden vom Modell an der Scheibe innen um den Faktor 2, in Raummitte ungefähr um den Faktor 3 überschätzt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß im Modell mit einer eindimensionalen Schallausbreitung gerechnet wird, während im Experiment eine Ankoppelung an ein dreidimensionales Luftvolumen vorliegt. Beide Aspekte sind für die folgende Betrachtung von untergeordneter Bedeutung.

Zur Beurteilung des Beitrags des Fensters zum Schallpegel im Raum ist die Analyse des Energieflusses durch die Scheibe erforderlich. In Abb. 5 und Abb. 6 ist der Energiefluß - die aus den Schalldrucksignalen innen und außen und den entsprechenden Schnellesignalen der Scheiben gebildete Intensität - für die gemessenen und gerechneten Signale dargestellt. Das Vorzeichen ist so gewählt, daß eine in positiver x-Richtung fließende Energie positiv gezählt wird, vgl. Abb. 1 und Abb. 2.

Der Energiefluß außen charakterisiert bei positivem Vorzeichen die aus dem Luftschallfeld in die Scheibenschwingung der äußeren Scheibe investierte Energie. Der Energiefluß innen charakterisiert bei positivem Vorzeichen die aus der Scheibenschwingung der inneren Scheibe in den Luftschall investierte Energie.

Die aus dem Modell berechneten Energieflüsse in Abb. 6 machen deutlich, daß ein fluktuierender Energieaustausch zwischen der Scheibenschwingung und dem Luftschall stattfindet. Nach einem anfänglich positivem Trend überwiegt ein "absorbierender" Effekt der Scheibe. Vernachlässigt man die Durchgangsverluste durch die Rückwand, verliert der Raum den "Schalleintrag" (den Beitrag zum Schallpegel) auch wieder durch die Scheibe. Der entsprechende gemessene Verlauf in Abb. 5 zeigt, daß nach einem geringen Schalleintrag in den Raum beim Eintreffen des Impulses der Energiefluß in wesentlichen aus dem Raum in die Scheibe erfolgt.

Dies macht deutlich, daß hier ein entscheidender Schalleintrag durch die Decke in den Raum erfolgt ist, der nun durch das Fenster abfließt. Wegen der entscheidend größeren Fläche der Decke ist der Schallfluß an der Oberfläche dieses Bauteils trotz geringerer Schnelle größer, vgl. Abb. 3 H. Das Fenster wirkt eher wie ein Resonanzabsorber für den

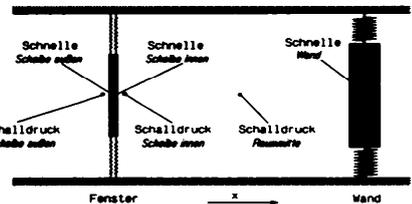


Abb. 2 Einfachstes Modell eines Raumes im Bereich der tiefsten Eigenresonanz mit Bezeichnung der Meßstellen

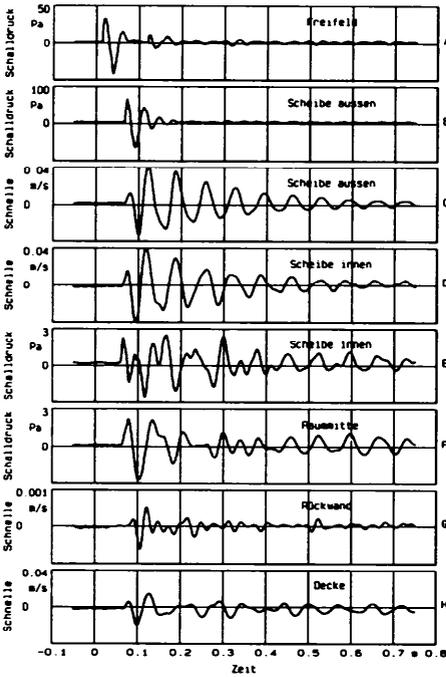


Abb. 3 Gemessene Schallsignale bei Eintritt eines Knalles in einen Raum mit Fenster

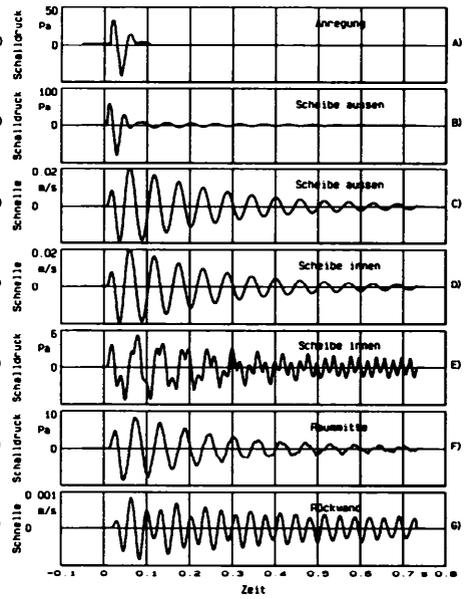


Abb. 4 Berechnete Schallsignale für das Modell nach Abb. 2

Deckenschall. Der Vergleich der Energieflüsse in Abb. 5 und Abb. 6 zeigt auf, daß das Modell auch die absoluten Energieflüsse unter Beachtung der Tatsachen voraussagt, daß die Scheibenschnellen Flächenmittelwerte darstellen.

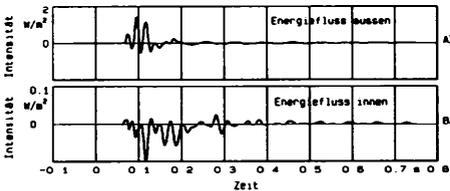


Abb. 5 Energiefluß durch die Fensterscheiben nach den gemessenen Signalen nach Abb. 3

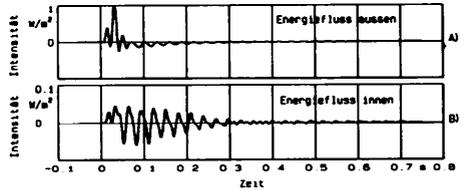


Abb. 6 Energiefluß durch die Fensterscheiben nach den gerechneten Signalen nach Abb. 4

Modell bei Abwesenheit der Rückwand

Da sich im Modell leicht die Wand und damit alle Raumrückwirkungen eliminieren lassen, ist es möglich, eine Aussage über die Schalldämmeigenschaften dieses Fenstertyps bei diesem speziellen Anregungssignal zu machen. Im Modell ergeben sich die in Abb. 7 dargestellten Zeitsignale im Raum bei Abwesenheit einer Rückwand. Abb. 8 zeigt die aus diesen Signalen gewonnenen Ergebnisse für den zum Anregungssignal gebörenden Energiefluß (A) und die Energieflüsse an der Außen-(C) und Innenscheibe (E). Jeweils zwischen diesen Signalen ist die Energiedichte - i.e. der über

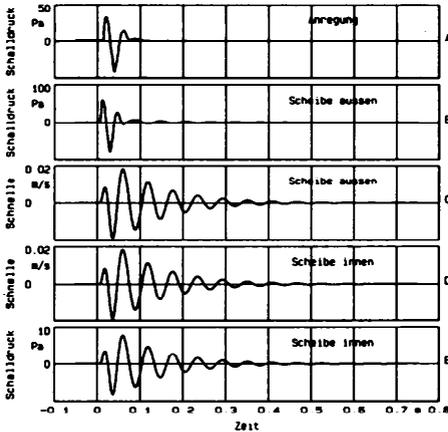


Abb. 7 Schallsignale beim Durchgang durch ein Fenster in einen nicht abgeschlossenen Raum, (Modellrechnung)

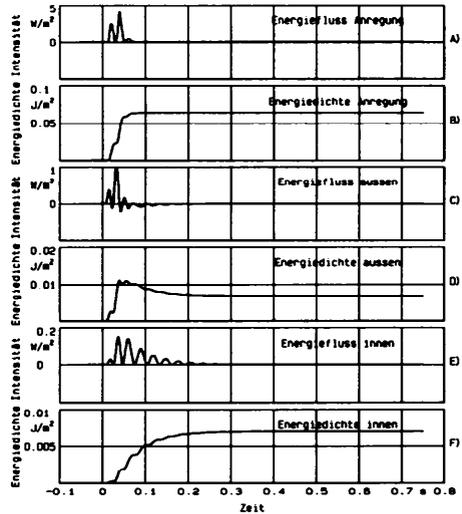


Abb. 8 Energiefluß und Energiedichte beim Schalldurchgang durch ein Fenster in einen nicht abgeschlossenen Raum, (Modellrechnung)

den Zeitverlauf aufsummierte Energiefluß/Fläche während des Vorganges - des Anregungssignals (B) und an der Außen-(D) und Innenscheibe (F) aufgetragen.

Als Maß für die Schalldämmung kann das Verhältnis der gesamten durchgelassenen Energie zur gesamten angelieferten Energie des Anregungssignals betrachtet werden. Dies entspricht dem Verhältnis der Endwerte der Zeitverläufe in Abb. 8 F und Abb. 8 B. Es ergibt sich im Modell ein 'Impulsdämmmaß' von 9,7 dB für dieses Fenster und für diese Signalfom.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Aus dem Vergleich der Meßergebnisse und der Ergebnisse dieses einfachen Modells können folgende Aussagen gewonnen werden:

1. Das Abklingen der Fensterschwingung ist vollständig durch die Abstrahlung (Strahlungswiderstand) dieser Schwingung in Luft bedingt. Allein durch die Ankopplung zur Luft wird die Güte (hier: Anzahl der Schwingungen, bis die Amplitude auf die Hälfte abgesunken ist) auf ca. 3 begrenzt. Eine weitere Herabsetzung dieser Güte durch innere Schwingungsverluste des Fensters als Beitrag zur Schalldämmung in diesem Frequenzbereich würde erst wirksam, wenn sie den Oszillator ohne Berücksichtigung der Luftankopplung auf eine Güte von 3 dämpfen würde.
2. Der "Nachhall" im Raum wird durch die Schwingungskopplung der Bauteile bestimmt. Der Energieanteil im Bereich der Resonanzfrequenz wird zwar überproportional in den Raum hineingeleitet, er wird aber durch dasselbe Bauteil wieder "absorbiert".
3. Trotz der Unzulänglichkeiten des eindimensionalen Modells läßt sich zumindest ansatzweise ein Impulsdämmmaß aufzeigen, das die Eigenschaften des Fensters charakterisiert. Veränderungen an der Geometrie des Raumes und an der Bauart des Fensters lassen sich im Hinblick auf eine tendenzielle Aussage beurteilen. Auch der Einfluß der Signalfom kann berücksichtigt werden.
4. Der Schalleintritt in einen Raum kann letztlich nur vor Ort gemessen werden, da die Schalleitungseigenschaften der übrigen Bauteile in diesem Frequenzbereich nicht zu vernachlässigen und nicht im Rahmen einer Betrachtung als Schallnebenwege berücksichtigt werden können.