

Entwicklung eines SEA-Modells für eine Holzrahmenbauwand mit N+F Beplankungslagen

Fabian Schöpfer^{1,2}, Carl Hopkins², Andreas R. Mayr¹, Ulrich Schanda¹

¹ Labor für Schallmesstechnik, Hochschule Rosenheim, 83024 Rosenheim, Email: fabian.schoepfer@fh-rosenheim.de

² Acoustics Research Unit, School of Architecture, University of Liverpool, L69 7ZN, UK.

Einleitung

Holzrahmenbaukonstruktionen stellen in Bezug auf ihre vibro-akustischen Eigenschaften komplexe Systeme dar. Eine Prognose des bei der Körperschallanregung durch haustechnische Anlagen erzeugten Schalldruckpegels in angrenzenden Räumen ist b.d. nicht möglich und bedarf entsprechender Modelle. In diesem Beitrag wird die Modellierung einer im Labor aufgebauten Holzrahmenbaukonstruktion unter Verwendung der Statistischen Energieanalyse (SEA) vorgestellt. Die Besonderheit der vorliegenden Konstruktion besteht in ihrem sehr einfachen Aufbau mit beidseitig einschaliger Beplankung durch Spanplatten mit Nut- und Federverbindung (N+F), sowie horizontalen und vertikalen Plattenstößen. In dieser Form weist die Konstruktion einen sehr inhomogenen Aufbau auf. Die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zeigten, dass an den N+F Verbindungen eine signifikante Abnahme der Schwingungsenergie vorliegt. Um diese Erkenntnisse im SEA-Modell zu berücksichtigen, wurden gemessene Kopplungsverluste für die Nut- und Federverbindung verwendet, wohingegen alle weiteren im System benötigten Verlustfaktoren aus Literaturwerten prognostiziert wurden. Ein Vergleich der Ergebnisse aus der SEA-Modellierung mit Messdaten der Schwingschnelle auf den Beplankungslagen sowie der Schalldruckpegel in den Wandhohlräumen wird vorgestellt.

Holzrahmenbaukonstruktion

Die betrachtete Holzrahmenbauwand ist Teil eines Leichtbauprüfstandes an der Hochschule Rosenheim. Die Wand ist 5,06 m lang und 2,59 m hoch und weist somit bauübliche Abmessungen auf. Die Konstruktion besteht aus einem ungedämmten Holzständerwerk mit einem Achsabstand von 62,5 cm welches beidseitig mit nicht verklebten Nut- und Feder-Verbindungen einfach mit 19 mm Spanplatten beplankt ist. Die Spanplatten sind horizontal (liegend) angeordnet und in einem Abstand von 35 cm auf die Rahmenkonstruktion geschraubt.

Experimentelle Untersuchungen

Vor der Entwicklung des SEA-Modells wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Diese Untersuchungen umfassten sowohl die Erfassung von Validierungsdaten wie auch von Eingangsdaten für das SEA-Modell, wie nachfolgend beschrieben.

Kartierung der Schwingschnelle:

Zur Untersuchung des vibro-akustischen Verhaltens wur-

de die Schwingschnelle auf beiden Seiten der Wand kartiert. Die Anregung erfolgte punktförmig mittels Schwingerreger. Die Schwingungsantwort der Struktur wurde auf einem regelmäßigen Raster von 49 x 24 Punkten erfasst. Die so ermittelten und in [1] und [2] näher erläuterten Messdaten wurden zur Validierung des SEA Modells nach Gleichung (1) in Energien umgerechnet.

$$E = m \langle v^2 \rangle_{t,s} \quad (1)$$

Schalldruckpegel im Gefach:

Die Messung des Schalldruckpegels in den Wandhohlräumen erfolgte durch drei Mikrofone, die körperschallentkoppelt im Gefach platziert wurden. Anlaog zu den Schwingschnellen wurden die räumlich und zeitlich gemittelten Messwerte für den Schalldruck nach Gleichung (2) in Energien umgerechnet.

$$E = \frac{\langle p^2 \rangle_{t,s} V}{\rho_0 c_0^2} \quad (2)$$

Eingangsleistung:

Um die so ermittelten Daten zur Validierung des SEA Modells verwenden zu können ist es zudem erforderlich die eingespeiste Körperschalleistung während den Messungen zu erfassen, um im SEA Modell die gleiche Anregung verwenden zu können. Aus diesem Grund wurde am Anregungspunkt die Kraft sowie die Beschleunigung mit zwei Sensoren erfasst. Die Körperschalleistung konnte somit aus dem Realteil des Kreuzspektrums zwischen Kraft und Schnelle bestimmt und im Modell (siehe Gleichung (5)) eingesetzt werden.

Nachhallzeit im Gefach:

Zur Überprüfung des im SEA Modell verwendeten Gesamtverlustfaktors der unbedämpften Gefache wurde die Nachhallzeit in den Wandhohlräumen experimentell abgeschätzt. Hierzu wurden ähnlich zu dem bereits beschriebenen Messverfahren Mikrofone sowie ein zusätzlicher Aktivlautsprecher im Wandhohlraum platziert. Insgesamt wurden vier Mikrofonpositionen pro Gefach verwendet. Der Gesamtverlustfaktor konnte nach Gleichung (3) aus den gemessenen Nachhallzeiten berechnet werden.

$$\eta_{ges} = \frac{2,2}{fT} \quad (3)$$

Kopplung der Platten über N+F Stoß:

Mangels Berechnungsmodelles wurde der Kopplungsverlustfaktor des N+F Plattenstoßes experimentell bestimmt. Hierfür wurden zwei Spanplatten über eine

Aufhängung frei gelagert und an einer Kante über den N+F Stoß verbunden. In diesem Aufbau wurde eine der beiden Platten mit einem Shaker punktförmig angeregt und die mittlere Schwingschnelle mit je zwölf Sensoren auf beiden Platten gemessen. Bei der Platzierung der Sensoren wurde auf einen ausreichend großen Abstand zum Anregungspunkt sowie zum Plattenrand geachtet, um nur das Diffusfeld in Anlehnung an [1] zu erfassen. Um mögliche Luftschallnebenwege zu unterdrücken, wurden die Platten mit Faserdämmstoff abgeschirmt. Der Kopplungsverlustfaktor wurde aus dem Verhältnis der Energien auf den beiden Platten gemäß Gleichung (1) und Gleichung (4) bestimmt.

$$\eta_{ij} = \frac{E_j}{E_i} \eta_{ges,j} \quad (4)$$

Die Energien wurden dabei aus der mittleren Schwingschnelle nach Gleichung (1) bestimmt. Der Gesamtverlustfaktor in Platte j wurde durch die Messung der Körperschallnachhallzeit nach Gleichung (3) bestimmt.

SEA Modell

In Abbildung 2 ist das betrachtete System schematisch dargestellt. Für die Einteilung dieses Systems in SEA Subsysteme zeichnen sich auf den ersten Blick sechs Komponenten ab: (1) Die Beplankungslage auf der angeregten Wandseite, (2) die Rahmenkonstruktion, (3) die Wandhohlräume, (4) die Beplankungslage auf der abgewandten Wandseite, (5) der Empfangsraum und (6) der Senderraum.

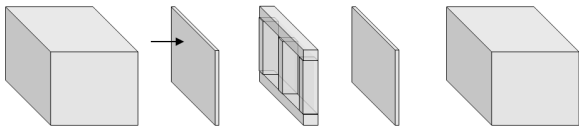


Abbildung 1: Explosionsskizze des betrachteten Systems. Der schwarze Pfeil deutet die Punktanregung an.

Allerdings zeigen die experimentellen Untersuchungen des Schwingungsverhaltens, dass eine deutliche Abnahme der Schwingungsenergie entlang der Wand und speziell an den Plattenstößen zu erkennen ist [2] [3]. Aus diesen Gründen wurde das SEA Modell sehr detailliert abgebildet, indem jedes Bauelement (Wandriegel, Spanplatte, ...) als individuelles Subsystem erfasst wurde, siehe Abbildung 2. Insgesamt ergaben sich aus dieser Einteilung 41 Subsysteme die untereinander gekoppelt sind. Die Gleichgewichtsbedingungen für dieses System sind in Gleichung (5) in Matrixschreibweise dargestellt.

$$\begin{bmatrix} \eta_1 & -\eta_{21} & \cdots & -\eta_{411} \\ -\eta_{12} & \eta_2 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ -\eta_{141} & & & \eta_{41} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_{41} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{W_{in,2}}{\omega} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

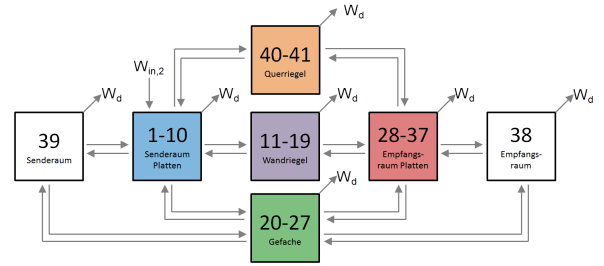


Abbildung 2: SEA Modell.

Subsystemeinteilung:

Auf der angeregten Wandseite sind zehn Spanplatten unterschiedlicher Größe auf die Rahmenstruktur geschraubt. Die Platten sind horizontal (liegend) angeordnet und als Subsysteme 1 bis 10 im Modell abgebildet. Die Rahmenstruktur besteht aus neun Wandriegeln (siehe Abbildung 3, Subsysteme 11 bis 19). Somit sind acht Wandhohlräume vorhanden welche die Subsysteme 20 bis 27 bilden. Auf der abgewandten Wandseite sind ebenfalls zehn Platten montiert (Subsysteme 28 bis 37). Die beiden angrenzenden Räume bilden Subsystem 38 (Empfangsraum) und Subsystem 39 (Senderraum). Abschließend bilden die Querriegel oben und unten Subsysteme 40 und 41.

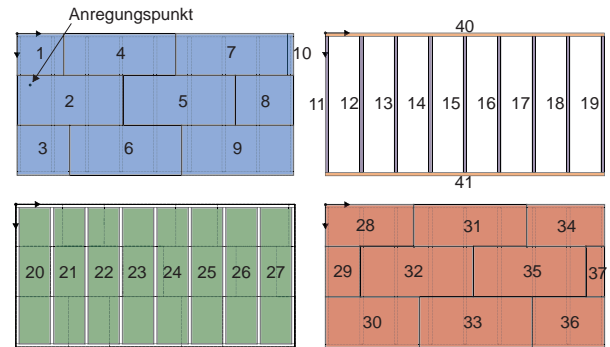


Abbildung 3: Einteilung der Konstruktion in Subsysteme. Oben links: Platten auf der angeregten Wandseite. Oben rechts: Wand- und Querriegel. Unten links: Wandhohlräume (Gefache). Unten rechts: Platten auf der abgewandten Seite.

Annahmen im SEA Modell:

Im vorliegenden Modell wurden sämtliche Verlustfaktoren berechnet, ausgenommen der Kopplung über den N+F Stoß, der wie beschrieben mit frei hängenden Spanplatten experimentell bestimmt wurde. Die internen Verlustfaktoren der Spanplatten sowie der Rahmenhölzer wurden ebenfalls messtechnisch wie in [2] beschrieben bestimmt. Der interne Verlustfaktor der ungedämmten Gefache wurde nach dem Modell von Price und Crocker [4] ermittelt wobei Annahmen für die Absorption der umlaufenden Rahmenhölzer eingesetzt wurden. Die Kopplung zwischen den Platten und der Rahmenkonstruktion über die Schraubenverbindung wurde als Kopplung der Strukturadmittanzen modelliert (siehe z.B. [5]). Dabei ist die Anzahl der Befestigungspunkte berücksichtigt und die Holzschraube als steife Verbindung angesetzt. Für die Strukturadmittanzen wurden näherungsweise Mo-

delle für unendliche bzw. halbbunendliche Platten und Balken (siehe [6]) verwendet. Wie in Abbildung 3 zu erkennen, ist jedes Gefach mit einer variablen Anzahl von Teilflächen der Spanplatten abgedeckt. Die Kopplung zwischen den Platten und Gefachen wurde deshalb mit der anteiligen Fläche der jeweiligen Spanplatten gewichtet. Die Abstrahlung wurde nach Leppington [7] für dünne, rechteckige, isotrope und endliche Platten modelliert. Das Schallfeld in den ungedämmten Gefachen wurde unterhalb der ersten tangentialen Mode als eindimensionales Schallfeld modelliert. Oberhalb der ersten Mode in Gefachtiefe wurde ein dreidimensionales Schallfeld angesetzt. Entsprechend wurde zwischen diesen Bereichen ein zweidimensionales Schallfeld modelliert. Durch die Punktanregung wurde im ersten Gefach eine zusätzliche Nahfeldabstrahlung (siehe z.B. [5]) im Modell berücksichtigt.

Ergebnisse

Kopplung der Spanplatten:

Der experimentell ermittelte Kopplungsverlustfaktor η_{ij} über einen N+F Stoß ist in Abbildung 4 dargestellt. Das Ergebnis zeigt eine Abnahme der Kopplung hin zu hohen Frequenzen. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen der experimentellen Untersuchungen zum Schwingungsverhalten der gesamten Wand ([2] und [3]).

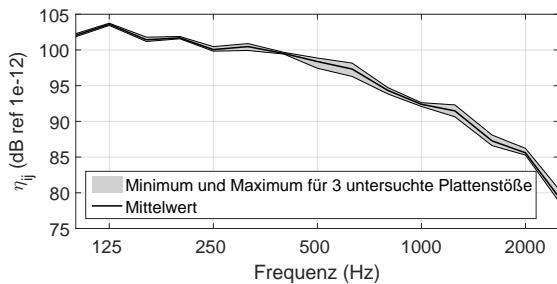


Abbildung 4: Gemessener Kopplungsverlustfaktor über einen nicht verklebten Nut- und Feder Stoß zwischen 19 mm starken Spanplatten.

Validierung SEA Gesamtverlustfaktor:

Der Gesamtverlustfaktor für ein Subsystem im SEA Modell ergibt sich aus dem internen Verlustfaktor inklusive der Summe der Kopplungsverlustfaktoren zu angrenzenden Subsystemen nach Gleichung (6). Der experimentell ermittelte Verlustfaktor für ein Gefach kann dem so ermittelten Gesamtverlustfaktor im SEA Modell gegenübergestellt werden.

$$\eta_{i,ges} = \eta_{i,int} + \sum_{j=1}^{41} \eta_{ij} \quad (6)$$

Dies ist in Abbildung 5 beispielhaft für das dritte Gefach (Subsystem 22) dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass lediglich im mittleren Frequenzbereich zwischen 250 Hz und 1000 Hz die Prognose die Messung leicht unterschätzt, wohingegen ab 2000 Hz eine leichte

Überschätzung zu erkennen ist. Dennoch zeigt der Vergleich eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und SEA Modell.

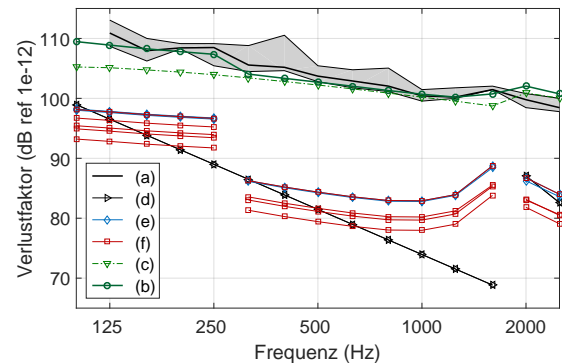


Abbildung 5: Vergleich zwischen experimentell ermittelten und berechnetem Gesamtverlustfaktor für ein Gefach. (a) Messung, (b) Berechneter Gesamtverlustfaktor nach Gleichung (6), (c) interner Verlustfaktor nach [4], (d) Kopplung zu Räumen, (e) und (f) Kopplung zu Spanplatten

Validierung SEA Energien:

Die Lösung von Gleichung (5) gibt die Energien in jedem einzelnen Subsystem bei Anregung mit der Leistung W_{in} . Da im Modell die gemessene Leistung eingesetzt wurde, können die Ergebnisse mit den gemessenen Energien verglichen werden. Hierzu wurde die mittlere Schnelle für jede Platte separat gebildet und die Energie nach Gleichung (1) bestimmt. Dies wurde analog für jedes Gefach mit den gemessenen Schalldrücken und Gleichung (2) durchgeführt. Für den Vergleich wurden alle Energien aus dem SEA Modell sowie alle experimentell ermittelten Energien auf Subsystem 2 bezogen. Aus diesen normierten Energien wurde die Abweichung zwischen SEA Modell und Messung nach Gleichung (7) als Pegeldifferenz D in dB bestimmt.

$$D = 10 \lg \frac{E_{i,SEA}}{E_{2,SEA}} - 10 \lg \frac{E_{i,Mess}}{E_{2,Mess}} \quad (7)$$

Die Abweichung (Pegeldifferenz D in dB) ist für die Spanplatten auf der angeregten Seite in Abbildung 6, für die Gefache in Abbildung 7 und für die Spanplatten auf der abgewandten Seite in Abbildung 8 dargestellt.

Die SEA Ergebnisse zeigen für die Platten auf der angeregten Seite eine gute Übereinstimmung im betrachteten Frequenzbereich mit Abweichungen im Bereich von 1-10 dB mit einzelnen Ausreißern bis zu 18 dB. Ein ähnliches Bild zeigt sich für die Platten auf der abgewandten Seite. Die Abweichungen in den Gefachen liegen ebenfalls im Bereich von 10 dB.

Zusammenfassung

Die Statistische Energie Analyse wurde im Rahmen dieser Arbeit verwendet um eine komplexe Holzrahmenbaustruktur bei punktförmiger Körperschallanregung zu modellieren. Dabei wurde das betrachtete System sehr detailliert in insgesamt 41 Subsysteme unterteilt.

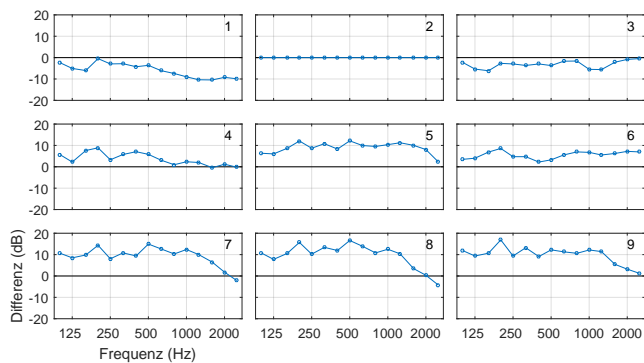


Abbildung 6: Vergleich der Energien aus dem SEA Modell mit Messdaten nach Gleichung (7) für die Spanplatten auf der Sendeseite.

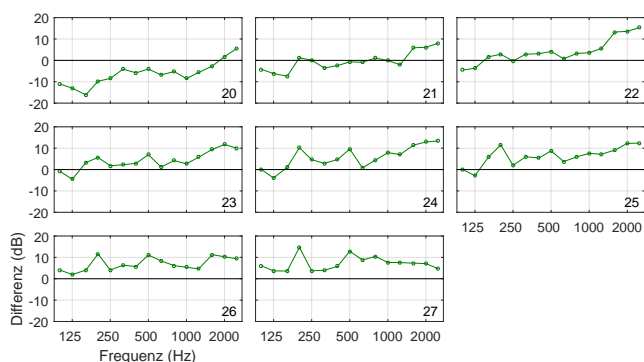


Abbildung 7: Vergleich der Energien aus dem SEA Modell mit Messdaten nach Gleichung (7) für die Gefache.

Sämtliche Kopplungen zwischen den einzelnen Subsystemen wurden aus bestehenden, in der Literatur zu findenden Modellen berechnet. Lediglich die Kopplung über die N+F Verbindung wurde experimentell ermittelt.

Zur Überprüfung des Modells wurden gemessene Gesamtverlustfaktoren mit den Verlustfaktoren aus dem SEA Modell beispielhaft für ein Gefach verglichen. Hier konnte eine gute Übereinstimmung erzielt werden. Im Weiteren wurden die Ergebnisse des SEA Modells experimentell ermittelten Energien auf den Beplankungslagen sowie in den Gefachen gegenübergestellt. Betrachtet man die Komplexität des vorliegenden Modells, weist dieser Vergleich mit Abweichungen, die weitgehend im Bereich von 10 dB mit einzelnen Ausreißern bis 18 dB liegen, eine passable Übereinstimmung auf.

Abschließend ist zu erwähnen, dass die Modellierung einer Leichtbaustruktur in dieser Form sehr aufwändig ist und nur für den speziellen Fall durchgeführt wurde, um die Anwendbarkeit der SEA zu überprüfen. Aufbauend auf die Erkenntnisse dieser Arbeit sollen nun Möglichkeiten zur Vereinfachung untersucht werden, um eine praktische Anwendbarkeit zu ermöglichen.



Abbildung 8: Vergleich der Energien aus dem SEA Modell mit Messdaten nach Gleichung (7) für die Spanplatten auf der abgewandten Wandseite.

Danksagung

Dieser Beitrag wurde im Rahmen des Projektes *Nachhaltiger Schallschutz gebäudetechnischer Anlagen in energetisch optimierten Gebäuden*, gefördert durch das BMBF im Rahmen der Förderlinie FHPProfUnt erarbeitet. Die Autoren bedanken sich zudem bei der Firma Regnauer für die Zusammenarbeit beim Bau des Prüfstandes sowie bei der Durchführung der Baumesung als auch bei der Firma Müller-BBM Vibroakustiksysteme für die Unterstützung in der Messtechnik.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 10848-1:2006-08. *Akustik - Messung der Flankenübertragung von Luftschall und Trittschall zwischen benachbarten Räumen in Prüfständen*.
- [2] F. Schöpfer u. a. "Case study on the vibrational behavior of a timber-frame structure". In: *Forum Acusticum*. Hrsg. von European Acoustics Association. 2014.
- [3] F. Schöpfer u. a. "Structure-borne sound propagation across a double leaf timber-frame wall". In: *ICSV*. Hrsg. von The International Institute of Acoustics and Vibration. 2015.
- [4] A. J. Price und M. J. Crocker. "Sound Transmission through Double Panels Using Statistical Energy Analysis". In: *The journal of the Acoustical Society of America* 47.3A (1970), S. 683.
- [5] C. Hopkins. *Sound Insulation*. Butterworth-Heinemann, 2007.
- [6] L. Cremer und M. A. Heckl. *Körperschall: Physikalische Grundlagen und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1967.
- [7] F. G. Leppington u. a. "The acoustic radiation efficiency of rectangular panels". In: *Proceedings of the Royal Society A* (1982).