

Akustische Vorhangsysteme als flexible Raumentrennelemente in Bürolandschaften

T. Graf¹, P. Jund¹, A. Taghipour¹, C. Hächler¹, P. Baumann² und O. Schälli¹

¹ Hochschule Luzern T&A, Technikumstrasse 21, CH-6048 Horw, thomas.graf@hslu.ch

² Création Baumann AG, Bern-Zürichstrasse 23, 4901 Langenthal, www.creationbaumann.com

Abstract

Mit Vorhangsystemen können Grossräume einfach und flexibel visuell getrennt werden. Die Herausforderung besteht darin, mit Textilien auch akustische Trennung und Privatsphäre zu erreichen. Für die akustische Trennung braucht es mehrschichtige Vorhangstoffe mit spezifischen Eigenschaften. Vorhangsysteme mit mehreren Vorhanglagen hintereinander, d.h. in Serie wurden mit Finiter-Element-Simulation (FEM) modelliert und optimiert. Die Simulationen wurden im akustischen Vorhangprüfstand der Hochschule Luzern Technik & Architektur experimentell validiert. Dabei wurden der Dämmungsgrad, der Sprachübertragungsindex (STI) und der Sprachverständlichkeitsindex (SII) in unterschiedlichen Szenarien bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass das Vorhangsystem die Schallübertragung partiell dämmt, sowie die Sprachverständlichkeit reduziert. Eine geringe Schallübertragung fand statt, in Folge deren die Sprache nur in Anwesenheit von zusätzlichen Geräuschen (im Büro) ganz unverständlich gemacht werden konnte. Eine Nutzerumfrage hat gezeigt, dass der Einsatz des Vorhangsystems in Büroräumlichkeiten das akustische Wohlbefinden, sowie die akustische Privatsphäre erhöht hat. Ferner wurde die Installation des Vorhangsystems mit einer Reduktion der subjektiv empfundenen Störung durch Umgebungsgeräusche assoziiert.

Untersuchungsmethode und Ergebnisse

Für die Untersuchung der mehrschichtigen Vorhanglagen wurden verschiedene Methoden angewendet: 1. Numerische Simulation mithilfe der Methode der finiten Elemente (FEM). 2. Ein analytisches Modell wurde entwickelt, welches als Grundlage für eine Software zur Berechnung des bewerteten Schalldämmmasses diente. 3. Die numerischen und analytischen Resultate wurden verglichen und Messungen gegenübergestellt. 4. Unterschiedliche Vorhangdämmungen wurden auralisiert. 5. Aus den Messungen und den Berechnungen wurde das Dämmmass berechnet und der Sprachübertragungsindex STI und der Sprachverständlichkeitsindex SII bestimmt. 6. Schliesslich wurde eine psychoakustische Nutzerumfrage durchgeführt.

Numerische Simulation: Bis zu fünf Vorhanglagen wurden numerisch mit der Methode der finiten Elemente simuliert. Für die Schallfeldberechnungen wurde das Programm COMSOL Multiphysics [1] verwendet und davon das Modul «pressure acoustics» (acpr) genutzt. Ein langer Kanal mit harten Wänden aber echofreiem Abschluss diente als virtueller Testraum (domain). Die Vorhänge wurden als «interior impedance» Z eingefügt. Z setzte sich aus dem Strömungswiderstand η in $Pa \cdot s/m$ und einem parallel geschalteten Massenbelag μ in kg/m^2 zusammen:

$$Z = \left(\frac{1}{\eta} + \frac{1}{i\mu\omega} \right)^{-1} \quad [Pa \cdot s/m] \quad (1)$$

wobei ω die Kreisfrequenz der akustischen Welle und $i = \sqrt{-1}$ die imaginäre Einheit ist. Gleichung (1) entspricht der Standardberechnung der Wellenimpedanz hängender Vorhangstoffe. Sie kann in der einschlägigen Literatur gefunden werden, z.B. in [2]. Die FEM Berechnung liefert das stationäre Feld des Schalldruckes für jede Frequenz. Nach dem Min/Max Verfahren oder der Methode der Wellentrennung kann der komplexe Reflexionskoeffizient r und Transmissionskoeffizient t frequenzabhängig berechnet werden (siehe z.B. [3]). Die Dämmung ergibt sich als:

$$\Delta L = 10 \log(|t|^2) \quad [dB] \quad (2)$$

Abb. 1 zeigt die drei Grössen $R = |r|^2$, $T = |t|^2$ und ΔL als Funktion der Frequenz für fünf Vorhanglagen in unterschiedlichem Abstand. (Beachte: Unsere Symbole entsprechen nicht der DEGA-Empfehlung 101, [4]). Die charakteristischen Grössen für die Berechnungen sind in Tabelle 1 gegeben. In der Abb. 1 werden die numerischen mit den analytischen Berechnungen verglichen. Die Übereinstimmung ist perfekt.

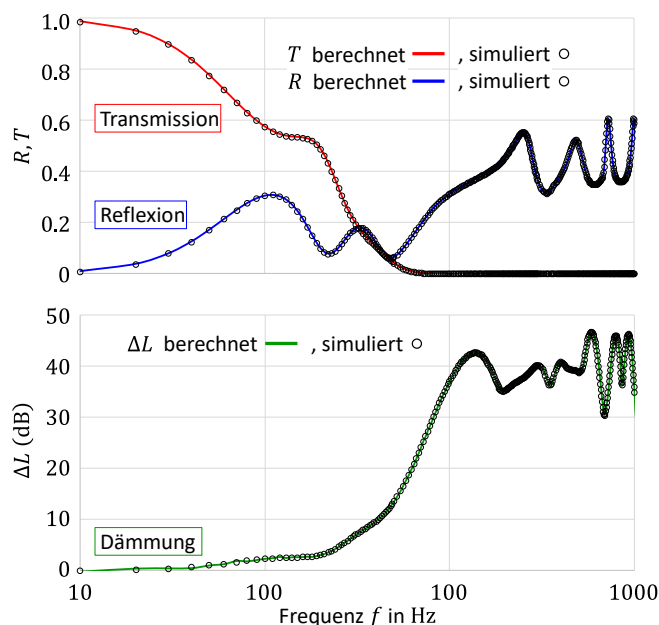


Abbildung 1: Analytische Berechnung (Linien, Airy Gleichungen) zusammen mit der numerischen Simulation (Kreise, FEM) des Reflexionsgrads R , des Transmissionsgrads T , sowie der Dämmung ΔL als Funktion der Frequenz f eines fünfflagigen Vorhangs mit unterschiedlichen Impedanzen und Abständen (s. Tabelle 1). Die Phasen sind berücksichtigt, was Interferenzphänomene und die Welligkeit der Kurven zur Folge hat.

Tabelle 1: Parameter für die Berechnungen in Abb. 1. η ist der Strömungswiderstand, μ ist der Massenbelag und Δs ist der Abstand zwischen benachbarten Vorhangschichten.

Nr.		1	2	3	4	5
η	$[Pa \cdot s/m]$	1000	1500	1500	1000	1500
μ	$[g/m^2]$	300	250	250	300	250
Δs	$[cm]$		8	10	5	7

Analytisches Modell: Das analytische Modell basiert auf der Methode der Transfer- und Streumatrizen für Wellen (siehe [5]). Bei einer Abfolge von Impedanzen und Abständen ergeben sich aus den Matrizen die Airy Gleichungen für r und t . Diese können für jede zusätzliche Schicht plus Abstand iterativ berechnet werden.

Basierend auf dem validierten, analytischen Modell wurde von der Hochschule Luzern T&A eine Software namens «Zelos» entwickelt, die integraler Bestandteil der Produkteentwicklung und Kundenberatung ist. Die Nutzer und Berater der Firma Création Baumann können verschiedene Stoffe aus dem Verkaufskatalog in einer Abfolge kombinieren und das bewertete Schalldämmmass $R_w(C; C_{tr})$ der gesamten Sequenz berechnen lassen. Abb. 2 zeigt die Programmoberfläche von «Zelos».

Experimentelle Validierung: Ein Vorhangprüfstand der Hochschule Luzern T&A wurde eigens für dieses Projekt entwickelt. Der Prüfstand besteht aus einem schallharten Korridor (Luftschutzbunker-Korridor), welcher in der Mitte durch einen Prüfraumen mit eingespanntem Vorhang in zwei Hälften unterteilt ist, siehe Abb. 3. Eine Hälfte des Korridors ist der Senderraum mit einer Referenzschallquelle (rosa Rauschen). Die andere Hälfte ist der Empfangsraum. In beiden Raumhälften wird der Schalldruckpegel in Terzbändern gemessen. Die Differenz des A-bewerteten Äquivalenzschallpegels entspricht dem Schalldämmmass des Trennvorhangs. Die Messtechnik wurde in Anlehnung an die Norm ISO 10140-2:2010 [6] für die praktische Anwendung adaptiert. Der Grundriss des Prüfraums, sowie eine Beispielsimulation für 400 Hz sind in Abb. 4 gezeigt.



Abbildung 3: Vorhangprüfstand der Hochschule Luzern, T&A. Der Prüfstand erlaubt das Messen mehrlagiger Vorhangsysteme mit unterschiedlichen Abständen zwischen den Lagen. Jede Lage kann schalldicht zur Wand, zur Decke und zum Boden eingespannt werden. Jede Lage kann mit beliebiger Spaltbreite zur Wand geöffnet werden.

Prototypen: Die Designerinnen der Firma Création Baumann haben die Erkenntnisse aus den Simulationen, respektive aus den Berechnungen mit dem Programm «Zelos» übernommen und verschiedene Vorhangprototypen produziert. Der Anspruch und die Herausforderung bestand darin, hohe Dämmwerte (Kombination aus hohem Massenbelag und grossem Strömungswiderstand) mit ästhetischen Ansprüchen (Transluzenz und Leichtigkeit) zu vereinen. Das Schalldämmmass der unterschiedlichen Prototypen ist in Abb. 5 dargestellt. Prototyp Nr. 1 zeigt im Bereich der Sprache ein Schalldämmmass von etwa 15 dB.

Die Erkenntnisse aus der Untersuchung der Prototypen führten zu kommerziellen Vorhangprodukten.

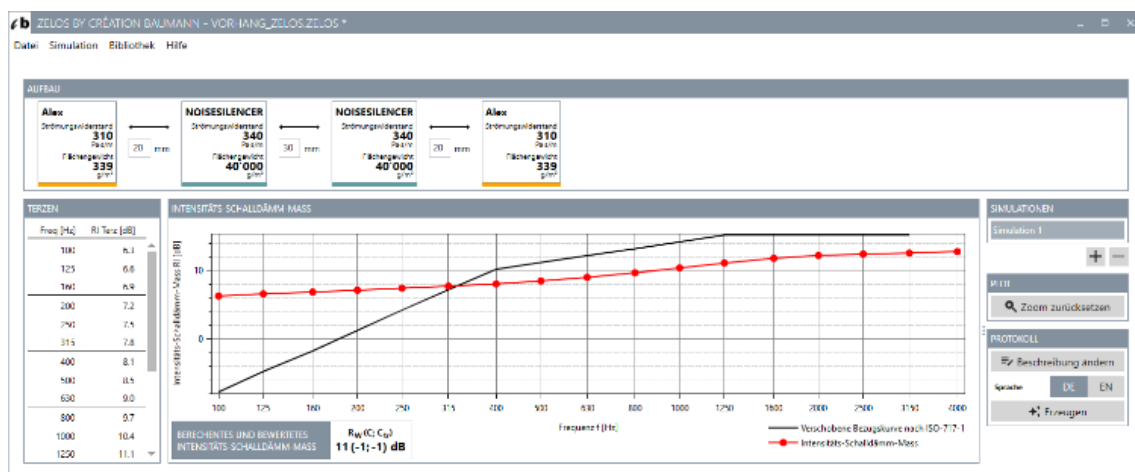


Abbildung 2: Software Zelos zur Berechnung des Schalldämmmasses eines mehrlagigen Vorhangs. Mithilfe der verschobenen Bezugskurve wird das bewertete Schalldämmmass R_w nach Norm bestimmt.

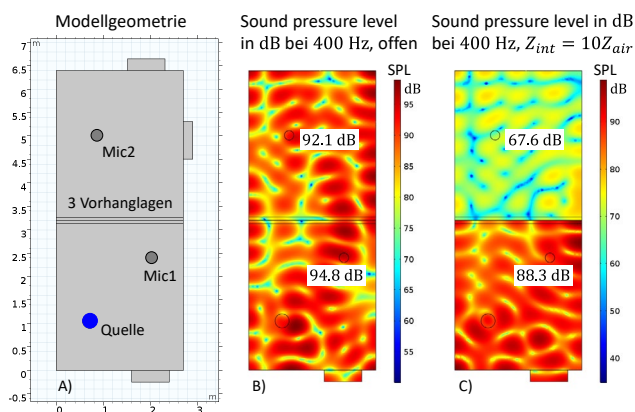


Abbildung 4: A) Grundriss des Vorhangprüfraums mit Positionen der Rauschquelle und der Mikrophone. B) Simulation der Schalldruckpegel-Verteilung im nicht unterteilten Prüfraum bei 400 Hz. C) Simulation mit drei Vorhanglagen als Raumtrennung. Für die Messungen und die Simulation wurden je drei Caruso-Absorbermatten in beide Raumhälften, an die entfernten Wände gestellt. Beachte: Die Validierungssituation im Prüfraum entspricht nicht der Modellsituation für die Berechnungen mit der Software «Zelos» (d.h. unendlich langer Korridor, siehe Abb. 2.).

Tabelle 2: Ergebnisse der Short-Time Objective Intelligibility (STOI) Messungen bei verschiedenen Szenarien. Erste Zeile: gemessener STOI [7-8] des Originalsignals, empfangen an der Empfängerposition, mit und ohne Vorhang zwischen Sender und Empfänger.

Signalquellen	STOI ohne Vorhang	STOI mit Vorhang	Verbesserung
Sp1	0.57	0.42	Ja
Sp1 + WGN_Quiet	0.48	0.39	Ja
Sp1 + sp2WGN_Quiet	0.43	0.32	Ja
Sp1 + WGN_Loud	0.40	0.32	Ja
Sp1 + sp2WGN_Loud	0.27	0.12	Ja

Zudem wurde der Sprachübertragungsindex STI [9-10] mit und ohne Vorhang gemessen. Der STI erreichte einen Wert von 0.77 ohne Vorhang, sowie einen Wert von 0.67 mit Vorhang. Die Sprachübertragung verschlechtert sich durch die Vorhangtrennung, allerdings nur unwesentlich. Der Vorhang hat also die Sprachübertragung beeinträchtigt, nicht aber genügend gestört, so dass die Sprache (ohne Maskierung) unverständlich wurde.

Nutzerumfrage: 13 Nutzer und Nutzerinnen aus sechs Büroräumlichkeiten nahmen an der Nutzerumfrage zum neu entwickelten Vorhangprodukt teil. Dabei wurden ihnen die folgenden drei Fragen gestellt:

1. Befindlichkeit: Wie bewerten Sie Ihr akustisches Wohlbefinden am Arbeitsplatz? (sehr unwohl bis sehr wohl)
2. Privatsphäre: Wie zufrieden waren bzw. sind Sie mit der akustischen Privatsphäre am Arbeitsplatz? (sehr unzufrieden bis sehr zufrieden)
3. Leistungsfähigkeit: Wie gestört fühlten bzw. fühlen Sie sich von Umgebungsgeräuschen bei der Bearbeitung Ihrer Aufgaben? (überhaupt nicht gestört bis äusserst gestört)

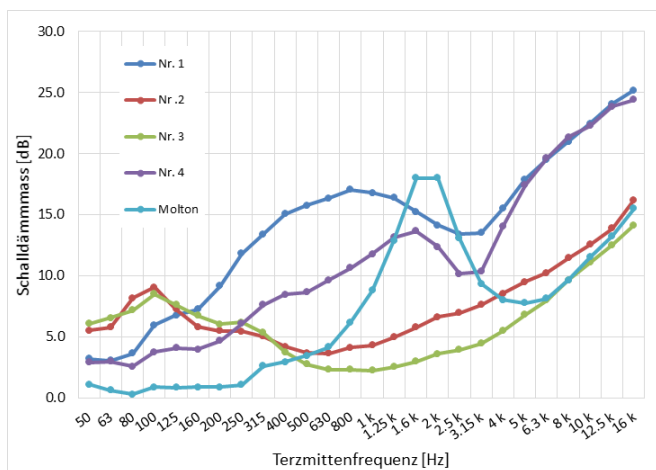


Abbildung 5: Schalldämmmass der vier Prototyp-Vorhängen als Funktion der Frequenz. Im Frequenzbereich der Sprache schneidet der Prototyp 1 im Vergleich zu den anderen und zum Molton besonders gut ab.

Diese Fragen haben die Studienteilnehmenden für zwei Zeiträume beantwortet: „Vor der Installation“ des akustischen Vorhangs und „nach der Installation“. Das akustische Wohlbefinden, sowie die Privatsphäre wurden auf einer bipolaren, 7-Punkte Skala (von -3 bis +3) bewertet [11]. Lärmstörung wurde auf einer unipolaren, 11-Punkte Skala (von 0 bis 10) beurteilt [12-14]. Die Abb. 6 zeigt die Ergebnisse der Umfrage. Der Einsatz des akustischen Vorhangs hat das akustische Wohlbefinden und die Privatsphäre deutlich gesteigert, und gleichzeitig die Störung durch Umgebungsgeräusche signifikant reduziert.

Messung von Indikatoren der Privatsphäre: Eine Vorhangvariante wurde im Prüfstand der Hochschule Luzern T&A untersucht. Zur Ermittlung der Sprachverständlichkeitsstörung wurde die Vorhangvariante mit Umgebungsgeräuschen maskiert. Dem Sprachsignal $Sp1$ wurde ein weiteres Sprachsignal $Sp2$, sowie ein Rauschsignal überlagert. Jedes Setup wurde mit und ohne Vorhang als Raumtrennelement gemessen, um dessen Einfluss zu bestimmen (Privatsphäre). Als Mass der Sprachverständlichkeitsstörung wurde der Short-Time-Objective Intelligibility (STOI) Algorithmus [7-8] verwendet. (siehe Tabelle 2).

Zusammenfassung

Von mehrlagigen Vorhangsystemen können wir das Dämmmass als Funktion des Strömungswiderstandes, des Massenbelags und des Abstands zwischen den Schichten berechnen. Andere Autoren haben Mehrlagen-Systeme als Absorber vor einer Wand untersucht (z.B. [15]). Unsere Berechnungen basieren auf Airy's Gleichungen. Dank unseren Analysen konnte ein akustisches Vorhangsystem verbessert werden. Messungen und Befragungen bei Nutzern bestätigen die Verbesserungen.

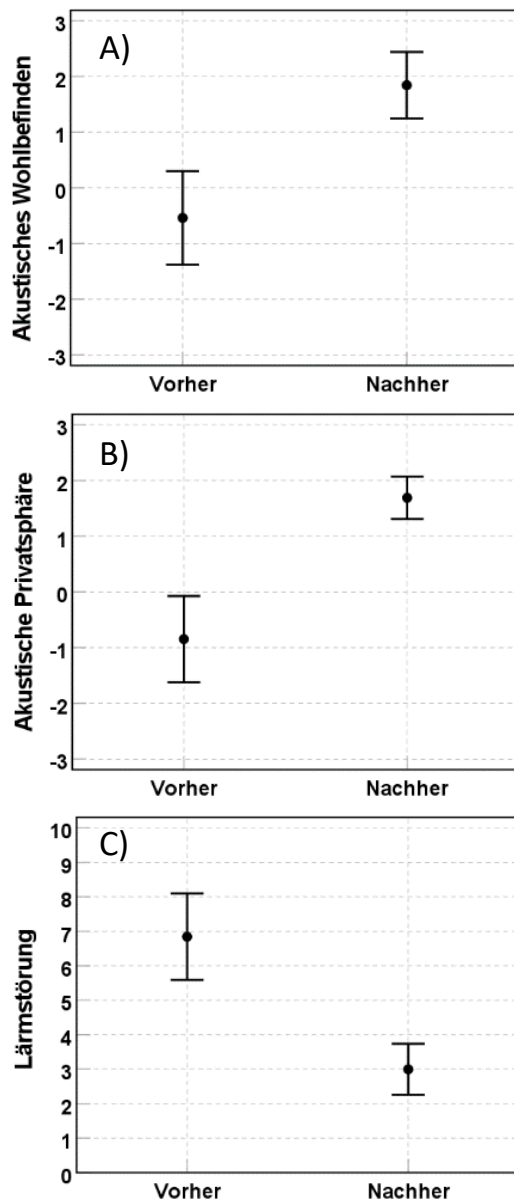


Abbildung 6: Ergebnisse der Nutzerumfrage zum subjektiven akustischen Empfinden vor und nach der Installation des akustischen Vorhangsystems. **A)** Akustisches Wohlbefinden. **B)** Akustische Privatsphäre. **C)** Lärmstörung. Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle werden gezeigt. Alle Unterschiede sind signifikant ($p < 0,01$).

Danksagung

Die Autoren sind Eliane Ernst, Brigitte Signer, Mario Klaus, György Csikos, Silvio Emmenegger sowie Antoine Schnetz für ihre hilfreichen Beiträge im Projekt sehr dankbar. Dieses Forschungsprojekt wurde durch die Innosuisse mitfinanziert.

Literatur

- [1] COMSOL Multiphysics®, URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
- [2] Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik – Band 2, Wellentheoretische Raumakustik, L. Cremer & H.A. Müller, Hirzel Verlag, 1976, Seite 28.
- [3] Technische Akustik, M. Möser, Springer Vieweg, 2012, Kapitel 6.2.1 und 6.2.2.
- [4] DAGA URL: https://www.dega-akustik.de/fileadmin/dega-akustik.de/publikationen/DEGA_Empfehlung_101.pdf
- [5] Fundamentals of Photonics, B.E.A. Saleh & M.C. Teich, John Wiley a. Sons, 2007, Second Ed., Kapitel 7.1.
- [6] ISO 10140-2:2010. Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 2: Measurement of airborne sound insulation; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2010.
- [7] C. H. Taal, R. C. Hendriks, R. Heusdens and J. Jensen, "A short-time objective intelligibility measure for time-frequency weighted noisy speech," 2010 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2010, pp. 4214-4217, doi: 10.1109/ICASSP.2010.5495701.
- [8] C. H. Taal, R. C. Hendriks, R. Heusdens and J. Jensen, "An Algorithm for Intelligibility Prediction of Time-Frequency Weighted Noisy Speech," in IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 19, no. 7, pp. 2125-2136, Sept. 2011, doi: 10.1109/TASL.2011.2114881.
- [9] Houtgast, T., and Steeneken, H. J. (1973). The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility. Acta Acust. United Acust. 28, 66–73. doi: 10.1121/1.1913632
- [10] IEC 60268-16 (2011). Sound System Equipment – Part 16: Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index. Geneva: International Organization for Standardization.
- [11] Acoustic comfort in virtual inner yards with various building facades, A. Taghipour, T. Sievers & K. Eggenschwiler, 2019, Int. J. Environ. Res. Public Health 16, 249.
- [12] ISO/TS 15666. Technical Specification: Acoustics – Assessment of Noise Annoyance by Means of Social and Socio-Acoustic Surveys; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2013.
- [13] Short-term annoyance reactions to civil helicopter and propeller-driven aircraft noise: a laboratory experiment, A. Taghipour, R. Pieren & B. Schäffer, 2019, J. Acoust. Soc. Am. 145, 956-967.
- [14] Effects of background sounds on annoyance reaction to foreground sounds in psychoacoustic experiments in the laboratory: limits and consequences, A. Taghipour & E. Pelizzari, 2019, Appl. Sci. 9, 1872.
- [15] Predicting sound absorption coefficients of lightweight multilayer curtains using the equivalent circuit method, R. Pieren & K. Heutschi, 2015, Appl. Acoust., 92, 27-41.