



## wenn schwarze Löcher Trittschall schlucken

5.10.2023 - Stefan Schoenwald  
[stefan.schoenwald@empa.ch](mailto:stefan.schoenwald@empa.ch)

10. BauphysikerInnen TREFFEN, Wien

# Hintergrund



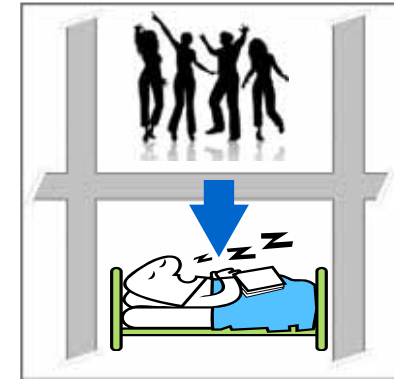
- Markante Zunahme der Nutzung des nachwachsenden Rohstoff Holz für mehrgeschossige Holzgebäude
- Beitrag zur Dekarbonisierung der Gesellschaft durch Kohlenstoffspeicherung
- Ermöglicht durch leistungsfähige Massivholz-Bauteile (Brettsperrholz, Brettschichtholz):
  - Erhöhte Anforderungen an Statik und Brandschutz im Mehrgeschossbau gut erfüllbar
  - Gute Wirtschaftlichkeit durch hohen Vorfertigungsgrad



# Optimierungspunkt Schallschutz der Massivholzdecken



- Trittschalldämmung bei tiefen Frequenzen
- Geringes Flächengewicht und relativ hohe Biegesteifigkeit
- Zusätzliche Massnahmen zur Trittschallminderung erforderlich:
  - Erhöhung der Masse, z. B. durch Kiesschüttungen, Verdreifachung der Masse der Grunddecke
  - Zusätzliche Vorsatzschalen, z. B. schwimmende Estriche oder Abhangdecken



# Relevanz

## Zahlen und Fakten zur Kiesschüttung



- 12 cm Kiesschüttung ( $\approx 200 \text{ kg/m}^2$ ) in Wohngebäude mit  $500 \text{ m}^2$  Grundfläche und 10 Stockwerken:
  - Gesamtaufbauhöhe:
    - $\approx 1.2 \text{ m}$
  - Verlorenes Raumvolumen:
    - $\approx 600 \text{ m}^3$
  - Zusätzliches Gewicht:
    - $\approx 1000 \text{ t}$



# Zielsetzung

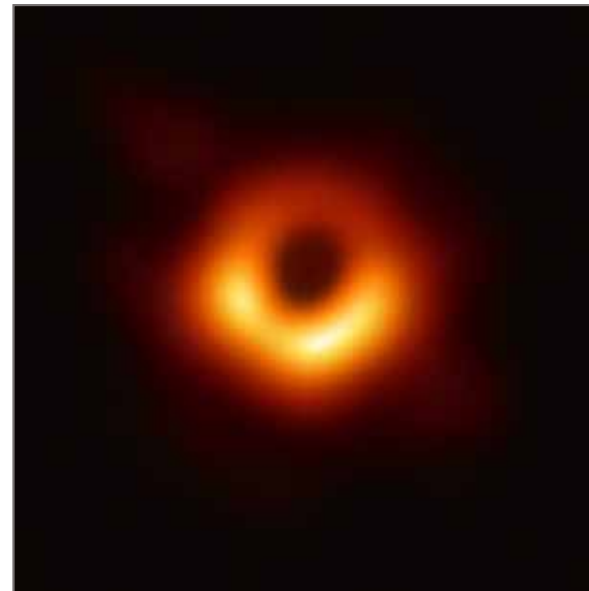


Ersatz der Kiesschüttung durch  
«Akustische Schwarze Löcher»  
zur Trittschallminderung



Photo S. Schoenwald Design "Juri Troy Architects, Pavillion BuGa 2023, Mannheim, Germany"

05.10.2023



Von Event Horizon Telescope - <https://www.eso.org/public/images/eso1907a/>

wenn schwarze Löcher Schall schlucken - S. Schoenwald

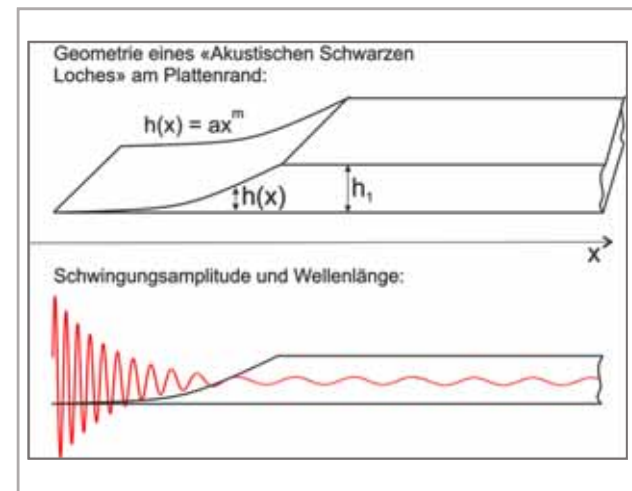
5



# Theorie

## «Akustische Schwarze Löcher»

- Beschrieben durch Mikhail Mironov, Soviet Physics Acoustics (1988) [1]
- Keine Reflektion von Körperschall bzw. Schwingungen an sich parabolisch verjüngenden Kanten von Platten
  - Biegewellengeschwindigkeit wird unendlich langsam
  - Biegewellenamplitude unendlich gross
  - Komplette «Absorption» des einfallenden Körperschalls
- Analogie zu schwarzen Löchern in der Astronomie



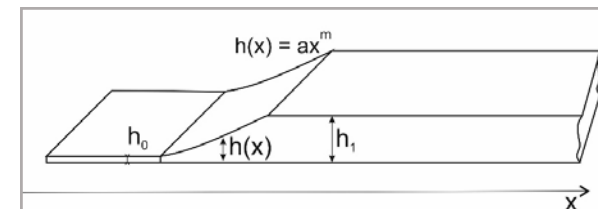
[1] Mironov, M. A. "Propagation of a flexural wave in a plate whose thickness decreases smoothly to zero in a finite interval." *Soviet Physics Acoustics-USSR* 34.3 (1988): 318-319

# Umsetzung in Praxis

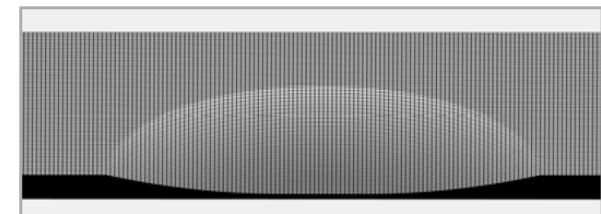
## Stand der Forschung



- Effekt auch schon bei nicht perfekten «gestutzten» Kanten [1]:  
Dämpfung der Verjüngung verstärkt deren Wirkung, wegen der dortigen grossen Schwingungsamplituden
- Weitere Anordnung der Verjüngung, z.B. als runde/ovale Vertiefung der Platte [2]
- ASL-Effekt tritt oberhalb der Grenzfrequenz ein:  
Erste Platteneigenmode mit «Resonanz» im Akustischen Schwarzen Loch (ASL)
- ASL-Effekt ist breitbandig:  
Reduzierung von breitbandigen, stochastischem Körperschall



[1] Krylov, Victor V. "New type of vibration dampers utilising the effect of acoustic 'black holes'." *Acta Acustica united with Acustica* 90.5 (2004): 830-837

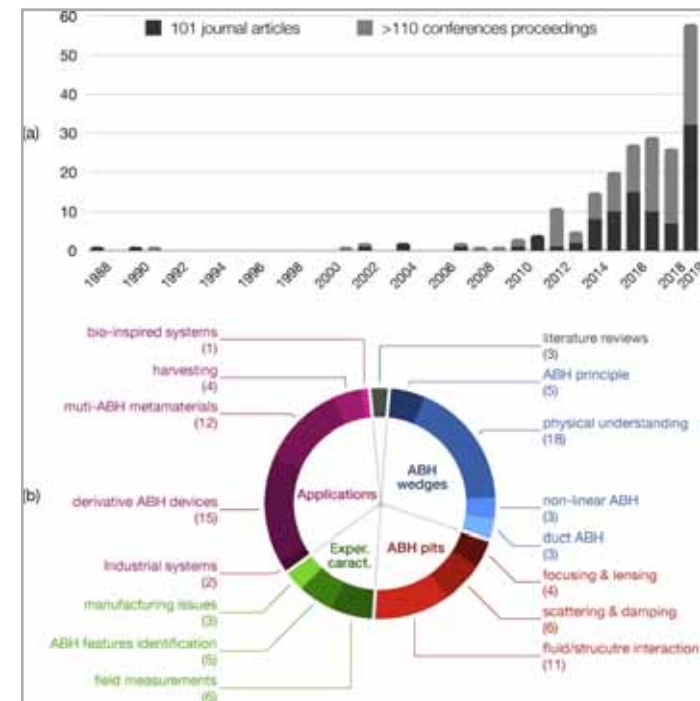


[2] Krylov, Victor V. "Propagation of plate bending waves in the vicinity of one- and two-dimensional acoustic 'black holes'." (2007).

# Umsetzung in Praxis Einsatzgebiete



- Zahlreiche akademische Anwendungsgebiete [1]
- Interesse an «ASL» in vielen Industriebereichen, unter anderem in Automobil und Aerospace-Sektor
- Wirksamkeit in vielen Untersuchungen nachgewiesen



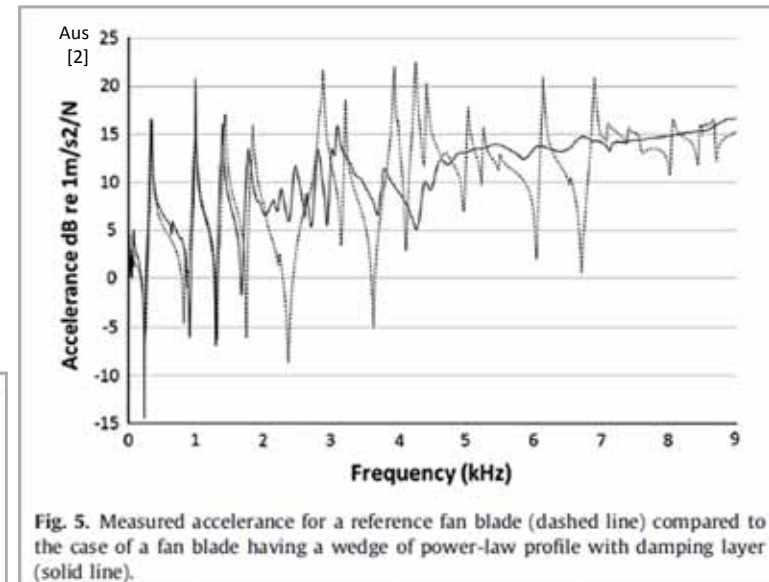
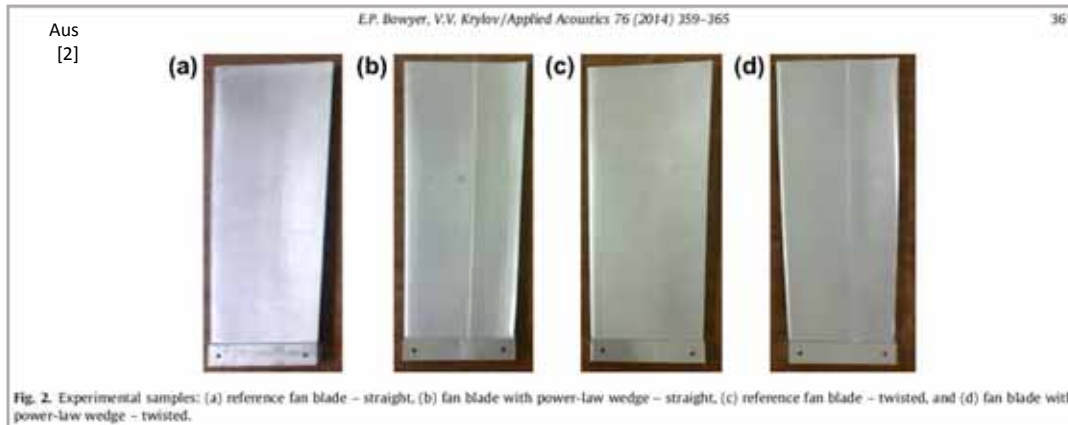
[1] Pelat, Adrien, et al. "The acoustic black hole: A review of theory and applications." *Journal of Sound and Vibration* 476 (2020): 115316.



# Industrielle Anwendung Turbinenschaufeln



- Schwingungsreduzierung bei Turbinenschaufeln mit ASL an den Kanten [1]
- Bisher eine bekannte industrielle Anwendung im Bereich der Lärm- und Schwingungsminderung



[1] Bayod, Jose Javier. "Application of elastic wedge for vibration damping of turbine blade." *Journal of System Design and Dynamics* 5.5 (2011): 1167-1175.

[2] Bowyer, E. P., and Victor V. Krylov. "Damping of flexural vibrations in turbofan blades using the acoustic black hole effect." *Applied Acoustics* 76 (2014): 359-365.

# Umsetzung in Praxis Problematik



- Anwendung und Fertigung oft nicht praktikabel wegen zu geringer Plattenstärke [1]
- ASL-Effekt tritt trotz kleiner Fertigungsfehler auf [2]

[1] Bowyer, Elizabeth Patricia. "Acoustic black hole manufacturing for practical applications and the effect of geometrical and material imperfection." *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. Vol. 253. No. 4. Institute of Noise Control Engineering, 2016.

[2] Bowyer, E. P., et al. "Effect of geometrical and material imperfections on damping flexural vibrations in plates with attached wedges of power law profile." *Applied Acoustics* 73.5 (2012): 514-523.

Aus [1]

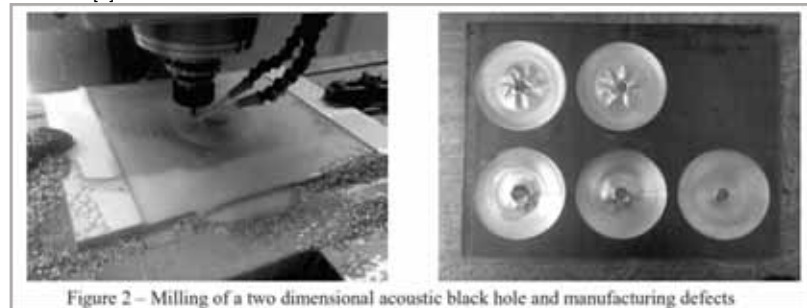


Figure 2 – Milling of a two dimensional acoustic black hole and manufacturing defects

Aus [1]

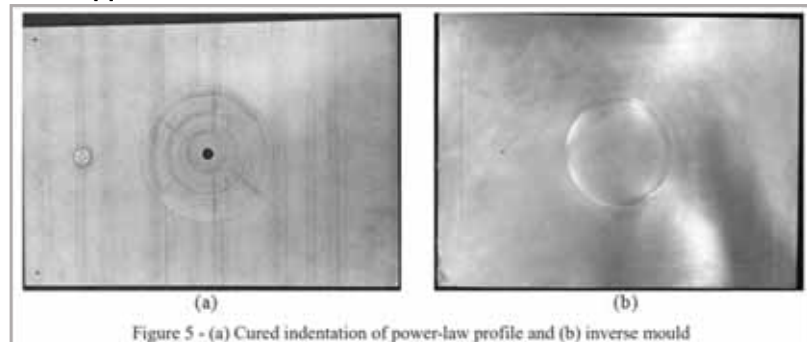
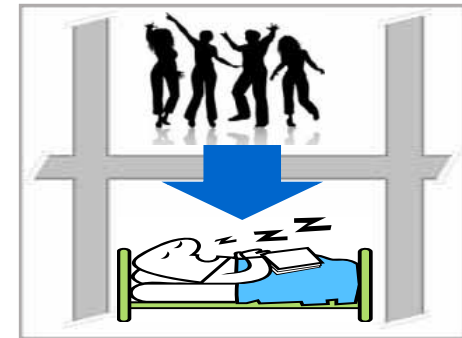


Figure 5 - (a) Cured indentation of power-law profile and (b) inverse mould

# Trittschalldämmung von Massivholzdecken mit Akustischen Schwarzen Löchern (TriMASL)



- Zielsetzung:  
Reduzierung der für den Trittschallschutz zusätzlichen Masse «Splittschüttung» durch akustische schwarze Löcher (ASL)
- Projektergebnis:  
Experimenteller Nachweis der Wirksamkeit der ASL an einem Deckendemonstrator im Empa Akustiklabor
- Förderung durch Umwelttechnologieförderung des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Schweiz



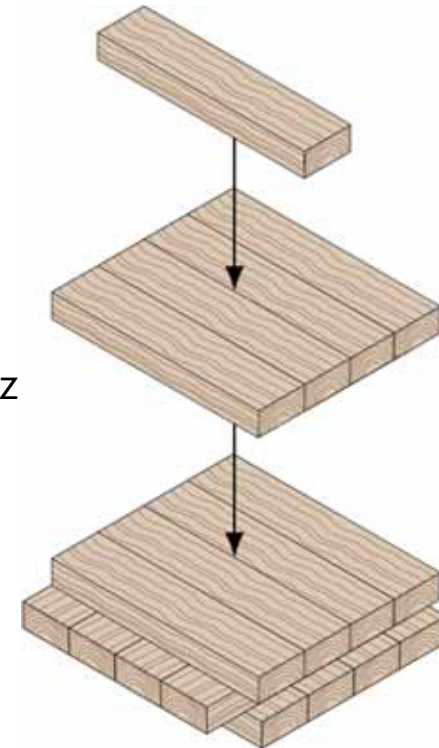
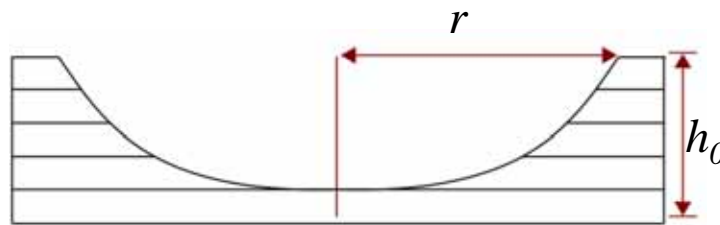
Von clt.info



# Finite-Elemente-Modell (FEM) - Brettsperrholz (BSP) Decke



- Bretter werden kreuzweise aufgeschichtet und verklebt
- Inhomogenes Material mit orthotropen Schichten
- Breitbandiges recheneffizientes vibro-akustisches FE-Modell notwendig:
  - Frequenzbereich bis 5 kHz und ASL Profil erfordert feines Netz
  - Sehr rechenaufwendig mit üblichen FEM-Volumenelementen

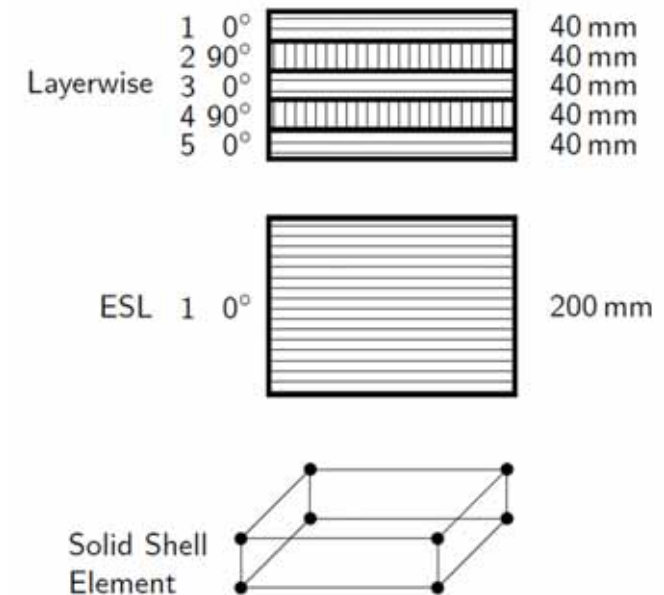


# Recheneffizientes FE-Modell für Brettsperrholz-Decke



- Entwicklung und Validierung eines recheneffizienten FE-Modells für BSP [1]
- Homogenisierung des Schichtaufbaus unter Berücksichtigung der Timoshenko/Reissner-Mindlin-Theorie als Schlüsselement
- Verwendung von Volumenschalen-Elementen
- Berechnungszeit <10min, 1200x schneller als einfaches Modell mit Volumenelementen

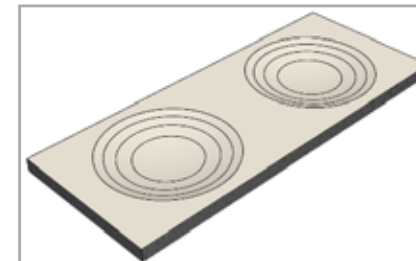
[1] S. Valley and S. Schoenwald, "An efficient analytical method to obtain the homogenised frequency-independent elastic material properties of cross-laminated timber elements," Journal of Sound and Vibration, vol. 546, 2023



# Kleinformatiger Prototyp mit ASL Fertigung



- Zwei Brettsperrholzplatten:
  - 5-lagig, Schichtdicke 20 mm
  - Abmessungen, ca. 2.80 m x 1.20 m x 0.10 m
  - **Ohne und mit 2x ASL**  $\varnothing$  1.00 m, Tiefe 80 mm



05.10.2023



wenn schwarze Löcher Schall schlucken - S. Schoenwald

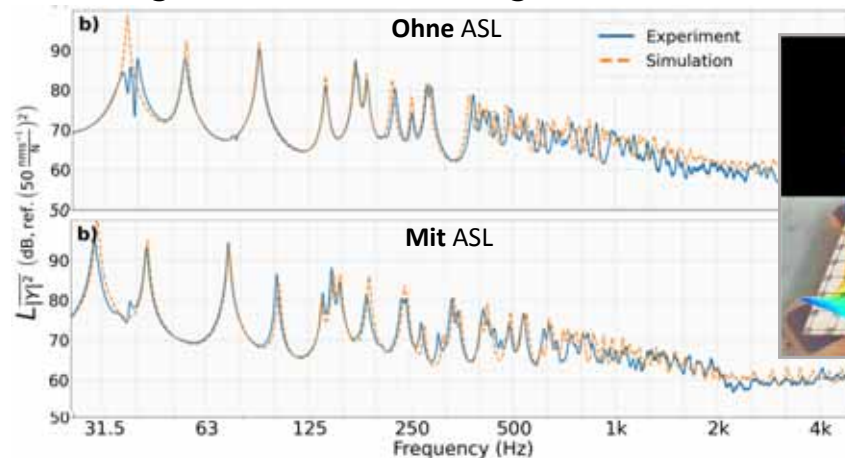
14



# Validierung der FEM-Berechnungen «kleine» BSP Platten mit/ohne ASL



- Messung der Oberflächenschwingung im Punktraster mit Scanning Laser Doppler Vibrometer und Anregung mit Shaker
- Materialdaten ermittelt für grosse BSP-Platte von anderem Hersteller – Steifigkeit für kleine Platte um 5% angepasst
- Sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment



05.10.2023

wenn schwarze Löcher Schall schlucken - S. Schoenwald



15

# BSP-Decke mit ASL Versuchsaufbau



Patentanmeldung:  
Low noise engineered wood building elements,  
EP23175366, 25.05.2023

- BSP 200 mm, 5-lagig, 5.73 m x 4.76 m:
  - Ohne und mit 4x ASL,  $\varnothing$  2.20 m, Tiefe 160 mm
  - Mit Splitt befüllt, 60% grössere Masse als Referenzplatte ohne ASL
- Trittschalldämmung mit Norm-Hammerwerk im Labor nach EN ISO 10140-3



05.10.2023

wenn schwarze Löcher Schall schlucken - S. Schoenwald



16



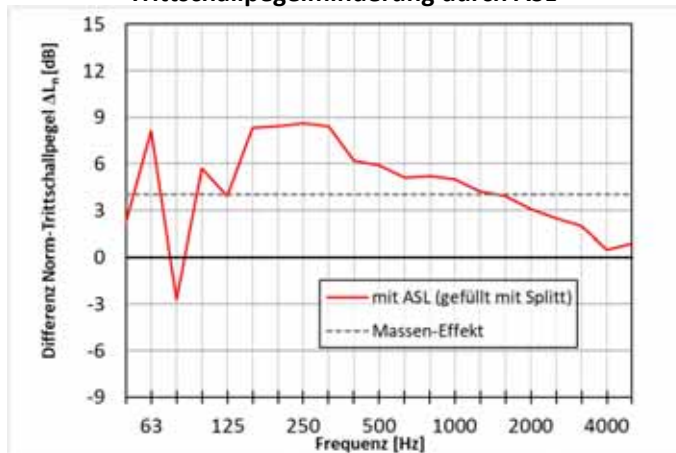
# Trittschalldämmung – BSP-Deckendemonstrator mit ASL



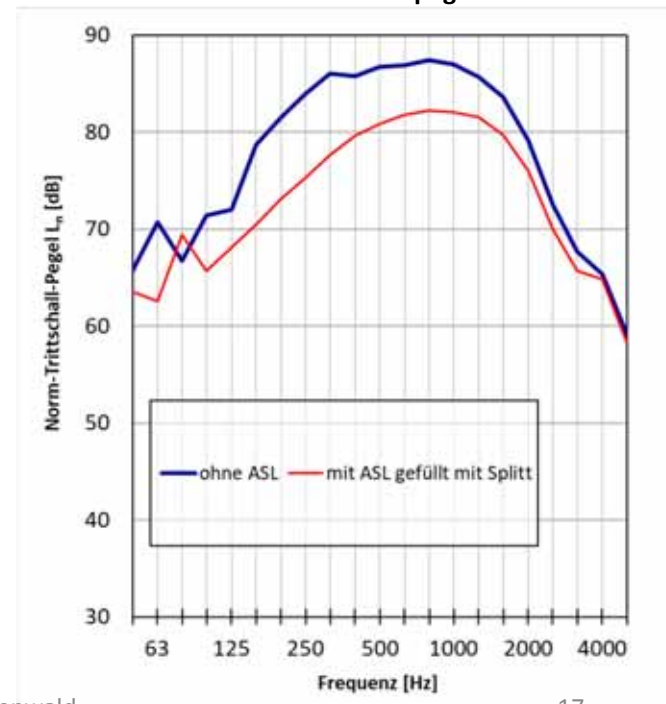
- Gute Trittschallpegel-Minderung erreicht
- Übertrifft theoretischen Masse-Effekt deutlich
- Ohne systematische Optimierung der ASL-Geometrie
- Einbruch bei 80 Hz durch Verschiebung einer Mode

Patentanmeldung:  
Low noise engineered wood building elements,  
EP23175366, 25.05.2023

Trittschallpegelminderung durch ASL



Norm-Trittschallpegel



# Trittschalldämmung – ASL Deckendemonstrator mit Fussbodenaufbau

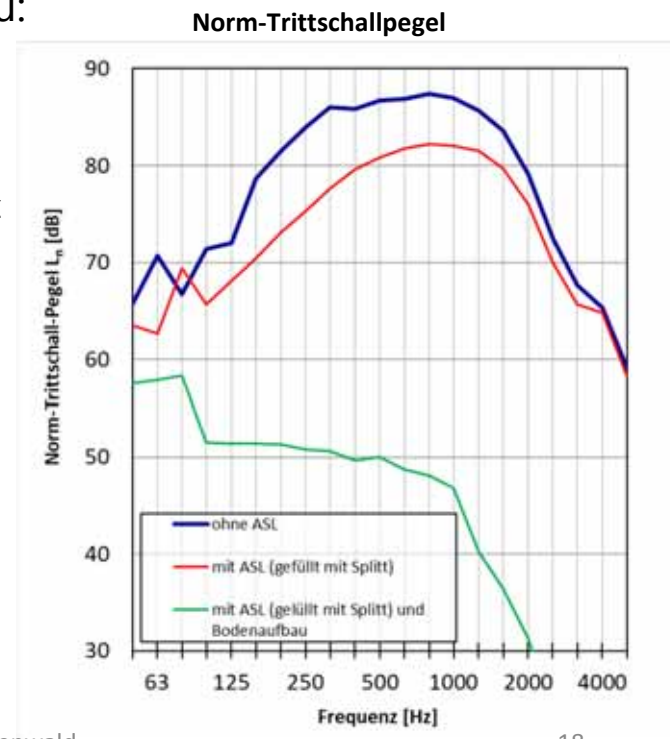


Patentanmeldung:  
Low noise engineered wood building elements,  
EP23175366, 25.05.2023

- BSP Decke mit Splitt befüllten ASL und Fussbodenaufbau:
  - 2 mm PVC Bodenbelag
  - 70 mm Zementestrichplatte (vorgefertigt, 166 kg/m<sup>2</sup>)
  - 60 mm Trittschalldämmung (Mineralwolle, 6 MN/m<sup>3</sup> + 9 MN/m<sup>3</sup>)
- Baurechtliche Anforderungen und Empfehlung für Trittschallschutz zwischen Wohnräumen werden erreicht

	$L_{n,w}$	$L_{n,w}+C_I$	$L_{n,w}+C_{I,50-2500}$
<b>Einzahlwert Laborversuch</b>	<b>47</b>	<b>46</b>	<b>50</b>
SIA 181 – Mindestanforderung	≤53 ✓	≤53 ✓	
SIA 181 – erhöhte Anforderung	≤49 ✓	≤49 ✓	
Lignum – Mindestschallschutz			≤58 ✓
Lignum – erhöhter Schallschutz			≤53 ✓
Lignum – höchster Schallschutz			≤49 ✗

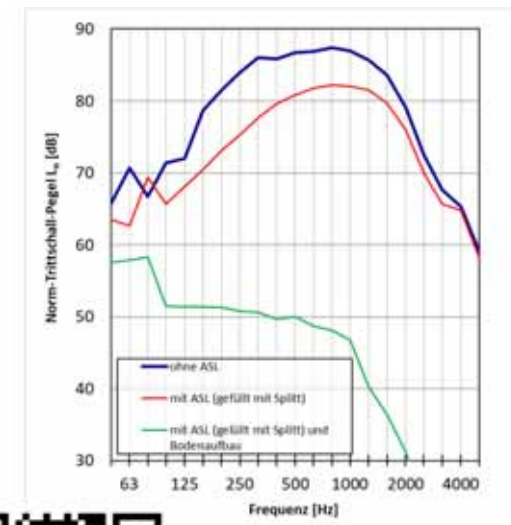
- Ohne Berücksichtigung der Nebenwege
- Grenzwerte als  $L_{nT,w}$  -> für Empfangsräume >30 m<sup>3</sup> -> geringere Beurteilungspegel



# Fazit



- Mit Splitt/Sand befüllte akustische schwarze Löcher verbessern die Trittschalldämmung deutlich
- Nur 30% zusätzliche Masse werden im Vergleich zu einer vollflächigen Splittschüttung benötigt
- Vielen Dank...
  - Für die finanzielle Unterstützung durch die Umwelttechnologie Förderung des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Schweiz
  - für die Realisierung der Versuchsobjekt durch Strüby Holzbau AG, Seewen (SZ) und Timber Structures 3.0 AG, Thun, Schweiz



<https://youtu.be/7Z6jGCB5MOM>