Simulation und experimentelle Validierung der Schalldämmung adaptiver Membrankissenkonstruktionen im Impedanzrohr

Simon O. Weber[1], Sumee Park[2], Philip Leistner[1,2]

[1] *Institut für Akustik und Bauphysik, 70569 Stuttgart, Deutschland, Email: simon.weber@iabp.uni-stuttgart.de*

[2] *Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 83626 Valley, Deutschland*

Einleitung

Anhand des kürzlich veröffentlichten Status-Bericht der Vereinten Nationen [2] ist der Gebäudebereich für 37% der globalen Kohlendioxidemissionen verantwortlich. Dabei entstehen 30% des Treibhausgaspotentials durch die graue Energie bzw. die Konstruktion und 70% durch den Betrieb des Gebäudes [10]. Innerhalb des SFB 1244 wird an Möglichkeiten zur Emissionsreduktion geforscht. Dazu wurde 2021 das weltweit erste adaptive Forschungshochhaus [1] errichtet, wobei die Lebenszykluskosten durch die Anwendung von Tragwerksaktoren um 40% reduziert werden konnten. Innerhalb der Fassade werden komplementär bedruckte Membrankissenkonstruktionen aufgrund ihrer multi-bauphysikalischen Wechselwirkungen, ihres geringen Flächengewichts und einer sehr guten Rezyklier- und Individualisierbarkeit untersucht. Durch die Adaption der Luftschichtdicke kann der Tageslichtdurchgang sowie der g- und U-Wert gezielt verändert werden. Um solch ein Potential zu nutzen wird ein durchgängig dynamisches Fassadenmodell benötigt. Durch die Kopplung domänen-spezifischer Modelle zur Tageslicht-, Wärme- und Akustiksimulation sollen die Auswirkungen der Schichtdickenadaption sichtbar gemacht und einer Regelung im Sinne des multibauphysikalischen Komforts zur Verfügung gestellt werden. Zur Ermittlung der Wechselwirkungen innerhalb der akustischen Domäne werden in dieser Arbeit erste Messungen plan-paralleler Membranaufbauten im Impedanzrohr durchgeführt und mit bestehenden Modellen ein- und zweischaliger Konstruktionen verglichen.

Bisherige Arbeiten beschäftigen sich unter anderem mit der Verbesserung der Schalldämmungseigenschaften durch das Anbringen kleiner Gewichte [5], das Einfügen einer Zwischenlage aus perforierter Folie [7] oder der Analyse der Wechselwirkung mit Regengeräuschen [11]. Im Fokus dieser Arbeit steht jedoch die Wechselwirkung des Schalldämm-Maßes mit den Lagenanzahlen und Schichtabständen einer Folienkonstruktion. Kiyama et. al. [6] leitete diesbezüglich detaillierte Modelle zweischaliger Membrankonstruktionen her. Es wurde die Dissipation gegenüber dem Flächengewicht der Lagen und deren Abstand untersucht. Dabei stellt er fest, dass die Dissipation ein Maximum bezüglich eines bestimmten Abstandes und einer Frequenz aufzeigt. In [4] werden Messergebnisse einschaliger PES-Gewebe und PVC-Folien mit einfachen Modellergebnissen verglichen. Im Vergleich mit einer um die Biegesteifigkeit und Vorspannung erweiterten Cremer-Formel identifiziert erweist sich die Biegesteifigkeit als Einflussparameter, welcher die Schalldämmung bei hohen Frequenzen reduziert. In [8] wurden mobile, aufblasbare Schallschutzkonstruktionen erforscht und gemessene Schalldämm-Maße von ein- und zweilagigen Konstruktionen mit Modellrechnungen verglichen. Gänzlich ohne Einfluss zeigte sich die Vorspannung. Aus der Untersuchung aller einschaligen Konstruktionen wurde ein empirischer Zusammenhang zwischen dem bewerteten Schalldämm-Maß und der Flächenmasse abgeleitet. Ausgehend davon sollte sich das Schalldämm-Maß durch die Erhöhung der Lagenanzahl verbessern. Bei Variation des Lagenabstandes mehrerer zweilagiger Konstruktionen erhöhte sich das Schalldämm-Maß von 4-6 dB.

Aus den vorhergehenden Untersuchungen werden zwei zentrale Hypothesen abgeleitet:

- Die Erhöhung der Lagenanzahl erhöht das bewertete Schalldämm-Maß
- Die Erhöhung der Luftschichtdicke erhöht das bewertete Schalldämm-Maß

Bisher wenig untersucht wurden Konstruktionen mit mehr als drei Folienlagen und Einflüsse der Lagenabstände auf die Schalldämmung. Daher sind die Hauptbeiträge dieser Arbeit:

- Systematische Analyse ETFE-Kissenkonstruktionen von ein- bis fünflagigen Konstruktionen
- Untersuchung des Einflusses des Lagenabstandes und der Folienanzahl
- Modellvalidierung bei ein- und zweischaligen Konstruktionen

Methoden

Die Messungen des Schalldämm-Maßes bei Variation der Lagenabstände und Lagenanzahl erfolgten im Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Das Impedanzrohr besitzt einen Innendurchmesser von 100mm und eine Wanddicke von 10mm. Zur Einstellung unterschiedlicher Folienanzahlen und Lagenabstände dienen Distanzhülsen in diskreten Längen mit plan gedrehten Stoßflächen. Aus einer Folie aus Ethylen - Tetrafluorethylen - Copolymer (ETFE) ($d_m = 200\mu m$; $\rho_m = 1750\frac{kg}{m^3}$) werden fünf Kreisscheiben ($D = 119mm$) herausgeschnitten. Die Auswahl der Lagenabstände ist durch die Anzahl der 11 Distanzhülsen und deren jeweiligen Länge auf diskrete Punkte festgelegt. Innerhalb der ein- bis fünflagigen Aufbauten werden insgesamt 228 Messpunkte untersucht. Das Terzbandspektrum wird durch Anwendung des kontinuierlichen Spektrums an ein weißes Terzban-

drauschen und anschließender Terzbandpegelberechnung ermittelt. Die den Messergebnissen gegenübergestellten Modelle ein- und zweischaliger Konstruktionen für senkrechten Schalleinfall, vgl. Gleichungen 1 bis 6, werden der Literatur [3, Eq. 5.13 & Eq. 5.84] entnommen.

$$\tau_1 = \left| \frac{2}{\tilde{z}_1'} \right|^2 \tag{1}$$

$$\tilde{z}_1' = \frac{s}{\omega\, \rho_l\, c} \left\{ j \left[(\frac{\omega}{\omega_0})^2 - 1 \right] + \eta \frac{\omega}{\omega_0} \right\} + 2 \tag{2}$$

$$\tau_2 = \left| - \frac{2\, j\, sin(k\, l_{12})}{(sin(k\, l_{12})\, \tilde{z}_2')^2 + 1} \right|^2 \tag{3}$$

$$\tilde{z}_2' = \tilde{z}_1' - 1 - j\, cot(k\, l_{12}) \tag{4}$$

$$k = \frac{\omega}{c} \qquad \omega_0 = \sqrt{\frac{s}{m}} = 2\,\pi\, f_0 \tag{5}$$

$$TL_i = 10\, \log_{10}(1/\tau_i) \tag{6}$$

Innerhalb der Modelle für die ein- und zweischalige Konstruktion sind die als unbegrenzt, unflexibel angenommenen Folien an einer Aufhängung mit der Steifigkeits- s und Dämpfungskonstante η angebracht. Da jede Lage aus dem gleichen Material besteht und dazwischen immer das Medium Luft liegt werden diese weitergehend vereinfacht. Die Gleichung 2 gibt die auf die Schallkennimpedanz normierte mechanische Impedanz der einschaligen Folie wieder. Diese wird in Gleichung 4, für das zweischalige Modell, um die Hohlraumimpedanz, mit dem Lagenabstand l_{12}, erweitert. Das Schalldämm-Maß für die einschalige Konstruktion wird durch Gleichung 1 und 6 und das der zweischaligen Konstruktion mit Gleichung 3 und 6 bestimmt. Hierbei werden für die Schallgeschwindigkeit ($c = 343,4 \frac{m}{s}$), die Luftdichte ($\rho_l = 1,204 \frac{kg}{m^3}$) und das Flächengewicht der ETFE-Membran ($m = 0,348 \frac{kg}{m^2}$) konstante Werte angenommen. Auch der Dämpfungsfaktor η und die Steifigkeit s der Folienlagenaufhängung sind frequenzunabhängig und werden durch drei unterschiedliche Anpassungsmethoden bestimmt. In Modell 1 wird sowohl der Dämpfungsfaktor als auch die Steifigkeit zu null gesetzt. Innerhalb der Modell 2 werden beide Modellparameter ohne Beschränkung an die Messdaten angepasst. Innerhalb der Modell 3 wird nur die Steifigkeit an die Messwerte angepasst und der Dämpfungsfaktors auf den Wert $\eta = 0.58$ festgelegt. Das Bestimmtheitsmaß wird im Frequenzbereich $100 - 1600\, Hz$ bestimmt, die Anpassung der Parameter jedoch für den Frequenzbereich $0 - 1600\, Hz$. Das Bestimmtheitsmaß beschreibt die Güte des Modells. Für ein Bestimmtheitsmaß $r^2 = 1$ stimmen Messung und Modell überein.

Die Bewertung des Frequenzganges wird anhand des Verfahrens in ISO 717-1 durchgeführt. Der innerhalb der Norm ISO 10534 ermittelte Arbeitsfrequenzbereich gilt aufgrund des Rohrdurchmessers bis max. 1700Hz. Demnach werden zur Ermittlung des Einzahlwertes R_w nur 13 Terzbänder (100-1600Hz) berücksichtigt.

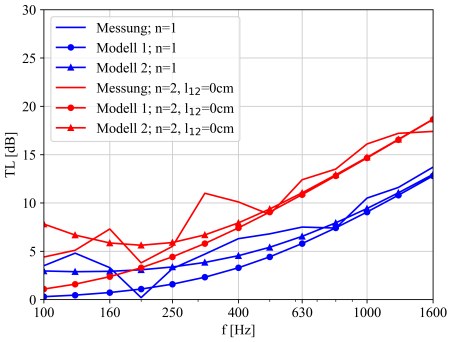


Abbildung 1: Frequenzgang des Schalldämm-Maß TL für eine einschalige und eine zweischalige Konstruktion ohne Luftzwischenraum

Ergebnisse & Diskussion

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Modellanpassung an die Messung der ein- und zweischaligen Konstruktionen bei unterschiedlichem Lagenabstand dargestellt. Dabei zeigt sich, dass durch die Modelle 2 und 3 durchweg höhere Bestimmtheitsmaße gegenüber Modell 1 erreicht werden. Demnach ist es im Vergleich mit Modell 1 entscheidend den Einfluss der Modellparameter zu betrachten. Innerhalb des Modell 3 wird versucht durch die Festlegung $\eta = 0.58$ die Abhängigkeit des Dämpfungsfaktors vom Lagenabstand auszuschließen. Diese Annahme verschlechtert die Bestimmtheit des Modells für geringe Lagenabstände bis 5cm. Hier scheint der Dämpfungsfaktor einen großen Einfluss zu spielen. Demnach ist es für Impedanzrohrmessungen entscheidend den Einfluss beider Parameter der Folienaufhängung mit zu berücksichtigen.

Tabelle 1: Modellparameter und Validierung für jede Anpassungsmethodik; Modell 1 mit η=s=0, Modell 3 mit η=0,58

Modell		1	2			3	
n	$l_{12}\,[cm]$	r^2 [%]	$\eta\,[-]$	$f_0\,[Hz]$	r^2 [%]	$f_0\,[Hz]$	r^2 [%
1	-	62	1,13	131	87	135	77
2	0	68	0,86	199	83	201	78
	5	48	2,05	167	74	185	63
	10	91	0,6	132	95	132	95
	20	74	0,59	170	90	170	90
	30	60	0,57	183	85	182	85
	40	66	0,67	128	83	128	82
	50	46	0,47	119	58	118	62

Die Abbildung 1 stellt den gemessenen und modellierten Frequenzgang der Schalldämmung (TL: Transmission Loss) der einschaligen und der zweischaligen Konstruktion ohne Luftabstand gegenüber. Theoretisch müssten durch die Verdoppelung der Masse (für $f >> f_0 \approx 131\, Hz$ bzw. $199\, Hz$) beide Kurven um $6dB$ auseinander liegen. Dies ist für das Modell 1 und 2 ab ca $630\, Hz$ gegeben. Die Parameterannahmen zur Einspannung wirken sich demnach vor allem im tieffrequenten Bereich aus. Dies wird in der Arbeit von Fahy et.al [3, S.283] auch angemerkt. Die Abbildung 2 vergleicht den gemessenen und modellierten Frequenzgang der zweischaligen Konstruktionen mit einem Schalenabstand von $10cm$ und $20cm$. Für die Konstruktion mit $10cm$ Abstand ist die

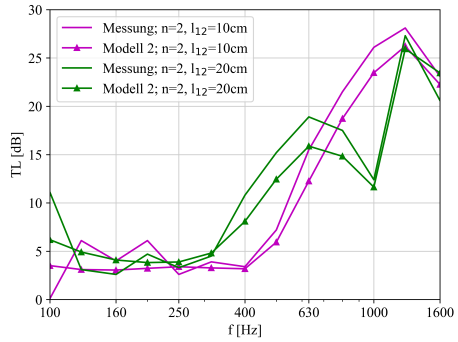


Abbildung 2: Frequenzgang des Schalldämm-Maß TL für zweilagige Konstruktionen mit einem Lagenabstand von l_{12}=10cm und l_{12}=20cm.

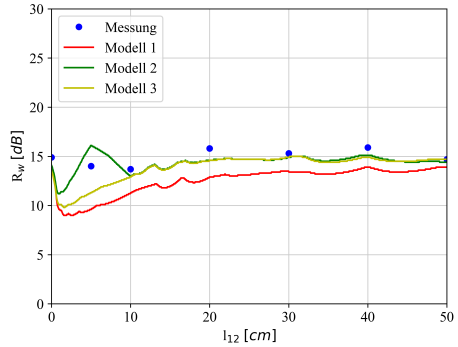


Abbildung 3: Bewertetes Schalldämm-Maß $R_w$gegenüber dem Abstand der zweilagigen Konstruktion im Vergleich aller Modelle

erste Hohlraumfrequenz ($f_0 = \frac{c\,n}{2\,d} = 1717Hz$) zu erkennen. Das gilt ebenso für die ersten beiden Hohlraummoden für den Abstand $d = 20cm$ mit $f_0 = 858Hz$ und $f_1 = 1717Hz$. Im Betrieb eines ETFE-Membrankissens ändern sich die Lagenabstände durch nützliche Wechselwirkungen in anderen bauphysikalischen Domänen (U-, g-Wert). Dazu vergleicht Abbildung 3 die experimentellen Messpunkte mit dem kontinuierlichen modellierten Verlauf für die zweischalige Konstruktion gegenüber dem Abstand zwischen beiden Lagen. Dazu werden die Dämpfungsfaktoren und Steifigkeiten zwischen den Messpunkten aus Tabelle 1 linear interpoliert. Dabei zeigt sich erneut, dass durch die Anwendung der Modelle 2 und 3 gegenüber den Vereinfachungen in Modell 1 der Verlauf der gemessenen Schalldämmung genauer wiedergeben wird. Im Bereich kleiner Abstände zeigt der Verlauf des Modells 2 ein auffälliges Verhalten. Da in Modell 3 nur die Steifigkeit gegenüber dem Abstand schwankt und in Modell 1 beide Parameter konstant null sind, muss dieser Einfluss durch die Schwankung des Dämpfungsfaktors im Bereich kleiner Abstände verursacht werden. Dies könnte eventuell mit dem Anstieg der Dissipation zusammenhängen, welcher in der Arbeit von Kiyama et.al[6] für diesen Abstandsbereich erwähnt wird. Zudem muss durch zukünftige Messungen der Bereich kleiner 10cm feiner aufgelöst werden um den durch die Modelle vorhergesagten Einbruch der Schalldämmung zu überprüfen. Insgesamt sagen die Modelle eine höhere Schwankungsbreite der Schalldämmmung (ca. 5dB), als durch Messungen bestätigt wird, voraus.

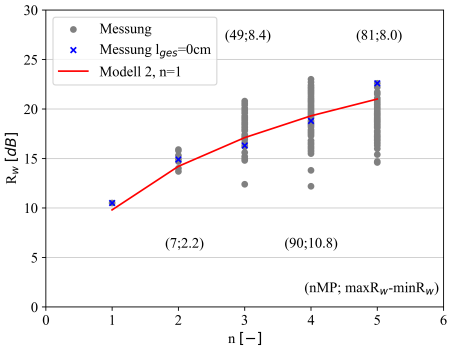
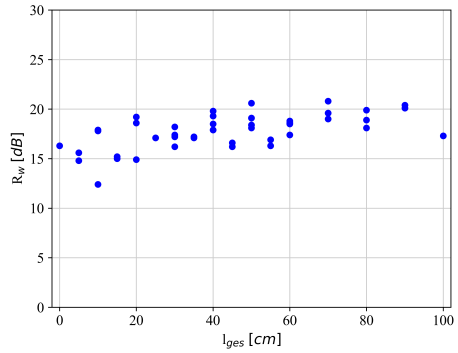


Abbildung 4: Bewertetes Schalldämm-Maß gegenüber der Anzahl der Lagen; Vergleich zwischen allen durchgeführten Messungen und dem einschaligen Modell

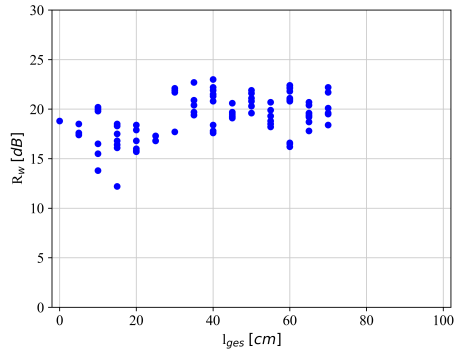
Die Abbildung 4 zeigt die bewerteten Schalldämm-Maße aller ausgeführten Messungen gegenüber der Anzahl der Lagen. Demgegenüber ist der Verlauf der modellierten einschaligen Schalldämmung für einen äquivalenten Massezuwachs dargestellt. Zudem sind die entsprechenden Messwerte der mehrlagigen Konstruktionen ohne Lagenabstand mit Kreuz-Symbolen eingezeichnet. Diese Abbildung zeigt einen Anstieg der Schwankungsbreite des Schalldämm-Maßes mit der Lagenanzahl auf. Diese ist aufgrund der diskreten Auswahl an Distanzhülsen zwischen den Konstruktionen nur eingeschränkt vergleichbar. Zudem werden unterschiedlich viele Messpunkte (nMP) pro Lagenanzahl berücksichtigt. Die modellierten Werte und die gemessenen Werte ohne Lagenabstand (Kreuz-Symbole) zeigen eine gute Übereinstimmung. Zudem erhöht sich die Schalldämmung durch die Verdoppelung der Lagenanzahl um ca. $5dB$, was den theoretischen $6dB$ sehr nahe kommt. Zum modellierten Verlauf der einschaligen Konstruktion mit ansteigender Masse ergeben sich allein durch die Änderung der Lagenabstände merkliche Abweichungen von ca. 10 dB. Dies zeigt die Notwendigkeit genauer Modelle für mehrlagige Konstruktionen auf. In praktischen Anwendungen werden hauptsächlich Konstruktionen eingesetzt, deren Gesamtabstand konstant bleibt und bei denen nur die inneren Lagen adaptiert werden. Hierzu sind die Messergebnisse der drei- bis fünflagigen Konstruktionen in den Abbildungen 5a bis 5c gegenüber dem Gesamtabstand l_{ges} zwischen der ersten und letzten Lage dargestellt. Sind mehrere Messpunkte für einen Gesamtabstand eingetragen, dann werden die inneren Schichtabstände variiert. Diese Abbildungen zeigen, dass selbst bei konstantem Gesamtabstand eine beachtliche Schwankungsbreite des Schalldämm-Maßes existiert. Diese scheint auf den ersten Blick mit der Lagenanzahl bei gleichem Gesamtabstand zuzunehmen. Dies kann jedoch auch an der zuvor erwähnten diskreten Verfügbarkeit der Distanzhülsen liegen. Es zeigt sich wie bei der zweilagigen Konstruktion keine klar zunehmende Schalldämmung mit der Lagenanzahl oder den Lagenabständen. Die beiden eingangs genannten Hypothesen müssen konkretisiert werden.

Zusammenfassung & Ausblick

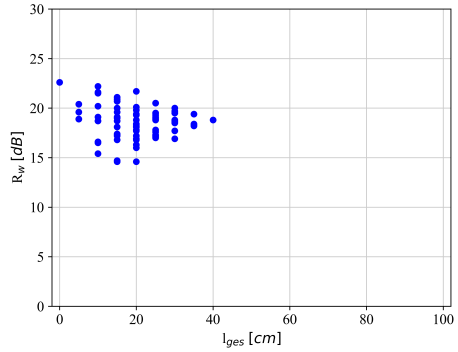
In dieser Arbeit wird die Schalldämmung verschiedener Membrankonstruktionen im Bereich von $100 - 1600\,Hz$ systematisch im Impedanzrohr untersucht. Dabei werden



(a) Dreilagige Konstruktionen



(b) Vierlagige Konstruktionen



(c) Fünflagige Konstruktionen

Abbildung 5: Gemessenes bewertetes Schalldämm-Maß gegenüber dem Gesamtabstand l_{ges} der jeweiligen Konstruktion.

die Lagenanzahl und Lagenabstände variiert. Für die ein- und zweilagigen Konstruktionen wird ein analytisches Modell angewandt. Die darin enthaltenen Parameter werden an die Messungen angepasst um den Einfluss der Lagenanzahl und der Lagenabstände darauf zu übertragen. Dadurch kann die Modellgüte deutlich verbessert werden. Und es zeigt sich ein starker Einfluss der Einspannbedingung. Für die drei- bis fünflagigen Konstruktionen steht die Modellvalidierung noch aus. Insgesamt können die zentralen Hypothesen nicht vollständig bestätigt werden. Die Lagenanzahl führt nur bedingt zu einer Erhöhung der Schalldämmung. Diese hängt entscheidend von den Lagenabständen ab, wodurch mit einer Schwankungsbreite des Schalldämm-Maßes im Betrieb der Membrankonstruktion gerechnet werden muss. Zukünftige Arbeiten sollten zur effizienten und genauen Kopplung der akustischen Domäne neben analytischen, empirischen Modellen auch Black-Box-Modellierungsansätze in Betracht ziehen.

Diese Arbeit findet statt innerhalb des Sonderforschungsbereiches SFB1244 "Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen" im Teilprojekt C05 und wird gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter der Projektnummer 279064222.

Literatur

[1] Lucio Blandini, Walter Haase, Stefanie Weidner, Michael Böhm, Timon Burghardt, Daniel Roth, Hansgeorg Binz, Oliver Sawodny, and Werner Sobek. Der Demonstrator D1244: Das weltweit erste adaptive Hochhaus. *Bautechnik*. doi:10.1002/bate.202100065.

[2] U. N. Environment. 2021 Global Status Report for Buildings and Construction, October 2021.

[3] Frank J. Fahy and Paolo Gardonio. *Sound and structural vibration: radiation, transmission and response*. Elsevier, 2007. doi:10.1016/B978-0-12-373633-8.X5000-5.

[4] R Haberkern and P Teller. *Zur Berechnung der Schalldämmung von Folien und Membranen*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 2002.

[5] N. Hashimoto, M. Katsura, Y. Nishikawa, K. Katagihara, T. Torii, and M. Nakata. Experimental study on sound insulation of membranes with small weights for application to membrane structures. *Applied Acoustics*, 48(1):71–84, May 1996. doi:10.1016/0003-682X(95)00062-E.

[6] Masakazu Kiyama, Kimihiro Sakagami, Masaki Tanigawa, and Masayuki Morimoto. A Basic Study on Acoustic Properties of Double-leaf Membranes. *Applied Acoustics*, 54(3):239–254, July 1998. doi:10.1016/S0003-682X(97)00070-4.

[7] C. Li, B. Cazzolato, and A. Zander. Sound transmission loss of double layer impervious membranes with an internal microperforated membrane. Australian Acoustical Society, 2013.

[8] SR Mehra, W Maysenhölder, P Leistner, and P Teller. Akustisches Verhalten von Hüllenkonstruktionen aus Folien und Membranen (AHAFUM). 2004.

[9] Karsten Moritz. ETFE-folie als tragelement. 2007. Technische Universität München.

[10] Friederike Schlegl, Johannes Gantner, Rene Traunspurger, Stefan Albrecht, and Philip Leistner. LCA of buildings in Germany: Proposal for a future benchmark based on existing databases. *Energy and Buildings*, pages 342–350, July 2019. doi:10.1016/j.enbuild.2019.04.038.

[11] Masahiro Toyoda and Daiji Takahashi. Reduction of rain noise from Ethylene-Tetra-Fluoro-Ethylene membrane structures. *Applied Acoustics*, 74(12):1309–1314, December 2013. doi:10.1016/j.apacoust.2013.05.013.