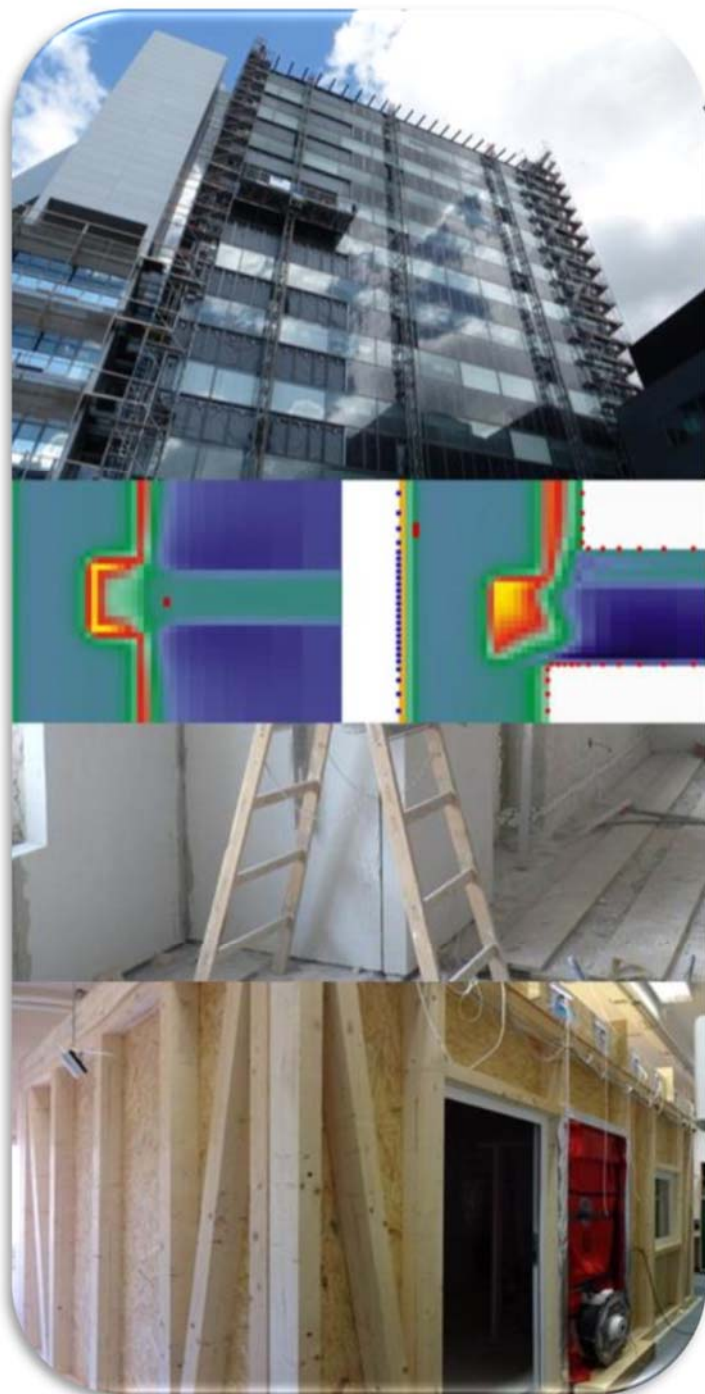


BauphysikerInnen-Treffen 2023

5. Oktober 2023

TU Wien

Prechtlsaal
Karlsplatz 13
1040 Wien



Programm

09:00 Eintreffen

09:15 Begrüßung: „10 Jahre BauphysikerInnen-Treffen“
Clemens Häusler, MSc, bauphysik.at, A-2511 Pfaffstätten

09:30 **Definition klimaneutral / zukünftiger EA / Feuchteschäden (Serienfehler)**
Prof Dr. Thomas Bednar, TU Wien, A-1040 Wien

Schimmel-Suchhunde Staffel

Verein für die Ausbildung und Einsatz von Spezialsuchhunden, A-4501 Neuhofen
Emanuel Mairinger, BV für Schimmelsanierung & Technische Bauteiltrocknung

11:00 Pause

11:30 **wenn schwarze Löcher Trittschall schlucken**
Dr. Stefan Schoenwald, EMPA, CH-8600 Dübendorf

Schallschutz 2036

Dr. Christoph Lechner, Amt der Tiroler Landesregierung, A-6020 Innsbruck

13:00 Mittagspause

14:00 **Hoher Schallschutz mit Hybridbauten**
DI(FH) Martin Schneider, MSc, HFT Stuttgart, D-70174 Stuttgart

Psychoakustik am Bau

Dr. Jan Krüger, HFT Stuttgart, D-70174 Stuttgart

15:30 Pause

16:00 **Gedanken zur Nachhaltigkeit und therm. Sanierung von Bestandsgebäuden**
Prof. Dipl.-Ing. Axel C. Rahn, Die Bauphysiker, D-10785 Berlin

Energiewohlstand für alle

Prof. Dr. Dr. Dr. h.c. Franz Josef Radermacher, Universität Ulm, D-89081 Ulm

17:30 Ende der Vorträge

18:30 Hocketse (Prechtlsaal TU Wien)

Moderation: Univ. Prof. Dr. Thomas Bednar (TU-Wien) & Clemens Häusler MSc (bauphysik.at)



Univ.Prof. DI Dr.

Thomas BEDNAR

Lebenslauf: <https://www.tuwien.at/cee/mbb/bph/team/lebenslauf>

Klimaneutralität – Energieausweis 2028 – Vermeidung von Serienfehlern

Univ.Prof. DI Dr. Thomas Bednar, Thomas.bednar@tuwien.ac.at

TU Wien
Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie

Vorbemerkung

Die Transformation des Gebäudebestandes und des Energiesystems zur Erhöhung der Resilienz und Versorgungssicherheit, die Senkung der Treibhausgasemissionen zur Verzögerung des Klimawandels und die Sicherung der Biodiversität sind immer dringendere Aufgaben vor der die gesamte Gesellschaft in Österreich, Europa und weltweit steht. Durch wirksame Maßnahmen kann die Vielzahl ernsthafter und teilweise verheerenden Folgen abgemildert oder bei großem Engagement abgewendet werden.¹

Zur Erhöhung der Resilienz der gebauten Umwelt, der Senkung der Treibhausgasemissionen und zur Förderung der Biodiversität ist der Bestand an Gebäude anzupassen/zu renovieren.

Da mir persönlich wichtig ist Zusammenhänge zu verstehen, habe ich in dieser Arbeit versucht erstmalig das noch zur Verfügung stehende Treibhausgasbudget² durch eine erste einfache Abschätzung von Szenarien auf die noch zur Verfügung stehenden Mengen für die Renovierung, den Betrieb und Recycling/Abbruch von Gebäuden abzuschätzen. Durch die Variation der Maßnahmen konnte ich ein Gefühl für die Bedeutung der verschiedenen Maßnahmen bekommen. Die Grundlagen der Berechnung inklusive der Berechnungstools werden von mir im Zuge der Zusammenarbeit im Innovationslabor RENOWAVE.AT veröffentlicht. Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge sind willkommen.

DISCLAIMER: Die folgende Abschätzung wurde von einem Physiker mit Spezialisierung im Bereich Bauphysik verfasst und dient dem Zweck, eine einfache Darstellung des Treibhausgasbudgets für die Renovierung von Gebäuden zu bieten und die ökonomische Wirkung unterschiedlicher Maßnahmen besser zu verstehen. Es ist wichtig zu beachten, dass ich kein Experte im Bereich Soziologie, Energiewirtschaft oder Ökonomie bin. Diese Abschätzung basiert auf vereinfachten Annahmen und kann daher nicht alle Faktoren und Nuancen berücksichtigen, die bei einer umfassenden Analyse notwendig wären. Leserinnen und Leser werden daher dazu angehalten, **die hier präsentierten Daten und Schlussfolgerungen kritisch zu hinterfragen** und sich bei Bedarf an Expert*innen im Bereich der Energiewirtschaft und Ökonomie zu wenden, um eine detailliertere und umfassendere Einschätzung zu erhalten.

¹ <https://www.klimawandelanpassung.at>, <https://ccca.ac.at/>, <https://www.biologischevielfalt.at>

² https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/factsheets/fs3_2009/wbgu_factsheet_3.pdf
https://www.ccca.ac.at/fileadmin/00_DokumenteHauptmenue/02_Klimawissen/Papiere/THG-Budget_Hintergrundpapier_CCCA.pdf

1. Die Aufgabe

Historisch wurde die Atmosphäre als Endlagerstätte aller Treibhausgase (THG) als unendlich leistungsfähig betrachtet. Seit dem 19.Jhdt ist der Zusammenhang zwischen Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre und der Erhöhung der mittleren oberflächennahen Temperaturen bekannt. Die weltweiten Messungen zeigen den Trend mittlerweile sehr deutlich. Starkniederschläge, Überflutungen, Bodenerosion und Hitzewellen nehmen messbar zu. Durch das Pariser Abkommen gibt es den Versuch durch weltweit koordiniertes Verhalten die Erwärmung auf unter +1.5K zu begrenzen. Für Österreich ergibt sich dadurch ein maximales Restbudget an THG-Emissionen von rund 30 Tonne/Kopf.³ Bei einer Überschreitung des Budgets steigt das Risiko verheerender Schäden und Transferzahlungen werden notwendig, zur Vermeidung könnten geeignet gewählte CO₂-Abgaben helfen mit denen die Transformation gefördert werden könnte^{4 5}. Wenn es zu keiner koordinierten Senkung der THG-Emissionen kommt, ist eine Anpassung der Niederschlagsableitungs-, Heiz-, Kühl- und Lüftungskonzepten aber auch Windwiderstand von Quartieren und Gebäuden notwendig um den gewohnten Komfort nicht zu stark einzuschränken.

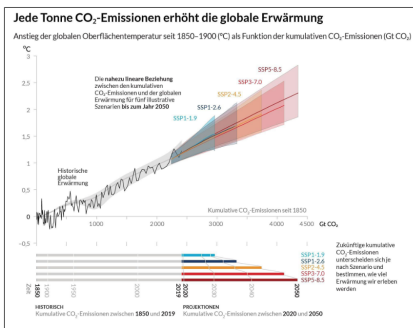


Abbildung 1 Anstieg der globalen Oberflächentemperatur seit 1850-1900 [°C] als Funktion der kumulativen CO₂-Emission (GtCO₂). Quelle: (IPCC, 2021)

Raum für eigene Gedanken:

.....

.....

.....

.....

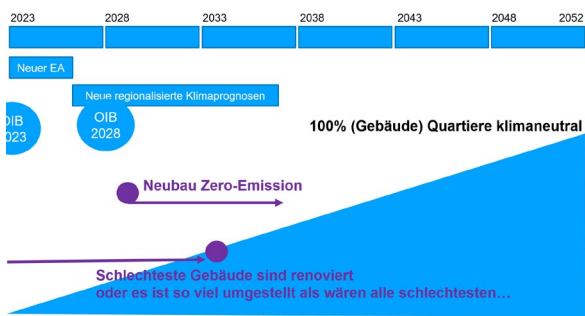
.....

.....

Abbildung 1: Zusammenhang zwischen kumulierten THG-Emissionen und Temperaturanstieg³

Als Reaktion auf die drängenden Aufgaben wurde vom europäischen Parlament im März 2023 eine Abänderung der Richtlinie zur «Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden» vorgeschlagen⁶. In den verschiedenen europäischen Mitgliedsländern sind seitdem zahlreiche Diskussionen öffentlich geführt worden um für die eigene Interessensgruppe die Maßnahmen zu erleichtern oder zu verzögern⁷. In Österreich steht jedenfalls 2028 eine Überarbeitung der OIB Richtlinien an, die Klimawandelanpassung und THG-Emissionssenkung als Ziel haben wird. Das Lebenszyklus-Treibhauspotenzial wird eine zentrale zu deklarierende Größe, die in einem Fahrplan systematisch gesenkt wird. Klimawandelanpassung, Luftqualität innerhalb und außerhalb von Gebäude und Motivation umweltverträglichen Verhaltens und sozialer Ausgleich sind ebenso klar angesprochen. Neubauten sollen daher den Nullemissionsstandard erfüllen.

³ https://www.ccca.ac.at/fileadmin/00_DokumenteHauptmenue/02_Klimawissen/Papiere/THG-Budget_Hintergrundpapier_CCCA.pdf
⁴ Wagner, Gernot; Weitzmann, Martin L.; Climate Shock: the economic consequences of a hotter planet; Princeton University Press; 2015
⁵ <https://www.nature.com/articles/s41558-018-0091-3>
⁶ https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0068_DE.pdf
⁷ <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wohnen/ampel-koalition-stellt-sich-gegen-eu-pflicht-zur-sanierung-von-wohnungen-19195245.html>



Raum für eigene Gedanken

Zero-Emission

.....

.....

.....

Life Cycle Global Warming Potential

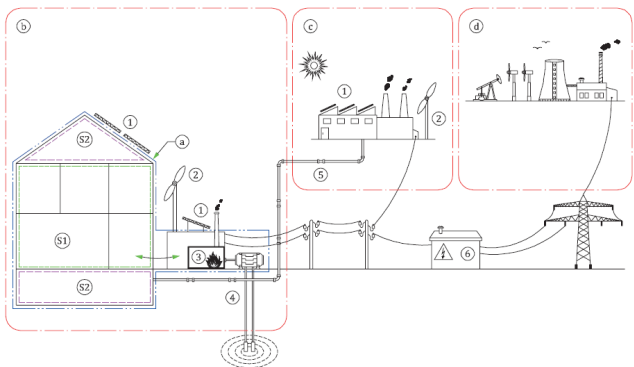
.....

.....

.....

Abbildung 2: Zeitlicher Ablauf neue OIB Richtlinie (2028); Verfügbarkeit neuer regionaler Klimaprognosen (2026); Anforderungen an Neubauten und Bestandsrenovierungen

Die gekürzte Definition⁸ für „Nullemissionsgebäude“ lautet: „Nullemissionsgebäude“ ist ein Gebäude mit einer sehr hohen Gesamtenergieeffizienz, das durch nachfrageseitige Flexibilität zur Optimierung des Energiesystems beiträgt und bei dem die noch benötigte sehr geringe Restmenge an Energie vollständig durch Energie gedeckt wird, die a) aus erneuerbaren Quellen stammt und vor Ort erzeugt oder gespeichert wird; b) aus erneuerbaren Quellen stammt und außerhalb des Standorts erzeugt und über das Netz bereitgestellt wird; c) von einer Erneuerbare-Energie-Gemeinschaft stammt; oder d) aus erneuerbaren Quellen stammt sowie durch Abwärme aus einem effizienten Fernwärme- und Fernkältesystem; Auch schon in EN ISO 52000-1:2018 wird die Deckung des Energieverbrauchs durch die Bilanzgrenzen «on-site», «nearby» und «distant» adressiert.



Key	
a	assessment boundary (use energy balance)
b	perimeter: on-site
c	perimeter: nearby
d	perimeter: distant
S1	thermally conditioned space
S2	space outside thermal envelope
1	PV, solar
2	wind
3	boiler room
4	heat pump
5	district heating/cooling
6	substation (low/medium voltage and possible storage)

Abbildung 3: Bilanzgrenzen aus EN ISO 52000-1:2018 (im Original: Figure 1)

⁸ https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0068_DE.pdf

Warum ich in dieser Arbeit von Energieverbrauch spreche:

Der Änderungsvorschlag spricht von einem **erfassten Energieverbrauch** – also von den tatsächlich gemessenen, das lokale Wetter und die reale Nutzung enthaltenden Zählwerte mindestens im Stundenintervall. Die Prognose dieses zukünftig erfassten Verbrauchs ist bei der Ermittlung von Lebenszykluskosten für Planungsentscheidungen sehr hilfreich. Davon unterschieden ist der **berechnete Energieverbrauch** mit typischem Wetter und Nutzung zur Vergleichbarkeit von Gebäudekonzepten. Der „**Energiebedarf**“ ist wie bisher «die Energie, die an einen klimatisierten Raum abgegeben oder ihm entzogen werden soll, um während eines bestimmten Zeitraums unter Berücksichtigung der Übertragungs- und Lüftungsverluste und der solaren und internen Gewinne die vorgesehenen Raumbedingungen in Übereinstimmung mit den EN-Normen aufrechtzuerhalten, wobei Ineffizienzen des gebäudetechnischen Systems unberücksichtigt bleiben»

Welche Teile des Energieverbrauchs sind in der Gesamtenergieeffizienz eines Gebäudes zu berücksichtigen?

Im Änderungsvorschlag Anlage I ist zu lesen: «Die Gesamtenergieeffizienz eines Gebäudes wird anhand des **berechneten oder erfassten Energieverbrauchs** bestimmt und spiegelt den typischen Energieverbrauch für Raumheizung, Raumkühlung, Warmwasserbereitung für den häuslichen Gebrauch, Lüftung, eingebaute Beleuchtung und andere gebäudetechnische Systeme wider. Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass der typische Energieverbrauch die tatsächlichen Betriebsbedingungen für jede relevante Typologie abbildet und das typische Nutzerverhalten widerspiegelt. Der typische Energieverbrauch und das typische Nutzerverhalten beruhen auf verfügbaren nationalen Statistiken, Bauvorschriften und den erfassten Daten. Wird die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden **auf der Grundlage der erfassten Energie berechnet**, muss es anhand der Berechnungsmethode möglich sein, den Einfluss des Verhaltens der Bewohner und der klimatischen Verhältnisse vor Ort zu ermitteln, der im Ergebnis der Berechnung jedoch nicht zu berücksichtigen ist.»⁹ Die reinen Zählwerte müssen daher mit einer abgesicherten Methode auf typisches Wetter und typische Nutzung umgerechnet werden.

Die Bedeutung der Qualität von Planung und Ausführung wird auch durch folgenden Hinweis im Änderungsvorschlag betont: «Die Mitgliedstaaten können den erfassten Energieverbrauch unter typischen Betriebsbedingungen verwenden, um die Richtigkeit des berechneten Energieverbrauchs zu überprüfen und einen Vergleich zwischen der berechneten und der tatsächlichen Gesamtenergieeffizienz zu ermöglichen». Ich verstehe darunter das vor Ort die typische Nutzung «erzeugt» wird und damit ein Vergleich mit einer Berechnung leichter möglich ist, da nur mehr das Wetter in der Berechnung zu adaptieren ist.

Die Planung mit einer Methode zur Prognose des erfassten Energieverbrauchs die mindestens stündliche Auflösung hat, typisches Wetter und Nutzung als auch reales Wetter und reale Nutzung abbilden kann ist damit im Interesse von Eigentümer*innen, Planer*innen und Ausführenden. Durch einen digitalen Zwilling der mit der Automation des Gebäudes verbunden ist, kann dann auch kontinuierlich der Betrieb optimiert und erfasster und berechneter Verbrauch nahe aneinandergelassen werden.¹⁰

⁹ https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0068_DE.pdf

¹⁰ <https://smartcities.at/projects/smart-airportcity/>

2. Szenarien für die Transformation des Energiesystems

Um ein Gefühl für das noch zur Verfügung stehenden Budget an Treibhausgasen für die Renovierung der Gebäude in Österreich zu bekommen sind im Folgenden aus einer einfachen Abschätzung zwei Szenarien zusammengestellt.

Grundsätzliche Annahmen: Die THG-Emissionen werden produktionsorientiert nicht konsumorientiert ermittelt. Durch entsprechende Maßnahmen ist eine Versorgungssicherheit gewährleistet. Durch Zölle an der EU-Außengrenze wird gesichert, dass die lebensnotwendigen Produkte in Europa verfügbar sind. Durch die internationalen Vereinbarungen wird je Land ein Pfad vereinbart mit dem die THG-Emissionen sinken. Verletzungen dieser Vereinbarung führen zu Strafzahlungen, die dazu dienen, die erhöhten Schäden durch den Klimawandel zu decken. Zu den unterschiedlichen Bilanzierungs- und Verteilmöglichkeiten gibt es mittlerweile umfangreiche Literatur ^{11,12}. **Der Nettostromimport bleibt von der Menge konstant und die damit «importierten» Emissionen werden mitgerechnet. Ebenso die «Sonstige» Stromerzeugung. Beide Erzeugungen reduzieren ihre Konversionsfaktoren bis 2050 auf 10 g/kWh.**

Szenario 1:

Die Rate der Umstellung auf Strom ist ambitioniert.

Die Effizienz der Gebäude, Geräte und Maschinen wird nicht verbessert. Der Strombedarf für Kühlung steigt.

Szenario 2:

Die Rate der Umstellung auf Strom ist ambitioniert.

Die Effizienz der Gebäude, Geräte und Maschinen durch Umstellung hoch

Der Strombedarf für Geräte, Maschinen und Kühlung sinkt.

Der Ausgangspunkt der Berechnungen sind die Statistiken für Gas & Strom aus <https://energie.gv.at/> und für Heizöl, Diesel, Benzin aus <https://www.wko.at/branchen/industrie/mineraloelindustrie/statistik.html>

Folgende Maßnahmen wurden berücksichtigt und durch Parameter abgebildet:

- Waldfläche in Österreich – Stoffliche / Energetische Verwendung
- Umstieg auf E-Mobilität; Reduktion der Weglänge; Minimierung «Tanktourismus»
- Umstieg auf Wärmepumpen, Direktstrom, Fernwärme (Abwärme, Wärmepumpen,), Biomasse
- Erhöhung der Effizienz von Gebäuden (Beleuchtung, Heizen, Warmwasser, Lüften, Kühlen, Transport,..)
- Erhöhung Effizienz bei Maschinen und Geräten (Betriebsstrom, Haushaltstrom)
- Ausbau Windkraft, PV, Speicher
- Umstellung Landwirtschaft, Nahrungszusammensetzung
- Ausstieg aus der Verwendung/Freisetzung von fluorierten Gasen (z.B. Kältemittel)
- Allgemeiner Strombedarf für Geräte, Maschinen, Kühlung usw.

¹¹ <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1078/1/012024/pdf>

¹² <https://journal-buildingscities.org/articles/10.5334/bc.47>

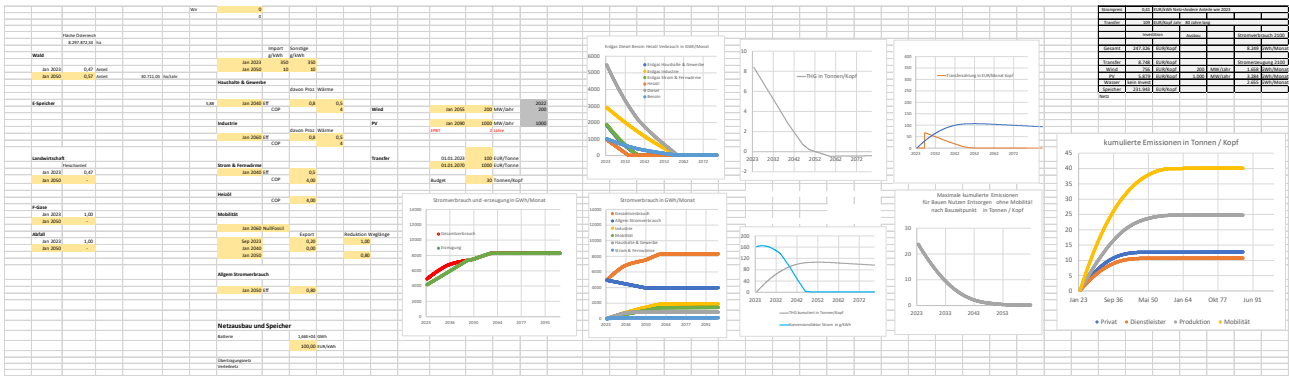


Abbildung 4: Parameter im Modell zur Definition des Szenarios und Ergebnisgrafiken. Erkennbar ist, dass es sich um ein sehr einfaches Modell handelt, das nur wenige Parameter für Effizienz von Gebäuden und TGA Anlagen, Ausbau von PV, Wind und Waldfläche und Umstieg auf E-Mobilität, Änderung der gefahrenen Strecke und Änderung des allgemeinen Strombedarfs enthält.

A) Ambitionierter Umstieg auf Strom; keine Verbesserung der Effizienz

Windkraft und PV werden so wie 2022 ausgebaut.

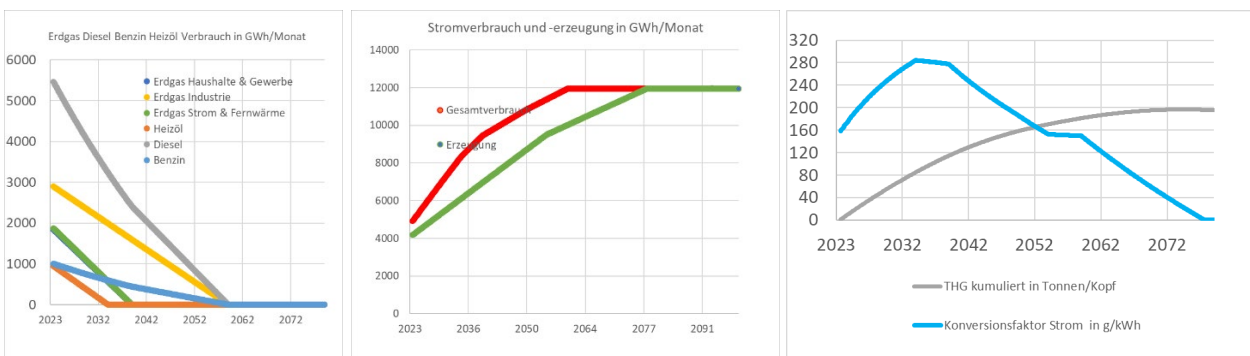


Abbildung 5: Links: Reduktion Verwendung fossiler Energieträger, Mitte Anstieg Stromverbrauch und -erzeugung; Rechts: Verlauf der kumulierten THG Emissionen und des Konversionsfaktors für den Strom

Tabelle 1: Zusammenstellung von Investitionskosten (ohne Inflation), Stromverbrauch und -erzeugung

	Investition		Ausbau		Stromverbrauch 2100	
Gesamt	472.115	EUR/Kopf			11.952	GWh/Monat
Transfer	25.201	EUR/Kopf			Stromerzeugung 2100	
Wind	756	EUR/Kopf	200	MW/Jahr	1.658	GWh/Monat
PV	12.801	EUR/Kopf	1.000	MW/Jahr	6.890	GWh/Monat
Wasser	kein Invest				2.655	GWh/Monat
Speicher	433.356	EUR/Kopf				

In diesem Szenario steigt der Stromverbrauch stark an und muss durch einen sehr langen Ausbau von Windkraft und PV Anlagen kompensiert werden. Die kumulierten THG-Emissionen erreichen dann statt 30 über 200 Tonnen pro Kopf.

Bei der Ermittlung von Kosten wurde keine Inflation berücksichtigt.

Die Kosten für PV wurden mit 1.600 EUR/kWp für Windkraft mit 1.000 EUR/kW und für Batteriespeicher mit 100 EUR/kWh angenommen. Die Transferzahlungen mit 100 EUR/Tonne ab 30 Tonnen/Kopf heute und 1000 EUR/Tonnen im Jahr 2050.

Der Strompreis wird durch die Kosten für PV, Windkraft und Speicher und die aktuellen Kosten für Übertragungsnetz und Verteilnetz und Sonstige Bestandteile des Strompreise errechnet. Die Personalkosten und der Gewinn der Unternehmen die PV und Windkraftanlagen betreiben wurde nicht berücksichtigt In diesem Fall ergeben sich Strom-Erzeugungskosten von 0,5 EUR/kWh. Die Transferzahlung aufgrund der Überschreitung des 30 Tonnen/Kopf Budgets ergibt über 80 Jahre 315 EUR/Kopf und Jahr.

B) Ambitionierter Umstieg auf Strom; Ambitionierte Erhöhung der Effizienz

Windkraft wird doppelt so stark und PV so wie 2022 ausgebaut.

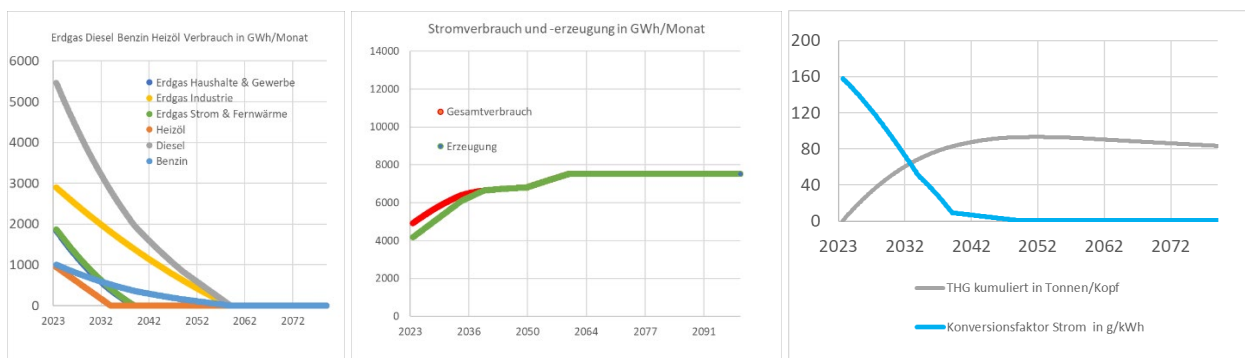


Abbildung 6: Links: Reduktion Verwendung fossiler Energieträger, Mitte Anstieg Stromverbrauch und -erzeugung; Rechts: Verlauf der kumulierten THG Emissionen und des Konversionsfaktors für den Strom

Tabelle 2: Zusammenstellung von Investitionskosten (ohne Inflation), Stromverbrauch und -erzeugung

	Investition		Ausbau		Stromverbrauch 2100	
Gesamt	247.326	EUR/Kopf			8.249	GWh/Monat
Transfer	8.748	EUR/Kopf			Stromerzeugung 2100	
Wind	756	EUR/Kopf	200	MW/Jahr	1.658	GWh/Monat
PV	5.879	EUR/Kopf	1.000	MW/Jahr	3.284	GWh/Monat
Wasser	kein Invest				2.655	GWh/Monat
Speicher	231.943	EUR/Kopf				

In beiden Szenarien sind die Kosten für die Errichtung von PV und Windkraftanlagen (ab Unterkonstruktion) und den Transferzahlungen ab 30 Tonnen/Kopf gegenüber den Saisonal Speicher Kosten minimal.

In diesem Fall ergeben sich Strom-Erzeugungskosten von 0,4 EUR/kWh. Die Transferzahlung aufgrund der Überschreitung des 30t/Kopf Budgets ergibt über 80 Jahre 109 EUR/Kopf und Jahr.

Aus dem Vergleich ist erkennbar, dass ein sehr forcierter Ausstieg aus fossilen Energieträgern bei gleichzeitiger Steigerung der Effizienz von Gebäude, Geräten und Maschinen pro Kopf mit rund 200.00 EUR gefördert werden könnte, wenn es keine kostengünstigere Alternativen zur Saisonal-Speicherung über Batterien gibt.

In weiteren Szenarien könnte die Nutzung von Thermische Energiespeicher für Quartiere¹³, Offshore Wind und Nutzung von Übertragungsnetzen¹⁴ bzw. die Umwandlung in Wasserstoff¹⁵ betrachtet werden.

3. Budgetansatz Renovierung

Aus den Szenarien lässt sich nun die für die Renovierung von Gebäuden und die Nutzung (Haushalts bzw. Betriebsstrom) und die Entsorgung der Baustoffe und Geräte noch zur Verfügung stehende THG-Budget ermitteln. In Abb. 7 links ist erkennbar das in Summe für den Sektor Privathaushalte (Definition entsprechend Energieflussbild Österreich 2022¹⁶) rund 10 Tonnen und für die Produktion 25 Tonnen zur Verfügung stehen. Unter der Annahme das 50% der Produktion für Baustoffe und TGA Anlagen aufgewendet wird, ergibt sich für 2023 die Anforderung, dass die Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen unter 23 Tonnen liegen müssen. In 10 Jahren würde der Wert dann bei 10 Tonnen liegen.

Neubauten gibt es in diesem Modell noch keine. Sie würden das Budget der Renovierungen verkleinern.

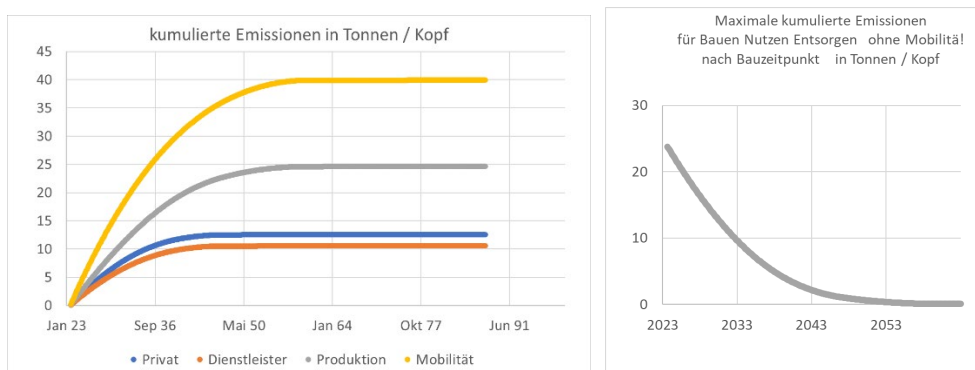


Abbildung 7: Links: kumulierte Emissionen in den Sektoren Mobilität, Produktion, Privathaushalte und Dienstleistung; Rechts: Maximale kumulierte Emission für Privathaushalte für Bauen, Nutzung und Entsorgung (ohne Mobilität) für die Renovierung eines Gebäudes in Österreich pro Kopf

¹³ https://www.dena.de/Link_zur_Studie_im_PDF

¹⁴ https://www.wind-energie.de/Link_zur_Studie_im_PDF

¹⁵ https://www.leopoldina.org/Link_zur_Studie_im_PDF

¹⁶ <https://www.bmk.gv.at/themen/energie/publikationen/zahlen.html>

4. Fazit

Aus den obigen Überlegungen ergibt sich ein dringender Handlungsbedarf die Rate und Qualität von Renovierungen deutlich zu steigern. Im Interesse von Eigentümer*innen, Planer*innen, Ausführenden und Nutzer*innen liegt es, dass auf Basis von ausreichend genauen Prognosen der Lebenszyklus Kosten auf die Wirtschaftlichkeit der gewählten Lösungen geachtet wird. Dabei ist der Anstieg der Stromkosten und die CO₂-Bepreisung so zu berücksichtigen, dass die gewählten Lösungen dem ambitionierten Pfad folgen.

Da hier sehr viele innovative Lösungen verwendet werden, ist es sehr empfohlen das Risiko von Serienfehlern drastisch zu senken¹⁷. Serienfehler entstehen insbesondere dann, wenn der Schadenseintritt mit großem Zeitabstand zur Herstellung auftritt. Besonders Feuchteschäden die die tragende Struktur eines Gebäudes betreffen haben ein großes Potential zu Serienfehlern. Wir sollten jetzt bei der Auswahl und Ausführung von Konstruktionen die Fehlertoleranz berücksichtigen, vor allem, wenn erst in ein paar Jahren die Regen- und Windbelastung von Gebäuden stark zunimmt. Der Einsatz eines Wetterschutzes für ganze Gebäude während der Errichtungsphase oder das Lernen aus den Ergebnissen von Leckagesuchen während Blower-Door-Messungen könnte hilfreich sein.

Der Einsatz fossiler Energieträger ist anscheinend auch ein Serienfehler gewesen.....

Ich freue mich auf Kommentare zur Arbeit, besonders analoge Berechnungen würde ich gerne diskutieren. Vielleicht habe ich in dieser Arbeit noch etwas übersehen oder einen Fehler.

Danksagung:

Bei der Erstellung der Arbeit konnte ich aus Diskussionen mit meinem Vater, , Andreas Sarkany, Bernhard Steiner, Lukas Kranzl, Sabine Sint wertvolle Gedanken für die Arbeit mitnehmen. Bei der Suche nach Literatur haben mich Google, Researchgate, Scencedirect, ChatGPT4.0 und besonders Perplexity unterstützt.

¹⁷ https://research.chalmers.se/publication/524731/file/524731_Fulltext.pdf

Schimmel-Suchhunde im Einsatz

Österreichische Schimmel-Suchhunde-Staffel

Verein für die Ausbildung und
Einsatz von Spezial-Suchhunden
ZVR: 810733180



Herr Dipl.(HTL)Ing. Emanuel Mairinger, e.mairinger@schimmelsuchhunde.at

Herr Wolfgang Hochreiter, info@schimmelsuchhunde.at

www.schimmelsuchhunde.at

A-4501 Neuhofen
Lothringenstrasse 13

Vorbemerkung

Eine immer häufiger eingesetzte Methode, versteckte Schäden zu lokalisieren, ist der Einsatz von Schimmelpilz-Suchhunden, die auf die von Schimmelpilzen abgegebenen flüchtigen Stoffe (MVOC) trainiert sind und diese bereits in niedrigsten Konzentrationen riechen können. Ein gut trainierter Hund zeigt geringste Geruchsquellen an, die fachlich richtig interpretiert und anschließend weiter untersucht werden müssen, er kann damit eine Hilfestellung für den erfahrenen Gutachter leisten.

1. Einleitung

Der Alltagshund

Im Gebrauchshundealltag werden die hervorragenden Eigenschaften der Hundenase seit der Domestizierung des Hundes genutzt: Jagdhunde, Fährtenhunde, Sprengstoffhunde, Drogensuchhunde, Rettungshunde. Ein zukunftssträchtiges Einsatzgebiet ist das Erschnüffeln von Schimmelpilzen. Die Hundenase beweist dabei eine Trefferquote und Zuverlässigkeit, die bisher durch kein technisches Gerät erreicht werden konnte.

Wo liegt das Problem?

Wichtig ist zu wissen, wonach man sucht, wenn man es nicht sieht. Schimmel-Suchhunde sind in der Lage, entstehenden und versteckten Schimmelpilzbefall im Bauteil punktgenau zu erkennen und zu lokalisieren.

Praktischer Hintergrund

Während der Mensch sich überwiegend visuell orientiert, ist für den Hund der Geruchssinn von entscheidender und überlebenswichtiger Bedeutung. Denn der Hund findet sich in seiner Umwelt vor allem über seine feine Nase zurecht und erhält über sie alle notwendigen Informationen.

2. Die Hundenase – das Messinstrument

Durch die besondere anatomische Beschaffenheit der Hundenase kann der Hund auch geringste Duftspuren gleichzeitig aufnehmen, erkennen und unterscheiden, selbst wenn sie nur in Spuren vorhanden und von anderen Gerüchen überdeckt sind. Jede Duftspur hinterlässt im Riechhirn des Hundes einen eindeutigen Fingerabdruck.

Zahlen und Fakten zur Hundenase

- Hunde können mit ihrem ausgeprägten Geruchssinn rund tausend Gerüche unterscheiden.
- Je nach Länge der Hundeschnauze erreicht die Riechschleimhaut eine Größe von 85 bis 200 cm², beim Menschen sind es hingegen gerade einmal 5 cm².
- Er hat wesentlich mehr Riechzellen, als der Mensch (5 Mio. : 220 Mio.).
- 10.000 Riechzelltypen helfen Gerüche besser zu differenzieren (350 beim Menschen).
- Der Hund kann ca. 300 mal in der Minute kurze Atemzüge tätigen.
- Er kann dimensional riechen (stereo links/rechts unterscheiden).
- Er ist in der Lage Gerüche in Teilkomponenten aufzuspalten und zu speichern.
- 10 % des Hirns nutzt der Hund zum Riechen, beim Menschen sind es nur ca. 1 %.
- Suchverhalten ist ein Grundbedürfnis für den Hund, es muss nicht erlernt werden, aber gezielt gefördert werden.

Nasensarbeit

Durch das Schnüffeln ist der Hund in der Lage, etwa 300-mal (Atemfrequenz) in der Minute einzuatmen. Die von den Riechhärchen (Fibrillen) gebundenen Gerüche werden direkt in die Riechschleimhaut und die darin enthaltenen Riechsinneszellen transportiert und im großen Riechhirn verarbeitet. Im Riechkolben (Bulbus Olfactorius) des Gehirns sorgt dann noch einmal eine besonders komplexe Art der Verschaltung für die enorm hohe Geruchsauflösung der verschiedenen Stoffe, sodass eine Art »räumliches« Riechen entsteht.

Ein Training erhöht die Arbeitsleistung des Gehirns und die Unterscheidungsfähigkeit um ein Vielfaches.

3. Training

Grundsätzlich sind die Schimmelpilz-Suchhunde auf die gängigsten Schimmelarten trainiert, wobei sich das Geruchsbild der einzelnen Arten nur selten ausgeprägt unterscheidet. Für die Trainingsphase, um ein neues Geruchsbild aufzunehmen, benötigt ein gut trainierter Suchhund eine relativ kurze Zeitspanne und kann dabei eine Vielzahl von unterschiedlichen Gerüchen speichern und wieder abrufen.

Die Basis der Ausbildung eines zertifizierten Schimmel-Suchhundes ist:

- **Vertrauensaufbau, Erziehung und Teamwork:**
Der optimale Vertrauensaufbau zwischen Hund und Hundeführer ist die Grundlage auf der eine erfolgreiche Ausbildung basiert. Nur ein harmonisches Team ist in der Lage, auch schwierige Situationen positiv auszuführen.
- **Positiver und spielerischer Aufbau des Trainings – »Ich darf suchen« anstatt »ich muss suchen«:**
Wichtig für den Hund sind, viele positive Erfahrungen im Aufbau zu erleben und eine zielgerichtete Ausbildung mit einer gewissen erzieherischen Konsequenz.
- **Motivation des Hundes:**
Ein fortlaufend trainiertes positives Erfahrungsbild des Hundes zieht sich durch die gesamte Ausbildung. Der Hundeführer oder Ausbilder muss sich immer die Fragen stellen: »Warum tut dies der Hund?«, »Wie kann ich die Motivation steigern?«.
Zum Beispiel: Hunger führt zur Suche nach Futter → Bestätigung mit Futter. Diese positive Assoziation (Verknüpfung) wie Geruch und Auffindung des Schimmels in Verbindung mit der richtigen Bestätigung (Futter – Beute) führt zu einem motivierten Suchhund.
- **Sauberes und steriles Arbeiten mit den Duftstoffen:**

Die versteckten Motivationsobjekte (Bringsel), die mit den verschiedenen Duftstoffen (Schimmelarten) bestückt sind, dürfen nie mit anderen Gerüchen in Verbindung gebracht werden (Mensch, Hundespeichel etc.). Jedes Objekt muss vor jedem Training steril ausgekocht werden und darf nur mit geruchsneutralen Handschuhen berührt werden, damit der Hund nur die austretenden MVOCs der jeweiligen bestückten Schimmelart in Verbindung bringt und dies zu einer positiven Assoziation verknüpft.

- **Generell:**

Schimmel-Suchhunde sind keine übernatürlichen Wesen, sondern können nur das wiedergeben, was sie gelernt haben, und dies unter unterschiedlichsten Umweltbedingungen: Nur eine gute und optimale Ausbildung ergibt einen sicheren Schimmel-Suchhund.

4. Zertifizierung

Eine Zertifizierung ist ein Verfahren, in dem nachgewiesen wird, dass bestimmte Anforderungen an Produkte, Dienstleistungen oder Personen eingehalten werden. Nach erfolgreichem Nachweis über die Einhaltung der Anforderungen wird ein Zertifikat ausgestellt. Durch die Zertifizierung wird Vertrauen geschaffen, da die Einhaltung der Anforderungen aus dem entsprechenden Zertifizierungsschema geprüft und bestätigt werden. Die Qualität der Produkte und Dienstleistungen bzw. die Kompetenz einer Person werden damit in einem unabhängigen Verfahren nachgewiesen.

Voraussetzungen für die Zertifizierung:

- **Ausgebildeter Suchhund:**
Eignung des Hundes wie Aggressionslosigkeit, Führigkeit, hohe Arbeitsbereitschaft, hohes Triebpotenzial.
- **Ausgebildeter Hundeführer:**
Erfahrene Hundeführer, geprüfte ÖKV-Trainer, Diensthundeausbildner für Polizei, Zoll oder Militär.
- **Vorraussetzung zur Ausbildung eines Schimmel-Suchhundes:**
Erfolgreich abgelegte Prüfungsstufen
 - IPO 2 Gebrauchshundeprüfung,
 - FH 3 Fährtenhundeprüfung,
 - RH FB + RH FLB Rettungshundeprüfung.

5. Gesundheit des Hundes (nachhaltiger Einsatz des Hundes)

Grundsätzlich gilt, dass nur gesunde Hunde zum Einsatz kommen. Die Belastung durch Schimmelpilze ist eher zu vernachlässigen, da beim gesamten Training der Hund nicht direkt mit den Sporen in Verbindung kommt. Der Schimmelpilz wird auf einen Spezial-Geruchsträger in geringer Menge aufgebracht. Dieser wird in einem Kunststoffbeutel luftdicht verschlossen und in ein Hartplastikröhrchen mit kleinen Luftlöchern eingepackt. Der Hund ist in der Lage, die geringe Ausgasung (MVOC) zu erkennen und zu lokalisieren. Im Einsatz kommt es in den mit Schimmelpilzbefall kontaminierten Bauteilen zu einer kurzzeitigen hohen Konzentration von Schimmelpilzsporen, die aber wie auch beim Menschen erst nach einem längeren Zeitraum zu Gesundheitsschäden führen können.

Zum Beispiel ist nach 15 Min. intensiver Suche die Belastung durch die Schimmelsporen als geringer einzustufen, als wenn der Hund vier Stunden im Garten herumtollt oder bei täglichen Sparziergängen einer viel höheren bzw. längeren Belastung ausgesetzt ist. Drogensuchhunde werden auch nicht drogensüchtig.

Viel mehr Augenmerk sollte auf die körperliche Verfassung bzw. Belastung des Hundes geachtet werden. Bei zu intensiver Suche eines Schimmelsuchhundes fällt dieser in einen fieberähnlichen Zustand und dementsprechend erhöht sich die Temperatur des Hundes und beeinflusst das Herz-Kreislaufsystem. Je nach Umwelteinflüssen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Staubbelastung, Lärm o. Ä. sind die maximalen Einsatzzeiten der Hunde von 15 bis 20 Min. dementsprechend zu reduzieren bzw. auch die Ruhezeiten des Hundes zwischen den Einsätzen entsprechend einzuhalten und ggf. zu verlängern, um keinerlei Gefährdung für den Hund zu riskieren. Bei zu hoher Umweltbelastung, z. B. Hitze, ist der Einsatz abubrechen bzw. zu verschieben, da die Gesundheit des Hundes im Vordergrund steht.

6. Im Einsatz

Die Kosten für den Einsatz eines Schimmel-Suchhundes sind für eine zerstörungsfreie Überprüfung von Gebäuden gering einzustufen. Eine alleinige Entscheidung für oder gegen eine Sanierung der betroffenen Räume sollte aus den Ergebnissen solcher Untersuchungen nicht abgeleitet werden [3].

Einsatzgebiete sind:

- Qualitätskontrolle bzw. Ankaufsüberprüfungen bei Kauf, Übernahme bzw. Miete einer Immobilie,
- Zerstörungsfreie Überprüfung bei Schadenssanierungen – War die Sanierung erfolgreich?
- Unterstützung von Gerichten, Gutachtern, Sachverständigen, Bauherren, Versicherungen und Sanierungsfirmen.
- schnelle, kostengünstige Schimmellokalisierung gegenüber Material- und Raumlufuntersuchungen,
- Unterstützung der Probenahme.
- Es muss nicht auf ein Laborergebnis gewartet werden.
Das Suchergebnis liegt sofort vor.

Literatur

[1] Haus, Bodo; Fieseler, Alfons: Nasenarbeitbildung und Einsatz von Spezial- und Suchhunden
Stuttgart: Ulmer Verlag, 2009

[2] Österreichische bzw. europäische Prüfungsordnung für Schimmel Suchhunde

[3] Tappler P., Mairinger E. (2019): Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus.

[4] Mitglieder des Arbeitskreises Innenraumluft (2019): Positionspapier zu Schimmel in Innenräumen.
Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus.

CURRICULUM VITAE



Dr.
Stefan Schoenwald

Abteilung Akustik/Lärmminderung

Empa Materials Science and Technology
Überlandstrasse 129
CH-8606 Dübendorf

stefan.schoenwald@empa.ch

Geboren 1976 in Bad Neustadt an der Saale, Deutschland, absolvierte er dort auch seine Schulausbildung und studierte danach Bauphysik in Stuttgart (FHT Stuttgart, Dipl.-Ing. (FH)). Nach einer 1-jährigen Tätigkeit als beratender Ingenieur, arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU in Eindhoven, Niederlanden, wo er im Jahr 2008 zum Thema "Flankenübertragung bei leichten Doppelwänden" promovierte (PhD).

Von 2008 bis 2013 forschte er zum Schallschutz im Holzbau am National Research Council in Ottawa, Kanada.

Seit 2013 leitet er den Fachbereich Bauakustik der Empa Abteilung Akustik/Lärmminderung in der Schweiz und ist seit 2019 Leiter der akkreditierten Prüfstelle für Bauakustik. Das Hauptforschungsgebiet ist die Schallübertragung in Holzgebäuden und die Entwicklung von schalltechnisch optimierten Holzbauelementen. Grundlage ist hierbei die Anwendung und Weiterentwicklung von numerischen, analytischen und experimentellen Verfahren. Seit 2015 lehrt er Akustik in Vorlesungen an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) in Zürich nun inzwischen in den Departementen Bauingenieurwesen, Architektur und Maschinenbau. Daneben ist er in verschiedenen nationalen, europäischen (CEN) und internationalen (ISO) Normausschüssen und Arbeitsgruppen vertreten.

wenn schwarze Löcher Trittschall schlucken

Dr. Stefan Schoenwald, PhD, stefan.schoenwald@empa.ch

Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung
CH-8606 Dübendorf

Sven Vallely, sven.vallely@empa.ch

Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung
CH-8606 Dübendorf

1. Einleitung

Der Einsatz von Holz als Baumaterial für mehrgeschossige Gebäude nimmt weltweit mit der Verbreitung neuer leistungsfähiger Holzwerkstoffe, wie z. B. Brettsperrholz, zu. Diese Entwicklung wurde vor allem durch die ökologischen und wirtschaftlichen Vorteile, wie zum Beispiel der Kohlenstoffspeicherung durch Holz und der hohe Vorfertigungsgrad, sowie durch die vergleichsweise hohe Biegesteifigkeit bei einem geringen Gewicht der Massivholzdecken begünstigt. Diese Eigenschaften begrenzen jedoch die Luft- und Trittschalldämmung, insbesondere im tieffrequenten Bereich. Dieser wird von gehenden Menschen oder springenden Kindern verursacht und ist eine der Hauptursachen für Störungen in Gebäuden [Rasmussen 2014]. Dies ist besonders ein Problem in Ländern, wie im D-A-CH-Raum, mit hohen baurechtlichen Schallschutzanforderungen und einem hohen Anspruch an Komfort und Qualität, in denen bei der Planung von Neubauten oft zusätzlich strengere Grenzwerte für den tieffrequenten Trittschall auf privatrechtlicher Basis vereinbart werden. In der Schweiz gibt es hierzu eine Empfehlung der Lignum [Lignum 2023].

2. Stand der Technik

Anforderungen für den Trittschall bei tiefen Frequenzen sind aber alleine mit schweren, schwimmenden Fußbodensystemen, welche auch für Fußbodenheizungen erforderlich sind, aufgrund deren Masse-Feder-Resonanz in der Regel nicht erreichbar. Daher werden in der Schweiz häufig Holzbetonverbund-Decken eingesetzt oder wie in anderen Ländern Massivholzdecken mit einer zusätzlichen Splittschüttung beschwert [Homb 2016]. Hierbei werden häufig Splittschüttungen mit bis zu 12 cm Schichtdicke verwendet [Lignum Data]. Dies ergibt eine zusätzliche Last von bis zu 200 kg/m², wodurch sich das Flächengewicht bezogen auf die Rohdecke bis zu verdreifacht. Bei hohen Holzgebäuden summieren sich pro Stockwerk die zusätzlich erforderliche Aufbauhöhe und das zusätzliche Flächengewicht, welches wiederum auf dem darunterliegenden Tragwerk lastet, zu enormen Größen auf. Zum Beispiel beträgt für ein zehnstöckiges Gebäude die Gesamtdicke der Kiesschichten aller Stockwerke bis zu 1.2 m. Bei einer bescheidenen Stockwerksfläche von 500 m² – dies entspricht noch nicht einmal der Fläche eines Tennisplatzes – beträgt das zusätzliche Gesamtgewicht der Kiesschüttung aller Stockwerke bereits bis zu 1000t.

3. Forschungsziel und Lösungsansatz

Ziel eines kürzlich abgeschlossenen Forschungsprojekts der Empa, welches von der Umwelttechnologie Förderung des schweizerischen Bundesamtes für Umwelt (BAFU) mitfinanziert wurde, war die Entwicklung einer innovativen Massivholzdecke mit einem wesentlich geringeren Materialeinsatz und Gewicht als bei herkömmlichen Systemen. In einem abschließenden Laborversuch gemäß EN ISO 10140-3 musste ein Deckenprototyp den Nachweis erbringen, dass die Anforderungen und Empfehlungen an den tieffrequenten Trittschallschutz mit dem Deckensystem erreicht werden. Andere Leistungsmerkmale und Aspekte, wie zum Beispiel Statik, Brandschutz und Fertigung, wurden bei der Entwicklung erwogen, aber nicht primär bearbeitet.

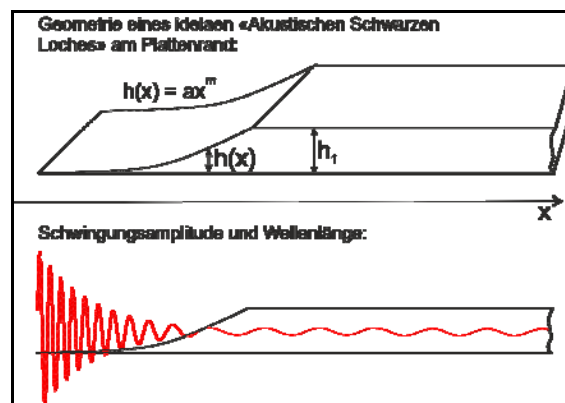
Sogenannte akustische schwarze Löcher wurden angewandt, um das Gewicht der Kiesschüttung, welche ausschließlich dem Schallschutz dient, wesentlich zu reduzieren.

3.1. Akustische schwarze Löcher (ASL)

Die Theorie der Akustischen Schwarzen Löcher (ASL) wurde erstmals in den späten 1980er Jahren für den eindimensionalen Fall eines Stabs mit einem sich geometrisch verjüngenden Ende veröffentlicht [Mironov 1988]. Seitdem wurden verschiedene Designs von ASLs vorgeschlagen und untersucht [Pelat 2020]. Das allgemeine Prinzip ist für alle Strukturen und Anwendungen gleich.

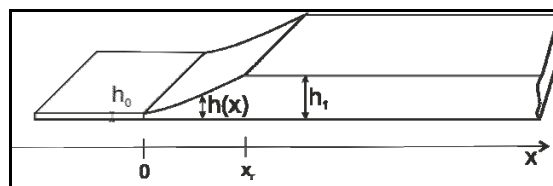
Durch eine Verringerung der Dicke und somit der Biegesteifigkeit einer Platte oder eines Stabes verlangsamt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit von einfallenden Biegewellen. Dieser Effekt ist in Abbildung 1 für ein ideales Querschnittsprofil, dessen Geometrie einer Potenzfunktion entspricht und dessen Dicke stetig gegen Null strebt, dargestellt. Theoretisch geht in diesem Fall die Biegewellengeschwindigkeit gegen Null. Das heißt, die Welle wird nicht reflektiert und somit "verschluckt". Dieser Effekt tritt breitbandig oberhalb einer Grenzfrequenz auf. Er ist daher gut geeignet, um Breitbandschwingungen, wie z. B. bei Trittschallanregung, zu reduzieren.

Abbildung 1: Darstellung eines idealen eindimensionalen ASL am Plattenrand



In der Praxis sind diese optimalen Querschnittsprofile nicht herstellbar oder gar anwendungstauglich. Im ASL nimmt auch die Schwingungsamplitude der Welle stetig zu und somit hier der Struktur durch Dämpfung gut Schwingungsenergie entzogen werden. Daher sind ASL mit einem Querschnittsprofil mit einer endlichen Restdicke, wenn auch begrenzt, durch die Materialdämpfung wirksam. Dies ist in Abbildung 2 dargestellt. Der ASL-Effekt kann in diesem Fall durch zusätzliche Dämpfung des ASL weiter verstärkt werden [Krylov 2004].

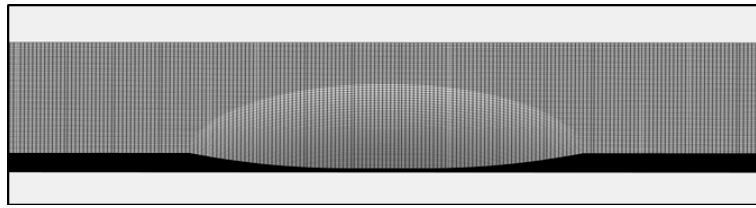
Abbildung 2: Darstellung eines eindimensionalen ASL mit endlicher Dicke am Plattenrand in der Praxis



Die Eintrittsfrequenz des Effekts ist abhängig von der ASL-Geometrie, während die Schwingungsreduzierung zusätzlich durch die Dämpfung bestimmt wird. Die relevantesten Entwicklungen für Plattenstrukturen sind die zweidimensionalen ASL (siehe Abbildung 3), das heißt kreisrunde Vertiefungen, welche auf einem plattenförmigen Bauteil angeordnet sind.

Die Herausforderung beim Entwurf von ASL ist die Ermittlung eines Querschnittsprofils, welches für den gewünschten Frequenzbereich und Dämpfungswirkung geeignet ist.

Abbildung 3: Darstellung des Querschnittes durch ein rundes zweidimensionales ASL angeordnet auf einer Platte



Das Querschnittsprofil $h(x)$ des ASL in Abbildung 2 folgt in der Regel dem Potenzgesetz nach Gleichung 1a, welches durch die ASL-Profilparameter, dem Koeffizient a und dem Exponent m , beschrieben wird.

$$h(x) = h_0 + ax^m \quad (1a)$$

$$r = \left(\frac{h_1 - h_0}{a}\right)^{1/m} \quad (1b)$$

Die Größe r des ASL, das heißt die Länge des eindimensionalen ASL oder der Radius des zweidimensionalen ASL, sind durch die Plattendicke h_1 sowie der minimalen Restdicke h_0 gegeben. Bei zweidimensionalen ASL muss auch deren Position auf der Platte berücksichtigt werden.

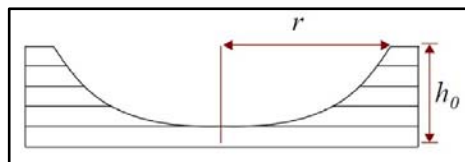
Bei homogenen Materialien, wie Stahl oder Aluminium, ist der Steifigkeitsgradient im ASL nur eine Funktion der Materialdicke, die entweder analytisch oder numerisch effizient mit gängiger Finite-Elemente-Methode-Software (FEM) berechnet werden kann.

Die Anwendung von ASL wurde in vielen Industriesektoren bereits erforscht. Die Herstellung von ASL in dünnen Platten, die in vielen Leichtbaustrukturen des Automobil- und Luftfahrtbereichs sehr verbreitet sind, stellt jedoch eine Herausforderung dar [Pelat 2020]. Bislang ist die die Schwingungsdämpfung von Turbinenschaufeln einzige bekannte industrielle Anwendung von ASL [Bowyer 2014].

3.2. Auslegung von akustischen schwarzen Löchern bei Brettsperrholzdecken

Holzwerkstoffböden, wie zum Beispiel Brettsperrholz (BSP), bestehen aus mehreren Schichten von Holzbalken oder Lamellen, die zu einem Verbundwerkstoff verleimt werden. Die Fasern aneinandergrenzender Schichten sind in der Regel rechtwinklig zueinander ausgerichtet. Die allgemeinen mechanischen Eigenschaften einer BSP-Platte hängen entscheidend von den Materialeigenschaften des Holzes sowie von der Anzahl, der Dicke und der Ausrichtung der Schichten ab. Weichholzarten wie Kiefer oder Fichte, die üblicherweise für BSP verwendet werden, sind stark orthotrop, das heißt deren Steifigkeit ist in der Richtung parallel zu den Fasern um eine Größenordnung höher als in der normalen oder tangentialen Richtung.

Abbildung 4: Darstellung des Querschnittes durch ein ASL auf einer BSP-Decke



Im Bereich der ASL werden stetig Lagen von dem BSP entfernt. Die lokalen strukturellen Eigenschaften in diesem Bereich hängen von der Anzahl der verbleibenden Lagen, ihrer Ausrichtung und ihrer verbleibenden Restdicke ab. Um all diese Faktoren bei der Dimensionierung eines ASL zu berücksichtigen, wurden numerische FEM-Berechnungen durchgeführt. Ziel war es, ASL-Geometrien zu finden, die geeignet sind, den von einem BSP-Boden abgestrahlten Trittschall zu reduzieren.

Für eine ausreichende geometrische Auflösung der ASL erfordern der schichtweise Aufbau des BSP bereits bei tiefen Frequenzen ein sehr feines FEM-Netz. Dies hat zur Folge, dass einfache FEM-Modelle mit üblichen Volumenelementen, bei denen die einzelnen Schichten und deren Geometrie explizit abgebildet werden, sehr groß und rechenintensiv sind.

Im ersten Schritt bei der Ermittlung von geeigneten ASL Parametern wurde daher ein recheneffizientes FEM-Modell für BSP, mit dem die Trittschallübertragung im gesamten relevanten Frequenzbereich von 50 Hz bis 3.15 kHz in Minutenschnelle berechnet werden kann, entwickelt. Die eigentliche harmonische Analyse wird in der FEM-Software "ANSYS" durchgeführt. In der Berechnung wird das geschichtete BSP als eine einzelne äquivalente Schicht mit recheneffizienten Volumenschalenelementen abgebildet. Die dazu notwendigen äquivalenten Materialkonstanten werden jedoch im Voraus mit einem Homogenisierungsverfahren [Vallely 2023] ermittelt. Der Trittschallpegel wird in einem separaten Nachbearbeitungsschritt aus den Ergebnisse der FEM-Analyse berechnet. Dazu wird die von dem BSP-Element in ein Freifeld abgestrahlte Schallleistung aus der Oberflächenschnelle-Verteilung mittels diskreter Berechnungsmethode (DCM) oder Integral-Transformationsmethode (ITM) berechnet [Hashimoto 2001, Conta 2020].

Zur Erhöhung der Verluste der ASL sind alle gängigen Schwingungsdämpfungsbeläge, zum Beispiel viskös elastische Materialien, denkbar. In diesem Projekt wurde jedoch eine Befüllung der ASL mit Sand oder Splitt vorgesehen, da diese Materialien zum einen auch als Dämpfer wirken und bisher bereits üblicherweise als zusätzliche Masse aufgebracht werden.

4. Resultate

Im Folgenden sind die Ergebnisse von zwei Laborversuchen des Forschungsprojekts kurz dargestellt. Die Versuche an dem kleinen BSP Prototypen dienen in erster Linie der Validierung der Rechenmodelle mit denen dann die ASL für die große BSP Decke der zweiten Versuchsreihe ausgelegt wurden. In dieser zweiten Versuchsreihe wurden dann Trittschallmessungen gemäß der Norm EN ISO 10140-3 zum Nachweis der Leistungsfähigkeit der BSP-Decke mit ASL durchgeführt.

4.1. Validierung der FEM-Berechnung am kleinen BSP Prototyp

Die Versuche wurden zwei nominell identischen BSP-Platten (5-Schicht, Schichtdicke 20 mm) mit den Abmessungen 2.80 m (L) x 1.20 m (B) x 0.10 m (H) durchgeführt. Eine der Platten war eine Referenz, in die zweite wurden zwei ASL (1.00 m Durchmesser, max. Tiefe 80 mm) mit einer CNC-Fräse gefräst. Die geometrischen Parameter der ASL wurden mit FEM-Berechnungen mit dem beschriebenen Verfahren ermittelt. Die ASL-Geometrie wurde nicht umfassend optimiert, da mit dieser Versuchsreihe das FEM-Modell validiert wurde.

Für die Schwingungsmessungen wurden beide BSP-Platten nacheinander im Leichtbaulabor der Empa auf drei Airbags platziert. Mit den Airbags wurden im Versuch freie Randbedingungen, die im FEM-Modell angewandt wurden, angenähert. Die Platten wurden jeweils an drei Anregungspunkten auf der Unterseite durch einen elektrodynamischen Trägheitsschwinger, Typ Data Physics IV40, mit einem Gleitsinussignal angeregt. Ein Foto des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 5 zu sehen. Zwei Anregepunkte befanden sich an zwei Ecken entlang einer der kurzen Kanten der Platten, und der dritte lag ungefähr in der Mitte der gegenüberliegenden Plattenkante. Am Anregungspunkt wurden die Kraft- und Beschleunigungssignale als Referenzsignale mit einem Impedanzkopf PCB 288D01 gemessen, der zwischen dem Schwingerreger und dem Prüfling angebracht war. Die Schwingungsantwort der Platte wurde auf der Oberseite mit einem Polytec Scanning Laser Vibrometer PSV 400 gemessen. Das rechteckige Messraster hatte 189 Messpunkten angeordnet in 9 Reihen und 21 Spalten. Aus der gemessenen Schwingung und der Kraft wurden die Transferadmittanzen an allen Messpunkten zum Vergleich mit den FEM-Ergebnissen bestimmt. Damit es möglich war auch bei der Platte mit ASL die gesamte Oberfläche abzutasten, um die die Auswirkungen der ABHs auf die Modenformen zu sehen, befanden sich die ASL bei der Messung auf der Plattenunterseite.

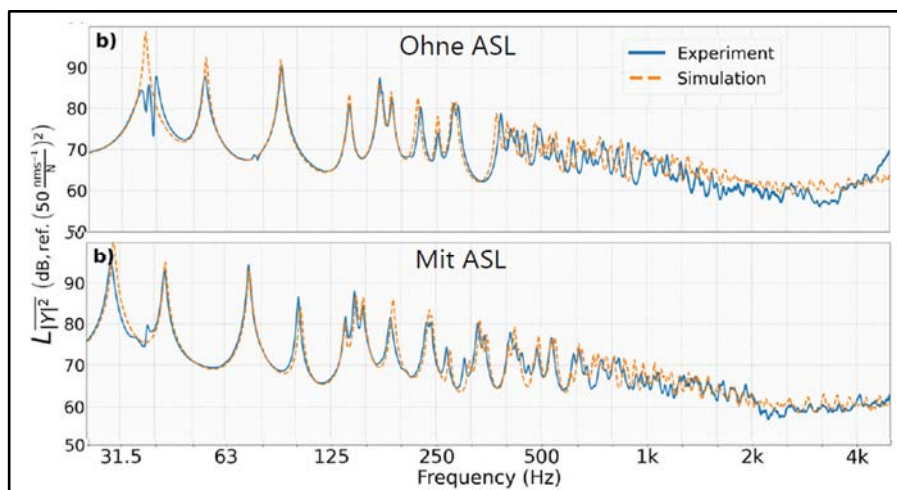
Die Ergebnisse der Schwingungsmessungen (blau) stimmen sehr gut mit den Plattenschwingungen aus der FEM-Berechnung (rot) in Abbildung 7 überein. Es sind die über alle Messpunkte gemittelten Transferadmittanzen für den Anregepunkt in der Mitte der Kante für die Referenzplatte (oben) und die Platte mit ASL (unten) dargestellt. Die gute Übereinstimmung ist repräsentativ für alle Messpunkte. Durch die ASL wird die Platte biegeweicher, so dass sich alle Moden zu tiefen Frequenzen verschieben. Die erste Mode der Platte ohne ASL lag bei ca. 35 Hz. In diesem Frequenzbereich haben die Airbags eine Resonanz, so dass die Resonanzspitze der Messergebnisse stärker als in der FEM-Berechnung gedämpft ist. Oberhalb von ca. 630 Hz ist die Modendichte so groß, dass nebeneinanderliegende Resonanzspitzen nicht klar unterschieden werden können. Der mittlere Verlauf der Transferadmittanzen stimmt jedoch zwischen Versuch und Berechnung sehr gut überein. Die Unterschiede bei sehr hohen Frequenzen sind bedingt durch Dickenschwingungen, welche messtechnisch nicht adäquat erfasst werden können.

In der Simulation wurden Materialeingangsdaten für die BSP-Platten verwendet, welche für die großen BSP-Elemente ermittelt wurden [Valley 2023]. Diese Werte wurden um 5% angepasst, da zuerst alle Eigenfrequenzen des Elements mit und ohne ASL systematisch um ca. 5% zu hoch lagen. Die großen BSP Elemente und die kleinen BSP Prototypen stammen von zwei verschiedenen Herstellern aus unterschiedlichen Ländern. Ein geringer Unterschied in der Steifigkeit erscheint daher plausibel. Weiter wurden aus den Berechnungsergebnissen nur die Ergebnisse jener Knotenpunkte extrahiert, die sich im Bereich des Messrasters befanden.

Abbildung 5: Versuchsaufbau für Schwingungsmessungen mit dem Scanning Laser Doppler Vibrometer an den kleinen BSP-Platten mit und ohne ASL im Leichtbaulabor der Empa.

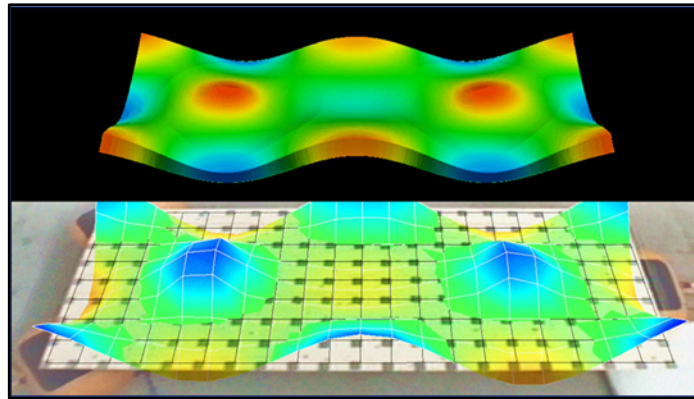


Abbildung 6: Vergleich der örtlich gemittelten Transferadmittanzen der beiden kleinen BSP-Platten aus den Schwingungsmessungen (Experiment) und den FEM-Berechnungen (Simulation).



In Abbildung 7 ist repräsentativ eine Modenform des kleinen ASL-Prototyps dargestellt. Die berechnete Modenform oben stimmt sehr gut mit der gemessenen Schwingungsform überein. Im Bereich der ASL treten hohe Schwingungsamplituden auf, da die ASL bei diesem ersten Experiment noch nicht mit Splitt oder Sand befüllt waren.

Abbildung 7: Vergleich der Modenform der kleinen BSP-Platte mit ASL aus der FEM-Berechnung (oben) und aus der Schwingungsmessung (unten).



4.2. Trittschalldämmung einer Brettsperrholzdecke mit akustischen schwarzen Löchern

Nachdem das Berechnungsverfahren validiert war, wurden damit die geometrischen Parameter der ASL einer bauüblichen Brettsperrholzdecke für Trittschallmessungen im Empa Holzdeckenlabor ausgelegt. Aus zeitlichen Gründen wurde keine systematische Optimierung vorgenommen, es wurden lediglich die Berechnungen für einige wenige ASL Geometrien durchgeführt und ein vielversprechender Kandidat ausgewählt.

Bei der Decke handelt es sich wiederum um eine 200 mm dicke BSP-Decke (5-lagig, Schichtdicke 40 mm) mit der Abmessung 5.73 m (L) x 4.76 m (B), welche aus zwei in etwa gleich großen Teilelementen zusammengefügt wurde. Zuerst wurde im Empa Holzdeckenlabor die Trittschalldämmung der unbearbeiteten Decke nach EN ISO 101403 gemessen (Abbildung 8, links). Anschließend wurde die Decke wieder ausgebaut und in beide Teilelemente wurden jeweils zwei ASL mit einem Durchmesser von 2.20 m und einer Tiefe von 160 mm gefräst. Danach wurde die Decke erneut im Empa Holzdeckenlabor eingebaut und die vier ASL mit Splitt gefüllt (Abbildung 8, Mitte bzw. rechts). Die Trittschalldämmung der ASL-Rohdecke wurde gemessen, in dem sie mit dem Hammerwerk in den Bereichen zwischen den ASL angeregt wurde und ein zweites Mal nachdem ein Fußbodenaufbau mit schwimmendem Estrich aufgebracht war. Der Aufbau war von oben nach unten:

- 2 mm PVC Bodenbelag
- 70 mm Zementestrich (vorgefertigte Betonplatte, flächenbezogene Masse 166 kg/m²)
- 60 mm Trittschalldämmung (30 mm Mineralfaser $s' \leq 6 \text{ MN/m}^3$ und 30 mm Mineralfaser $s' \leq 9 \text{ MN/m}^3$)
- 200 mm BSP-Decke mit Splitt gefüllten ASL

In Abbildung 9 sind die gemessenen Norm-Trittschallpegel L_n der drei Bodenaufbauten dargestellt. Die Referenz, das heißt, die Ergebnisse der BSP-Rohdecke ist als blaue Linie dargestellt. Eine signifikante breitbandige Reduzierung der Pegel um bis zu 9 dB ergeben sich durch die vier mit Splitt gefüllten ASL (Abbildung 9, rot). Die Verbesserung beginnt schon bei tiefe Frequenzen erreicht sein Maximum oberhalb 125 Hz. Die Verbesserung nimmt oberhalb von 2000 Hz zu hohen Frequenzen immer weiter ab. In diesem Bereich wird die Holzdecke auf Grund der geringen Kontaktsteifigkeit durch das Hammerwerk nicht effektiv angeregt. Nur im 80 Hz Terzband wurde eine geringfügige Erhöhung der Norm-Trittschallpegel im Vergleich zur Referenzdecke festgestellt. In den Frequenzbändern unterhalb 100 Hz ist die Anzahl der Biegemoden der Decke sehr begrenzt. Die Verschlechterung wird durch eine einzelne Mode verursacht, die sich im Frequenzbereich verschiebt, sehr effizient Schall abstrahlt und nicht durch die ASL beeinflusst wird. Durch eine systematische Optimierung der ASL Geometrie, auch unter Berücksichtigung deren Position auf der Decke können solche Schwachstellen bei zukünftigen Auslegungen sicherlich vermieden werden.

Abbildung 8: Einbau der BSP-Decke im Holzdeckenlabor der Empa für Schallmessungen; links: BSP-Decke ohne ASL als Referenz; mittig: BSP-Deckenprototyp mit ungefüllten ASL; rechts: BSP-Deckenprototyp mit Splitt befüllten ASL.

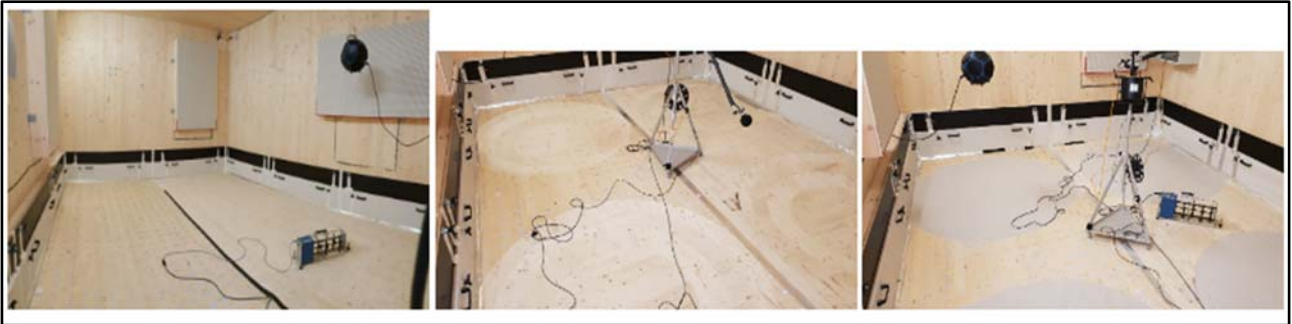


Abbildung 9: Norm-Trittschallpegel gemessen nach EN ISO 10140-3 im Empa Holzdeckenlabor für BSP-Decke ohne ASL (blau), BSP-Decke mit Splitt befüllten ASL ohne Fußbodenaufbau (rot) und BSP-Decke mit Splitt befüllten ASL mit schwimmendem Fußbodenaufbau (grün).

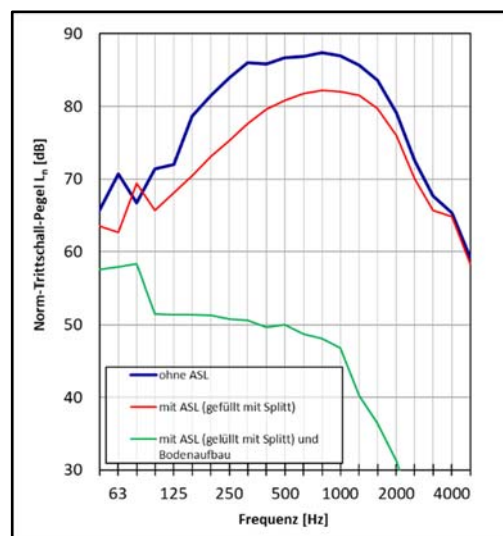
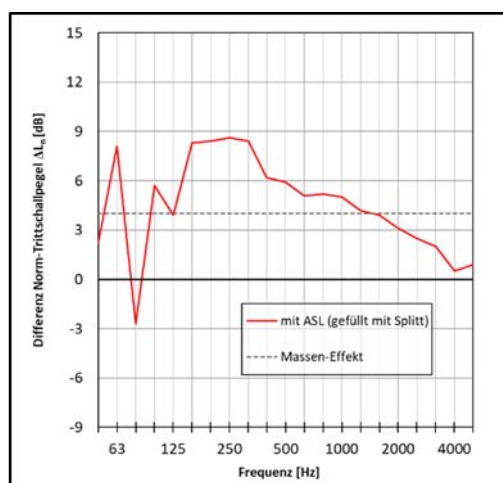


Abbildung 10: Reduzierung des Norm-Trittschallpegel durch Splitt befüllte ASL bezogen auf BSP-Decke ohne ASL (rot) und theoretische Verbesserung gemäß Massen-Effekt.



Die Verbesserung durch die mit Splitt befüllten ASL ist detailliert in Abbildung 10 als Differenz der beiden gemessenen Norm-Trittschallpegel (rote Linie) dargestellt. Durch die höhere Dichte des Splitts im Vergleich zu dem entfernten Holz vergrößerte sich das Gewicht des Deckenelements um knapp 60% im Vergleich zur

Rohdecke. Theoretisch verringert sich nach dem Massegesetz der Trittschallpegel um gerade einmal 4 dB. Diese Verbesserung ist ebenfalls in Abbildung 10 als gestrichelte Linie dargestellt. Die gemessene Verbesserung ist jedoch deutlich grösser und somit die Wirkung der ASL zur Reduzierung der Norm-Trittschallpegel nachgewiesen.

Zum Schluss wurden die Trittschalldämmung eines kompletten Fußbodensystems mit ASL zum Vergleich den baurechtlichen Anforderungen und Empfehlungen für erhöhten Trittschallschutz gemessen. Der Frequenzverlauf ist in Abbildung 9 als grüne Linie dargestellt. Wie zu erwarten wird durch den schwimmenden Estrich eine sehr große Reduzierung des Trittschallpegels bei mittleren und hohen Frequenzen erreicht. Der gemessene bewertete Norm-Trittschallpegel und die Spektrum-Anpassungswerte betragen $L_{n,w} (C_1, C_{1,50-2500}) = 47(-1, 3)$ dB. Diese sind in der Tabelle 1 den Anforderungswerten aus der SIA 181 und den Empfehlungen der Lignum gegenübergestellt [Lignum 2023]. Diese gelten als erreicht, wenn die entsprechende Einzahlangabe aus der Messung gleich oder geringer als der Anforderungswert ist.

Tabelle 1: Vergleich mit baurechtlichen Trittschallschutz-Anforderungen nach SIA 181 [SIA 181] und Empfehlungen der Lignum für Grenzwerte für Trittschallschutz unter Berücksichtigung der Frequenzen bis 50 Hz [Lignum 2023].

	$L_{n,w}$ [dB]	$L_{n,w}+C_i$ [dB]	$L_{n,w}+C_{i,50-2500}$ [dB]
Messergebnisse: Technologie_Demonstrator mit ASL und Bodenaufbau	47	46	50
SIA 181 - Mindestanforderung	≤ 53 <input checked="" type="checkbox"/>	≤ 53 <input checked="" type="checkbox"/>	
SIA 181 – erhöhte Anforderung	≤ 49 <input checked="" type="checkbox"/>	≤ 49 <input checked="" type="checkbox"/>	
Lignum – Mindestempfehlung			≤ 58 <input checked="" type="checkbox"/>
Lignum – erhöhte Stufe			≤ 53 <input checked="" type="checkbox"/>
Lignum – höchste Stufe			≤ 49 <input type="checkbox"/>
<i>Hinweise zur Beurteilung in der Tabelle:</i>			
<ul style="list-style-type: none"> • Die Anforderungswerte gelten für einen Wohnraum mit mittlerer Lärmempfindlichkeit, z. B. Wohnzimmer, Schlafzimmer, Büro. • Die Anforderungen gelten für die Übertragung im Gebäude unter Berücksichtigung aller Nebenwege. Diese sind hier nicht berücksichtigt, sie werden jedoch wegen dem schwimmenden Fußbodenaufbau zur Trittschalldämmung als zweitrangig eingestuft. • Als Anforderungswerte gelten die bewerteten Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$, die das Raumvolumen des Empfangsraums berücksichtigen. Bei üblichen Raumvolumen $>30 \text{ m}^3$ sind diese Werte kleiner als die hier angegeben gemessenen normierten Größen. • Es sind keine Projektierungszuschläge (Sicherheitsbeiwerte) berücksichtigt. 			

Die baurechtlichen Anforderungswerte sind gut eingehalten. Nach SIA 181 sind sie abhängig von der Lärmbelastung im Senderraum und der Lärmempfindlichkeit des Empfangsraums. In der Tabelle 1 sind die Anforderungswerte für Räume mit mittlere Lärmempfindlichkeit, wie Schlafzimmer, Wohnzimmer, Büros oder Schulzimmer, für in Wohngebäuden übliche mäßig Lärmbelastung, aufgeführt. Diese müssen als bewertete Standard-Trittschallpegel $L_{nT,w}$ im fertiggestellten Gebäude, das heißt unter Berücksichtigung des Empfangsraumvolumens und inklusive der Flankenübertragung, eingehalten werden. In den Messergebnissen ist die Flankenübertragung nicht berücksichtigt. Ein schalltechnisch günstiger Fußbodenaufbau, wie bei der ASL Decke, reduziert jedoch auch die Trittschall-Flankenübertragung, so dass in den allermeisten Fällen, nur die Direktübertragung für die Beurteilung maßgeblich ist. Die gemessenen Norm-Trittschallpegel können in die Standard-Trittschallpegel umgerechnet werden. Bei Räumen mit einem Volumen $>30 \text{ m}^3$, also für übliche Aufenthaltsräume, sind die Standard-Trittschallpegel geringer als die Norm-Trittschallpegel und somit auf der

sicheren Seite. Bei kleinen Empfangsräumen mit einem Volumen $<30 \text{ m}^3$ sind die Standard-Trittschallpegel grösser als die Norm-Trittschallpegel. Jedoch trifft dies jedoch meistens auf Badezimmer, Küchen und WC zu. Hier ist die Lärmempfindlichkeit gering und somit sind die Anforderungswerte wiederum 5 dB weniger streng.

Die empfohlenen Trittschallgrenzwerte von Holzdecken der Lignum sind in der Regel schwieriger zu erreichen, da der tieffrequente Trittschallschutz bis 50 Hz berücksichtigt wird. Es gelten die gleichen Bedingungen für Flankenübertragung und Raumvolumen wie bei den baurechtlichen Anforderungen. Aber selbst hier erfüllt die ASL-Decke die Empfehlungen für Mindestanforderungen, sowie für die erhöhte Stufe sehr gut. Nur der Grenzwert für die höchste Schallschutzstufe wird nur knapp um 1 dB verfehlt. Es ist als realistisch einzuschätzen, dass die Trittschalldämmung der ASL Decke mit einer systematischen Optimierung der ASL Geometrie und deren Anordnung, sowie einem optimierten Fußbodenaufbau, um einige Dezibel weiterverbessert werden kann, so dass auch dieser Grenzwert erfüllt wird.

5. Fazit

Akustische schwarze Löcher (ASL) sind zur Verbesserung der Trittschalldämmung von Massivholzdecken geeignet. Die Befüllung der ASL mit Splitt dämpft die Deckenschwingungen, so dass sich eine signifikante Gewichtseinsparung und Reduzierung der Aufbauhöhe im Vergleich zu den heute üblichen vollflächigen bis zu 12 cm dicken Splittschüttungen, welche in erster Line den Effekt der Beschwerung nutzen, ergibt. Die ASL sind schon bei tiefen Frequenzen wirksam, die bei leichten Decken als besonders störend wahrgenommen werden.

Im Laborversuch wurde mit einem Brettsperrholz-Deckenprototyp mit ASL nachgewiesen, dass die baurechtlichen Anforderungen nach SIA 181 sowie auch die strengeren Empfehlungen der Lignum an den tieffrequenten Trittschallschutz in der Schweiz erfüllt werden können. Die ASL Geometrie und deren Anordnung wurde für diesen Deckenprototyp aus Zeitgründen noch nicht systematisch optimiert. Die Anforderungen anderer Planungsdisziplinen wurden in Erwägung gezogen, aber noch detailliert untersucht.

Des Weiteren wurde in dem Projekt ein effizientes, breitbandiges Rechenmodell für den Trittschallschutz, welches auf der Finiten Elemente Methode basiert entwickelt und validiert. Dieses Modell wird für eine systematische Optimierung und Weiterentwicklung der ASL bei Massivholzdecken auch unter Berücksichtigung anderer Planungsdisziplinen in Nachfolgeprojekten verwendet.

Danksagung

Die Autoren danken der Umwelttechnologieförderung des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) der schweizerischen Eidgenossenschaft für die finanzielle Unterstützung des Projekts «Trittschalldämmung von Massivholzdecken mit akustischem schwarzen Loch (TriMASL)», sowie den Firmen Strüby Holzbau AG, Seewen (SZ) und Timber Structures 3.0 AG, Thun für die Unterstützung bei Herstellung, Fertigung und Einbau der Prüfobjekte.

Literatur

- [Bowyer 2014] E. Bowyer and V. Krylov, "Damping of flexural vibrations in turbofan blades using the acoustic black hole effect," *Applied Acoustics*, vol. 76, pp. 359–365, 2014
- [Conta 2020] Conta, Simone, Andrea Santoni, and Anders Homb. "Benchmarking the vibration velocity-based measurement methods to determine the radiated sound power from floor elements under impact excitation." *Applied Acoustics* 169, 2020
- [EN ISO 10140-3] EN ISO 10140-3, Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 3: Messung der Trittschalldämmung, 2021
- [Hashimoto 2001] Hashimoto, N. "Measurement of sound radiation efficiency by the discrete calculation method." *Applied Acoustics* 62.4 p. 429-446, 2001

- [Homb 2016] A. Homb, C. Guigou-Carter, and A. Rabold, "Impact sound insulation of cross-laminated timber/massive wood floor constructions: Collection of laboratory measurements and result evaluation," *Building Acoustics*, vol. 24, no. 1, pp. 35–52, 2017
- [Krylov 2004] V. V. Krylov, "New type of vibration dampers utilizing the effect of acoustic 'black holes'," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 90, no. 5, pp. 830–837, 2004
- [Lignum 2023] Lignum-Dokumentation Schallschutz im Holzbau, Lignum, Empa, 2023
- [Lignum Data] www.lignum-data.ch, Online Bauteilkatalog
- [Mironov 1988] M. Mironov, "Propagation of a flexural wave in a plate whose thickness decreases smoothly to zero in a finite interval," 1988.
- [Pelat 2020] A. Pelat, F. Gautier, S. C. Conlon, and F. Semperlotti, "The acoustic black hole: A review of theory and applications," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 476, p. 115316, 2020
- [Rasmussen 2014] B. Rasmussen and M. Machimbarrena, "COST Action TU 0901–building acoustics throughout Europe. volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe," 2014
- [SIA 181] Schallschutz im Hochbau, SIA 181, 2020
- [Vallely 2023] S. Vallely and S. Schoenwald, "An efficient analytical method to obtain the homogenised frequencyindependent elastic material properties of cross laminated timber elements," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 546, p. 117424, 2023

Formelzeichen:

$h(x)$	lokale Stab- oder Plattendicke im akustischen schwarzen Loch (ASL) [m]
x	x -Koordinate [m]
h_0	minimale Restdicke im ASL [m]
h_1	Stab- oder Plattendicke [m]
a	Koeffizient der ASL Geometrie
m	Exponent der ASL Geometrie
r	Ausdehnung des ASL, d.h. Länge für 1d ASL am Plattenrand und Radius für 2d-ASL auf der Platte
$L_{n,w}$	bewerteter Norm-Trittschallpegel [dB]
$L'_{nT,w}$	bewerteter Standard-Trittschallpegel (in europäischen Normen $L'_{nT,w}$) [dB]
C	Spektrum-Anpassungswert für Trittschall für 100 Hz bis 2.5 kHz [dB]
$C_{j,50-2500}$	Spektrum-Anpassungswert für Trittschall für 50 Hz bis 2.5 kHz [dB]

CURRICULUM VITAE



Christoph Lechner absolvierte 1987 die HTL für Elektrotechnik in Innsbruck und begann als Sachverständiger in der Abteilung Maschinenbau und Elektrotechnik im Amt der Tiroler Landesregierung. Als Elektrotechniker wurde er auch in die Messtechnik, speziell im Schallbereich eingesetzt. Das Tätigkeitsfeld erweiterte sich sukzessive im Bereich der Gutachtertätigkeit bei gewerbebehördlichen Verfahren, wobei im Laufe der Zeit die Schwerpunkte bei Industrieanlagensicherheit, Risikoanalysen, Lärm und Erschütterungen sowie Luftreinhaltung lag. In den Jahren 1998 bis 2002 unterbrach er die Tätigkeit beim Land Tirol und betrieb hauptberuflich ein Technisches Büro für Technische Physik, welches im Bereich Akustik und Lärminderung tätig war. Von 1998 bis 2014 war er Vorsitzender des Forum Schall, aus dem zahlreiche Publikationen entstanden. 2003 erwarb er den Titel Diplom-HTL-Ingenieur. Besonders Augenmerk schenkte er den Unsicherheiten schalltechnischer Messungen und Berechnungen, wozu er fünf Ringversuche plante, durchführte und auswertete.

2012 wurde Christoph Lechner Leiter des Fachbereiches Maschinenwesen und Umwelttechnik in der Abteilung Emissionen Sicherheitstechnik Anlagen beim Amt der Tiroler Landesregierung. Durch die Mitwirkung bei den Umweltverträglichkeitsprüfungen der großen Schienenstrecken in Tirol geriet die Lärmwirkung immer mehr in den Fokus des Interesses. 2017 graduierte er zum Magister der Gesundheitswissenschaften und 2020 promovierter er zum Doktor für Public Health an der UMIT Tirol. Inhalt der Forschung war die Kombinationswirkung von Lärm aus unterschiedlichen Quellen.

Christoph Lechner ist allgemein beeideter und gerichtlich zertifizierter Sachverständiger für Schalltechnik, Maßnahmen zu Vermeidung überhöhter Lärmfaltung und Bauakustik, Mitglied des Sachverständigenbeirates zur OIB-Richtlinie 5, Mitglied im ONK 138 und stellvertretender Vorsitzender im ONK 208 sowie Präsident des Österreichischen Arbeitsringes für Lärmbekämpfung.

Schallschutz 2023

Über Können und Wollen

Dr. Christoph Lechner, christoph.lechner@tirol.gv.at

Amt der Tiroler Landesregierung
A-6020 Innsbruck

1. Einleitung

Der Titel des Vortrages nimmt Bezug auf das in gar nicht in so weiter Ferne liegende 100-Jahr-Jubiläum der Ausgabe der ersten Bauakustiknorm in Österreich. Es ist dies ÖNORM B 2115 „Hochbau-Schutz gegen Schall und Erschütterungen“. Laut Aussagen der österreichischen Grand Dame der Akustik Prof. Judith Lang war dies die erste internationale Bauakustiknorm, in der auch Anforderungen formuliert werden. Es darf die Frage erlaubt sein, wie sich diese Anforderungen, im weiteren Sinne der Schallschutz, im Laufe der Jahrzehnte verändert haben und mit welchen Ergebnissen 2036 gerechnet werden kann. Damit verbunden ist untrennbar die Frage des Standes der Technik und der dazu veröffentlichten Regeln der Technik. Welche Entwicklungen sind nun zu erwarten, was sind die Treiber und was sind die Hürden?

2. Schallschutz und Lärm als Thema von Public Health

Es gilt als gesicherter Stand des Wissens, dass Lärm negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit hat. Neben den direkt das Gehör betreffenden auralen Wirkungen, welche Berufskrankheit Nummer 1 sind, sind vor allem extraaurale Effekte in ihrer Gesundheitslast zu verzeichnen. Dazu gehören als harte medizinische Fakten kardiovaskuläre Effekte, Risikofaktoren wie Erhöhung des Blutdruckes und Stress, welcher auch durch Hormonausschüttungen zu beobachten ist. Die ganz große Anzahl der Betroffenheit entsteht aber bei den gesundheitsrelevanten Wirkungen, Belästigung und Schlafstörung. Um diese Krankheitslast (burden of disease in Europe) zum Ausdruck zu bringen, verwendet man die auch in anderen Umweltbereichen üblichen DALYs (disability adjusted live years). Die Weltgesundheitsorganisation WHO schätzt rund 900.000 DALYs aufgrund von Schlafstörungen und 650.000 aufgrund von Belästigungen ein. Schätzungen der europäischen Umweltagentur EEA zufolge beträgt der volkswirtschaftliche Schaden bis zu 120 Mrd. Euro im Jahr. Allein auf Grund dieser Zahlen ist es plausibel, dass auch ein hohes politisches Interesse an der Lärmbekämpfung und am Schallschutz besteht oder zumindest bestehen sollte. Seit einigen Jahren ist es nicht mehr so, dass die Folgen der Belästigung und Schlafstörung in hohem Maß dem Verkehrslärm zuzuschreiben sind. Bei dem Drittel der Österreicher und Österreicherinnen, welche sich in ihrem Wohnumfeld durch Lärm gestört fühlt, entfällt auf den Verkehrslärm rund die Hälfte, aber bereits ein Viertel bezieht sich auf Lärm von Nachbarwohnungen als vordringlichste Quelle. Die zeitliche Entwicklung dieses Anteiles zeigt, dass dieser stetig im Steigen ist, was wiederum Antrieb zur Überlegung gibt, ob die Anforderungen an den baulichen Schallschutz noch zeitgemäß sind. Forschungen zeigen auch, dass Lärmstörung sehr stark mit sinkender Lebensqualität assoziiert ist.

3. Schallschutz 1936

Am 15. Dezember 1936 ist die ÖNORM B 2115 im damaligen österreichischen Normenausschuss erschienen. Wenngleich gewisse Unschärfen zu den heutigen Parametern bestehen, so beispielsweise die Formulierung der Anforderung als Dämmung oder die Angabe der Pegel in Phon als Lautstärke des Schalls, können die Werte mit gewissen Unschärfen in Bezug zur Gegenwart gebracht werden. Die ÖNORM B 2115 kam hinsichtlich der Anforderungen an Luft- und Trittschall mit einer 3-zeiligen Tabelle aus. Für Wohnhäuser lag der Anforderungswert für Doppelfenster bei 35 dB, für Türen bei 30 dB, Scheidewände innerhalb derselben Wohnungen sollten 40 dB erfüllen, zwischen Wohnungen 55 dB. Zwischen zwei Gebäuden war die Anforderung an die Luftschalldämmung 60 dB. Außenbauteile mussten mit Fenstern 35 dB, ohne Fenster 55 dB erfüllen. Für Decken war der Luftschallschutz mit 55 dB definiert. Beim durchgelassenen Trittschall wurde ein Pegel als Lautstärke des Schalls in Phon von 40 Dezibel für zulässig bestimmt, dies bei einer normalen Gehbeanspruchung der Decke, wobei eingeräumt wird, dass die Messergebnisse einzelner Versuchsanstalten wegen abweichender Versuchseinrichtungen noch nicht miteinander vergleichbar wären. Leider ist hier nicht präzise zu eruieren, welche Anregung genau für diese Vorgabe unterstellt wird. Wäre dies im Sinne des

derzeitigen Standes der ÖNORM ein Fersengang, so würde der damalige Anforderungswert wesentlich strenger sein als die derzeitigen Mindestanforderungen. Vielleicht setzte der Normengeber aber in Erwartung eines rücksichtsvollen Umganges unter Nachbarn einen Ballengang der Wohnenden voraus?

Beim Vergleich Zahlenwerte der Trennwände zwischen Wohnungen und zwischen Gebäuden erkennt man, dass diese formuliert für die Standard-Schallpegeldifferenz noch immer dieselben Zahlenwerte sind. Dasselbe gilt auch beim Luftschall für die Decke zwischen Wohnungen. Von speziellem Interesse aus heutiger Sicht ist aber die Strategie, welche den Anforderungswerten und den sonstigen Bestimmungen zugrunde lag. So war bereits normativ bestimmt, dass bei der Raumanordnung innerhalb einer Wohnung die Räume mit größerem Störspiegel wie Kinderzimmer oder Küchen gegen die Gruppe der ruhigeren Wohnräume gut schallgedämmt sein müssen. Auch wurde davon ausgegangen, dass die Lautstärke so weit zu dämmen sei, dass der Lärm hinter der Wand oder unter der Decke in den inneren Störspiegel fällt und nicht mehr störend wahrgenommen wird. Dieser innere Störspiegel wurde mit 10 bis 20 Phon laut damaliger Tafel 1 definiert. Gleichzeitig wurde aber auch darauf hingewiesen, dass es zwecklos sei, einen Schallschutz unter dem unvermeidlichen inneren Störspiegel anzustreben. Dies stellte einen methodischen Ansatz dar, wie er erst wieder in der Ausgabe vom 15. April 2021 in ÖNORM B 8115 Teil 2 in dieser Stringenz formuliert und in ein Formelwerk gekleidet wurde.

Auffällig ist auch, dass die Qualität der Fenster nach heutigen Gesichtspunkten bis zu einer Außenlärmbelastung von 65 dB, die der Außenwände bis 62 dB das Auslangen finden. Sollen Trennwände innerhalb von Wohnungen ein bestimmtes Schallschutzniveau aufweisen, so lässt sich derzeit dies nur privatrechtlich im Sinne der ÖNORM B 8115 Teil 5:2021 vereinbaren, wobei dazu sowohl die geringere Lärmempfindlichkeit als auch ein organisatorischer Schallschutz in Rechnung gestellt wird. 1936 galt eine Mindestschalldämmung innerhalb der Wohnung als Stand der Technik.

4. Der Stand der Technik

Als Stand der Technik versteht man landläufig den bekannten technischen Entwicklungsstand und die darauf basierenden technischen Möglichkeiten zur Erreichung eines bestimmten praktischen Ziels. Rechtsmaterien wie auch das Baurecht kennen Legaldefinitionen dieses Standes der Technik. Beobachtet man diesen aktuellen Entwicklungsstand in einem 100 Jahre umfassenden Zeitraum bietet sich der Vergleich mit Automobilen an. Dem Grunde nach sind Konstruktionsprinzipien bei Autos über die Jahre gleichgeblieben, vor allem auch der Verwendungszweck, was bei Telekommunikation einfach nicht der Fall wäre und damit ein Vergleich unpassend wäre. Ohne hier ins Detail einzugehen, zeigen sich den Stand der Technik betreffende bahnbrechende Entwicklungen der Automobilindustrie beginnend von den Energieträgern über Fahrwerk, aktive und passive Sicherheit bis hin zu den gesamten Komforteinrichtungen, welche moderne Fahrzeuge bieten. Auch ist die Effizienz der Energieumsetzung und die Fahrperformance eine ganz andere. Bei Betrachtung dieser fahrzeugtechnischen und schallschutztechnischen Entwicklungen fällt ein selbstkritischer Vergleich in der Entwicklung des jeweiligen Standes der Technik sehr ernüchternd aus. Hat sich nun der Stand der Bautechnik nicht weiterentwickelt oder könnte man mit heutiger Technik auch unter Berücksichtigung der Kosten wesentlich besser bauen, wenn die Anforderungen dies verlangten? An dieser Stelle muss man sich bewusstmachen, dass Normen und wohl auch darauf fußende verwaltungsrechtliche Vorgaben lediglich Regeln der Technik sind. Diese sind daher nicht an den Stand der Technik gebunden und bedürfen schon gar nicht eines wissenschaftlichen Hintergrundes, da die Regel in der Zusammenarbeit mit den betroffenen Interessen durch Konsensverfahren erzielt werden. Das Konsenssystem erweist sich hier als großer Hemmschuh und Hürde, da es keine Waffengleichheit zwischen jenen gibt, welche eine Veränderung betreiben mit jenen, welche weiterhin am Stand treten wollen. Auch im Bereich Schallschutz begegnen uns Beispiele, bei denen der Grundsatz „Fakten werden durch Meinungen ersetzt“ obsiegt. Den bewerteten Standard-Trittschallpegel kann man technisch möglich und kostenmäßig vertretbar unter 35 Dezibel bringen. Selbst im Wissen der negativen Beeinträchtigung der Lebensqualität und damit Gesundheit und einer günstigen Kosten-Nutzen-Analyse bleibt die Regel der Technik auf 48 dB. Im umgekehrten Fall wird im Bereich Wärmepumpen ein Immissionspegel unter 25 dB gefordert und dies sogar an der Grundstücksgrenze, obwohl es keine Evidenz für negative Effekte unterhalb von 30 dB gibt. Nicht einmal die Vermutung, dass die Lärmbelastung von der Veränderung der tatsächlichen örtlichen Verhältnisse abhängt, ist wissenschaftlich belegt. Bereits 1936 hat man den Aussagen von ÖNORM B 2115 zufolge erkannt, dass Immissionsbegrenzung unter den inneren Störspiegel zwecklos ist. Aber auch im Bereich der Infrastruktur klaffen Praxis und Wissenschaft massiv auseinander. Die Schienenverkehrslärm-Immissionsschutzverordnung (SchIV) hält einen nächtlichen Dauerschallpegel von 60 dB immer noch für zumutbar, während die WHO zur Vermeidung negativer gesundheitlicher Folgen einen Wert von 44 dB vorschlägt. Über das selbstgestrickte Regelwerk ist es einfach auf Niveaus zu verharren, welche teilweise schon lange nicht mehr dem Stand der Technik und dem Stand der Wissenschaft entsprechen.

5. Aktuelle Praxis

Obwohl der Schallschutz bei Betrachtung der Anforderungen scheinbar keine bedeutende Entwicklung erkennen lässt, macht in der Akustik der Stand der Technik aber auch nicht Halt. Am besten erkennt man diesen Umstand im Vergleich der messtechnischen Apparatur. Allein in meiner eigenen Karriere über die 35 Jahre entwickelte sich die messtechnische Ausstattung von transistorgefüllten Analogmessgeräten, Filtern und Schreibern hin zu Hightech-Geräten mit mannigfaltigen Möglichkeiten, welche das operative Durchführen von Messungen nahezu auf die Betätigung des Start- und Stoppschalters reduzieren. Stellt man nun seine Erwartungen entsprechend dieser technischen Entwicklung auch an die Qualität der Beurteilung der Zulässigkeit von Schallimmission, so sieht man keinen substanziellen Fortschritt. Ursache dafür ist im Beurteilungsfall das der Rechtsprechung entstammende unsägliche Trio der Lärmbeurteilung bestehend aus Techniker, Mediziner und Juristen. Nach der Judikatur beschreibt der technische Sachverständige Art und Ausmaß der Schallimmission, die medizinische Sachverständige die Auswirkungen auf den menschlichen Organismus und die Behörde entscheidet über die Zumutbarkeit und damit Zulässigkeit der Schallimmission. Dieses in der Theorie so nützliche Dreigestirn erweist sich in der Praxis für Projektwerber wie Planer nicht selten als „never ending story“. Es beginnt damit, dass dem Planer die genauen Vorgaben fehlen, womit er häufig lediglich ein fertiges Projekt schalltechnisch beschreibt, dies in der Hoffnung, dieses zu einer positiven Genehmigung zu führen. Der wohl in den Belangen des Schallschutzes am versiertesten, weil am häufigsten eingesetzte Techniker beginnt nun mit seinen Erhebungen, misst und rechnet, darf aber über die Zulässigkeit der Immission keine Aussagen treffen. Mediziner sind sehr häufig mit der rein zahlenmäßigen Beschreibung von Schallimmissionen überfordert, weshalb die Beurteilung erst bei vollendeter Anlage und bereits vorhandener Schallimmission erfolgen kann. Hier wird fast in der Regel nach Gehör und der inneren Fragestellung „möchte ich hier selber solchen Immissionen ausgesetzt werden“ anstelle belastbarer Beurteilungsgrundlagen begutachtet. Im Anschluss entscheidet die Behörde ohne allerdings ein Wort darüber zu verlieren, was im Falle der Unzulässigkeit der anzustrebende Wert wäre. Dies führt zu Ablehnung, Verzögerung und damit Frustration, womit wiederum der Planer beginnt, ein nach den spärlichen Erkenntnissen des vorangegangenen Prozesses geändertes Projekt zu beschreiben. Auch erfährt der Antragstellen in der Regel nicht, ob die schalltechnische Planung bei einer positiven Bewertung gar völlig überzogen war. Neben Verzögerung und damit verbundenen Mehrkosten erweist sich die Vorgangsweise einer Beurteilung basierend auf Hörproben bereits als Schwarzbauten realisierter Anlagen zur Erreichung einer hohen akustischen Qualität als kontraproduktiv. Wenn in der Planungsphase eine hohe akustische Qualität angestrebt wird, so kann dies mit sehr geringen Mehrkosten erfolgen, während in der Betriebsphase oder wohl besser Sanierungsphase diese Qualität oft gar nichtmehr erreicht werden kann und dies nur mehr bei unverhältnismäßig hohen Kosten, welche dann als nichtmehr tragbar angesehen werden und somit die Planungsfehler wieder applaniert werden. Schallschutz in der Planungsphase erfordert mehrere Prämissen. Es benötigt ambitionierte Ziele, robuste Grenzwerte, deren Gültigkeit auch in der Betriebsphase nicht erschüttert wird und Planungsparameter, welche auch prognostizierbar sind. Gerade auf der Suche neuer Deskriptoren ist die Möglichkeit der Prognose für ein hohes Schallschutzniveau unbedingt mitzudenken. So ist es rein methodisch nützlicher, prognostizierbare Parameter – selbst wenn sie die Störwirkung nur suboptimal beschreiben - zu senken, als auf neue nicht planbare Größen zu setzen.

6. Fazit und Ausblick

Wollte man die technische Entwicklung im Schallschutz bis 2036 prognostizieren, muss man sich eingestehen, dass eine Erhöhung desselben nicht am Können, sondern am Wollen scheitert. Es bringt nichts, sich auf früheren Lorbeeren auszuruhen, denn Österreich wurde der Rang mit dem besten Mindestschallschutz international bereits abgelaufen. Es bringt auch nichts, die Verbesserung des Schallschutzes aufgrund suboptimaler Parameter nicht voranzutreiben oder darauf zu warten, bis neue ge- oder erfunden werden. Sich auf die Kosten eines besseren Schallschutzes hinauszureden, stets gepaart mit dem Killerargument des leistbaren Wohnens, ohne den erzielten Nutzen für die Lebensqualität und die Gesundheit mitzudenken, wird sich mittel- und langfristig als der größte Fehler herausstellen.

Schallschutz ist ein wesentlicher Einflussfaktor für die Lebensqualität und damit die Gesundheit der Menschen, die negativen Gesundheitsfolgen sind evident. Der Schallschutz für sich hat sich im Bereich der Bauakustik seit 1936 de facto nicht verbessert. Methoden und Bauweisen ändern sich zwar, während die Zahl Belästigter steigt. Für einen wirkungsvollen Schallschutz benötigt es stringente, robuste und prognosetaugliche Grenzwerte. Zusammenfassend sehe ich einen düsteren Ausblick auf 2036 den Schallschutz betreffend, wenn nicht eine Allianz der Kompetenten und Willigen das Ruder in die richtige Richtung stellt.



Dipl.-Ing.(FH), MSc

Martin Schneider

Hochschule für Technik Stuttgart (HFT)

Akademischer Mitarbeiter

Zentrum für Bauphysik (ZfB) am Institut für angewandte Forschung (IAF)

Schellingstraße 24

70174 Stuttgart

martin.schneider@hft-stuttgart.de

Diplom Studium Bauphysik an der Hochschule für Technik Stuttgart, Masterstudium an Universität in Southampton im Bereich „Sound and Vibration Studies“.

Akademischer Mitarbeiter im Bereich Bauakustik an der Hochschule für Technik Stuttgart in Stuttgart, seit 2011 stellvertretender Laborleiter. Durchführung von Forschungsprojekten. Vorträge und Publikationen im Bereich der Bauakustik. Der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Tätigkeit an der Hochschule für Technik Stuttgart liegt im Bereich der Schallübertragung im Leicht- und Massivbau und bei der akustischen Messtechnik. Hierzu zählen die Erarbeitung und Erprobung verschiedener neuer Messverfahren zur Körperschallübertragung und die Erarbeitung neuer Berechnungsverfahren zum Schallschutz in Gebäuden.

Mitarbeit in nationalen und internationalen Normungsgremien z.B. NA 005 DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) Vorsitzender im NA 005-55-75 AA Arbeitsausschuss Nachweisverfahren, Bauteilkatalog, Sicherheitskonzept,

2014 bis 2020 Vorsitzender des Fachausschusses Bau- und Raumakustik in der DEGA (Deutsche Gesellschaft für Akustik).

Hoher Schallschutz mit Hybridbauten

Martin Schneider

Hochschule für Technik Stuttgart (HFT)
Zentrum für Bauphysik (ZfB) am Institut für angewandte Forschung (IAF)
Schellingstr. 24
D-70174 Stuttgart

1. Einleitung

Der Schallschutz in und an Gebäuden wird angesichts der Lärmbelastigung durch Außenlärm (z.B. Verkehrslärm), Nachbarschaftslärm (Luft- und Trittschall) sowie durch Lärm von gebäudetechnischen Anlagen (z.B. Aufzüge) immer wichtiger. In Deutschland beschäftigt sich die Normenreihe der DIN 4109 „Schallschutz im Hochbau“ mit ihrer fast 80jährigen Tradition mit dem Schallschutz in Bezug auf Anforderungen und mit den rechnerischen und messtechnischen Nachweisverfahren an den Schallschutz innerhalb des Gebäudes und dem Schallschutz gegenüber dem Außenlärm. In Österreich ist dies die Normenreihe der ÖNORM 8115. Während im letzten Jahrhundert im mehrgeschossigen Wohnungsbau die Massivbauweise im Mittelpunkt des Baugeschehens und damit auch der Normung stand, spielt der Baustoff Holz aufgrund der Vorteile beim Klimaschutz und den Möglichkeiten zur Vorfertigung mit den damit verbundenen verminderten Bauzeiten eine immer größere Rolle. Er wird deshalb auch bei der Normung entsprechend berücksichtigt. In der Vergangenheit wurden und werden immer wieder Bauweisen entwickelt, die gezielt die Vorteile einzelner Baustoffe miteinander verknüpfen. Diese Bauweisen werden „Hybride“ genannt. Das Wort weist auf mindestens zwei unterschiedliche Baustoffe oder Bauweisen hin, welche zu einer neuen meist vorteilhaften Konstruktion verbunden werden. In diesem Beitrag soll die Verbindung von Wänden in Holz- und Leichtbauweise mit vorgefertigte Stahlbetonhohldecken in Bezug auf die Luft- und Trittschalldämmung anhand von schalltechnischen Messungen in zwei mehrgeschossigen Wohnbauten untersucht und die akustischen Vorteile der Konstruktion dargestellt werden.

2. Bauteilbeschreibung

In den beiden vorgestellten Gebäuden sind die Wohnungstrenndecken aus vorgefertigten Stahlbetonhohldecken ($d = 200 \text{ mm}$, $m' \text{ ca. } 330 \text{ kg/m}^2$) mit schwimmendem Estrich. Die dynamische Steifigkeit der Trittschalldämmplatten wurde mit $s' = 7 \text{ MN/m}^2$ so gewählt, dass in Verbindung mit der relativ dicken Estrichplatte die Resonanzfrequenz des Estrichs unter $f_r = 50 \text{ Hz}$ liegt. Das Treppenhaus mit Aufzugsanlage ist ebenfalls in Stahlbeton hergestellt.

In dem ersten vorgestellten Gebäude sind die tragenden Innen- und Außenwände aus Massivholzelementen, die nichttragenden Innenwände gipsplattenbeplante Metallständerwände. Aus brandschutztechnischen Gründen wurden die Massivholzaußenwände innenseitig mit $2 \times 12.5 \text{ mm}$ dicken Gipsplatten und außenseitig mit einer 15 mm GKF-Platte beplankt. Die 160 mm außenseitig angebrachte Mineralwolle (MiWo) wurde mit einer Holzverschalung versehen.

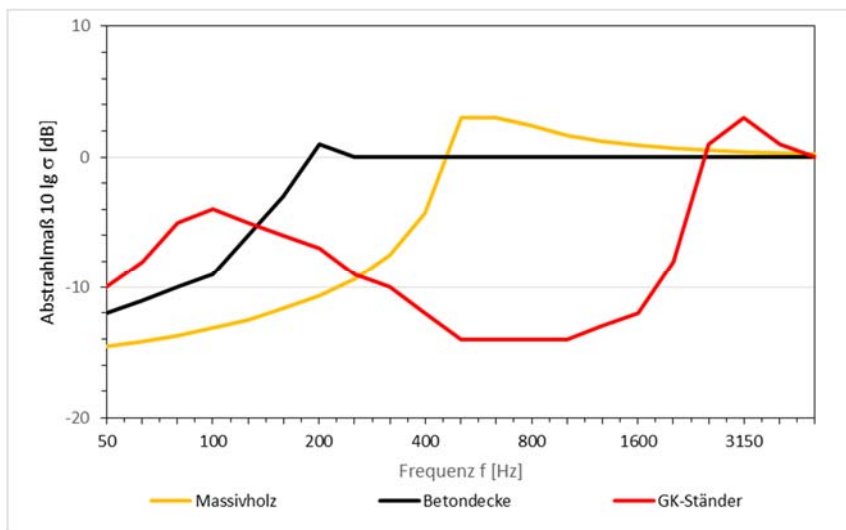
Die Wohnungstrennwand (180 mm Massivholz) wurde auf der einen Seite mit $2 \times 18 \text{ mm}$ GKF-Platten beplankt, auf der anderen Seite wurde eine freistehenden Vorsatzkonstruktion aus gipsplattenbeplante Metallständern angeordnet (CW 50 mit 40 mm MiWo und $2 \times 12.5 \text{ mm}$ GK-Bauplatten).

Im zweiten Gebäude sind die Massivholzwände durch Holzständerwände ersetzt. Damit ergibt sich für die Außenwand von außen nach innen folgender Aufbau: 20 mm Holzverschalung; 30 mm Traglattung vertikal 30/50; 18 mm Gipsfaserplatte; 260 mm Holzständerkonstruktion mit MiWo; 18 mm Gipsfaserplatte; 27 mm Federschiene mit 20 mm MiWo; 15 mm Gipsfaserplatte. Die Wohnungstrennwand wurde hier als Metallständerwand mit getrenntem Ständerwerk ($2 \times \text{CW}50$ mit 5 mm Abstand) beidseitig doppelt beplankt ($2 \times 12.5 \text{ mm}$ GKF-Platten) ausgeführt.

3. Durchgeführte Messungen

In beiden Gebäuden wurde die Luft- und Trittschalldämmung der Wohnungstrenndecken sowie die Luftschalldämmung der Wohnungstrennwand ermittelt. Zusätzlich zu diesen Untersuchungen wurde das Flankendämm-Maß der, an der flankierende Übertragung beteiligten Bauteile mittels Körperschallmessungen ermittelt. Dabei wurde im Senderaum entweder mit Luftschall oder mit dem Norm-Hammerwerk angeregt und auf den Bauteilen im Empfangsraum der Schnellepegel gemessen. Die verminderte Abstrahlung unterhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz wurde durch das in nachfolgender Abbildung gezeigte Abstrahlmaß berücksichtigt. Für Betondecke und Massivholzwand wurde das Abstrahlmaß nach EN ISO 12354-1 [1] berechnet für die GK-Ständerwand wurden eigene Messdaten aus dem Labor herangezogen.

Abbildung 1: Abstrahlmaße für eine Massivholzwand, eine Stahlbetondecke und ein GK-Ständerwand



Das Norm-Flanken-Schalldämm-Maß kann mit nachfolgender Gleichung (1) aus der Pegeldifferenz zwischen Sendepiegel L_1 und Schnellepegel $L_{v,j}$ unter Berücksichtigung des Abstrahlmaße $10 \lg \sigma$ und den Bauteilflächen von Trennbauteil S_{tr} und flankierendem Bauteil S_j .

$$R_{v,ij} = L_1 - L_{v,j} - 6 \text{ dB} - 10 \lg \sigma + 10 \lg (S_{tr}/S_j) \quad (1)$$

Der Norm-Flanken-Trittschallpegel berechnet sich bei Anregung mit dem Normhammerwerk aus dem gemessenen Schnellepegel $L_{v,j}$ unter Berücksichtigung des Abstrahlmaße $10 \lg \sigma$ und der Bauteilfläche des flankierendem Bauteils S_j .

$$L_{n,v,ij} = L_{v,j} + 6 \text{ dB} + 10 \lg \sigma + 10 \lg (S_j/10) \quad (2)$$

Mithilfe dieser Messungen können die jeweiligen Anteile der verschiedenen Bauteile bzw. Übertragungswege an der gesamten Schallübertragung ermittelt und eingeordnet werden.

4. Messergebnisse

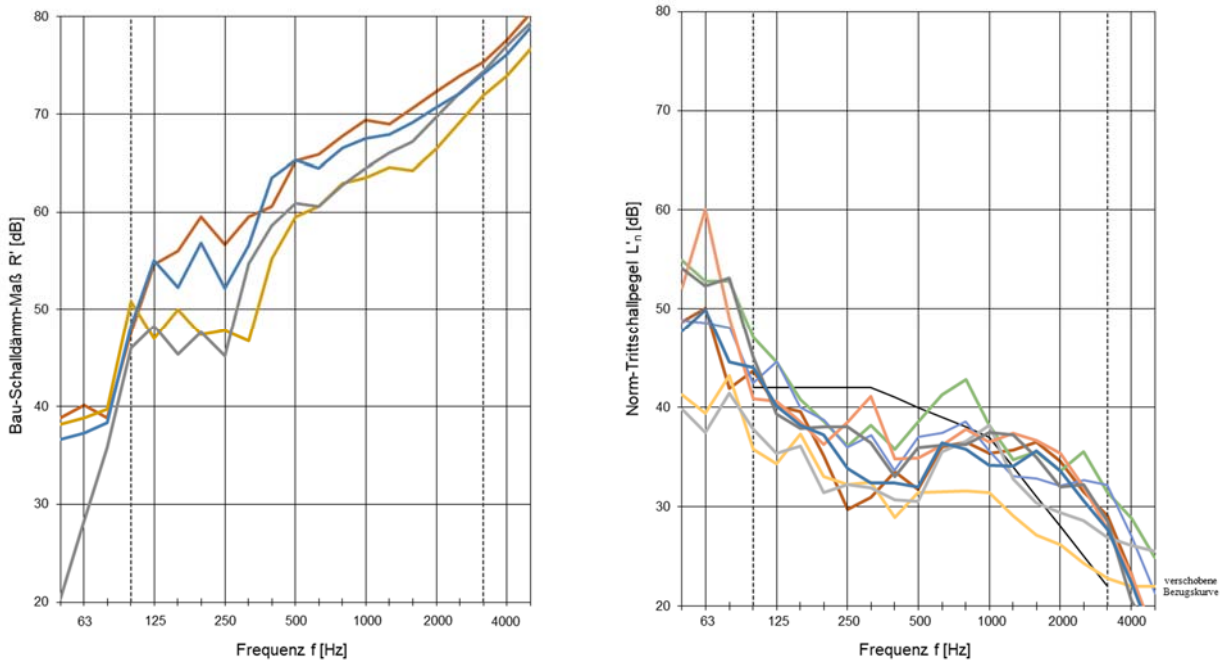
Insgesamt konnte für nahezu alle Messsituationen ein sehr guter Schallschutz ermittelt werden. Nachfolgend werden typische Situationen vorgestellt.

4.1. Gebäude 1 mit Massivholzwänden

Die nach DIN EN ISO 16283-1 [2] ermittelten bewerteten Bau-Schalldämm-Maße R'_w der Wohnungstrenndecken lagen zwischen $R'_w = 61 \text{ dB}$ und 68 dB . Die nach DIN EN ISO 16283-2 [3] ermittelten bewerteten Norm-

Trittschallpegel $L'_{n,w}$ der Wohnungstrenndecken lagen zwischen $L'_{n,w} = 33$ dB und 42 dB, mit Berücksichtigung des Spektrum-Anpassungswertes $C_{1,50-2500}$ bei $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} = 33$ dB bis 46 dB

Abbildung 2: Frequenzverlauf der Bau-Schalldämm-Maße für die untersuchten vier Wohnungstrenndecken (links) und des Norm-Trittschallpegels an 8 untersuchten Trenndecken (rechts)



Der Frequenzverlauf des Bau-Schalldämm-Maßes ist eher unspektakulär. Unterschiede ergeben sich vor allem im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 500 Hz. Diese Unterschiede ergeben sich durch die verschiedenen flankierenden Bauteile. Während die flankierenden Innenwände (GK-beplankte Metallständerwände) nahezu keinen Beitrag zur gesamten Schallübertragung liefern ergeben sich besonders in den Eckräumen mit zwei Außenwänden nicht unerhebliche Beiträge durch die Massivholzaußenwände.

Der insgesamt sehr gute Trittschallschutz der Wohnungstrenndecken ist vor allem auf die geringe Steifigkeit der Trittschalldämmplatten ($s' < 7$ MN/m³) und die etwas größere Dicke des Heizestrichs zurückzuführen.

Neben den Messungen zur Luftschalldämmung nach DIN EN ISO 16283-1 [2] wurden die Flankenschalldämm-Maße der an der Schallübertragung beteiligten Bauteile messtechnisch ermittelt. Bei der Luftschallübertragung wurde ein mittlere Schnellepegel L_{vi} bei Luftschallanregung im Senderaum (L_1) auf dem Bauteil i gemessen und entsprechend Gl. (1) ausgewertet. Bei der Trittschallübertragung wurde im Senderaum der schwimmende Estrich mit dem Normhammerwerk angeregt und die Schnellepegel auf den Oberflächen der Bauteile im Empfangsraum entsprechend Gl. (2) ausgewertet.

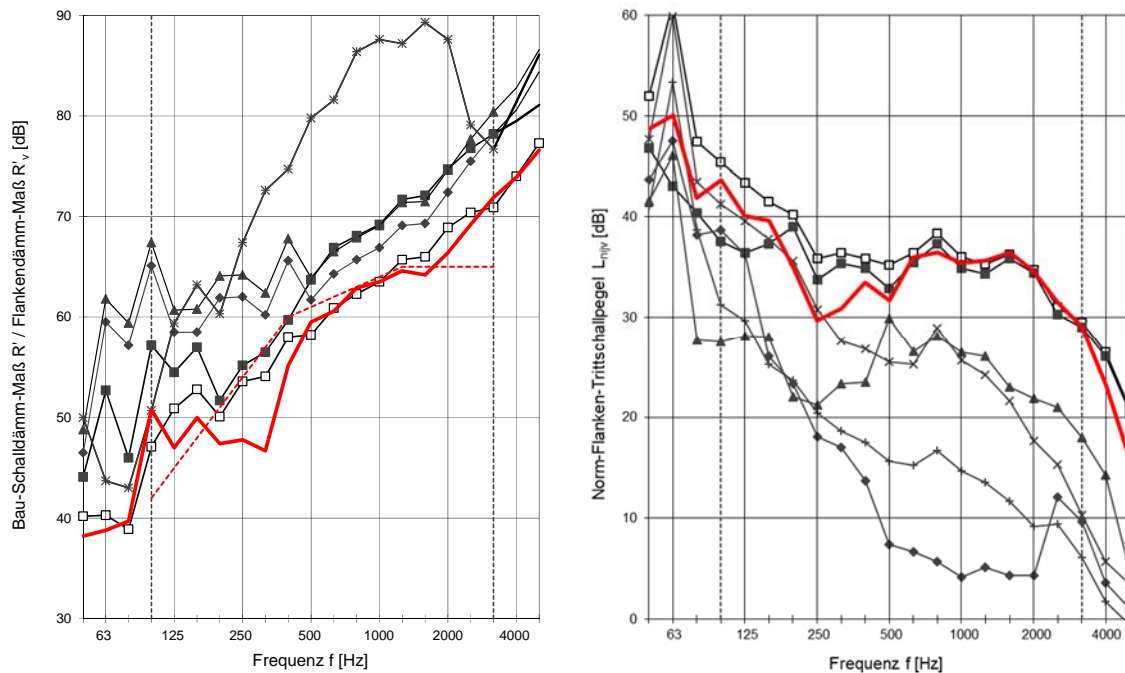
Die Flankenschalldämm-Maße R_v sind für die Messung in einem Eckraum in nachfolgender Abbildung 3 frequenzabhängig dargestellt. Werden alle Flankenschalldämm-Maße zu einer gesamten Schalldämmung R'_v zusammengefasst können diese mit der Luftschallmessung des Bau-Schalldämm-Maßes R' verglichen werden.

Deutlich zu erkennen sind die hohen Flankenschalldämm-Maße der Metallständerwand. Die Decke selbst strahlt vor allem im mittleren Frequenzbereich die meiste Schallenergie ab. Bei den hohen Frequenzen bestimmen die flankierenden Massivholzwände die Gesamtdämmung. Insgesamt ist eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Luft- und Körperschallmessungen festzustellen.

Beim Trittschallschutz ist es vor allem die Stahlbetondecke, die den Schall abstrahlt. Die Anteile der flankierenden Bauteile sind hier beinahe zu vernachlässigen.

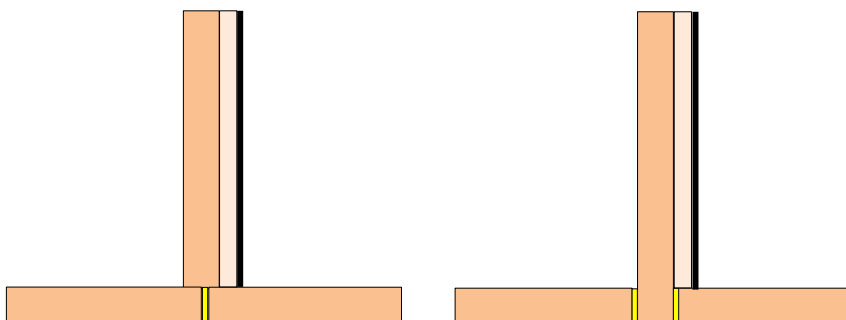
Insgesamt ergibt sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen der Luftschallmessung und der Auswertung über die Körperschallmessungen.

Abbildung 3: Frequenzverlauf der Flankenschalldämm-Maße (links) der Decke (Quadrat gefüllt), der Außenwände (Dreieck und Raute) und der beiden Innenwände (Kreuz), mit Bau-Schalldämm-Maß ermittelt aus Körperschallmessungen (Quadrat leer) und aus Luftschallmessung (rote Linie) sowie Frequenzverlauf der Norm-Flanken-Trittschallpegel (rechts) der Decke (Quadrat gefüllt), der Außenwand (Dreieck, Kreuz) und der beiden Innenwände (Raute, +), mit Norm-Trittschallpegel ermittelt aus Körperschallmessungen (Quadrat leer) und aus Luftschallmessung (rote Linie)



Während für die Luftschalldämmung der Wohnungstrenndecken ein hervorragender Schallschutz messtechnisch ermittelt wurde, lag die Luftschalldämmung der Wohnungstrennwand deutlich niedriger. Ursache dafür war zum einen die Schallübertragung über die durchlaufende Betondecke, die im Bereich der Wohnungstrennwand nur ein sehr geringes Stoßstellendämm-Maß K_{ij} aufweist. Zum anderen zeigte sich, dass die flankierende Übertragung über die Massivholzaußenwand, trotz Trennung der Außenwand (einseitig) erheblich zur Gesamtschallübertragung beiträgt. Um die Schallübertragung auf diesem Übertragungsweg (Verbindung durch Gewindeschrauben) zu verringern kann entsprechend nachfolgender Abbildung eine zweite elastische Zwischenschicht eingebaut werden.

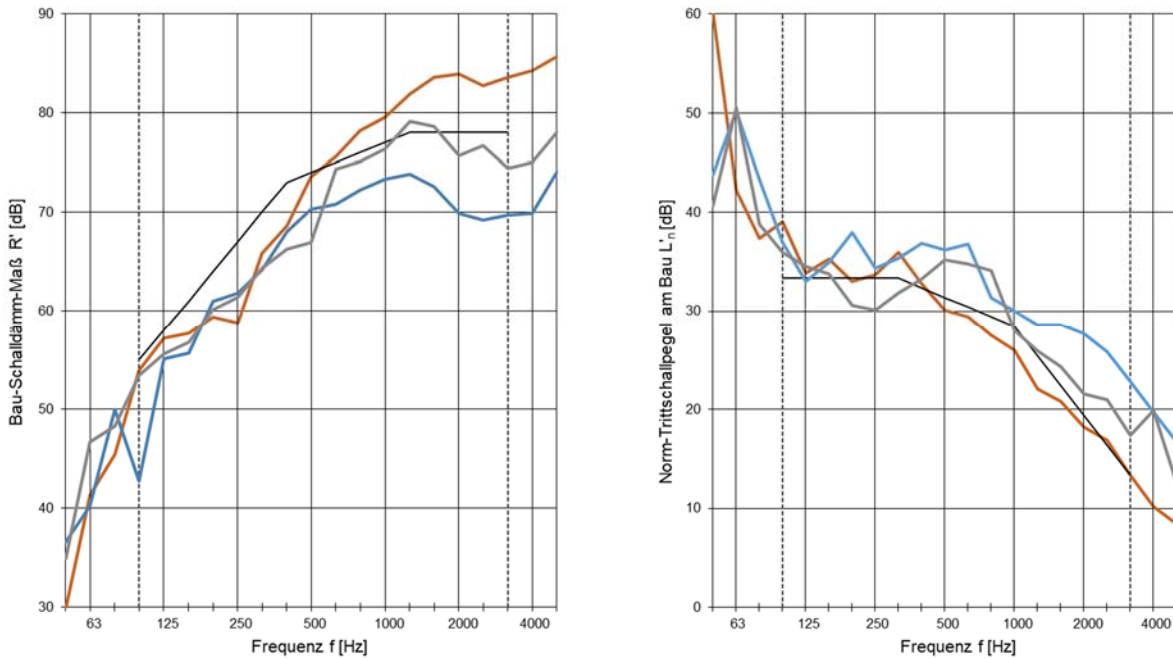
Abbildung 4: Skizze der Anordnung einer elastischen Zwischenschicht (gelb) zur Reduzierung der Flankenübertragung der Massivholzaußenwand über die Massivholztrennwand mit Vorsatzschale beim Bauvorhaben (linkes Bild) und verbesserte Anordnung mit zwei Zwischenschichten zur weiteren Reduzierung der Flankenübertragung (rechtes Bild)



4.2. Gebäude 2 mit Holzständerwänden

Die ermittelten bewerteten Bau-Schalldämm-Maße R'_w der Wohnungstrenndecken lagen zwischen $R'_w = 67$ dB und 70 dB. Die ermittelten bewerteten Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ der Wohnungstrenndecken lagen zwischen $L'_{n,w} = 30$ dB und 35 dB, mit Berücksichtigung des Spektrum-Anpassungswertes $C_{1,50-2500}$ bei $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} = 37$ dB bis 45 dB

Abbildung 5: Frequenzverlauf der Bau-Schalldämm-Maße für die untersuchten drei Wohnungstrenndecken (links) und des Norm-Trittschallpegels 3 untersuchten Trenndecken (rechts)



Der Frequenzverlauf des Bau-Schalldämm-Maßes zeigt den zu erwartenden kontinuierlichen Anstieg des Schalldämm-Maßes bis ca. 1 kHz. Unterschiede zwischen den Decken ergeben sich vor allem im Frequenzbereich oberhalb 500 Hz. Die Unterschiede ergeben sich vor allem durch unterschiedliche Flankendämm-Maße.

Der insgesamt sehr gute Luft- und Trittschallschutz der Wohnungstrenndecken ist auch hier auf die niedrige Steifigkeit der Trittschalldämmplatten ($s' < 7$ MN/m³), die etwas größere Dicke des Heizstrichs und vor allem auf die sehr hohe Flankendämmung der Außen- und Innenwände zurückzuführen.

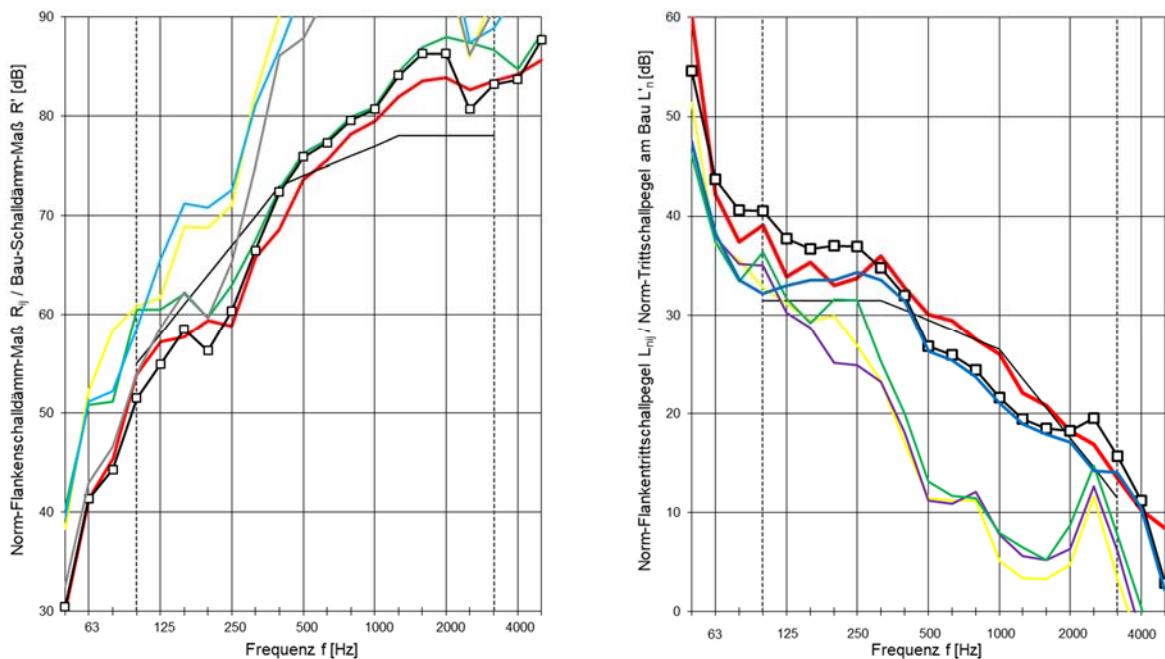
Die Flankenschalldämm-Maße R_v sind für die Messung in einem Eckraum in nachfolgender Abbildung frequenzabhängig dargestellt. Werden alle Flankenschalldämm-Maße zu einer gesamten Schalldämmung R'_v zusammengefasst können diese mit der Luftschallmessung des Bau-Schalldämm-Maßes R' verglichen werden.

Deutlich zu erkennen sind die hohen Flankenschalldämm-Maße der Metallständerwand. Die Decke selbst strahlt vor allem im mittleren Frequenzbereich die meiste Schallenergie ab. Bei den hohen Frequenzen bestimmen die flankierenden Massivholzwände die Gesamtdämmung. Insgesamt ist eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Luft- und Körperschallmessungen festzustellen.

Beim Trittschallschutz ist es auch hier vor allem die Stahlbetondecke, die den Schall abstrahlt. Die Anteile der flankierenden Bauteile sind dabei nahezu zu vernachlässigen.

In einem weiten Frequenzbereich ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der Luftschallmessung und der Auswertung über die Körperschallmessungen.

Abbildung 6: Frequenzverlauf der Flankenschalldämm-Maße (links) der Decke (grün), der Außenwand (grau) und der Innenwand (gelb), der Wohnungstrennwand (grau) mit Bau-Schalldämm-Maß ermittelt aus Körperschallmessungen (Quadrat leer) und aus Luftschallmessung (rote Linie) sowie Frequenzverlauf der Norm-Flanken-Trittschallpegel (rechts) der Decke (Quadrat gefüllt), der Außenwand (gelb) und der Innenwand (grün), der Wohnungstrennwand (lila) mit Norm-Trittschallpegel ermittelt aus Körperschallmessungen (Quadrat leer) und aus Luftschallmessung (rote Linie)



Auch hier ergibt sich für die Luft- und Trittschalldämmung der Wohnungstrenndecken ein hervorragender Schallschutz.

Das bewertete Bau-Schalldämm-Maß der Wohnungstrennwand lag bei $R_w = 58$ dB und $R_w = 63$ dB. Die Unterschiede ergaben sich aufgrund der Verwendung von Gipsplatten mit unterschiedlichen Rohdichten. Die Schallübertragung über die Wohnungstrennwand bestimmte die Gesamtübertragung im tiefen Frequenzbereich (Resonanzfrequenz der zweischaligen Konstruktion bei ca $f_R = 63$ Hz) sowie im Frequenzbereich der Koinzidenzfrequenz ($f_G = 2500$ Hz). Im mittleren Frequenzbereich trägt die flankierende Übertragung über die durchlaufende Stahlbetonhohldecken zur Gesamtübertragung bei.

5. Rechenverfahren für den Hybridbau

Ausgehend von den Berechnungsverfahren für den Massivbau wurden und werden die Rechenverfahren sukzessiv für den Leichtbau und den Holzmassivbau in DIN 4109-2 [4] ergänzt, korrigiert oder verändert. Bei der Berechnung für den Hybridbau mit Stahlbetondecken und Wänden in Holz- und Leichtbauweise ergeben sich Unterschiede bei der Luftschalldämmung, aber besonders bei der Trittschalldämmung zum klassischen Massivbau. Bei allen Typen von Hybridbauten sind dann die Rechenansätze aus beiden Bauweisen entweder passend zu wählen, zu mischen oder auch anzupassen.

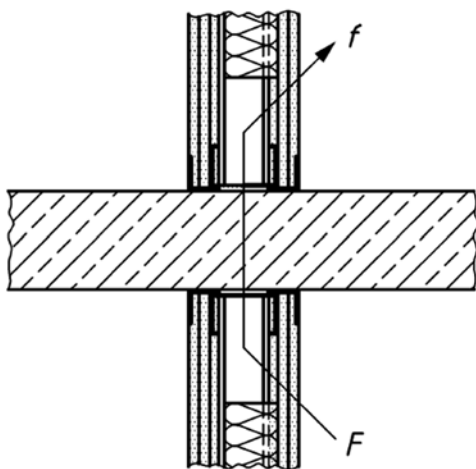
Ausgangspunkt für die Berechnung der Luft- und Trittschalldämmung im Hybridbauten sind die EN ISO 12354-1 [1] für den Luftschallschutz und EN ISO 12354-2 [5] für den Trittschallschutz. Dabei werden die entsprechenden Schalldämm-Maße bzw. Trittschallpegel auf den verschiedenen Übertragungswege berechnet und anschließend aufaddiert.

Die **direkte** Übertragung in **vertikaler** Übertragungsrichtung ergibt sich für das massive Bauteil aus der flächenbezogenen Masse des Grundbauteils (z.B. Stahlbetondecke) und einer möglichen Verbesserung durch

eine Vorsatzschalen (z.B. schwimmende Estrich). Für die **direkte** Übertragung in **horizontaler** Richtung (Holzständerwände mit Vorsatzschalen, mehrschalige Metallständerwände, Massivholzwände mit Vorsatzschalen etc.) muss das Schalldämm-Maß der Gesamt-Wandkonstruktion aus tabellierten Messwerten (z.B. DIN 4109-33 [6], Holzbauhandbuch [7], ...) entnommen werden.

Die Berücksichtigung der **flankierenden** Übertragung in **vertikaler** Richtung erfolgt bei der gewählten Hybridbauweise mit flankierenden Leichtbauteilen über die bewertete Norm-Flankenschallpegeldifferenz $D_{n,f,w}$. Für die in Abbildung 7 dargestellte Situation wird beispielsweise in DIN 4109-33 für die dargestellte Metallständerwand aber auch für Holztafelwände ein Wert von $D_{n,f,w} = 76$ dB angegeben. Dieser Wert gilt auch für die nicht dargestellte Situation, wenn die Leichtbauwand eine Außenwand ist. Für flankierenden Massivbauteile kann wie üblich im Massivbau das bewertete Norm-Flankendämm-Maß $R_{ij,w}$ berechnet werden.

Abbildung 7: Flankenübertragung einer leichten Metallständerwand über eine Stahlbetondecke (Bildquelle: DIN 4109-33)



Die Berücksichtigung der **flankierenden** Übertragung in **horizontaler** Richtung erfolgt für flankierende Leichtbauteile ebenfalls über die Norm-Flankenschallpegeldifferenz $D_{n,f,w}$. Wird die Flanke als klassisches Leichtbauteil (Balkendecke, Holztafel- oder Trockenbauwand) ausgeführt, so wird die Flankenübertragung nur für den Weg F_f berücksichtigt.

Die flankierende Übertragung über massive Bauteile, wie beispielsweise Treppenhauswände oder Wände von Aufzugsschächten, wird an der betrachteten Stoßstelle mittels bewertetem Flanken-Schalldämm-Maß $R_{ij,w}$ für jeden Übertragungsweg ij wie folgt berechnet.

$$R_{ij,w} = \frac{R_{i,w}}{2} + \frac{R_{j,w}}{2} + \Delta R_{ij,w} + K_{ij} + 10 \lg \frac{S_S}{l_0 l_f} \quad (3)$$

Häufig ergibt sich dabei an der Stoßstelle zwischen massivem flankierendem Bauteil und leichtem trennenden Bauteil eine sehr geringes Stoßstellendämm-Maß K_{ij} und damit ein ebenfalls eher geringes bewertetes Flankendämm-Maß für das Massivbauteil, das dann die resultierende Schalldämmung zwischen den Räumen begrenzt.

6. Zusammenfassung

In den untersuchten Mehrfamilienhäusern in Hybridbauweise (Stahlbetondecken mit leichten flankierenden Wänden) wurde ein sehr guter Schallschutz messtechnisch nachgewiesen. Sowohl in dem Haus mit Massivholzwänden als auch in dem Haus mit Holzständerwänden lagen Luft- und Trittschallschutz deutlich über den in Deutschland geforderten Mindestanforderungen z.B. der DIN 4109-1 [8] und über den erhöhten Anforderungen der DIN 4109-5 [9].

Für den hohen Trittschallschutz zeichnete sich vor allem die geringe dynamische Steifigkeit der Trittschalldämmung mit der damit verbundenen niedrigen Resonanzfrequenz des Estrichs verantwortlich. Der gute Luftschallschutz in vertikaler Richtung ergab sich vor allem aufgrund der geringen flankierenden Übertragung über die leichten flankierenden Wände: Metallständerwände, Holzständerwände und Massivholzwände.

In horizontaler Richtung kann durch entsprechende Wahl der Trennwand (Metallständerwand mit getrennten Ständerwerk oder Massivholzwand mit ausreichend dimensionierter Vorsatzschale) ebenfalls ein guter Schallschutz erreicht werden. Die flankierende Übertragung über die Stahlbetondecke verhindert aufgrund der geringen Stoßstellendämmung allerdings einen besonders hohen Schallschutz. Bei Massivholz-Außenwänden kann durch entsprechende konstruktive Maßnahmen an der Stoßstelle die flankierende Übertragung begrenzt werden.

7. Literatur

- [1] DIN EN ISO 12354-1:2017-11: Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften, Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen (ISO 12354-1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 12354-1:2017
- [2] DIN EN ISO 16283-1:2018-04 Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil 1: Luftschalldämmung
- [3] DIN EN ISO 16283-2:2018-11 Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau – Teil 2: Trittschalldämmung
- [4] DIN 4109-2:2018-01 Schallschutz im Hochbau -Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen
- [5] DIN EN ISO 12354-2:2017-11: Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften, Teil 2: Trittschalldämmung zwischen Räumen (ISO 12354-2:2017); Deutsche Fassung EN ISO 12354-2:2017
- [6] DIN 4109-33:2016-07 Schallschutz im Hochbau – Teil 33: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) –Holz-, Leicht- und Trockenbau
- [7] Holzbau Deutschland-Institut e.V. (Herausgeber): Holzbauhandbuch: Schallschutz im Holzbau – Grundlagen und Vorbemessung, März 2019
- [8] DIN 4109-1:2018-01 Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen
- [9] DIN 4109-5:2020-08 Schallschutz im Hochbau – Teil 5: Erhöhte Anforderungen



Dr.-Ing., MSc, DI(TU)

Jan Krüger

Hochschule für Technik Stuttgart (HFT)

Dozent und Akademischer Mitarbeiter

Zentrum für Bauphysik (ZfB) am Institut für angewandte Forschung (IAF)

Schellingstr. 24

70174 Stuttgart

jan.krueger@hft-stuttgart.de

jan.krueger@acoustic-innovation.de

Nach dem Studium der Informationstechnik mit Vertiefung Akustik und Messtechnik an der TU Dresden folgte 1992 ein Studium an der University of Southampton zum Master of Science in Electronics inklusive des Besuches von Vorlesungen am ISVR zum Thema „Active Control of Noise and Vibration“. Anschließend Anstellung am [Fraunhofer-Institut für Bauphysik](#) in Stuttgart als wissenschaftlicher Mitarbeiter. 1999 wurde die Promotion zum Dr.-Ing. an der Universität Stuttgart mit einer Arbeit zu aktiven Schalldämpfern mit „sehr gut“ abgeschlossen.

Ab 2000 Entwicklungsarbeit an Abgasanlagen von Pkw, Lkw und Standheizungen für die Eberspächer GmbH in Esslingen in diversen Führungsfunktionen. Im Jahr 2022 Wechsel an die [HFT Stuttgart](#) als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Zeitgleich Gründung des Beratungsunternehmens [Acoustic Innovation Consulting](#) (AIC), das europäische Unternehmen bei der akustischen Optimierung ihrer Produkte unterstützt.

Autor von über 50 wissenschaftlichen Publikationen in deutschen und anglo-amerikanischen Fachzeitschriften davon ein Großteil mit anonymer externer Begutachtung. 6 wissenschaftliche Buchbeiträge sowie 34 erteilte Patente in D, EP, US und CN. Lehraufträge seit 2003, 2021 und 2022 an der HFT und [Dualen Hochschule Baden-Württemberg](#) (DHBW) Stuttgart in den Fächern Psychoakustik, Fahrzeugakustik und Aktive Lärmbekämpfung.

Psychoakustik am Bau

Dr. Jan Krüger

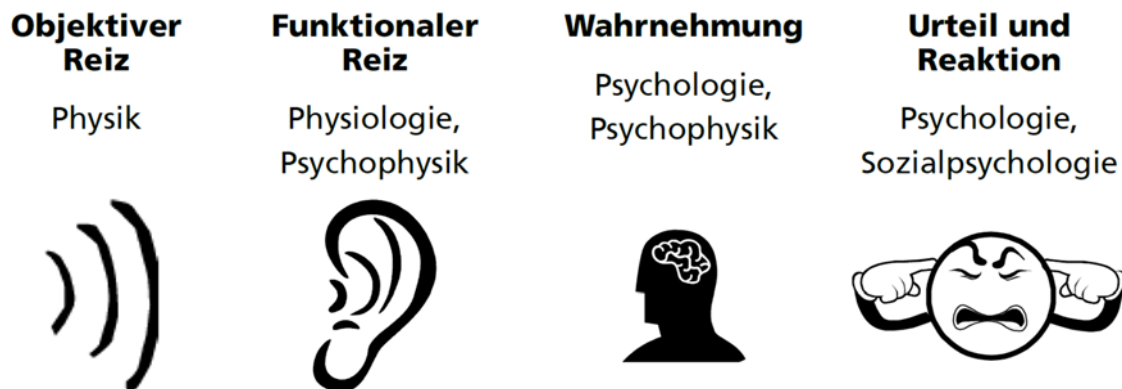
Hochschule für Technik Stuttgart (HFT)
Zentrum für Bauphysik (ZfB) am Institut für angewandte Forschung (IAF)
Schellingstr. 24
D-70174 Stuttgart

1. Einleitung

Die Psychoakustik befasst sich mit dem Zusammenhang zwischen der physikalisch messbaren Anregung durch Schall und der dadurch hervorgerufenen Hörwahrnehmung sowie dessen Beurteilung durch den Menschen [1–4]. Dies ist nötig, weil in vielen Fällen kein einfacher Zusammenhang zwischen Schalldruck und menschlicher Empfindung besteht bzw. dieser sich auch im Kontext verändert. So sind wir vielleicht mittags genervt vom leisen Brummen der Wärmepumpe des Nachbarn. Abends besuchen wir freiwillig (und sogar gegen Entgelt) ein Rockkonzert und erleben Glücksgefühle bei sensationell hohen Schallpegeln.

Offensichtlich besteht also ein großer Unterschied zwischen dem physikalisch eindeutig messbaren Reiz (z.B. Schalldruckpegel) und dem Urteil bzw. der Reaktion des Menschen. Die Wirkungskette vom objektiven Schallreiz zum menschlich-subjektiven Urteil kann nach [5] wie in Abbildung 1 dargestellt werden.

Abbildung 1: Wirkungskette der Psychoakustik (Bildquelle: [5])

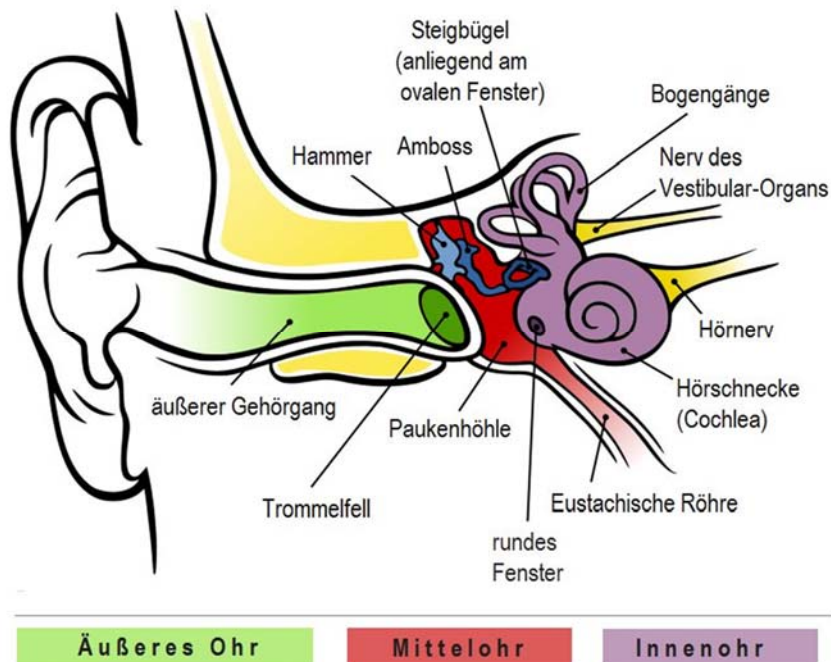


Um diese Wirkbeziehungen bei diversen psychoakustischen Fragestellungen zu erkunden, werden üblicherweise Hörversuche durchgeführt. Ein Hörversuch stellt sozusagen das «Messinstrument» des Psychoakustikers bzw. der Psychoakustikerin dar. Der nötige Aufwand für die Vorbereitung, Durchführung und Analyse von Hörversuchen sollte nicht unterschätzt werden. Wenn die Ergebnisse wissenschaftlichen Bestand haben sollen, müssen umfangreiche Vorkehrungen getroffen werden [6, 7]. Dies betrifft insbesondere die:

- Auswahl und Konditionierung der Hörbeispiele,
- Auswahl der Probanden (zufällig oder Experten),
- Art der Darbietung der Hörproben (vor Ort, Freifeldraum, Soundstudio, Kopfhörer),
- Statistische Auswertung

2. Wie funktioniert unser Gehör?

Um die Funktionsweise unseres Gehörs zu verstehen, muss zunächst die Anatomie (*Abbildung 2*) betrachtet werden.

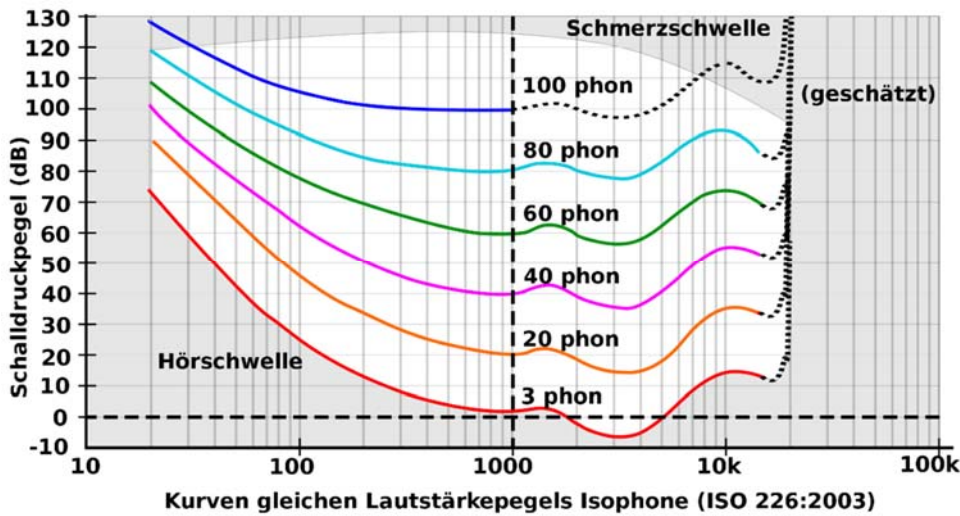
Abbildung 2: Anatomie des menschlichen Hörorgans (Bildquelle: [UVEX](#))

Der über das Außenohr eindringende Luftschall wird am Trommelfell in Körperschall gewandelt. Dieser wird anschließend über die als mechanische Übersetzung (Hebelarm) agierenden Gehörknöchelchen an das ovale Fenster weitergeleitet. Dort wird der Körperschall in Flüssigkeitsschall gewandelt und entsprechende Wellen in der mit Flüssigkeit gefüllten Gehörschnecke hervorgerufen. Diese Wellen laufen in der ca. 32 mm langen Gehörschnecke entlang und haben je nach Frequenz an unterschiedlichen Stellen ein resonanzbedingtes Maximum. Die starke Auslenkung der Flüssigkeit wird von feinen Härchen auf der Basilarmembran erfasst und in elektrische Impulse gewandelt, die über den Hörnerv an das Gehirn geleitet und dort verarbeitet werden. Wesentliche Effekte des Hörvorganges bestehen daher in der:

- Wandlung von Luftschall über Körperschall in Wasserschall und damit
- einer Impedanzanpassung von Luft auf Wasser ohne zu großen Übertragungsverlust und
- einer Frequenz-Orts-Transformation.

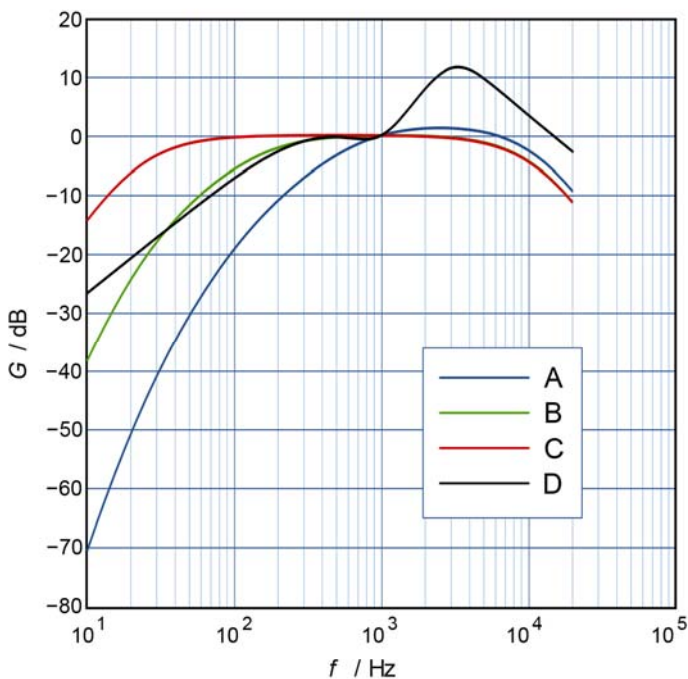
Dies stellt nur eine verkürzte Skizzierung des Hörvorganges dar. Für eine ausführlichere Beschreibung wird auf [1] verwiesen. Im Ergebnis dieser komplexen Schallübertragung hat der Mensch ein ausgesprochen gutes Hörvermögen, das auf der Frequenzskala 4 Dekaden umfasst und gleichzeitig insbesondere bei ca. 3 kHz extrem empfindlich ist. Dies liegt einerseits an der nahezu perfekten Impedanzanpassung bei ca. 1 kHz und andererseits an der sich vom Trommelfell zum Außenohr im Gehörgang ergebenden Lambda-Viertelresonanz bei ca. 4 kHz. Dagegen ist die Schallempfindlichkeit des Menschen an den Frequenzgrenzen von ca. 20 Hz und ca. 20 kHz deutlich geringer. Schon seit langem wurde untersucht, welche Schalldruckpegel bei welcher Frequenz die gleiche Lautstärkewahrnehmung hervorrufen. Diese «Kurven gleicher Lautstärke» oder auch «Isophonen» sind in [8] international genormt (Abbildung 3)

Abbildung 3: Kurven gleicher Lautstärke (Bildquelle: [8])



Wie man an den Isophonen sieht, rufen die gleichen Schalldruckpegel bei unterschiedlichen Frequenzen einen deutlich unterschiedlichen Höreindruck hervor. Entsprechende Einzahlwerte sind daher wenig vergleichbar. Da man aber dennoch mit Einzahlwerten einfacher arbeiten und argumentieren kann, wurden die Frequenzbewertungen A-D eingeführt, die auf verschiedenen Pegelniveaus den Frequenzcharakter der Isophonen näherungsweise widerspiegeln (Abbildung 4). Die mit diesen Frequenzbewertungen erreichte Vergleichbarkeit von Schalldruckpegeln war historisch ein wesentlicher Fortschritt und hat sich in der Folge auch legislativ durchgesetzt. Die eigentlich genauere Messgröße des Lautheitspegels gemessen in Phon hat sich international außer im wissenschaftlichen Bereich ebenso wenig durchgesetzt wie die Lautheit (gemessen in sone). Dies mag daran liegen, dass zur Zeit der möglichen Einführung die nötigen digitalen Messgeräte noch nicht in ausreichendem Maße verfügbar waren. Andererseits verhindern die Vielzahl an Normen und auch rechtlichen Regelungen die inzwischen auf dem dB(A) basieren eine Änderung auf Grund der damit verbundenen enormen Transferkosten.

Abbildung 4: Frequenzbewertungen A-D (Bildquelle: Wikipedia)



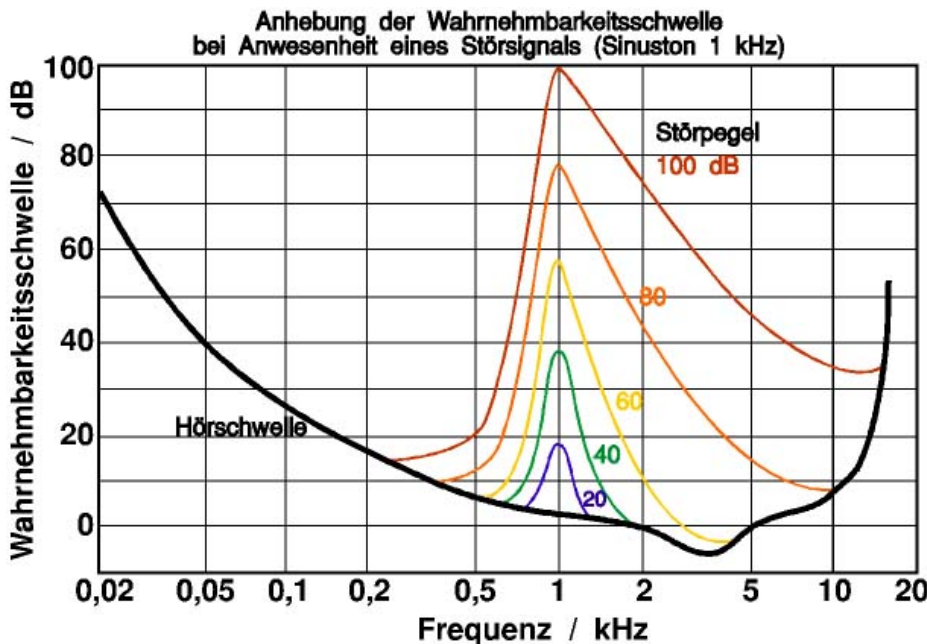
3. Weitere nichtlineare Effekte des Gehörs

Der besondere Aufbau unseres Hörorgans führt neben dem nichtlinearen und pegelabhängigen Frequenzgang auch noch zu weiteren psychoakustischen Effekten von denen hier insbesondere die Maskierung und der Stapedius-Effekt kurz erläutert werden sollen.

3.1. Stationäre und instationäre Maskierung

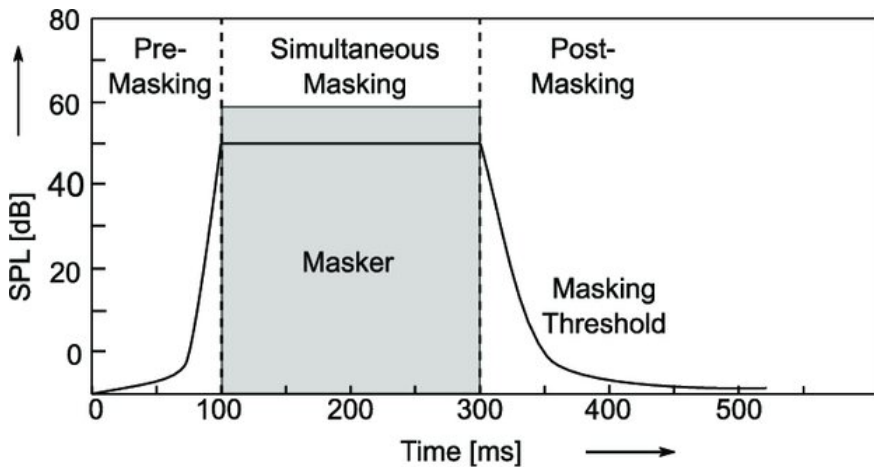
Als Maskierung bezeichnet man den Effekt, dass ein leiserer, aber grundsätzlich hörbarer Ton durch einen lauterem (z.B. bei einer anderen Frequenz) verdeckt wird, so dass er nicht hörbar ist. Dieser Effekt ist nicht nur frequenz- sondern auch pegelabhängig wie in *Abbildung 5* illustriert wird. Daraus wird deutlich, dass die Maskierung grundsätzlich besser von tiefen zu hohen Frequenzen funktioniert als umgekehrt. So verdeckt ein lauter 1 kHz Ton mit 100 dB schon einen 60 dB lauten Ton bei 4 kHz (2 Oktaven darüber), während dies umgekehrt nicht funktioniert. Die Ursache dafür liegt in der Lage der Maxima der Wasserwelle in der Gehörschnecke, die bei hohen Frequenzen nahe am ovalen Fenster liegt, die auch von vorbeieilenden tieffrequenten Wellen erregt werden. Das eher am Ende der Schnecke liegende Maximum für tiefe Frequenzen wird jedoch von hochfrequenten Wellen nicht erreicht [1].

Abbildung 5: Stationäre Maskierung von Geräuschen (Bildquelle: [Wikipedia CC BY-SA 4.0](https://de.wikipedia.org/wiki/Station%C3%A4re_Maskierung))



Eine Maskierung tritt nicht nur bei stationären Geräuschen auf, d.h. wenn Maskiergeräusch und Testton gleichzeitig vorhanden sind. Vielmehr kann ein lautes maskierendes Geräusch auch kurz nach dem Abschalten noch einen leiseren Testton verdecken [1, 9]. Praktisch sind wir also kurz nach einem lauten Geräusch (ca. 100 – 150 ms) noch recht schwerhörig (*Abbildung 6*). Dies liegt zum großen Teil daran, dass die schwingfähige Biomechanik im Gehör inklusive der Flüssigkeit in der Gehörschnecke nach einem lauten Geräusch zunächst zur Ruhe kommen müssen, bevor feine Auslenkungen erneut erkannt werden.

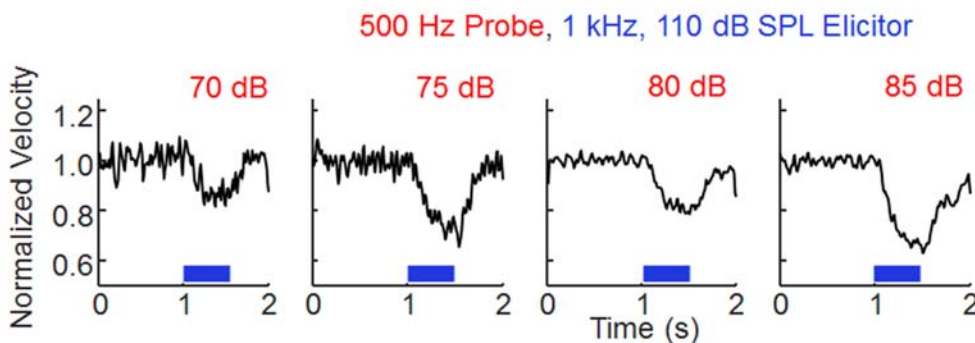
Abbildung 6: Instationäre Maskierung von Geräuschen (Bildquelle: [9])



3.2. Stapedius-Effekt

Ein weiterer nichtlinearer Effekt schützt unser Hörvermögen bei lauten Geräuschen noch stärker vor Überlastung. Dieser auch als Stapediusreflex bekannte Effekt wird durch Geräusche ab einem Pegel von etwa 70 dB ausgelöst und führt ca. 70 ms nach dem Auftreten des lauten Geräusches zu einem Anspannen des Stapedius-Muskels, der an einem Gehörknöchelchen ansetzt. Dies führt zu einer Verspannung der Gehörknöchelchen und letztlich auch des Trommelfells, d.h. diese können nicht mehr so frei schwingen. Dieser Effekt wurde mittels Laser-Doppler-Vibrometrie am Menschen nachgewiesen [10]. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, nimmt die durch einen 500 Hz Ton hervorgerufene Schnelle am Trommelfell deutlich ab, wenn ein lauter Ton mit 1 kHz ab 1.0 s dargeboten wird. Sobald der laute Ton abgeschaltet wird, entspannt sich der Stapediusmuskel wieder und ca. 0.5 s später ist etwa wieder das normale Hörvermögen vorhanden.

Abbildung 7: Messung der Schnelle bei 500 Hz am Trommelfell ohne und mit 1 kHz Störschall (Bildquelle: [10])



Dieser Effekt schützt also unser Gehör bei andauerndem Lärm eine gewisse Zeit, solange der kleine Muskel die Kraft dazu hat. Selbstverständlich hilft dies jedoch nicht bei überraschend auftretenden impulsartigen Lärmspitzen wie z.B. einem Knall. Kurzzeitig extreme Lärmspitzen treten nicht nur bei Schusswaffen auf, sondern auch, wenn infolge eines Unfalls im Auto die Airbags gezündet werden und sich explosionsartig entfalten. Dies führte in den Anfangsjahren der Airbag-Entwicklung in manchen Fällen zu Knalltraumata oder zu anderen schweren Hörschäden wie z.B. Riss des Trommelfells. Daher wurde später u.a. die Auslösung der diversen Airbags leicht zeitversetzt initiiert. Mercedes-Benz hat darüber hinaus den Stapedius-Effekt mit der Einführung der PRE-SAFE® Sound-Technologie 2013 erstmals genutzt, um die Folgen eines Unfalls und ggfs. des Auslösens der Airbags für unser Gehör zu mildern [11]. Dabei wird bei erkannter Kollisionsgefahr über die Soundanlage im Fahrzeug ein kurzes Rauschsignal abgespielt, welches den Stapediusreflex auslöst und so die Insassen vor den zu erwartenden Schalldrücken infolge des Unfalls und der Airbag-Zündung schützt.

4. Eben wahrnehmbare Änderungen der Lautstärke

Eine praktisch sehr bedeutende Frage ist die nach den eben wahrnehmbaren Lautstärkeänderungen. In wissenschaftlichen Untersuchungen konnte mit zahlreichen Hörversuchen festgestellt werden, dass Menschen Pegelunterschiede in weißem Rauschen von knapp 1 dB ab einer Lautstärke von etwa 30 dB bis zu großen Lautstärken gerade eben unterscheiden können [1]. Da die meisten Lärmarten relativ breitbandig sind und auch erst ab Schalldruckpegeln über 30 dB wirklich stören, bedeutet dies, dass 1 dB auch praktisch die untere Grenze der Wahrnehmbarkeit für die Verbesserung bzw. Verschlechterung einer Lärmsituation darstellt. Zudem muss noch angemerkt werden, dass der Grenzwert von 1 dB im Labor unter idealen Bedingungen und in direkter zeitlicher Abfolge ermittelt wurde. Damit wird klar, dass bei berechneten oder gemessenen Schalldruckpegeln die Nachkommastelle sinnvollerweise nicht angegeben werden muss, da sie außer im Fall von Vergleichen mit harten rechtlichen Grenzwerten keine praktische Relevanz für den Menschen hat.

Eine weitere wichtige Erkenntnis zahlreicher psychoakustischer Untersuchungen stellt die Tatsache dar, dass ebenfalls ab ca. 30 dB bis zu großen Lautstärken eine Halbierung bzw. Verdopplung der wahrgenommenen Lautstärke bei einer Reduzierung bzw. Erhöhung um ca. 10 dB stattfindet [1]. Damit kann man Anhaltswerte für die Wahrnehmung von Pegeldifferenzen in der Praxis ableiten, wie sie in Tabelle 1 aufgeführt sind.

Tabelle 1: Typische Wahrnehmungen der Änderungen der Lautstärke von Geräuschen

Änderung des Pegels in dB(A)	Wahrnehmbarkeit im direkten Vergleich	Wahrnehmbarkeit mit größerem zeitlichem Abstand
1	gerade eben von einige Menschen	kaum jemand
3	eindeutig von den meisten Menschen	von einigen Menschen
10	Verdopplung	deutlich von den meisten Menschen
20	Vervierfachung	stark von allen Menschen

Diese grundsätzliche menschliche Fähigkeit für die Wahrnehmbarkeit von Pegelunterschieden sollte stets beachtet werden, wenn in der Baupraxis Schallschutzmaßnahmen geplant oder über Normung nachgedacht wird. So muss man davon ausgehen, dass Menschen, die sich über zu starken Lärm in ihrer Lebenssituation beschweren, mit einer Schallschutzmaßnahme, die nur eine Verbesserung von ca. 3 dB(A) bringt, und dies auch erst nach möglicherweise langwierigen Umbauten, kaum zufrieden sein werden. Abgesehen von dem eventuell wirksamen psychologischen Aufmerksamkeitseffekt nach dem Motto „unsere Klage war erfolgreich – der Nachbar / die Politik musste etwas unternehmen“ darf erst ab einer Minderung von 5 dB im Luftschall und 7 dB im Trittschall wirklich mit einer deutlichen Verbesserung und damit Linderung der Lärmbeschwerden gerechnet werden. Vor diesem Hintergrund sind auch Begrenzungen der Höchstgeschwindigkeit im Straßenverkehr durchaus differenziert zu sehen. Nach [12] führt eine Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit auf ca. die Hälfte auch tatsächlich zu ca. 10 dB Pegelminderung und damit zu einer Halbierung der wahrgenommenen Lautstärke. Somit kann mit einer Begrenzung der Höchstgeschwindigkeit innerorts von 50 km/h auf 30 km/h durchaus eine erhebliche und deutlich wahrnehmbare Lärminderung erreicht werden. Andererseits würde eine Begrenzung der Höchstgeschwindigkeit auf 120 km/h auf deutschen Autobahnen nur zu einer Reduzierung um ca. 1 dB(A) führen, was u.a. an dem vergleichsweise lauten Lkw-Anteil liegt sowie daran, dass viele Pkw auch aus anderen Gründen keine deutlich höhere Geschwindigkeit fahren. Eine kaum wahrnehmbare Lärminderung kann daher nicht als Argument für die Einführung eines generellen Tempolimits herangezogen werden.

Davon unabhängig sind jedoch stets psycho-soziale Effekte und Einflüsse, was an einem weiteren aktuell praxisrelevanten Beispiel kurz erläutert werden soll. Auf Grund der gesellschaftlich gewünschten Energie- und Wärmewende werden immer mehr Wärmepumpen zur Beheizung von Wohngebäuden installiert. Die dazu notwendigen Außengeräte erzeugen Geräusche, die je nach Dichte der Bebauung und Lage zu schutzwürdigen Räumen wie Schlafzimmern zu Lärm-Beschwerden führen können. Sollte sich in einen solchen Fall herausstellen, dass die Wärmepumpe tatsächlich ca. 2 dB zu laut ist, kann mit einer Schallschutzhaube eine Reduzierung der abgestrahlten Schalleistung erreicht werden. Da jedoch solche Schallschutzhauben große Öffnungen aufweisen müssen, um den Volumenstrom der Wärmepumpe nicht zu sehr einzuschränken, ist die Wirksamkeit insbesondere einfacher Hauben häufig begrenzt, erreicht aber durchaus Werte von ca. 3 dB(A). Eine solch geringe

Minderung würde aus psychoakustischer Sicht eigentlich kaum wahrgenommen. Dennoch kann es hier zu einer erhöhten Akzeptanz kommen, wenn z.B. der Nachbar des Besitzers der Beschwerdeführer war und sich durch die deutlich sichtbare Nachbesserung sowie die messbare Minderung des Schalldruckpegel bestärkt fühlt. Ein ganz anderes Ergebnis kann unter ansonsten gleichen Umständen erzielt werden, wenn die Lärmbeschwerde von den Besitzern selbst kam. Diese erwarten vermutlich nach einer selbst finanzierten Nachbesserung eher eine deutliche Verbesserung und dürften mit den gerade wahrnehmbaren 3 dB(A) weniger zufrieden sein, selbst wenn das Schallpegel-Messgerät einen niedrigeren Wert anzeigt.

Psychoakustische Aspekte spielen auch in der Normung eine wesentliche Rolle, auch wenn dies auf den ersten Blick nicht sofort erkennbar ist [13]. So hat sich bei den Mindestanforderungen an den Schallschutz in Gebäuden, die in Deutschland in der DIN 4109-1 [14] festgelegt und bauaufsichtlich eingeführt sind, eine Kategorisierung der Anforderungen an die Luftschalldämmung von Außenbauteilen im 5 dB – Raster seit langer Zeit bewährt. Je nach Art des Raumes K_{Raumart} und Außenpegeln L_a wird eine resultierende Fassadenschalldämmung R'_{wges} gefordert:

$$R'_{\text{wges}} = L_a - K_{\text{Raumart}}$$

Mit den 3 Raumarten:

- $K_{\text{Raumart}} = 25$ dB für Bettenräume in Krankenanstalten und Sanatorien;
- $K_{\text{Raumart}} = 30$ dB für Aufenthaltsräume in Wohnungen, Übernachtungsräume in Beherbergungsstätten, Unterrichtsräume und Ähnliches;
- $K_{\text{Raumart}} = 35$ dB für Büroräume und Ähnliches;

Das gleiche aus psychoakustischer Sicht sinnvolle Kategorisierungsraster von 5 dB wurde für die Zuordnung zwischen Lärmpegelbereichen und maßgeblichem Außenlärmpegel in dieser Norm verwendet sowie auch in der Unterteilung der Schallschutzklassen von Fenstern [15].

An anderer Stelle der DIN 4109 gelingt die Einbeziehung psychoakustischer Erkenntnisse weniger gut. So wird in der DIN 4109-5 [16], in der eigentlich erhöhte Anforderungen festgelegt werden, im Kapitel zur Luftschalldämmung von Außenbauteilen zunächst mit der Maskierung von Geräuschen argumentiert, um dann die Anforderungen nicht über das Mindestmaß hinaus zu erhöhen. Konkret heißt es: «Durch eine Erhöhung der Schalldämmung der Außenbauteile über die Anforderungen nach DIN 4109-1 hinaus wird das Grundgeräusch im Inneren eines Raums oder eines Gebäudes potenziell weiter gesenkt. Somit kann die Wahrnehmung von Geräuschen aus fremden Wohn- und Arbeitsbereichen begünstigt werden. Geräusche der gebäudetechnischen Anlagen (z. B. Installationsgeräusche) und sonstige Geräusche aus fremden Räumen (z.B. Nachbarwohnungen) können deutlicher wahrgenommen und daher belästigender empfunden werden, als dies ohne höhere Schalldämmung der Außenbauteile der Fall wäre.»

Grundsätzlich vernachlässigt wurde bei dieser Argumentation, dass eine Maskierung nur bei gleichzeitig auftretenden Geräuschen bzw. kurz danach wirksam ist. Davon kann jedoch bei z.B. vereinzelt auftretendem nächtlichem Straßenverkehr und einzelnen Geräuschspitzen aus der Nachbarwohnung kaum ausgegangen werden. Es bleibt daher unklar, warum hier nicht ebenso das bewährte 5 dB-Raster verwendet wurde, um wahrnehmbar «erhöhte Anforderungen» zu definieren, die diesen Namen verdienen.

5. Psychoakustik und Schallschutz in Wohngebäuden

Im Folgenden soll an 2 Beispielen ausgeführt werden, wie psychoakustische Ansätze zu einem besseren Verständnis der Lärmbelastung von Menschen in Wohngebäuden beitragen können.

5.1. Trittschallschutz in Mehrparteien-Wohngebäuden

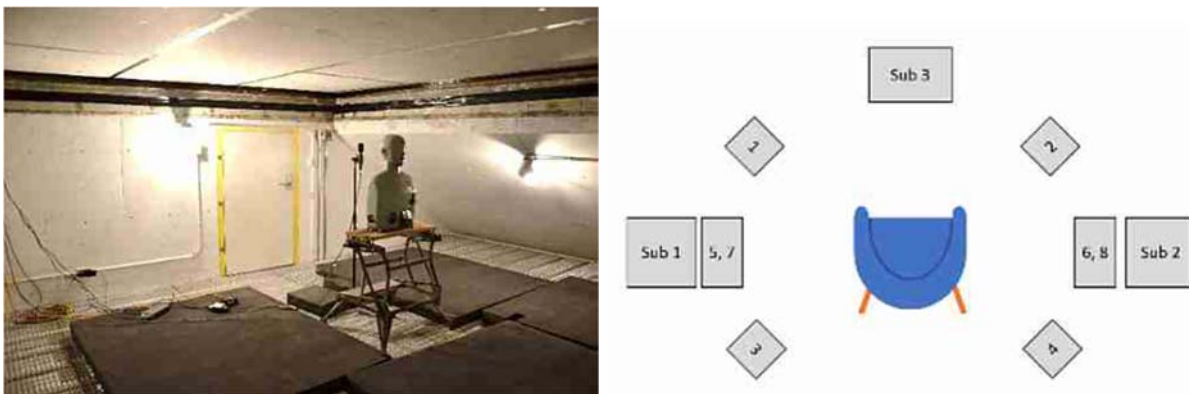
Bei der Beurteilung von Trittschall wird je nach Deckenaufbau und Anregung immer wieder beobachtet, dass der A-bewertete Trittschallpegel, der nach [17, 18] bestimmt wird, die Lärmbelastung nur unzureichend widerspiegelt [4, 5]. Dieses Thema wurde in den letzten Jahren besonders mit der aus Gründen der Nachhaltigkeit präferierten Holzbauweise relevant, die zunehmend auch im mehrgeschossigen Wohnungsbau Einzug hält. Intensive Unter-

suchungen in Schweden zeigten mit aufwändig erstellten Hörlaboren vielmehr, dass die Lästigkeit durch Trittschall mit der wahrgenommenen Lautstärke gut korreliert [19]. In einer weiteren Studie, die am National Research Center (NRC) in Kanada in Kooperation mit HFT-Stuttgart und Kangwon National University-Korea durchgeführt wurde [20], konnten insgesamt 12 Konstruktionen aus verleimten Schichtholzplatten, Holzböden mit diversen Auflagen und Unterdeckenkonstruktionen detailliert untersucht werden. Dabei wurde der Trittschall zudem mit 6 verschiedenen Arten angeregt:

- leichtes Hammerwerk (ASTM E492),
- Einzelhammerwerk,
- Gummiball mit Fallhöhe 10 cm und 100 cm,
- Gehen barfuß und mit Schuhen

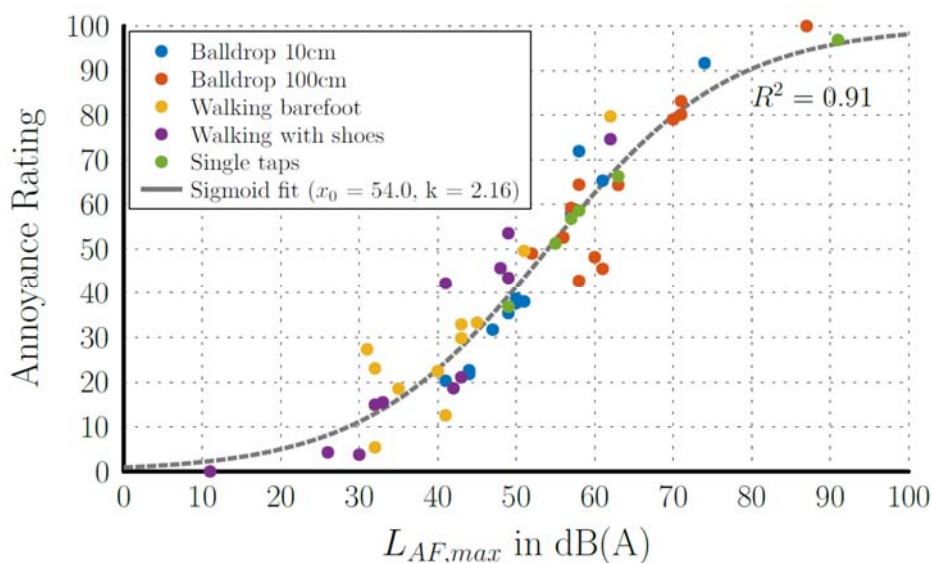
Die mit Ambisonic-Mikrofonen und Kunstkopf aufgenommenen Zeitsignale wurden später über ein Lautsprecher-Array insgesamt 26 Probanden im Alter von 19-60 Jahren vorgespielt (Abbildung 8).

Abbildung 8: Aufnahme und Wiedergabe von Trittschall am NRC (Bildquelle: [20])



Die Präsentation der Trittschalle und Abfrage der wahrgenommenen Lästigkeit (0-nicht lästig bis 100-sehr lästig) erfolgte über ein intelligentes Matlab® -Script und eine Graphical User Interface (GUI). Die Auswertung der Voten zeigte, dass der wichtigste Einflussfaktor für die Lästigkeit der $L_{A,F,max}$ in dB(A) am Empfänger ist. Eine nicht-lineare Regressionsanalyse mit einer Sigmoid-Funktion ergab über alle Geräusche die beste Kurvenanpassung mit einem Regressionskoeffizient von $R^2 = 0.91$. Beachtlich ist jedoch, dass bei einzelnen Lästigkeitsniveaus die gemessenen Schalldruckpegel noch immer um mehr > 10 dB(A) variierten!

Abbildung 9: Lästigkeit von Trittschall in Abhängigkeit von $L_{A,F,max}$ (Bildquelle [20])



5.2. Schutz vor Verkehrslärm

Die Bevölkerung in Deutschland, Österreich und vielen anderen entwickelten Industrienationen ist grundsätzlich einer Vielzahl an Geräuschquellen ausgesetzt. Hierzu gehören neben vielem anderem vor allem Straßenlärm und Nachbarschaftslärm. Das Umweltbundesamt in Deutschland führt zum generellen Umweltbewusstsein der Bevölkerung regelmäßig Untersuchungen durch, in denen auch nach der Beeinträchtigung durch Lärm gefragt wird [21]. Dabei zeigte sich, dass unter den verschiedenen Lärmarten, der Lärm aus dem Straßenverkehr und der Lärm aus der Nachbarschaft noch immer als größte Belästigung wahrgenommen werden. Weiterhin wird in einer neueren Studie des UBA zum Umweltbewusstsein von 2020 [22] festgestellt, dass noch immer 67% der Befragten in Deutschland meinen, dass zur Reduzierung des Verkehrslärms „eher nicht genug“ bzw. „nicht genug“ getan wird. Vor diesem Hintergrund wird derzeit an der HFT Stuttgart ein Forschungsprojekt «Lärmschutz in Erdgeschoss» durchgeführt, da hier die Lärmbelastung als besonders groß angesehen wird. Da gleichzeitig die übliche manuelle Fensterlüftung aus Sicherheitsgründen problematisch ist, hat dies in Städten zu einer geringeren Attraktivität von Erdgeschosswohnungen geführt, was sich nachteilig auf den in Ballungszentren häufig angespannten Immobilienmarkt auswirkt.

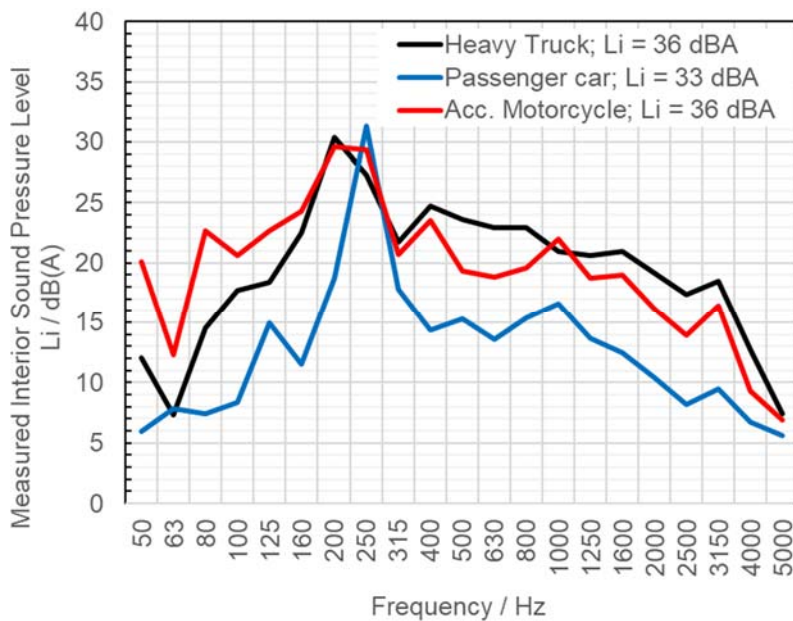
Im Rahmen dieses Projektes wurde 2022 eine Studie zur Lärmbelastung in Erdgeschoss in Kooperation mit dem NRC Kanada durchgeführt und deren Ergebnisse auf der DAGA 2023 erstmal veröffentlicht [23]. Dabei wurden im Großraum Stuttgart zwei sehr unterschiedliche Objekte untersucht. Bei dem real fließenden Verkehr wurden die Schalldruckpegel außen und innen synchron gemessen und die Schalldämmung nach [24] bestimmt. Einige Parameter dieser beiden Messkampagnen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Daten und Messergebnisse an den 2 Gebäuden

Lokation / Daten	Tübingen	Stuttgart
Abstand von der Fassade zur Straßenmitte ca. (m)	22	16
Fassadenfläche S_S (m ²)	10	12,4
Raumgrundfläche S_G (m ²)	18	30
Raumvolumen V (m ³)	43	76
Schalldämm-Maß $R'_{tr,s}$ (dB)	31	22
Spektrum-Anpassungswerte C, C_{tr} (dB)	-2, -3	-1, -1

Im Weiteren wurde einzelne Vorbeifahrten aus dem kontinuierlichen Datenstrom separiert und die Schalldämmung ermittelt. Hierbei zeigte sich, dass die Fassadendämmung im Frequenzbereich um 200 Hz einen typischen Einbruch hat. Dies liegt weitestgehend an der Resonanz der üblicherweise verbauten Fenster mit 2-Scheiben-Isolierglas [25]. In der Folge ergibt sich jedoch eine signifikante spektrale Überhöhung des Schalldruckpegels im Innenbereich bei etwa 200 Hz, während Frequenzbereiche unter 100 Hz und über 4 kHz keine wesentliche Rolle spielen. Dies wurde auch in anderen Forschungsvorhaben bereits beobachtet [26, 27]. Das dies selbst bei verschiedenen Fahrzeuganregungen gilt, zeigt *Abbildung 10*.

Abbildung 10: Schalldruckpegel innen L_i aufgetragen über der Frequenz für 3 verschieden Verkehrsgeräuschquellen nach [23]



Um die Auswirkung auf die real in einer Wohnung erlebte Lärmbelastung näher zu untersuchen, wurden im weiteren psychoakustische Hörversuche mit den extrahierten Vorbeifahrt-Geräuschen geplant. Hierbei sollte insbesondere bestimmt werden, ob und wie sehr sich die Belastung bei gleichem Außenpegel L_a unterscheiden kann. Die Hörversuche wurden gemäß den Vorschriften in [7] durchgeführt. Dazu wurden zunächst aus dem vorhandenen Pool an Vorbeifahrt-Hörproben insgesamt 10 WAV-Dateien ausgesucht, die sich in ihrem Geräuschcharakter stark unterscheiden. Anschließend wurden die L_a und L_i bestimmt. Diese variieren erheblich. Um die Lärmbelastung im inneren bei nominell gleichen Außenpegeln zu ermitteln, wurde nunmehr der Differenzpegel aller Außengeräusche zum lautesten Außenpegel (Schwerlaster mit $L_a = 74$ dB(A)) bestimmt und diese Differenz bei jedem entsprechenden Innenpegel aufgeschlagen. Auf diese Art und Weise wurden die Innenpegel auf den lautesten Außenpegel normiert. Am Hörversuch nahmen insgesamt 32 Teilnehmerinnen und Teilnehmer überwiegend aus dem Bereich der Hochschule teil. Nach [6] ist eine Stichprobengröße über 30 nicht mehr «klein» und kann damit für statistische Auswertungen verwendet werden. Der Hörversuch selbst fand in einem unbenutzten Büro am Ende eines Ganges statt, das relativ ruhig gelegen war. Die Probandinnen und Probanden wurden gebeten, sich eine Wohnzimmeratmosphäre vorzustellen, in der sie nach einem anstrengenden Arbeitstag entspannen wollen. Nach dem Abspielen der Hörproben sollten sie dann angeben, wie störend das Geräusch auf einer Skala von 0 (überhaupt) nicht bis 10 (extrem) war. Die Ergebnisse des Hörversuchs sind in Tabelle 3 zusammengefasst und nach aufsteigender Lästigkeit sortiert.

Tabelle 3: Ergebnisse des Hörversuchs für 10 verschiedene Vorbeifahrtgeräusche

Name der Messung	Fahrzeug	L_i / dB(A)	Lautheit N_{10}	Psychoakustische Lästigkeit
TÜ_g	Fließender Verkehr	40,9	3,3	4,9
TÜ_e	Lkw	39,7	3,1	5,1
TÜ_b	Pkw - Hupe	36,6	2,9	5,2
TÜ_a	Schwerlaster	35,2	2,6	5,5
TÜ_d	Bus	38	3,6	5,9
TÜ_c	Motorrad konstant	37,2	2,9	6,1
TÜ_f	Motorrad beschleunigend	40,5	4,1	6,9

ZFB_b	Pkw beschleunigend	46,6	6,6	7,1
ZFB_c	Pkw konstant	47,9	7	7,2
ZFB_a	Pkw	46,5	6,2	7,4

Zunächst einmal ist festzustellen, dass der resultierenden Innenpegel L_i selbst nach der Normierung auf den gleichen Außenpegel L_a noch in einem Bereich von 35 bis 48 dB(A) schwankt. Es überrascht daher nicht, dass auch die Perzentil-Lautheit N_{10} einen Wertebereich von 2,6 bis 7 umfasst. Dies entspricht – bei gleichem Außenpegel – fast einer Verdreifachung der wahrgenommenen Lautheit [1]! Der im Hörversuch ermittelte Mittelwert der empfundenen Lästigkeit entspricht in den meisten Fällen recht gut der gemessenen Lautheit und sogar dem A-bewerteten L_i . Auffällig ist lediglich, dass z.B. das Hupengeräusch (TÜ_b) und das beschleunigende Auto (ZFB_b) mehr stören als der Schalldruckpegel und die Lautheit dies eigentlich vorhersagen. Im Gegensatz dazu wird der fließende Verkehr (TÜ_g) deutlich weniger störend wahrgenommen, als dies aus den recht hohen L_i vorherzusehen gewesen wäre. Auch dies bestätigt die Ergebnisse anderer Forschungsgruppen, dass weniger der Außenpegel selbst, als vielmehr dessen Spektrum und auch der zeitliche Verlauf für die empfundene Lärmbelastigung innen maßgebend sind. Selbstverständlich gilt dies nur, wenn die Fenster geschlossen sind und nicht etwa zum Lüften oder zum sommerlichen Auskühlen des Wohnraums nachts geöffnet werden müssen.

Vor diesem Hintergrund kann die in Deutschland derzeit diskutierte Anpassung der Mindestanforderungen an den Schallschutz gegen Außenlärm in [28] unter Einbeziehung der Spektrum-Anpassungswerte [29] auch aus psychoakustischer Sicht nur unterstützt werden.

6. Fazit

Psychoakustik stellt das Bindeglied zwischen der objektiv messbaren Physik und subjektiv menschlichem Hörempfinden dar. Mit systematischen Hörversuchen können hierzu zuverlässige Relationen bestimmt werden. Die am meisten verbreitete akustische Messgröße «Schalldruckpegel mit Fast- und A-Bewertung» wird häufig zur Beurteilung von Lautheit und Lärmbelastigung herangezogen, weil sie relativ einfach messbar und normativ verankert ist. Lautheit und insbesondere Lästigkeit werden jedoch auch von zahlreichen weiteren Faktoren bestimmt. So ist z.B. ein Zusammenhang zwischen A-bewerteten Trittschall oder gar Außengeräusch und Lärmbelastigung in Gebäuden nur vage gegeben. Wenn die Bevölkerung effektiv vor den schädlichen Auswirkungen von Lärm geschützt werden sollen, muss mit Hörversuchen bestimmt werden, welche Lärmwirkung - und welche Maßnahme zur Lärminderung - tatsächlich am Menschen ankommt, denn es gilt: "Entscheidend ist, was hinten rauskommt" [30].

7. Literatur

- [1] H. Fastl und E. Zwicker, *Psychoacoustics*, 3. Aufl. Springer, 2007.
- [2] K. Genuit, Hg., *Sound-Engineering im Automobilbereich: Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen*. Heidelberg: Springer, 2010.
- [3] J. Hellbrück, „Wahrnehmung und Wirkung von Schall - Akustik zwischen Physik und Psychologie: Vortrag DAGA 2007“. Stuttgart, 2007.
- [4] A. Fiebig, „Betrachtung psychoakustischer Aspekte zur Geräuschbewertung - Pflicht oder Kür?“. Stuttgart, 2022.
- [5] A. Liebl, „Ruhe, Klang und Hörsamkeit – Psychoakustische Grundlagen: https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/publikationen/ak/vortraege-symposium-building-sound-design/Vortrag_Liebl.pdf“.
- [6] S. Y. Müller, „Handbuch für Versuchsdesign in der Psychoakustik“. Diplomarbeit, Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation, TU Graz, Graz, 2013.
- [7] *Acoustics — Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys*, ISO/TS 15666, 2021.
- [8] *Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel (ISO 226:2003)*, DIN ISO 226, 2006.
- [9] J. Herre und S. Dick, „Psychoacoustic Models for Perceptual Audio Coding—A Tutorial Review“, *Applied Sciences*, Jg. 9, Nr. 14, S. 2854, 2019, doi: 10.3390/app9142854.

- [10] H. G. Jones, N. T. Greene und W. A. Ahroon, „Human middle-ear muscles rarely contract in anticipation of acoustic impulses: Implications for hearing risk assessments“ (eng), *Hearing research*, Jg. 378, S. 53–62, 2019, doi: 10.1016/j.heares.2018.11.006.
- [11] Mercedes-Benz, *PRE-SAFE® Sound: Nutzung von natürlichen Reflexen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/innovation/schutz-in-unfallsituationen-mercedes-benz-pre-safe/>.
- [12] H. Steven, „Spart eine generelles Tempolimit auf Autobahnen auch Lärm ein?: Lärmkongress“. Stuttgart, 2023.
- [13] C. Burkhart, „Schallschutz im Wohnungsbau – DEGA-Schallschutzausweis“ in *Bauphysik-Kalender*, Bd. 2020, *Bau- und Raumakustik*, N. A. Fouad, Hg., Berlin: Ernst et Sohn, 2020, S. 71–105, doi: 10.1002/9783433610091.ch4.
- [14] *Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Mindestanforderungen*, 4109-1, DIN 4109-1, 2018.
- [15] *Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen*, 2719, VDI 2719, 1987.
- [16] *Schallschutz im Hochbau – Teil 5: Erhöhte Anforderungen*, DIN 4109-5, 2020.
- [17] *Akustik – Messung der Luftschalldämmung und Trittschalldämmung und des Schalls von haustechnischen Anlagen in Gebäuden – Kurzverfahren: Ersatz für DIN EN ISO 10052:2010-10*, 10052, DIN EN ISO 10052, 2021.
- [18] *Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 11: Messung der Trittschallminderung durch Deckenauflagen auf leichten Bezugsdecken in Prüfständen*, DIN EN ISO 140-11, 2005.
- [19] N. Amiryarahmadi, W. Kropp und K. Larsson, „Identification of Low-Frequency Forces Induced by Footsteps on Lightweight Floors“, *Acta Acustica united with Acustica*, Jg. 102, Nr. 1, S. 45–57, 2016, doi: 10.3813/AAA.918923.
- [20] M. Müller-Trapet, K. Möller, C. Young-Ji und B. Zeitler, „A subjective study of source types and rating methods for impact sounds in buildings“. Internoise Seoul, 2020.
- [21] Umweltbundesamt, *Lärmbelästigung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/laermwirkung/laermbelaestigung> (Zugriff am: 13. Februar 2023).
- [22] Umweltbundesamt, *Umweltbewusstseinsstudie 2020*, 2020.
- [23] J. Krüger, L. Perchevska, B. Zeitler und M. Müller-Trapet, „Annoyance inside buildings due to road traffic noise“. Hamburg, 2023.
- [24] *Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau – Teil 1: Luftschalldämmung*, DIN EN ISO 16283-1, 2018.
- [25] A. Rabold, U. Schanda und J. Hessinger, „Schalldämmung typischer Außenbauteile bei üblichen Lärmsituationen“. Rosenheim, 2021.
- [26] L. Müller, W. Kropp und J. Forssen, „Measurement, Simulation and Auralization of Indoor Road Traffic Noise“. Stuttgart, 2022.
- [27] A. Meier, *Forschungsvorhaben Schallschutz gegen Außenlärm: Anforderungen zum baulichen Schallschutz gegen Außenlärm nach DIN 4109 unter Berücksichtigung des derzeitigen Stands der Technik als Grundlage für bauaufsichtliche Regelungen*. Fraunhofer IRB Verlag, 2021.
- [28] A. Meier, „Schallschutz gegen Außenlärm – Ergebnisse eines Forschungsvorhabens und Vorschlag für die zukünftigen normativen Regelungen in DIN 4109“. Stuttgart, 2022.
- [29] R. O. Neubauer, „Spektrum-Anpassungswerte C und Ctr“, *Bauphysik*, Jg. 43, Nr. 3, S. 195–200, 2021, doi: 10.1002/bapi.202100012.
- [30] H. Kohl. Pressekonferenz 31. August 1984 zitiert in DER SPIEGEL.



CURRICULUM VITAE

Prof. Dipl.-Ing.

Axel C. RAHN

Bauphysiker, Bausachverständiger

Ingenieurbüro Axel C. Rahn GmbH Die Bauphysiker.

Lützowstraße 70

D-10785 Berlin

mail@ib-rahn.de

Geboren 1957 in Berlin, Abitur am Paulsen Gymnasium Berlin, Studium des Bauingenieurwesens an der TU Berlin, 1984 - 1987 Mitarbeiter von Prof. Dr. rer.-nat. Erich Cziesielksi, 1986 Niederlassung als Beratender Ingenieur in Berlin, seit 1993 von der Industrie- und Handelskammer zu Berlin öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Schäden an Gebäuden, 1993 - 2002 Vizepräsident der Baukammer Berlin, 1996 - 2002 Professor für Bauphysik an der FH Potsdam, 2002 Erweiterung des Vereidigungstenors auf Bauphysik, 2003 Umfirmierung in die Ingenieurbüro Axel C. Rahn GmbH Die Bauphysiker., seit 2009 Vorsitzender des Bundesverbandes Feuchte und Altbausanierung, seit 2018 Vizepräsident der Baukammer Berlin.

Die Ingenieurbüro Axel C. Rahn GmbH Die Bauphysiker betätigt sich auf folgenden Gebieten:

- Energetische Gebäudeplanung
- Thermische und hygrothermische Simulationen
- Bauakustik
- Raumakustik
- Bausachverständigenwesen
- Nachhaltigkeitszertifizierungen

Ferner ist das Büro VMPA-Güteprüfstelle nach DIN 4109 und von der DAkkS akkreditierte Messstelle für Schallimmissionsschutz.

Gedanken zur Nachhaltigkeit und zur thermischen Sanierung von Bestandsgebäuden

Prof. Dipl.-Ing. Axel C. Rahn, Berlin

Einleitung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei dem Kollegen Häusler dafür bedanken, dass er mich zu dem Bauphysiker:innen-Treffen 2023 eingeladen hat und mir dieses Thema nahegelegt hat. Der erste Teil des Titels ist hierbei eigentlich schon für eine abendfüllende Veranstaltung geeignet, da der Begriff Nachhaltigkeit sehr gerne, sehr oft benutzt wird, gleichwohl hinsichtlich seiner Umsetzung nicht uneindeutig definiert ist bzw. sehr unterschiedlich interpretiert wird. Gleiches gilt für Begrifflichkeiten wie klimaneutral etc. Ferner möchte ich an dieser Stelle mich auch gleich für etwas outen, auf das man früher stolz war, was heute aber verpönt ist - nämlich ich versuche querzudenken! Meine Meinung ist, dass wir trotz aller technischen Fähigkeiten und Möglichkeiten, die wir besitzen, eigentlich immer noch zu wenig wissen. Wir sollten stets demutsvoll bedenken, dass alles, was wir heute für das "Gelbe vom Ei" halten, sich morgen unter Umständen nicht als das "Gelbe vom Ei" herausstellen kann, sondern unter Umständen auch als fatale Fehlentwicklung. Ich denke an dieser Stelle an die Zeit am Anfang meines Studiums, wo der beste Baustoff der Welt schlechthin entwickelt und auf den Markt kam. Ein Baustoff für die Ewigkeit, geeignet für den Rohrleitungsbau, geeignet für Fassadenbekleidungen, geeignet für Dachbekleidungen sowie für Blumenkästen und vieles mehr. Ein Baustoff für die Ewigkeit, der auch einen diesbezüglich entsprechenden Namen bekam. Heute wissen wir, dass dieser Baustoff zweifelsfrei hervorragende Eigenschaften hatte, nur dass das Asbest, welches zu seiner Herstellung mitverarbeitet wurde, nicht nur für die mit der Herstellung des Baustoffs betrauten, sondern auch für die mit der Verarbeitung des Baustoffes betrauten Personen nachteilig gesundheitliche Wirkungen hatte, so dass einige Jahrzehnte später umfassende Sanierungsprogramme aufgelegt wurden. Es ließen sich in diesem Zusammenhang noch einige weitere Beispiele benennen. Ich möchte damit zum Ausdruck bringen, dass wir uns bei der heute insbesondere auch politisch initiierten energetischen Sanierung demutsvoll und mit Augenmaß den Projekten widmen müssen. Dies sei einleitend zu meinen Gedanken zur Nachhaltigkeit und zur thermischen Sanierung von Bestandsgebäuden gesagt.

1. Gedanken zur Nachhaltigkeit

Auf der Seite des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung der Bundesrepublik Deutschland findet man unter dem Begriff Nachhaltigkeit folgende Definition:

Nachhaltigkeit oder nachhaltige Entwicklung bedeutet, die Bedürfnisse der Gegenwart so zu befriedigen, dass die Möglichkeiten zukünftiger Generationen nicht eingeschränkt werden. Dabei ist es wichtig die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit - wirtschaftlich effizient, sozial gerecht, ökologisch tragfähig - gleichberechtigt zu betrachten. Um die globalen Ressourcen langfristig zu erhalten, sollte Nachhaltigkeit die Grundlage aller politischen Entscheidungen sein.

Dies ist sicherlich eine schöne, wohlgefeilte und gute Definition, die das Ziel einer wollmilcheierlegenden Sau definiert, nur nicht wie dies erreichbar ist bzw. erreicht werden soll. Wie lässt sich dies nun umsetzen? Welche Möglichkeiten bestehen? Hier könnte man schon die Frage stellen, wie sich wirtschaftlich effizient und ökologisch tragfähig vereinbaren lassen. Wenn die Nachhaltigkeit im Vordergrund steht, steht bei dieser Betrachtung die wirtschaftliche Effizienz oftmals im Weg und kann mit der sozialen Gerechtigkeit in einen großen Konflikt geraten. An dieser Stelle sei mir die Frage erlaubt, wie lassen sich die Umstände der Förderung von Kobalt und Lithium für die Akkumulatoren unserer E-Mobilität mit ökologischen Aspekten und sozialer Gerechtigkeit in Einklang bringen. Nimmt man hier die Definition des Bundesministeriums genau, sind alleine schon im Hinblick auf den Aspekt der ökologischen Tragfähigkeit und der sozialen Gerechtigkeit Batterien von E-Autos in keinem Fall nachhaltig.

Kommen wir aber wieder zum Bauwesen zurück. Geht man durch Ihre schöne Stadt Wien, erlebt man, wie schön Nachhaltigkeit sein kann. Denn nichts ist aus meiner Sicht erst einmal nachhaltiger als Altbausubstanz, auch

wenn diese nicht heutigen wärmeschutztechnischen Standards genügt oder nur unzureichend genügt. Dies ließe sich theoretisch durch eine heute so beliebte CO₂-Bilanzierung für Errichtung und Instandhaltung belegen. Ich möchte auch behaupten, dass ein Abriss eines seit 100 Jahren stehenden Gebäudes und eine Neuerrichtung eines Niedrig-Energie-Hauses an dieser Stelle zu einer negativen CO₂-Bilanz führen würde, wobei auch dieser Begriff der negativen CO₂-Bilanz auch schon wieder ein nett anwendbarer Begriff ist, der jedoch keine eindeutige Definition zugrunde zu liegen hat. Ich möchte den Begriff aber für mein Beispiel dahingehend erläutern, dass natürlich die CO₂-Emissionen für den Abriss und für den Neubau zusammengerechnet werden müssten und erst einmal eine "Investition" in CO₂-Emissionen bedeuten würde, bis durch das neu errichtete Niedrig-Energie-Gebäude vergleichsweise zum Altbau diese wieder über Jahre hinweg bzw. Jahrzehnte hinweg eingespart werden würden. Selbst bei dieser Betrachtung bliebe die Frage der Schuttentsorgung immer noch unberücksichtigt. Energiesparmaßnahmen haben erst einmal immer CO₂-Emissionen zur Folge. Verstehen Sie mich bitte nicht falsch, ich bin für Energieeinsparmaßnahmen, mich verwundern nur Politiker, die verwundert sind, dass trotz aller schon ergriffener Maßnahmen die Emissionen nicht «proportional» zu den Maßnahmen sinken.

Sie sehen die Gedanken können recht komplex sein, die man zum Thema Nachhaltigkeit und thermische Sanierung oder Energieeinsparung entwickeln kann.

In Berlin habe ich gerade den Fall erlebt, dass eine Wohnungsbaugesellschaft zur Erlangung von Fördermitteln bei einer, aus welchen Gründen auch immer, noch unter Denkmalschutz stehenden Siedlung ein im Rahmen einer früheren energetischen Ertüchtigung angeordnetes Wärmedämmverbundsystem mit 4 cm dicken Polystyrolhartschaumdämmplatten abreißen möchte und dafür ein neues Wärmedämmverbundsystem mit 6 cm dicken Mineralfaserdämmplatten anordnen möchte. Der U-Wert der Außenwandkonstruktion kann dadurch von $U = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf $U = 0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ gesenkt werden. Das ist eine energetische Sanierung bzw. es soll eine energetische Sanierung werden. Die Frage ist nur, ist das nachhaltig?

Ich bin kein Freund davon, das gebe ich ehrlich zu, den Fokus auf Energieeinsparung und CO₂-Immissionen zu richten. Dies ist aus meiner Sicht der falsche Fokus im Hinblick auf Nachhaltigkeit. Aus meiner Sicht sollte der Fokus auf die Ressourcenschonung gerichtet werden. Dies kann zu gleichen Erkenntnissen und Ergebnissen führen, hat aber aus meiner Sicht auch eine umfassendere Betrachtung zur Folge. Ressourcenschonung bedeutet für mich, wir müssen dafür sorgen, weniger Müll zu produzieren. In Deutschland gibt es die gelbe oder orangene Tonne über die Wertstoffe aus den Haushalten entsorgt werden. Während Müll nicht exportiert werden darf, dürfen Wertstoffe exportiert werden und so passiert es natürlich, dass Inhalte von solchen Tonnen die als Wertstoffe in die Dritte Welt exportiert werden, oftmals dort ins Meer gekippt werden. – An dieser Stelle muss ich mich für den Begriff Dritte Welt entschuldigen, der eine gewisse Arroganz beinhaltet, den ich aber nicht korrigieren wollte, um die Problematik der Begrifflichkeit zu verdeutlichen -. Ziel müsste es sein, dass diese Wertstoffe, die in der Bundesrepublik Deutschland oder in Österreich gesammelt werden, auch vor Ort verwertet werden. Das heißt, dass man sich zum Ziel setzen sollte, für all die Produkte, die in diesen Wertstofftonnen landen, Materialien zu entwickeln, die recycelt werden können. Aus der Erfahrung mit diesen kurzlebigen Wirtschaftsgütern ließen sich dann Konzepte für mittel- und langlebige Wirtschaftsgüter entwickeln. Einiges ist hierbei schon im Gange und hier möchte ich auch den von mir sehr geschätzten Prof. Dr. Michael Braungart erwähnen, der mit dem von ihm propagierten Cradle-to-Cradle-Prinzip schon vieles erreicht hat.

Grundsätzlich sollte bei dem sog. Produktdesign, um diesen modischen Begriff zu verwenden, die Entwicklung eines produktbezogenen Stoffkreislaufs mitberücksichtigt werden. Zumindest zum Zeitpunkt der Massenproduktion von Produkten sollte der Stoffkreislauf gesichert sein. Der großflächige Ausbau von Solarkraftwerken sollte aus meiner persönlichen Sicht erst erfolgen, wenn man weiß was man mit den Paneelen am Ende ihrer möglichen Gebrauchsdauer anfängt. Gleiches gilt für unsere Windkraftanlagen. Wenn wir heute nicht wissen, wie wir all die hierfür erforderlichen Materialien in einen Stoffkreislauf bekommen, müssen wir wissen, dass wir unserer Nachwelt einen riesigen Müllberg hinterlassen.

2. Nachhaltigkeit im Bauwesen

Bei einem Forum der Architektenkammer Berlin habe ich im Hinblick auf die Nachhaltigkeit ausgeführt, dass die Nachhaltigkeit im Bauwesen mit folgenden Themen beginnt:

- Schadensfreies Bauen

- Instandhaltungsfreundliches Planen und Bauen
- Umbaufreundliches Planen und Bauen

Für mich sind diese drei Punkte erst einmal die Grundlage, um sich über weiterführende Aspekte der Nachhaltigkeit bei Bauvorhaben Gedanken zu machen. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist für mich hierbei auch sich Gedanken über Stoffkreisläufe, wie vorangehend schon dargestellt, und die Bewirtschaftung der Immobilien zu machen.

Auch wenn ich jetzt Eulen nach Athen trage, weil ich hier vor Kolleginnen und Kollegen spreche, möchte ich im Hinblick auf Bestandsgebäude anmerken, dass die Grundlage für Nachhaltigkeit im Rahmen der thermischen Sanierung erst einmal ist, zu erkunden wie das Gebäude als Einheit und die Bauteile als einzelne unter Berücksichtigung der Nutzung funktioniert haben. Dies ist ein zentraler Punkt, da eine derartige Analyse viel mehr Erkenntnisse bringen kann als Anforderungen von Normen und Regelwerken. Im Weiteren ist dann die Frage zu beantworten, welche Veränderung im Rahmen der thermischen Sanierung hat welche Auswirkungen auf die Funktion und Dauerhaftigkeit zur Folge. Hier stellt sich auch die Frage, welche Maßnahmen haben welche Risiken zur Folge. Ebenso ist auch der Aspekt der Gebrauchsdauer mit zu betrachten.

Betrachten wir allein den Aspekt eines monolithischen Sichtmauerwerks, was im Rahmen einer thermischen Sanierung mit einer Innendämmung versehen werden soll, stellt sich hier stets die Frage, wie gut ist der Witterungsschutz dieses Sichtmauerwerks und wie dauerhaft ist eine Ertüchtigung des Witterungsschutzes, sofern eine derartige vorgenommen werden muss. Funktionseinschränkungen im Witterungsschutz bei einem Sichtmauerwerk, das mit keiner raumseitigen Wärmedämmung bekleidet ist, sind schnell und vergleichsweise einfach erkennbar. Solange raumseitig im Bereich der vorhandenen Putzschichten keine Schäden auftreten, ist der Witterungsschutz in Ordnung. So einfach könnte man es sich machen. Bei der Anordnung einer Innendämmung kann es jedoch der Fall sein, dass Funktionsbeeinträchtigungen beim Witterungsschutz erst erkannt werden, wenn es zu Deckenabsenkungen kommt, weil das Mauerwerk bedingt durch die raumseitige Bekleidung bis zur Raumseite unbemerkt durchfeuchten kann, Holzbalken der Holzbalkendecken Schaden nehmen können und erst beim Versagen des Auflagers einzelner Balken und Absenkung der Decke vielleicht festgestellt wird, dass der Witterungsschutz nicht mehr funktionstüchtig ist. Aus meiner Sicht müssen wir uns bei all derartigen Maßnahmen Gedanken machen, wie die Dauerhaftigkeit dieser einzuschätzen ist und welche Maßnahmen für ein Monitoring zum Bestandserhalt und damit auch zur Nachhaltigkeit sinnvoll sind.

3. Monitoring eine sinnvolle Folge einer thermischen Sanierung

Ich glaube die Möglichkeiten einer thermischen Sanierung von Bestandsgebäuden sind in diesem Kreis hier hinreichend bekannt. Bei Außenwänden gibt es die Möglichkeit einer Außen- oder Innendämmung, bei Fenstern den Austausch oder die Ertüchtigung wie z.B. bei Kastenfenstern den Austausch der raumseitigen Verglasung durch eine im Hardcoatingverfahren beschichtete Einfachverglasung, eine Sparisolierverglasung oder eine Vakuumisolierverglasung. Hier gibt es kein Rezeptbuch, sondern man muss individuelle Lösungen erarbeiten.

Befassen wir uns bei der thermischen Sanierung mit dem Thema Nachhaltigkeit, kommt aus meiner Sicht einem Monitoring besondere Bedeutung zu. Gerade bei Bestandsgebäuden stellt man immer wieder fest, dass über die 100 Jahre des Bestehens eines Gebäudes schon sehr viel durch Instandhaltungsmaßnahmen erneuert wurde oder auch Sanierungsmaßnahmen durchgeführt wurden. Was, wann, womit lässt sich dabei im Regelfall nur noch näherungsweise ergründen. Ja, irgendwann wurden schon mal ein paar Fenster ausgetauscht. Ja, der Maler war auch vor ein paar Jahren da. Dies ist aber aus meiner Sicht nicht nachhaltig. Die Grundlage für eine nachhaltige Immobilienbewirtschaftung sollte ein Logbuch sein, ähnlich dem Checkheft beim Auto. Ein einfaches Logbuch könnte hierbei u. a. aufgebaut sein wie auf Bild 1 dargestellt. Hier reicht eigentlich eine kurze Angabe der Maßnahme, des ausführenden Unternehmens, der Zeit und des Ablageortes der zu dieser Maßnahme erfolgten Dokumentation. In das Logbuch wären zudem Maßnahmen einzutragen, die aufgrund der durchgeführten Instandhaltungs- oder Sanierungsmaßnahme turnusmäßig zur Inspektion oder Kontrolle vorzunehmen sind.

Logbuch 2023

Instandhaltung

Maßnahme	Firma	Angebot	Rechnung	Ablageort d. Doku/Rechnung

Wartung

Maßnahme	gepl. Termin	Ausführung	Rechnung	Ablageort d. Doku/Rechnung

Bild 1: Mögliche Struktur eines Logbuches

Ich möchte hierzu einige Beispiele benennen, die sich aus meiner Sicht in Folge einer Instandhaltung oder thermischen Sanierung ergeben könnten:

Wärmedämmung der obersten Geschossdecke

Durch Wärmedämmung der obersten Geschossdecke wird Energie eingespart, indem Wärmeenergie von dem obersten Wohngeschoss in den Dachraum nicht mehr so ungehindert wie vorher gelangen kann. Das bedeutet aber auch, dass der Dachraum kälter wird. Damit steigt die Gefahr von möglicher Tauwasserbildung an den den Dachraum umschließenden Bauteilen, da oftmals die Luftdichtigkeit der obersten Geschossdecke Mängel aufweist und sich eine ausreichende Luftdichtigkeit in Nachhinein nur extrem schwer herstellen lässt. Vor diesem Hintergrund sollten hier in den ersten Jahren im Winter Kontrollgänge durchgeführt werden oder es sollte eine einfache Messtechnik installiert werden, über die die Klimaverhältnisse im Dachboden erfasst und überwacht werden können. Im Falle übermäßigen Tauwasseranfalls müssen Maßnahmen zu Erhöhung der Luftdichtheit der Geschosdecke und/oder Maßnahmen zur Belüftung des Dachraums ergriffen werden.

Ertüchtigung von Fensterkonstruktionen

Will man alte Holzfensterkonstruktionen ertüchtigen kann eine Zustandserfassung von besonderer Bedeutung sein. Der Zustand der Fenster vor der Ertüchtigung ist maßgeblich für den Umfang der Maßnahmen und den Turnus einer künftigen Instandhaltung. Ferner helfen sie Schäden im Vorfeld einer künftigen Sanierung besser bewerten zu können. Am einfachsten ist hier eine fotografische Dokumentation zum Zeitpunkt vor der Ertüchtigung und eine fotografische Dokumentation nach der Ertüchtigung. Zu dokumentieren ist in diesem Fall auch, was wurde gemacht und was wurde mit welchen Materialien gemacht. Zum Monitoring gehört dann die Festlegung wann eine visuelle Überprüfung der Fenster erneut erfolgen soll (nach zwei Jahren oder nach fünf Jahren etc.). Die vorgesehenen Monitoring- oder Inspektionstermine sind in dem schon erwähnten Logbuch zu vermerken.

Werden Holzkastenfenster zudem thermisch dadurch ertüchtigt, dass raumseitig eine Verglasung mit einem besseren Wärmedämmwert angeordnet wird, verändern sich die thermischen Verhältnisse im Kasten entscheidend, womit die Gefahr besteht, dass auf der dem Kasten zugewandten Oberfläche der äußeren Verglasung es zu extremerem Tauwasseranfall kommen kann. Bei einer derartigen Ertüchtigung ist es aus meiner Sicht dringend angeraten, schon im ersten Winter nach der Maßnahme zu überprüfen, in welchem Maß Tauwasser auftritt und ob durch ergänzende Maßnahmen die Entlüftung des Fensterkastens nach außen bzw. die Dichtigkeit der raumseitigen Fensterebene optimiert werden muss. In Abhängigkeit von den Erkenntnissen, die hierbei gewonnen werden, sollte eine turnusmäßige Kontrolle im Hinblick auf Tauwasseranfall erfolgen, um Schäden an den äußeren Fensterflügeln der Kastendoppelfenster frühzeitig erkennen zu können und Maßnahmen im Hinblick auf den Bestandserhalt ergreifen zu können.

Innendämmmaßnahmen

Innendämmmaßnahmen zur energetischen Ertüchtigung von Altbauten habe ich schon vorangehend erwähnt. Auch wenn alles machbar und funktional erscheint, stellen Innendämmmaßnahmen bei Holzbalkendecken für mich immer noch ein gewisses Risiko dar. Das Risiko hängt hierbei in hohem Maße von der Nutzungsfeuchte

ab, d. h. vom Raumklima und damit auch von der Nutzung. Während eine Büronutzung ein vergleichsweise geringes Risiko erwarten lässt, da die Nutzungsfeuchten im Regelfall gering sind, kann eine Wohnnutzung aufgrund der zu erwartenden Nutzungsfeuchte ein erhöhtes Risiko zur Folge haben. Da es viele Einflussfaktoren gibt, die zu Schäden führen können, die nicht sofort sichtbar werden, sondern verdeckte Schadensmechanismen hervorrufen können, erscheint mir gerade bei Holzbalkendecken ein messtechnisches Holzfeuchtemonitoring in diesen Fällen von besonderer Bedeutung. Ebenso ist aus meiner Sicht zu prüfen, ob man nicht an diskreten Stellen auch Kontrollöffnungen zur Zustandsüberprüfung vorsieht, wobei hierfür eine bauphysikalisch sinnvolle Lösung zu entwickeln ist.

4. Verwendung C2C-zertifizierter Produkte

Das Cradle-to-Cradle-Prinzip wurde, wie schon erwähnt, von Prof. Dr. Michael Braungart mit entwickelt. Kurzgefasst bedeutet es von der Wiege bis zur Wiege und befasst sich mit Stoffkreisläufen. Bei der thermischen Sanierung sollte man auch diesen Aspekt im Hinblick auf die Nachhaltigkeit berücksichtigen und C2C-zertifizierte Produkte, wenn möglich, verwenden. Das Prinzip zu verdeutlichen und an Hand von Beispielen zu erläutern, würde jedoch den Rahmen dieses Vortrages sprengen, daher will ich nur auf folgende Websites aufmerksam machen:

<http://c2c.ngo>

<http://c2ccertified.org/certified-products>

5. Schlusswort

Mir war es wichtig meine persönliche Meinung bzw. meine persönlichen Gedanken zur Nachhaltigkeit und zur thermischen Sanierung von Bestandsgebäuden ein wenig global darzulegen, da für mich Nachhaltigkeit ein sehr komplexes und auch wichtiges Thema ist, das einer sehr umfassenden Betrachtung bedarf. Wie dargelegt, halte ich es für sinnvoll den Fokus auf die Ressourcenschonung zu richten, wobei auch hier schon ein Konflikt auftritt, da diese natürlich nicht nur die baustofflichen Ressourcen oder die Ressourcen der Bestandsgebäude betrifft, sondern natürlich auch die Ressourcen unserer Energieträger. Hier gibt es aus meiner Sicht nicht das perfekte Rezept und ich glaube ein Rezept wird es auch nicht geben, sondern wir dürfen uns aus meiner Sicht demutsvoll den Aufgaben stellen und ingenieurmäßig dem jeweiligen Bestandsgebäude gerecht werdende Lösungen erarbeiten.



Prof. Dr. Dr. Dr. h.c.

F. J. Radermacher

CURRICULUM VITAE

Professor (em.) für „Datenbanken und Künstliche Intelligenz“ an der Universität Ulm, gleichzeitig Vorstand des Forschungsinstituts für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung/n (FAW/n) Ulm, Vizepräsident und Ehrenpräsident des Senats der Wirtschaft e. V., Bonn, Vizepräsident des Ökosozialen Forum Europa, Wien, langjähriges Mitglied in der Nachhaltigkeitskonferenz Hessen, von 2011 bis 2019 Mitglied im wissenschaftlichen Beirat des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur sowie Mitglied des Club of Rome. Seit August 2018 ist er außerdem Mitglied im Österreichischen Rat für Nachhaltige Entwicklung sowie Jurymitglied. Seit August 2020 Vorstandsmitglied des Vereins Global Energy Solutions e.V. Seit 2021 ist Radermacher stellvertretender Vorsitzender des Stiftungsrates der Eiselen Stiftung.

Er studierte Mathematik und Wirtschaftswissenschaften (RWTH Aachen, Universität Karlsruhe), Habilitation in Mathematik an der RWTH Aachen 1982. Seine Forschungsschwerpunkte sind u. a. globale Problemstellungen, lernende Organisationen, intelligente Systeme, Digitalisierung und Vernetzung, Umgang mit Risiken, Fragen der Verantwortung von Personen und Systemen, umweltverträgliche Mobilität, nachhaltige Entwicklung, Überbevölkerungsproblematik, Welternährung, Klima und Energie, Regulierung des Weltfinanzsystems.

Seit 2013 ist Radermacher Fellow der World Academy of Art & Science (WAAS). Seit Juli 2013 Vorstand der Rotarian Action Group for Reproductive, Maternal and Child Health (RMCH). 2013 Verleihung der Ehrendoktorwürde der International Hellenic University, Thessaloniki. 2013 - 2016 Mitglied des BASF Stakeholder Advisory Council, Ludwigshafen. 2018 Ernennung zum Ehrenpräsident des Ökosozialen Forum Österreich und Europa. Seit 2012 Mitglied im Beirat des Vodafone Instituts für Gesellschaft und Kommunikation sowie seit 2020 Mitglied im Nachhaltigkeitsbeirat der Vodafone Deutschland GmbH und Mitglied in der Kommission Nachhaltiges Wirtschaften, Handeln und Finanzieren des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung. Seit 20.02.2021 Vizepräsident sowie Ehrenpräsident des Senats der Wirtschaft e.V. Seit 2022 Mitglied im UN-Council for Engineers for the Energy Transition (CEET). Seit 2022 Mitglied im Beirat des Clean Energy Forum. Seit 2022 Ordensritter des St. Georg-Orden – ein europäischer Orden des Hauses Habsburg-Lothringen.

Ausgezeichnet wurde Radermacher u. a. durch den Wissenschaftspreis der Gesellschaft für Mathematik, Ökonomie und Operations Research, durch den Planetary Consciousness Award des Club of Budapest, den Preis für Zukunftsforschung des Landes Salzburg (Robert-Jungk-Preis), den Karl-Werner-Kieffer-Preis, den „Integrations-Preis“ der Apfelbaum Stiftung, den Umweltpreis „Goldener Baum“ der Stiftung für Ökologie und Demokratie e.V., dem Nafis Sadik Award for Outstanding Humanitarian Service der Rotarian Action Group for Population & Development, dem Anerkennungspreis der Österreich Deutschland Gesellschaft (FAW/n zusammen mit dem Universitätsclub /Wissenschaftsverein Kärnten der Alpen-Adria-Universität Klagenfurt), sowie dem Abt Jerusalem-Preis der Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft.

Energiewohlstand für alle

Prof. Dr. Dr. Dr. h.c. Franz Josef Radermacher

Der Abschlussvortrag ist individuell gestaltet und wird von Prof. Radermacher frei gehalten, Präsentationsfolien bzw. Textform gibt es naturgemäß keine. Um den Teilnehmern dennoch ein Nachlesen zu ermöglichen anbei eine Publikation des Autors aus dem diskutierten Themenfeld.

DIE „HEUCHELEI“ DER REICHEN LÄNDER

Einblicke in die aktuelle internationale Debatte um den richtigen Weg zur Transformation des globalen Energiesystems

Estelle Herlyn, Franz Josef Radermacher

Die Dominanz der reichen Länder führt im internationalen Klimadiskurs dazu, dass Entwicklungs- und Schwellenländer über finanzielle Anreize, wie auch über Lieferketten- und Taxonomievorgaben in eine Richtung gedrängt werden, die dem europäischen Energiewende-Narrativ entspricht. So blockierten Geldgeber aus dem Norden sogar jüngst den Übergang von Holzkohle zur Nutzung von Gas beim Kochen, weil sie versuchen, ihre Vorstellungen durchzusetzen.¹

Dies wurde von den Betroffenen bisher meistens unwidersprochen hingenommen.

In jüngster Zeit ändert sich jedoch das Bild. So hat sich der **nigerianische Vizepräsident Yemi Osinbajo** sehr deutlich gegen diese Art von Vorgaben zu Wort gemeldet.² Er hat für Entwicklungs- und Schwellenländer das Recht auf Entwicklung eingefordert und klar gemacht, dass dazu vieles notwendig ist, was von den reichen Staaten gerne ausgeblendet wird. Dazu gehört insbesondere die Feststellung, dass fossile Energieträger nach wie vor eine große Bedeutung haben werden. Die Entwicklungs- und Schwellenländer haben gemäß Paris-Vertrag und Klimarahmenkonvention das international anerkannte Recht, ihre Emissionen weiter zu erhöhen, was einer weitergehenden Nutzung fossiler Energieträger gleichkommt.

Osinbajo bringt deutlich zum Ausdruck, dass die Energiearmut in Sub-Sahara Afrika die Lebenschancen der dortigen Menschen massiv reduziert. Ohne Südafrika geht es in Sub-Sahara Afrika um über eine Milliarde Menschen, die heute zusammengenommen weniger Energie nutzen als Spanien. Er spricht von **globaler Energie-Ungleichheit und großen Lücken**. Diese

¹ Vgl. The Economist (2022): Yemi Osinbajo on the hypocrisy of rich countries' climate policies, im Internet unter: <https://www.economist.com/by-invitation/2022/05/14/yemi-osinbajo-on-the-hypocrisy-of-rich-countries-climate-policies>

² Ebd.

Situation droht sich zu verschärfen. Für 2050 wird für Nigeria eine Bevölkerungsgröße von 400 Millionen Menschen erwartet. Nigeria wird dann die drittgrößte Bevölkerung der Welt haben und die USA in dieser Position überholen. Die Mehrheit der Menschen wird in Städten leben. Allein in Lagos werden es mehr als 30 Millionen Menschen sein. Afrika braucht Jobs und eine leistungsfähige Industrie. Afrika muss sich in der Weltwirtschaft gleichberechtigt einbringen können. Für den Weg dahin benötigt Afrika viel Unterstützung, Flexibilität für die Transformationsprozesse – wie in den reichen Ländern – und **eine Abkehr von naiven Vorstellungen** in Bezug auf erneuerbare Energien (im Sinne von renewables-only), die auf **Leap-Frogging-Potentialen** basieren, die völlig unrealistisch sind, weil Energiebereitstellung etwas ganz anderes ist als Informationsverarbeitung.³

Er begrüßt in diesem Zusammenhang die erfolgte Öffnung der EU-Taxonomie zum Thema zur Akzeptanz von Erdgas und Kernenergie für grüne Investments und sieht dies als Ausweis für die Richtigkeit seiner These, dass verschiedene Länder die Option haben müssen, verschiedene Wege zur Transformation ihres Energiesystems zu verfolgen.

Strikt wendet er sich gegen einen Bann bzgl. der Finanzierung von fossilen Energielösungen in Entwicklungsländern. Fossile Energieträger werden noch für lange Zeit für Grundlastbereitstellung und Beherrschung der Volatilität der erneuerbaren Energieträger unverzichtbar sein, übrigens auch in den reichen Ländern. Zudem ist klar, dass die Welt ihre Probleme nicht lösen können wird, wenn die ärmeren Staaten weiterhin in dem Sinne als zweitklassig behandelt werden, dass ihnen von anderen Lösungen aufgezwungen werden. Kooperation auf der Basis gerechter Verhältnisse sieht anders aus.

Schon im Januar hatte sich **Südafrikas Bergbau- und Energieminister Gwede Mantashe** ähnlich geäußert wie Yemi Osinbajo aus Nigeria. Er wendete sich öffentlich gegen den Druck „reicher Industriestaaten“, mit dem sein Land aus der Kohle gedrängt werden soll. Er sprach sich dafür aus, den bisher geplanten Bau von Kohlekraftwerken mit einer Kapazität von bis zu 1500 MW aufrechtzuerhalten. Anders als Präsident Cyril Ramaphosa sieht er keinen Bedarf, die Kohleverstromung aufzugeben und setzt zudem auf die von Umweltschützern kritisierte Gas- und Ölsuche vor der Ostkap-Provinz.^{4, 5}

In eine ähnliche Richtung argumentiert der **ägyptische Außenminister und Präsident der kommenden COP 27** auf afrikanischem Boden, **Sameh Shoukry**: *„Es gibt zum Nachteil der afrikanischen Staaten eine übertriebene Diskussion, Gas als alternative Energiequelle des*

³ Energiebereitstellung betrifft Elektronen und Moleküle, deren Größe fixiert ist. Informationsverarbeitung beruht auf Bitkodierungen, deren Größe in den letzten Jahrzehnten alle 20 Jahre um mehr als den Faktor 1000 verkleinert werden konnte (Moore's Law).

⁴ Vgl. Tagesspiegel (2022): Kohlekraftwerke. Südafrikas Energiekrise als Chance, im Internet unter: <https://background.tagesspiegel.de/energie-klima/suedafrikas-energiekrise-als-chance>

⁵ Vgl. DW (2022): Energiekrise am Kap als Chance für deutsche Investoren, im Internet unter: <https://www.dw.com/de/energiekrise-am-kap-als-chance-f%C3%BCr-deutsche-investoren/a-60379488>

Übergangs zu überspringen.“ Es sei wichtig, die Nutzung von Erdgas nicht durch „exzessive Beschränkungen“ zu entmutigen.

Erwähnt wird in derselben Quelle, dass in Afrika gerade ein großes Erdgas-Infrastrukturprojekt auf dem Weg ist, die Trans-Sahara Gas Pipeline. Über 4000 Kilometer soll sie Erdgas von Nigeria nach Algerien und von dort weiter nach Europa bringen. Im Gespräch ist die Pipeline seit den 1970-er Jahren. Vor kurzem unterzeichneten die Energieminister von Nigeria, Niger und Algerien eine Vereinbarung zur Wiederaufnahme der Planungen.

Schon weit gediehen sind die Vorarbeiten an der 1400 Kilometer langen East African Crude Oil Pipeline (EACOP) durch Uganda und Tansania. Der französische Präsident Macron hatte das Projekt in einem Gratulationsschreiben an Ugandas Staatspräsident Yoweri Museveni anlässlich dessen sechster (!) Wiederwahl 2021 ausdrücklich unterstützt.

Der afrikanische Energie-Experte **NJ Ayuk, CEO der African Energy Chamber**, der im Mai 2022 mit Bundeskanzler Scholz während dessen Afrikareise gesprochen hatte, äußert sich auf die Frage, ob es ein Fehler war, dass Deutschland und andere Länder die Finanzierung und Erschließung neuer fossiler Vorkommen in Afrika deutlich erschwert haben, wie folgt:⁶

„Ja, das war ein Fehler. Wir haben Deutschland deutlich kritisiert, dass sie darauf gedrungen haben, dass man in Afrika kein Erdgas erschließen und nur in grüne Technologien investieren sollte. Vergessen Sie nicht, dass in Afrika 600 Millionen Menschen keinen Zugang zu Elektrizität haben. 900 Millionen Menschen haben keinen Zugang zu sauberen Kochmöglichkeiten - die meisten davon sind Frauen. Energiearmut ist hier ganz real. Eine deutsche Familie verbraucht mit ihrem Kühlschrank mehr Strom, als viele Afrikaner in einem ganzen Jahr verbrauchen. Wir haben hier ein Problem mit dem Zugang zu Energie. Deutschland nutzt Gas und Kohle, um wirtschaftlich zu wachsen. Aber mit diesem Vorstoß wollte man das Afrika nicht gewähren - so haben es zumindest damals viele interpretiert. Dass der Kanzler jetzt da war, das hat diese Diskussion wieder etwas entschärft.“

Auf die Frage, ob Afrika Europas Energieproblem lösen könne, äußert er sich wie folgt:

„Ja, afrikanische Länder können Europas Energieabhängigkeit lösen - vorausgesetzt, es wird investiert. Das ist der Status quo. Es gibt in Afrika eine gewaltige Menge an Ressourcen. Deutschland baut ja zwei LNG-Terminals. Aber wo soll das Gas herkommen? Deutschland kann nicht dauerhaft mit Gas aus den USA planen, das viermal so teuer ist. Das würde langfristig nicht funktionieren. Russisches Gas ist am billigsten, aber Gas aus Afrika kommt gleich danach. Und der Vorteil: Es wird aus Ländern kommen, die Deutschland zugewandt sind. Gleichzeitig gibt es langfristige Initiativen, die dem Kontinent Afrika helfen. Hier geht es jetzt um eine Partnerschaft auf Augenhöhe und nicht nur um Entwicklungshilfe, wie das in der Vergangenheit immer der Fall war.“

⁶ Vgl. Ntv (2022): Energie-Experte im Interview. Afrika kann Europas Energieproblem lösen, im Internet unter: <https://www.n-tv.de/wirtschaft/Afrika-kann-Europas-Energieproblem-loesen-article23357110.html>

In dieses Bild fügt sich sicher der folgende programmatische Hinweis auf der Webseite der African Energy Chamber: *Bei der Entwicklung des Energiesektors in Afrika sollten die afrikanischen Nationen sich darauf fokussieren den Markt für Erdgas zu entwickeln, das eine wesentliche Grundlage für Afrikas Energieindustrie bilden wird. Wir fokussieren, uns sehr darauf, einen entsprechenden starken Heimatmarkt für Afrika zu entwickeln.*⁷

Interessant ist schließlich eine Kehrtwende des **deutschen Kanzlers Olaf Scholz**. Er forderte die Afrikaner auf, mehr Öl, Gas und Kohle zu fördern, um so die europäische Energieabhängigkeit von Russland zurückbauen zu können.⁸ Mit afrikanischen Ländern wurden Kohlelieferungen nach Deutschland vereinbart. Er erklärte in Südafrika, dass Deutschland mit dem Land vor allem bei erneuerbaren Energien zusammenarbeiten wolle, aber auch südafrikanische Kohle importieren möchte, um sich von russischer Kohle zu lösen. Er forderte alle Förderländer in Afrika auf, ihre Öl- und Gas-Produktion zu erhöhen. *„Wir diskutieren jetzt mit all diesen Ländern, die Öl und Gas fördern, und versuchen sie davon zu überzeugen, ihre Kapazitäten zu erhöhen, weil dies dem Weltmarkt helfen würde.“*, so der Kanzler.

Fazit: Die Afrikaner bezeichnen es völlig zurecht als „Heuchelei“, dass Deutschland und Europa den Kontinent einerseits in ein enges Korsett aus erneuerbarer Energie und grünem Wasserstoff zwingen wollen, andererseits jedoch versuchen, Zugang zu den fossilen Ressourcen Afrikas zu bekommen, um sich aus der Abhängigkeit von russischem Erdgas zu befreien.

⁷ Vgl. African Energy Chamber (2022): About / Africa is a Powerhouse, im Internet unter: <https://energychamber.org/about/>

⁸ Vgl. Tagesspiegel Background (vom 25. Mai 2022): Engere Energiekollaboration mit Südafrika geplant, im Internet unter: <https://background.tagesspiegel.de/energie-klima/engere-energiekollaboration-mit-suedafrika-geplant>