

MASTERARBEIT

„Gleichzeitige Gewährleistung von natürlicher Belüftung und ausreichendem Schallschutz via innovativer Fassadenkonstruktionen“

**ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von**

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ardeshir Mahdavi

E259/3

Institut für Architekturwissenschaften

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Markus Hintermayer

0625959

Ort, Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Zum besseren Verständnis der Wirkungsweise bzw. der Verwendbarkeit von Doppelfassaden als akustische Puffer (beispielsweise gegen Umgebungslärm) im Falle natürlicher Belüftung, sind im Rahmen eines Forschungsprojekts der Abteilung für Bauphysik und Bauökologie an der Technischen Universität Wien unter der Leitung von Herrn Univ.Prof. Dr. Ardeshir Mahdavi in einem entsprechend adjustierten Akustiklabor zielgerichtete Untersuchungen erfolgt. Die Ergebnisse einer solchen Testreihe und ein daraus abgeleitetes Planungswerkzeug werden in dieser Arbeit dargelegt.

Schlagworte: Doppelfassade, Lärmschutz, natürliche Belüftung, schalldämmende Außenwand, Pfosten/Riegel-Rastersystem

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
2	Lärm	7
2.1	Verkehrslärm.....	8
2.1.1	Der Frequenzgang von Straßenverkehrslärm	11
3	Die Gebäudehülle als Werkzeug des Lärmschutzes	13
3.1	Auszug internationaler Forschungen.....	13
3.2	Doppelfassaden – Typen und Eigenschaften.....	16
4	Forschungen des BPI der TU Wien.....	19
4.1	Allgemeiner Ansatz	19
4.2	Das Labor.....	21
4.3	Vorarbeit.....	23
4.4	Aktuelle Strategie	26
5	Messungen an der Teststruktur.....	29
5.1	Messausrüstung.....	29
5.2	Messpositionen	31
5.3	Ablauf.....	32
6	Ergebnisse	32
6.1	Auswertung vorhandener Gleichungen	33
6.1.1	Die öffnungsabhängige Reduktion des Schalldämm-Maßes.....	34
6.1.2	Das Schalldämm-Maß.....	35
6.1.3	Das bewertete Schalldämm-Maß	37
6.2	Herleitung einer Formfaktor-Formel	38
6.2.1	Das idealisierte Modell	45
7	Ergänzendes	56
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	59
9	Anhang.....	60
9.1	Die 32 Messungen	60
9.2	Erläuterung der Messreihendarstellungen.....	71
9.3	Herleitung des View Factors.....	71
9.4	Nachhall-Formeln.....	77
9.5	R_w vs. R_{1250}	78
10	Literaturverzeichnis.....	79

Abkürzungen

α	Absorptionsgrad
$\bar{\alpha}$	flächengewogener mittlerer Absorptionsgrad
ΔL	betragsmäßige Differenz zweier Pegel
ΔL_A	A-Bewertung
ΔR	betragsmäßige Differenz zweier Schalldämm-Maße
θ	Polarwinkel
λ	Wellenlänge
φ	Azimutwinkel
Φ_e	Strahlungsleistung, Strahlungsfluss
Ω	Raumwinkel
A	(äquivalente Absorptions-)Fläche
A_b	äquivalente Absorptionsfläche von S_b
A_{proj}	Zentralprojektion eines Objekts auf die Einheitskugel
$A_{proj,d}$	Zentralprojektion eines Objekts auf eine Kugel mit dem Radius d
D, d	Distanz, Dicke
ER (bzw. E)	Empfangsraum
$F_{1 \rightarrow 2}$	Formfaktor
f	Frequenz
I	Intensität, Schallintensität
I_e	Strahlungsintensität, Strahlstärke
L	Schallpegel
L_e	Strahldichte
$L_{A,eq}$	A-bewerteter L_{eq}
L_{day}	Taglärminde
L_{den}	Tag-Abend-Nacht-Pegel in dB
L_{eq}	Energieäquivalenter Dauerschalldruckpegel
$L_{evening}$	Abendlärminde
L_{night}	Nachtlärminde
L_p	Schalldruckpegel
p	Schalldruck
P	Leistung
R	Schalldämm-Maß
R^2	Bestimmtheitsmaß
R_w	bewertetes Schalldämm-Maß
S_b	Absorptionsbereich
SR (bzw. S)	Senderraum
T, t	Zeitintervall/-punkt, Nachhallzeit
VF	Formfaktor
W	Schallleistung (üblicherweise: P_{ak})
1→2	Sender nach Empfänger
b	dazwischen
cl	geschlossen
max	maximal, maximaler Wandverschluss
op	geöffnet
proj	projiziert
tot	insgesamt, ganz

1 Einleitung

Unter jenen Umweltfaktoren, die das Wohlbefinden des Menschen beeinträchtigen können, kommt dem Lärm sicherlich besondere Bedeutung zu, denn seine negativen Auswirkungen sind vielfältig. Zu den direkten physischen Konsequenzen einer Lärmexposition zählen etwa

- Hörschäden/-verlust
- Kommunikationsprobleme
- Schlafstörungen (Ein- bzw. Durchschlafprobleme)
- Konzentrationsschwierigkeiten
- Stress

Als langfristige gesundheitliche Folgen sind u. a. Herz-Kreislaufkrankungen, Bluthochdruck, hormonelle Reaktionen, Übergewicht, Diabetes, Atembeschwerden und Depression zu nennen. Daraus gehen schließlich Erwägungen sozio-ökonomischer Art hervor (Krankenstandskosten, Preispolitik bei Immobilien in ungünstigen Lagen, etc.). [Buchholz 2005; Marty-Nussbaumer 2010]

Aus diesem Grund sind gerade in Gebieten höherer Lärmbelastung (wie zB Ballungsräumen) gegensteuernde Maßnahmen unerlässlich. Die meisten davon, vor allem jene, die unmittelbar beim Verursacher ansetzen, sind Gebietskörperschaften vorbehalten; dem Architekten bleibt (wie auch in vielen anderen Fällen) kaum mehr als die Gebäudehülle, um den Nutzer vor allzu großer Belästigung zu bewahren. Im Laufe der Zeit kam diesbezüglich zwar eine erhebliche Zahl an Ideen auf (s. zB Abb. 1 u. 2), doch nur eine Handvoll sind mit dem Wunsch nach natürlicher Belüftbarkeit vereinbar. Eine davon soll in der vorliegenden Arbeit präsentiert werden.

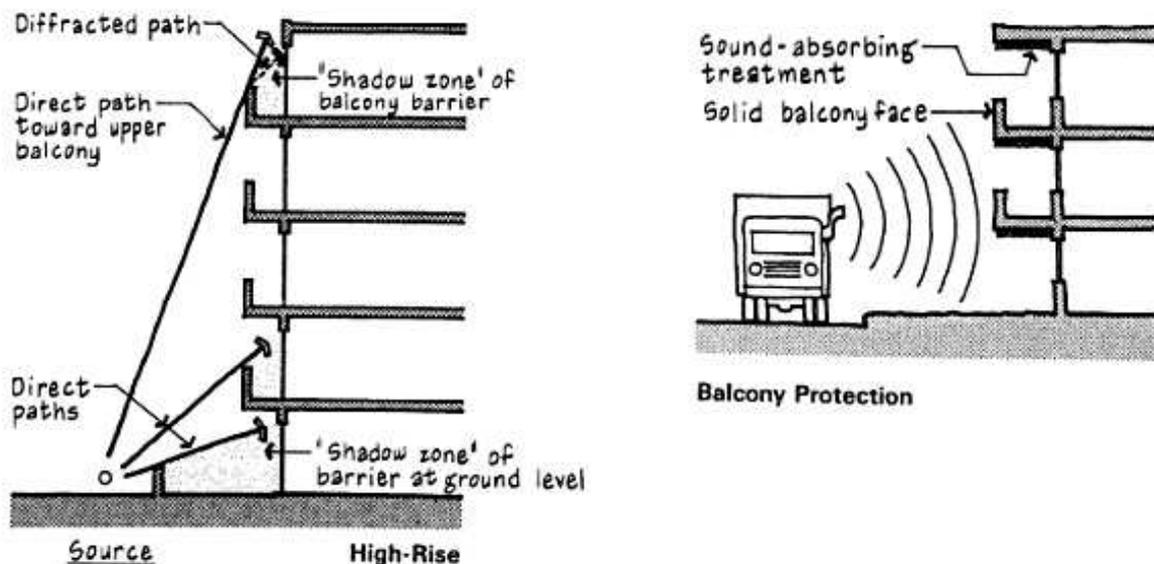
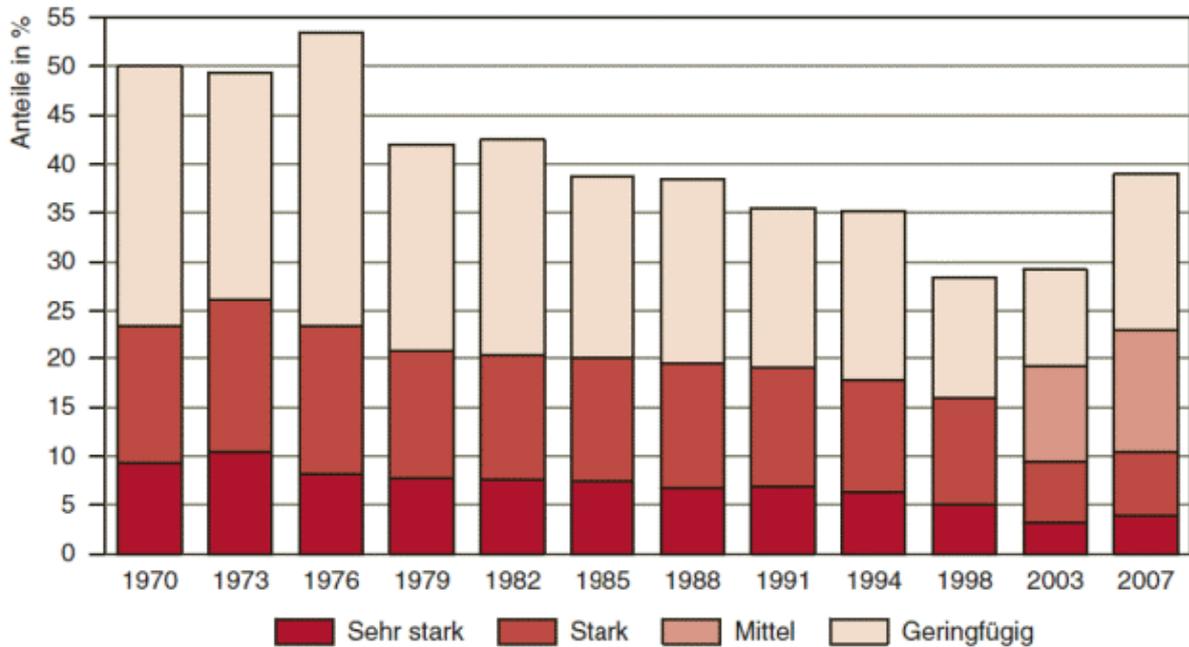


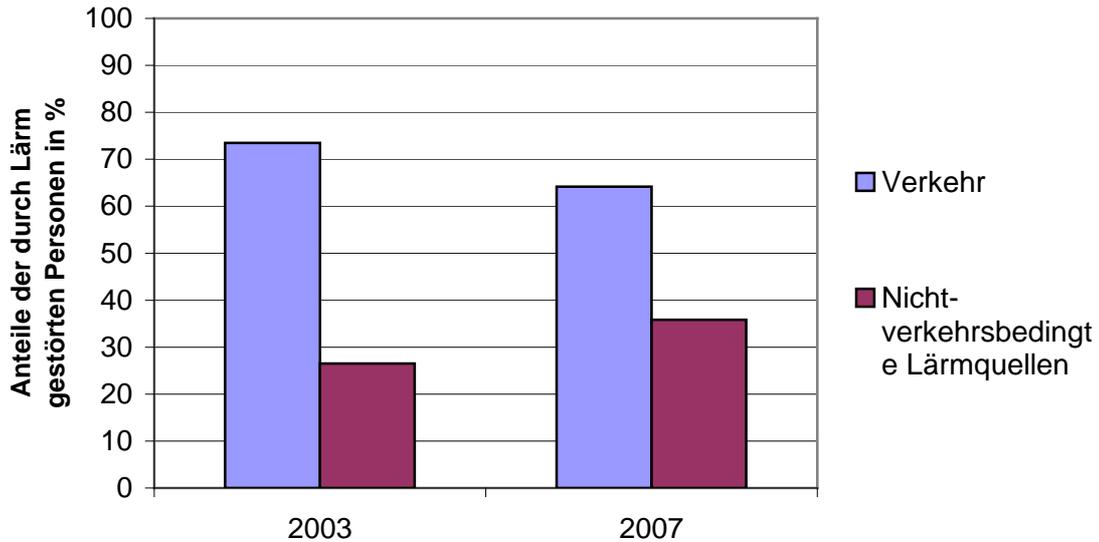
Abb. 1 + 2: Der Balkon als akustischer Puffer. [May 1979]

2 Lärm

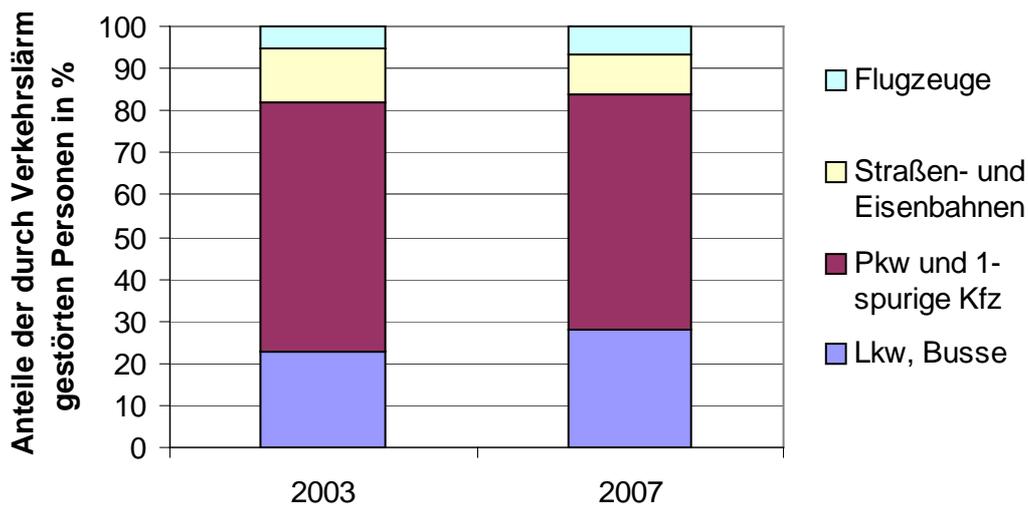
Laut des im Jahr 2007 von der Statistik Austria durchgeführten Mikrozensus fühlten sich damals 38,9 % der Befragten in ihrem Wohnbereich durch Lärm gestört, also deutlich mehr als noch in den Jahren 2003 und 2007 (s. Diag. 1). Von 64,2 % dieser Personen wurde Verkehr als Lärmverursacher genannt, wobei die Gesamtheit aller Kraftwagen und einspurigen Kraftfahrzeuge den mit Abstand größten Anteil (83,9 %) ausmacht (s. Diag. 2 und Diag. 3). [Statistik Austria 2009]



Diag. 1: Anteile der am Tag und/oder in der Nacht in ihrem Wohnbereich durch Lärm gestörten Befragten im Zeitraum 1970 bis 2007 (bis 1991 auf Wohnungs-, ab 1994 auf Personenebene) (Quelle: Statistik Austria, Mikrozensus „Umweltbedingungen – Umweltverhalten“, 4. Quartal 2007).



Diag. 2: Vergleich der Lärmquellen in den Jahren 2003 und 2007. [Statistik Austria 2009]



Diag. 3: Vergleich der Lärmquelle Verkehr in den Jahren 2003 und 2007. [Statistik Austria 2009]

Gerade dem Verkehr ist auch deshalb ganz besondere Relevanz zuzuschreiben, weil er im Unterschied zu den meisten anderen Lärmquellen (Lokale, Betriebe, Baustellen, Nachbarwohnungen, Freizeit- und Tourismuseinrichtungen bzw. -veranstaltungen) vorbehaltlich einer ortsabhängigen Schwankung seiner Intensität keine lokale Besonderheit darstellt. In vielen Fällen ist er somit der bestimmende Faktor und – mehr noch – der gemeinsame Nenner typischer Lärmkulissen verschiedener geografischer Regionen.

2.1 Verkehrslärm

Da Verkehrslärm ein zeitlich veränderliches Schallereignis darstellt, wäre er durch einen Momentanwert nicht hinlänglich beschrieben. Eine deutlich aussagekräftigere Einzelgröße

ist da der Mittelungspegel L_m . Für seine Ermittlung existieren je nach betrachteter Lärmart unterschiedliche Berechnungsverfahren und dementsprechend auch eigene Bezeichnungen. Im Falle des Straßenverkehrslärms erwies sich der Energieäquivalente Dauerschall(druck)pegel L_{eq} als besonders geeignet [ÖNORM S 5004]:

$$L_{eq} = 10 * \lg \left(\frac{1}{T} * \int_{t_1}^{t_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) = 10 * \lg \left(\frac{1}{T} * \int_{t_1}^{t_2} 10^{0,1 * L_p(t)} dt \right) \quad (1)$$

Dabei ist die Messdauer T vom variablen, jedoch innerhalb der Messung liegenden Zeitpunkt t zu unterscheiden. Wird $L_p(t)$ vor der Verrechnung A-bewertet, so lautet die Abkürzung für den resultierenden Pegel sinngemäß $L_{A,eq}$.

$$L_{A,eq} = 10 * \lg \left[\frac{1}{T} * \int_{t_1}^{t_2} 10^{0,1 * (L_p(t) + \Delta L_A)} dt \right] = L_{eq} + \Delta L_A \quad (2)$$

Tageszeitabhängige Tendenzen hinsichtlich des Verkehrsaufkommens (tagsüber sind *grundsätzlich* mehr Fahrzeuge unterwegs als nachts, weshalb es *grundsätzlich* lauter ist) einerseits und hinsichtlich der Perzeption (ein durchschnittlicher Mensch wird von ein und demselben Lärmereignis im Wachzustand (also *grundsätzlich* tagsüber) weniger gestört als in der Ruhephase (*grundsätzlich* nachts)) andererseits sind die Grundlage für die Unterteilung des 24 Stunden-Zyklus in 3 Bereiche unterschiedlicher Gewichtung: Tageszeit, Übergangszeit und Nachtzeit. [RL 2002/49/EG] In der Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments wurden dazu unter Punkt 9 zwei Lärmindizes vorgestellt: der Tag-Abend-Nacht-Pegel L_{den} („den“ für „day-evening-night“) zur Bewertung der allgemeinen und der Nachtpegel L_{night} zur Bewertung der nächtlichen Belastung. Die Standardzeiten lauten:

„Day“: 07.00 – 19.00 Uhr (12 Stunden, ohne Gewichtungszuschlag)
 „Evening“: 19.00 – 23.00 Uhr (4 Stunden, Gewichtungszuschlag: 5 dB)
 „Night“: 23.00 – 07.00 Uhr (8 Stunden, Gewichtungszuschlag: 10 dB)

Die Indikatoren L_{day} , $L_{evening}$ und L_{night} berechnen sich jeweils als A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel gem. (2), wobei sich der Beurteilungszeitraum auf ein Jahr beläuft und die Bestimmungen an allen Kalendertagen für L_{day} am Tag, für $L_{evening}$ am Abend und für L_{night} in der Nacht erfolgen. L_{den} ist als ein durch Zuschläge gewichteter Mittelungspegel dieser drei Größen zu verstehen:

$$L_{den} = 10 * \lg \left\{ \frac{1}{24} * \left[12 * 10^{0,1 * L_{day}} + 4 * 10^{0,1 * (L_{evening} + 5)} + 8 * 10^{0,1 * (L_{night} + 10)} \right] \right\} \quad (3)$$

In der österreichischen Normung wurde von dem (i. d. oben erwähnten Richtlinie angeführten) Recht Gebrauch gemacht, den Abend um 1 oder 2 Stunden zu kürzen, um die Differenz dem Tag und/oder der Nacht zuzuschlagen. Gemäß Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie gilt [Stadt Wien 2006]:

„Day“: 06.00 – 19.00 Uhr (13 Stunden, ohne Gewichtungszuschlag)

„Evening“: 19.00 – 22.00 Uhr (3 Stunden, Gewichtungszuschlag: 5 dB(A))
 „Night“: 22.00 – 06.00 Uhr (8 Stunden, Gewichtungszuschlag: 10 dB(A))

Aus (3) wird somit:

$$L_{den} = 10 * \lg \left\{ \frac{1}{24} * \left[13 * 10^{0,1 * L_{day}} + 3 * 10^{0,1 * (L_{evening} + 5)} + 8 * 10^{0,1 * (L_{night} + 10)} \right] \right\} \quad (4)$$

Als Grundlage für Aktionsplanungen wurden (gem. RVS 04.02.11 resp. Bundes-Umgebungslärmschutzverordnung 2006) für Bundes- und die meisten Landesstraßennetze (außerhalb „Ruhiger Gebiete“) die Grenzwerte $L_{den} = 60$ [dB] und $L_{night} = 50$ [dB] festgelegt. Sogenannten Konfliktzonenkarten (aktueller Stand: 2007) des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (kurz: Lebensministerium) kann man entnehmen, in welchen Bereichen wichtiger Ballungsräume und Hauptverkehrsstraßen Österreichs Überschreitungen dieser Schwellen vorliegen (s. Abb. 5) [BMLFUW 2012].



Abb. 3: Luftbild des Großraums Karlsplatz (oberhalb der Bildmitte: der Resselpark). [BMLFUW 2012]



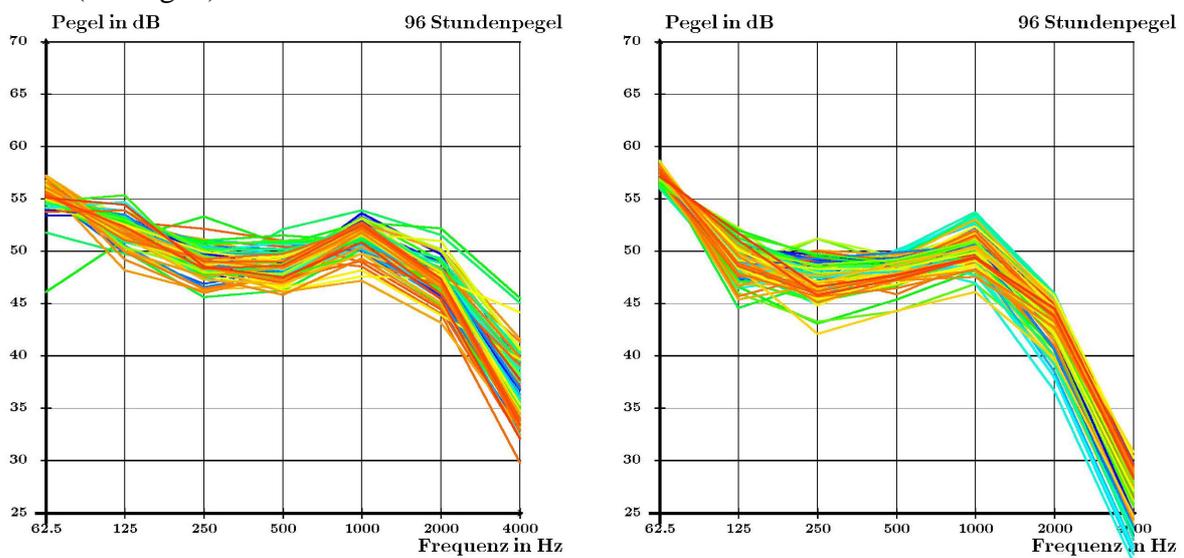
Abb. 4: Auf den Straßenverkehr reduzierte Umgebungslärmkarte des Großraums Karlsplatz für den Zeitraum Tag-Abend-Nacht. [BMLFUW 2012]



Abb. 5: Auf den Straßenverkehr reduzierte Konfliktzonenkarte des Großraums Karlsplatz für den Zeitraum Tag-Abend-Nacht. [BMLFUW 2012]

2.1.1 Der Frequenzgang von Straßenverkehrslärm

Einige voneinander unabhängige Studien (insb. [Sandberg 2003], [Windelberg 2009], [Buratti 2002]) über typische Frequenzverteilungen des Straßenverkehrslärms kamen zu dem Schluss, dass die größten A-bewerteten Schalldrücke i. d. R. zwischen 700 und 1300 Hz gemessen werden (s. Diag. 4).



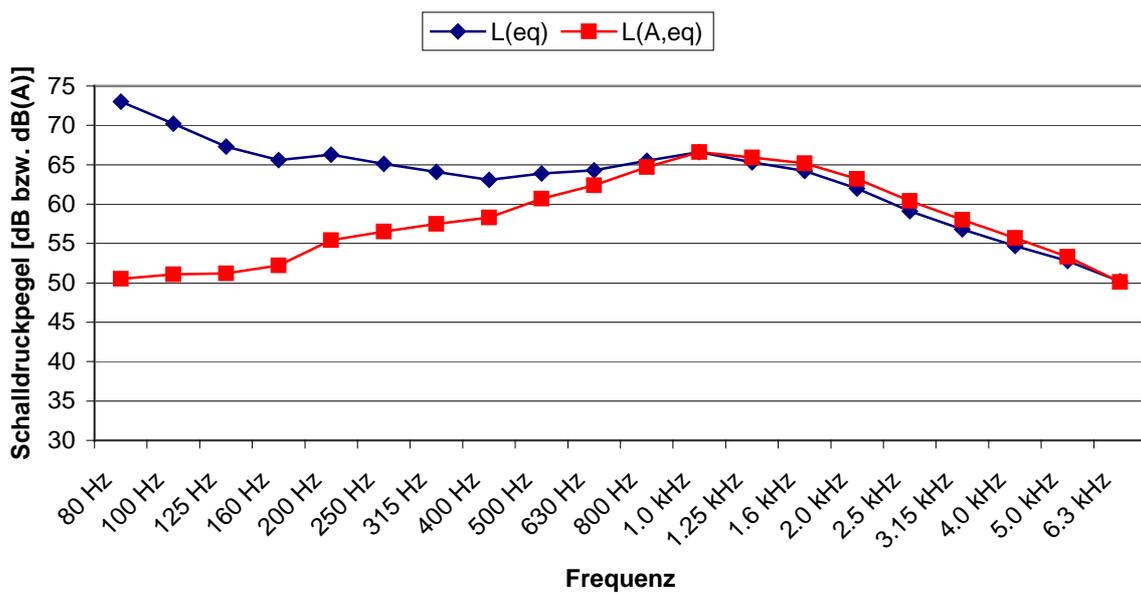
Diag. 4: Normierte Frequenzverteilungen (energetisches Mittel: 51 dB) des unbewerteten Schalldruckpegels von Straßenverkehrslärm in der Stadt (links) und auf der Autobahn (rechts). Nach einer A-Bewertung würde die Spitze in beiden Fällen bei 1000 Hz liegen. [Windelberg 2009]

Die Ursachen dieses Charakteristikums, das auch als Multi-Coincidence Peak bekannt ist, sind vielfältig (Materialeigenschaften der Reifen, Beschaffenheit des Fahrbahnbelags, etc.). Um es anhand eines lokalen Beispiels bestätigt zu finden, wurde am 13. April 2012 zwischen 9:33 und 9:43 Uhr an der Kreuzung Wiedner Hauptstraße/Karlsplatz eine Messung des durch den Straßenverkehr dominierten Umgebungslärms durchgeführt (s. Abb. 6). Als Messgerät diente der in

Tab. 2 angeführte Analysator Nor140 (von Norsonic). Die Ergebnisse sind in Diag. 5 dargestellt und spiegeln das beschriebene Merkmal deutlich wider.



Abb. 6: Straßenverkehrslärmmessung am Karlsplatz.



Diag. 5: Äquivalenter Dauerschallpegel des Verkehrslärms an der Kreuzung Wiedner Hauptstraße/Karlsplatz.

Immer neue technische Errungenschaften (wie zB offenporiger Asphalt) mögen bereits in näherer Zukunft zu einer Änderung dieses Phänomens führen, im Rahmen dieser Arbeit wurde es jedoch als hinreichende Grundlage angenommen (s. Kap. 4.4).

3 Die Gebäudehülle als Werkzeug des Lärmschutzes

Obwohl Strategien zur Lärminderung bevorzugt am Emissionsort ansetzen sollten, sodass eine Ausbreitung des störenden Schalls gar nicht erst möglich ist, wurden im Laufe der letzten Jahrzehnte auch auf dem Gebiet des passiven Lärmschutzes, dessen Gegenstand Maßnahmen am Immissionsort sind, einige konsequente Ansätze entwickelt.

3.1 Auszug internationaler Forschungen

1980 stellten OLDHAM und MOHSEN in [Oldham & Mohsen 1980] einen geometrischen Leitfaden zum Entwurf von lärmhemmenden Vorbauten (wie zB Balkonen) vor: Durch Kenntnis des vertikalen (γ) und des horizontal (ζ) Einfallswinkels eines Lärms auf ein Fenster (bzw. eine Öffnung), sowie der Fensterform und der durch den Vorbau bedingten Entfernungsdifferenz δ zwischen direkter Distanz und kürzester nichtdurchdringender Distanz (zwischen Quelle und Fenster) lassen sich in den Diagrammen der Abb. 7 der Reihe nach (durch Übertragung parallel zu den Pfeilen) Schnittpunkte ermitteln, sodass zuletzt rechts unten die überschlagsmäßige Reduktion des entsprechenden Pegels abgelesen werden kann (TNI := Traffic Noise Index).

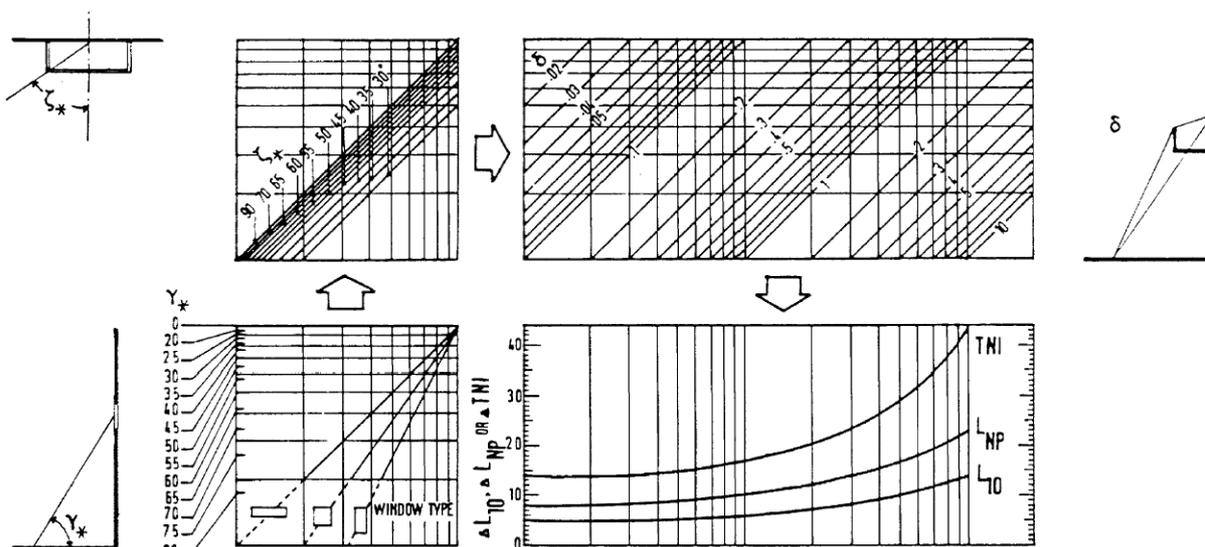


Abb. 7: Entwurfsleitfaden für lärmhemmende Vorbauten nach Oldham und Mohsen.

JAKOB und MÖSER (TU Berlin) konzentrierten sich auf Doppelverglasungen mit in den Zwischenraum eingesetzten Lautsprechern (s. Abb. 8) zur Erzeugung von Antischall sowohl nach der Feedforward- als auch nach der Feedback-Methode und maßen Verbesserungen im Bereich von 7 bzw. 3,4 – 6 dB. Seine größte Wirkung entfaltete das System bei 50 – 200 Hz. [Jakob & Möser 2003]



Abb. 8: Die ANC-Fenster enthalten in jeder Ecke ein Mikrofon und zwei Antischall-Lautsprecher. [Jakob & Möser 2003]

ASDRUBALI und BURATTI thematisierten in [Asdrubali & Buratti 2005] Fenster mit über der Verglasung im Rahmen eingebautem „Aerator“ (ähnlich einem Labyrinthlüfter samt integrierter Schalldämpferkulisse; s. Abb. 11). Durch den Einsatz solcher HSIVW (high sound insulation ventilating windows) erzielten sie bewertete Schalldämmmaße von 28 – 38 dB. Zum Vergleich: Das R_w von Schallschutzgläsern liegt i. d. R. zwischen 32 und 51 dB. Sie erörterten zudem, dass ventilatorgestützte Aeratoren grundsätzlich ein wenig schlechter abschneiden als solche ohne Ventilatoren. Die Abbildungen 12 und 13 zeigen Beispiele aus der Praxis.

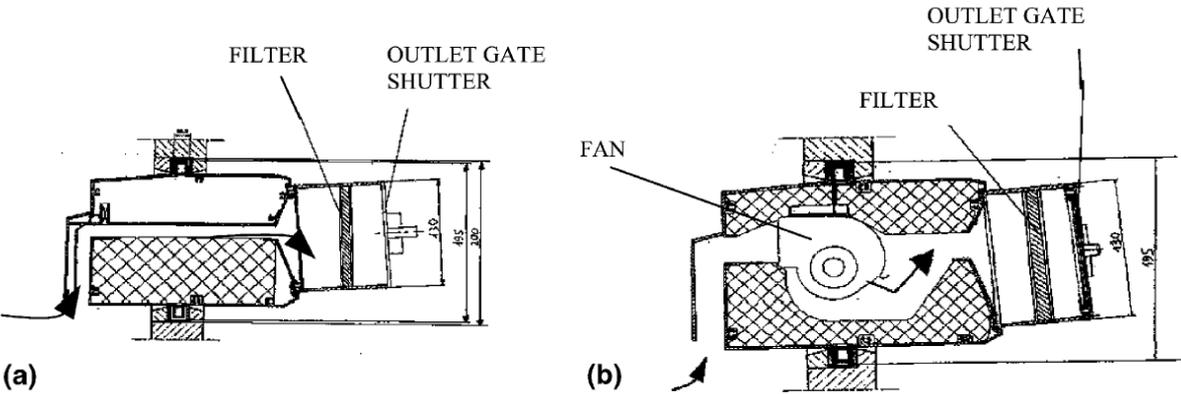


Abb. 9 u. 10: Schnitt durch einen Aerator ohne und mit Gebläse [Asdrubali & Buratti 2005]



Abb. 11: Aerator im Einbauzustand [Asdrubali & Buratti 2005]

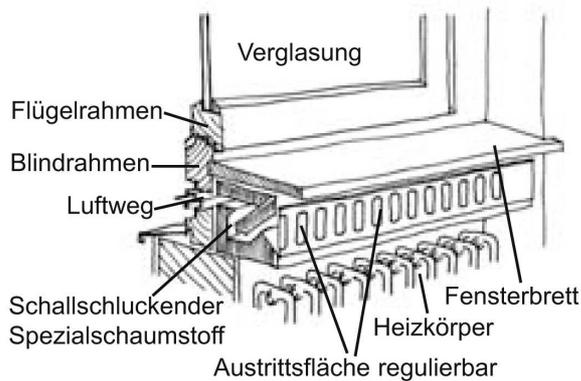


Abb. 12: Integrierte Schalldämmlüftung [Gratt W. et al. 2009]



Abb. 13: Lüfter in Wandmontage [Gratt W. et al. 2009]

Insbesondere sind auch die Versuche von Jian KANG et al. zu nennen, da sie den in Kapitel 4.2 beschriebenen schon recht nahe kamen. Dabei wurde ein Grundaufbau, bestehend aus zwei hintereinander in eine Wandöffnung eingesetzten und mit zueinander versetzten Öffnungen versehenen Glasplatten, um zusätzliche schalldämmende bzw. -dämpfende Elemente erweitert (s. Abb. 14). Bei den Experimenten nahm man aber nicht nur auf die akustischen Eigenschaften der einzelnen Lösungen Rücksicht, sondern auch auf die Optik (=> Gewährleistung von Transparenz), gesundheitliche Aspekte (=> Vermeidung fasernder und/oder poröser Materialien) und das Durchströmungsverhalten bei üblichen Lüftungsbedingungen. Außerdem brachte die schrittweise Veränderung einiger Abmessungen (wie zB die Höhe der Öffnungen) ihren Einfluss auf die Ergebnisse zutage. [Kang & Brocklesby 2005, Kang & Li 2007]

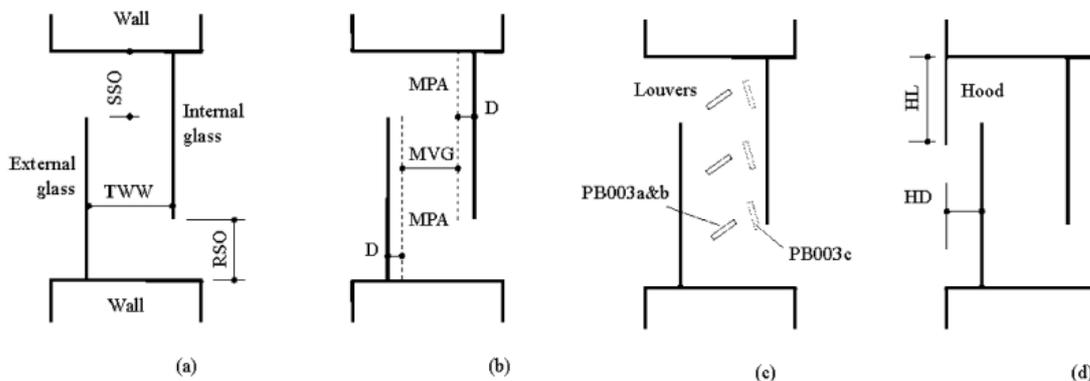


Abb. 14: Schnitt durch die Versatz-Doppelverglasung ohne Ergänzung (a), mit eingesetzten Mikroperforierten Absorbieren (b; strichliert), mit zwei unterschiedlichen Anordnungen eingesetzter Blenden (c) und mit außen vorgesetzter Blende (d). [Kang & Li 2007]

Um bereits an dieser Stelle eine konkrete Vorstellung davon zu ermöglichen, in welchem Bezug zur Baupraxis solche Untersuchungen wie die letztgenannte oder aber auch die in dieser Arbeit vorgestellte stehen, seien im nachfolgenden Kapitel einige bereits vielfach bewährte Grundtypen zweischaliger Fassaden aufgelistet.

3.2 Doppelfassaden – Typen und Eigenschaften

Außenwände, die der grundlegendsten Forderung genügen müssen, wenigstens zweischalig zu sein, lassen sich nach ganz unterschiedlichen Gesichtspunkten klassifizieren. Mehrere Bedingungen wurden in Kap. 3.1 bereits vorweggenommen. Beispielsweise kann es sich bei dem gesuchten Typus weder um eine Abluft-, noch um eine Pufferfassade handeln, da sonst keine natürliche Belüftung möglich wäre. Auch statische Eigenschaften stellen im betrachteten Fall keinen relevanten Faktor dar.

Eine Einteilung hinsichtlich der Zonierung des Zwischenraumes ist dagegen durchaus sinnvoll:

1. Ungeteilter Zwischenraum

a. Die Vorgehängte Hinterlüftete Fassade (VHF), engl.: rainscreen cladding

ist die einfachste Form einer unzonierten, hinterlüfteten Außenwand. Die Bezeichnung ist dahin gehend irreführend, als sie zwar die gesamte Fassade meint, sich jedoch – dem (deutschen) Namen nach – nur auf den äußeren Layer bezieht. Der Grund dafür ist der, dass sich solche Lösungen i. d. R. nur in Hinblick auf die Wetterschutzschicht von einer ganz gewöhnlichen Außenwand unterscheiden. In Form einer hinterlüfteten Fassadenbekleidung (aus Natur- oder Kunststein, Holz, Glas, Keramik, etc.) wird sie nämlich vermittels einer an der Wand befestigten Unterkonstruktion (oft auch nur eingedübelte, die WD durchdringende Profile)



vor der unverkleideten Dämmung auf Abstand (ca. 4 cm) gehalten, um es dieser zu ermöglichen, bei anfallendem Kondenswasser abzutrocknen. [Fisch 2008]

Abb. 15: Vorgehängte Hinterlüftete Fassade (Quelle: www.baulinks.de)

Da den Vorsatzschalen vieler VHF allein schon wegen der hohen Fugenzahl keine ausreichend guten schalldämmenden Eigenschaften zugeschrieben werden können, eignen sie sich in ihrer herkömmlichen Form kaum für die in Kap. 4.1 („Allgemeiner Ansatz“) dargelegten Zwecke.

b. Die Zweite Haut-Fassade

ist von der VHF über die ÖNORM EN 13119: 2007 („Vorhangfassaden – Terminologie“) abgrenzbar. Demnach ist sie eine

zweischalige Vorhangfassade aus äußerer Einfachverglasung und innerer Isolierverglasung bestehend, mit Außenluft ventilertem tiefen Zwischenraum zur Regulierung der Sonneneinstrahlung und natürlichen Belüftung durch öffnbare Fenster in der Innenschale.

Weiters besteht eine Vorhangfassade (engl.: curtain wall)

in der Regel aus vertikalen und horizontalen, miteinander verbundenen, im Baukörper verankerten und mit Ausfachungen ausgestatteten Bauteilen, [...] die eine leichte, raumumschließende ununterbrochene Hülle bilden, die selbstständig oder in Verbindung mit dem Baukörper alle normalen Funktionen einer Außenwand erfüllt, jedoch nicht zu den lastaufnehmenden Eigenschaften des Baukörpers beiträgt.

Ob eine gedämmte Außenwand mit vorgesetzter (opaker) Verglasung als VHF oder als Vorhangfassade zu begreifen ist, sei dahingestellt.

Jedenfalls geht das landläufige Verständnis einer

Zweite Haut-Fassade so weit, dass es weder Einschränkungen hinsichtlich des Ausmaßes des Zwischenraums („Haus im Haus“) noch hinsichtlich der

statischen Eigenschaften der inneren Schale (s. Abb. 16) gibt. Lüftungsöffnungen werden bei diesem Typ grundsätzlich nur im Fuß- und Kopfbereich des Gesamtaufbaus vorgesehen, was sich für die angestrebte Umsetzung ebenfalls als eher ungünstig erweist. [Streicher 2008]

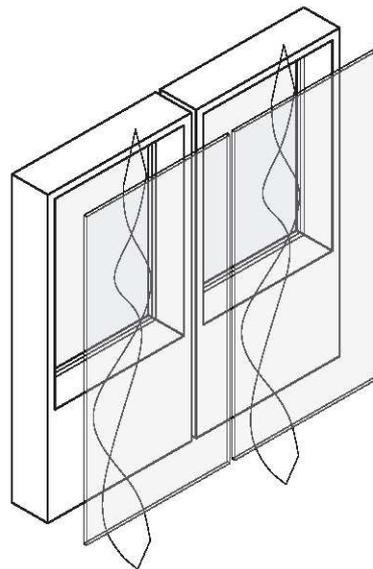


Abb. 16: Zweite Haut-Fassade [Knaack et al. 2007]

2. Geteilter Zwischenraum

a. nur vertikal segmentiert: die Korridorfassade

Ist der Zwischenraum nur in vertikaler Richtung (zB geschoßweise) aufgeteilt, so spricht man von einer **Korridorfassade**, in Anlehnung an den Umstand, dass der Pufferbereich oft so breit gebaut wird, dass es dem Wartungs- und Reinigungspersonal möglich ist, ihn zu durchschreiten (s. Abb. 17). Lüftungsöffnungen findet man im Fuß- und Kopfbereich des Abschnitts/Geschoßes, und zwar versetzt zueinander, um das Eindringen der Abluft eines Geschoßes in das darüber liegende zu vermeiden. [Streicher 2008]

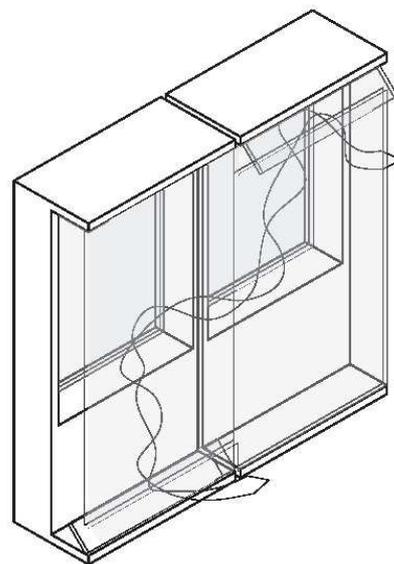


Abb. 17: Korridorfassade [Knaack et al. 2007]

b. nur horizontal segmentiert

Eine rein horizontal aufgeteilte Fassade weist gegenüber der Zweite Haut-Fassade keinen relevanten Mehrwert auf, weshalb sie absolut unüblich ist. Erst im Zusammenspiel mit einer vertikalen Aufteilung ergeben sich sinnvolle Varianten.

c. vertikal und horizontal segmentiert

Sind die durch sowohl vertikale als auch horizontale Partition entstehenden „Zellen“ vollständig voneinander abgegrenzt, handelt es sich um eine **Kastenfenster-Fassade** (s. Abb. 18). Ist der Zelle keine andere benachbart (sondern bloß von einer klassischen (massiven) Außenwand umgeben), so hat man es (an dieser Stelle) mit einem einfachen Kastenfenster bzw. belüfteten Doppelfenster zu tun. Auch verschließbare Loggien können in diesem Kontext berücksichtigt werden. [Knaack et al. 2007]

Auf der Idee, zwischen den Zellen sehr wohl Verbindungen vorzusehen, beruht das Konzept der

Schacht-Kasten-Fassade: Ihre Spalten bestehen abwechselnd aus Kastenfenstern und durchgehenden Abluftschächten. Äquivalent zu der Überlegung, die bereits im Zusammenhang mit der Korridorfassade erwähnt wurde, dringt die Frischluft zwar genauso an der Unterseite der äußeren Schale in das Kastenfenster ein, die Abluft wird dann aber nicht einfach an der Oberseite der gleichen Zelle ausgelassen, sondern in den benachbarten Schacht eingeleitet, in dem der Kamineffekt (evtl. im Zusammenspiel mit einer mechanischen Anlage) für den Ausstoß nach oben sorgt (s. 19).

Mischlösungen dieser Grundformen sind z. B. die Wechsel- und die Komponentenfassade. [Streicher 2008]

Generell liegt die Standard-Schallpegeldifferenz von zu Lüftungszwecken geöffneten und dem Stand der Technik entsprechenden Doppelfassaden lt. [Fisch 2008] bei ca. 30 dB.

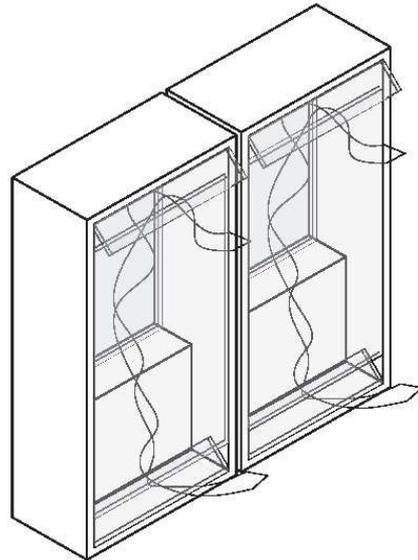


Abb. 18: Kastenfenster-Fassade [Knaack et al. 2007]

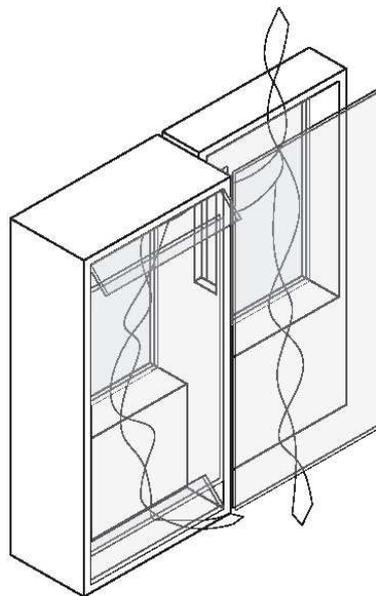


Abb. 19: Schacht-Kasten-Fassade [Knaack et al. 2007]

4 Forschungen des BPI der TU Wien

Vor einigen Jahren nahm sich ein Forschungsteam um Univ.-Prof. Dr.techn. Ardeshir MAHDAVI und Josef LECHLEITNER an der bauphysikalischen Abteilung des Instituts für Architekturwissenschaften der Technischen Universität Wien der eingangs beschriebenen Problematik an, und zwar mit dem besonderen Anspruch, eine Lösung zu entwickeln, welche im Betrieb möglichst ohne Energieversorgung oder besondere Mechanismen auskommen würde und nicht zuletzt auch deshalb leicht herzustellen bzw. zu warten wäre.

4.1 Allgemeiner Ansatz

Die schlussendlich gewählte und bis heute verfolgte Strategie besteht nun darin, ein etabliertes Außenwandprinzip, nämlich jenes der Doppelfassade, so einzusetzen, dass dabei ein „Schall-Obstakel“ entsteht (s. Abb. 20 und Abb. 21).

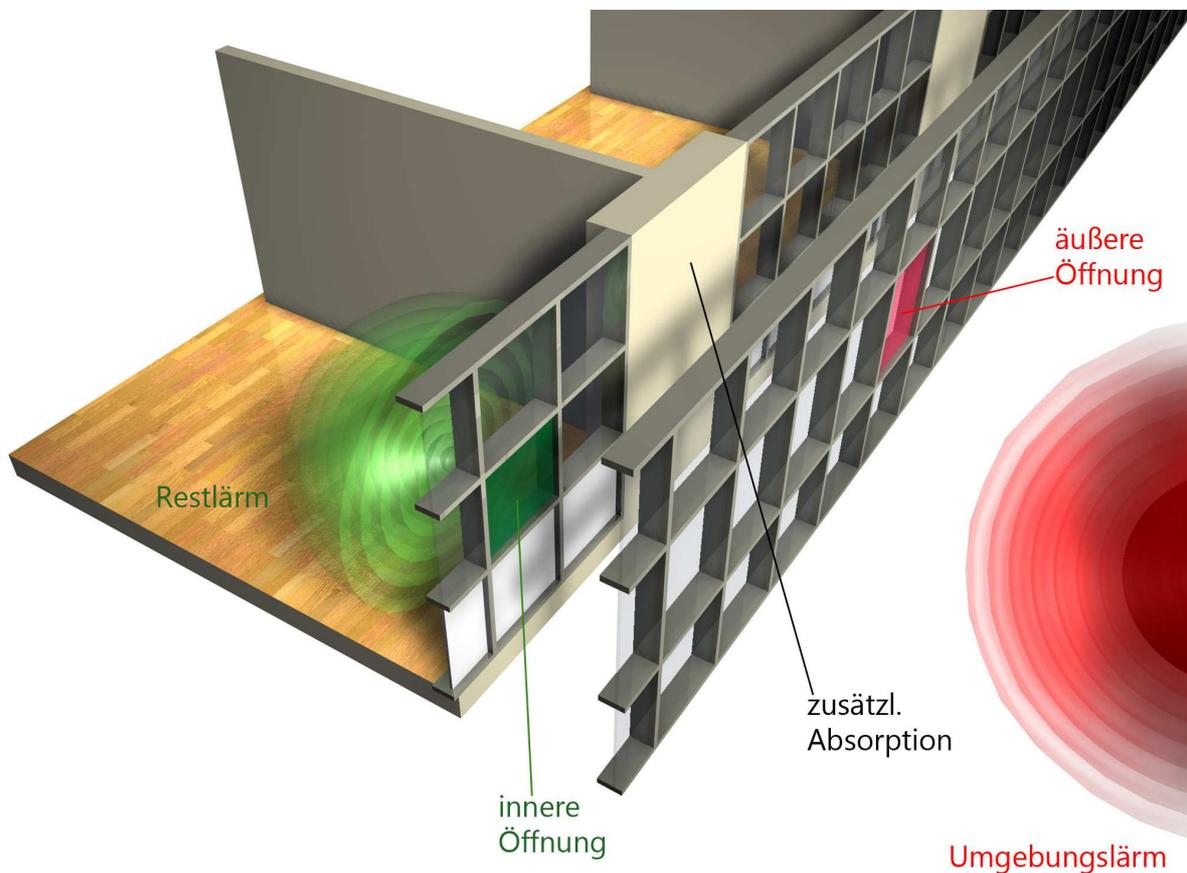


Abb. 20: Das Prinzip. Opake Abschnitte im Versatzbereich könnten die Applikation etwaiger Absorptionsmaterialien begünstigen.

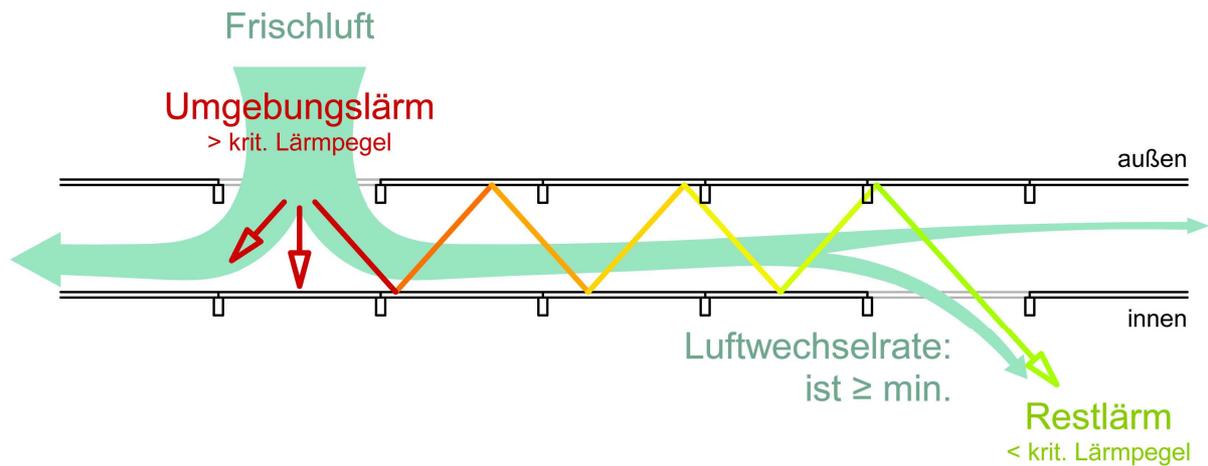


Abb. 21: Das Prinzip im Grundriss. Der Versatz der beiden Öffnungen ist ein Kompromiss zwischen ausreichender Belüftung und möglichst geringer akustischer Belastung.

Bereits in einfachen Fällen, also ungeachtet solcher Variationen, die beispielsweise auf der zielgerichteten Auslegung der Schalengeometrie oder des Zwischenraums beruhen, weist ein derartiges System einige Freiheitsgrade auf (s. Abb. 22).

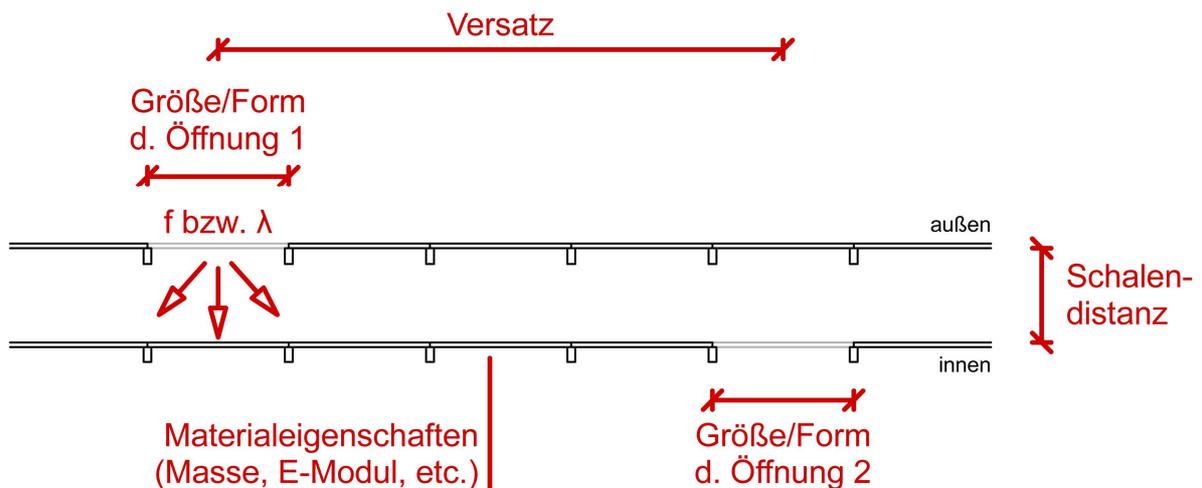


Abb. 22: Vereinfachte Darstellung einer Auswahl an Parametern, die das Schalldämmvermögen der Anordnung bestimmen.

Bei den in dieser Arbeit vorgestellten Versuchen wurde auf brandschutz- und strömungstechnische Fragestellungen (=> Gewährleistung eines ausreichenden Luftstroms/-wechsels) nicht näher eingegangen. Ein umfassendes Urteil über die praktische Tauglichkeit einer entsprechenden Konstruktion kann aber verständlicherweise keinesfalls ohne ihre Berücksichtigung resp. Klärung gefällt werden.

4.2 Das Labor

Der Prüfstand für die Teststruktur befindet sich im Akustiklabor der Abteilung für Bauphysik und Bauökologie (UG Paniglgasse 1 – 3, 1040 Wien) der TU Wien und besteht, wie bereits in [Çakir 2012] beschrieben, entsprechend ÖNORM EN ISO 10140-5 aus zwei aneinandergrenzenden, entkoppelten Hallräumen (Volumina $> 50 \text{ m}^3$) mit einer gemeinsamen Prüföffnung (Größe: $3,1 \times 3,1 \text{ m}$) (s. Abb. 23). Zur Erhöhung der Diffusität wurden die Begrenzungsflächen weitestgehend aus Beton bzw. STB glatt und unverkleidet hergestellt. Auch eine Planparallelität der Wände wurde teilweise vermieden.

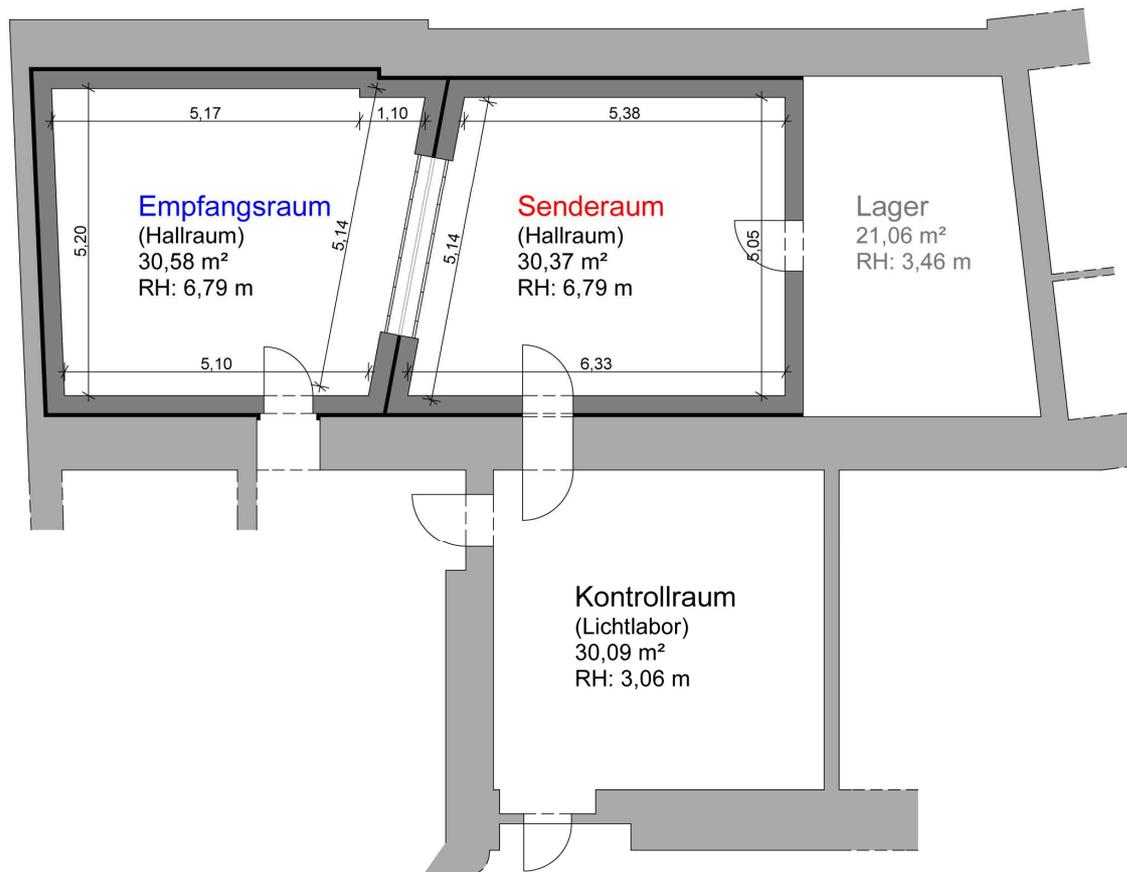


Abb. 23: Das Akustiklabor.

Das in der Öffnung angebrachte Prüfbauteil (s. Abb. 24) setzt sich in jedem Fall aus einer fixen Unterkonstruktion und dem variablen Aufbau zusammen. Erstere wird durch zwei in einem Abstand von 35 cm hintereinander angeordneten (also einem sende- und einem empfangsraumseitigen) Alu-Rastern (s. Abb. 25) gebildet, wobei die Pfosten (Breite: 8 cm) und die Riegel (Breite 4 cm) je Raster in der gleichen (4 cm tiefen) Ebene liegen, sodass die äußere Tiefe 43 cm beträgt. Zur permanenten Konstruktion zählen außerdem 4 cm dicke Spanplatten, die von außen an die 30 cm breiten Randbereiche angeschraubt wurden.

Innerhalb dieses Rahmens kann ein Set von maximal 25 Spanplatten ($B/H/T = 50/50/4 \text{ cm}$) als variabler Aufbau angebracht werden (s. Abb. 26). Durch das Freilassen/Besetzen einzelner Rasterplätze ist so die Einrichtung verschiedenster Öffnungskonfigurationen und das systematische Vorgehen gem. Abb. 22 möglich.



Abb. 24: Senderraumseitige Ansicht der Testwand. Der Blick durch die Öffnung (es fehlen die Platten Nr. 6, 11 und 16) lässt die beiden Raster erahnen. Rechts neben der Öffnung ist der 30 cm breite, umlaufende Rahmen erkennbar.

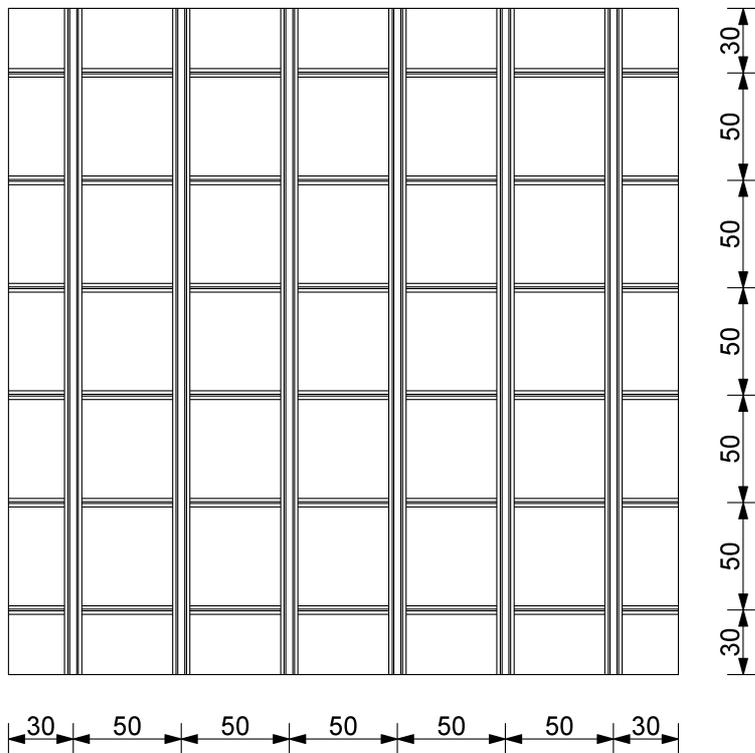


Abb. 25: Einer der beiden aus Alu-Profilen zusammengesetzten Konstruktionsraster im Ausschnitt der Testöffnung.

5	4	3	2	1	
10	9	8	7	6	
15	14	13	12	11	
20	19	18	17	16	
25	24	23	22	21	

Wandschale des Senderraums
(von diesem aus gesehen)

1	2	3	4	5	
6	7	8	9	10	
11	12	13	14	15	
16	17	18	19	20	
21	22	23	24	25	

Wandschale des Empfangsraums
(von diesem aus gesehen)

Abb. 26: Die beiden Ansichten der (vollständig geschlossenen) Testwandschalen.

4.3 Vorarbeit

Den im Rahmen dieser Diplomarbeit gemeinsam mit Josef LECHLEITNER und MArch Egzon BAJRAKTARI realisierten Experimenten an der (im vorigen Kapitel beschriebenen) Testwand gingen einige Messungen (s. Diag. 6; zum besseren Verständnis der Darstellungen s. Anhang 9.2) voraus, die von Josef LECHLEITNER und MSc Onurcan ÇAKIR durchgeführt wurden, um das Schalldämmverhalten der Struktur in Abhängigkeit von den Ausmaßen der Öffnungen und deren relativen Positionen zueinander abschätzen zu können. Üblicherweise waren die Öffnungen der beiden Layer gleich groß und innerhalb ein und derselben Messreihe stellte ihr Versatz zueinander die einzige veränderliche Größe dar.

1	2	3	4	5	
6	7	8	9	10	
11	12	13	14	15	
16	17	18	19	20	
21	22	23	24	25	

Messreihe 1
5 Messungen:

vorne: 6
hinten: 20; 19; 18; 17; 16

1	2	3	4	5	
6	7	8	9	10	
11	12	13	14	15	
16	17	18	19	20	
21	22	23	24	25	

Messreihe 2
5 Messungen:

vorne: 6-16
hinten: 10-20; 9-19; 8-18;
7-17; 6-16

1	2	3	4	5	
6	7	8	9	10	
11	12	13	14	15	
16	17	18	19	20	
21	22	23	24	25	

Messreihe 3
5 Messungen:

vorne: 6-11-16
hinten: 10-15-20; 9-14-19;
8-13-18; 7-12-17;
6-11-16

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Messreihe 4
5 Messungen:

vorne: 1
hinten: 21; 22; 23; 24; 25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Messreihe 5
5 Messungen:

vorne: 1
hinten: 1; 7; 13; 19; 25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Messreihe 6
5 Messungen:

vorne: 1-2
hinten: 16-21; 17-22;
18-23; 19-24;
20-25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

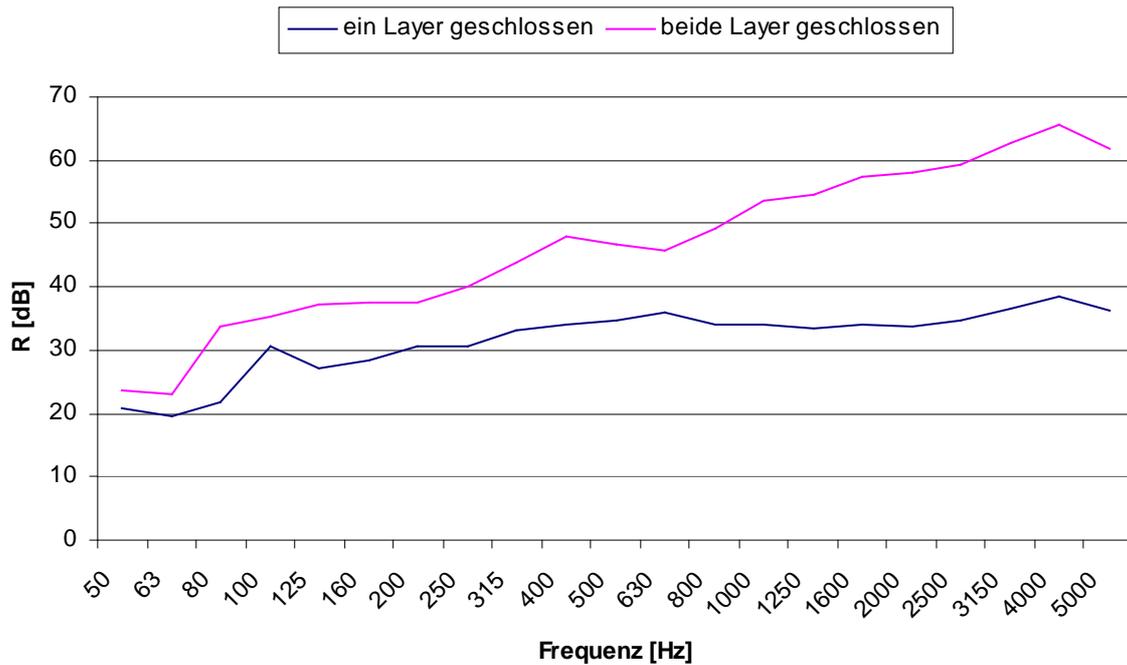
Messreihe 7
2 Messungen:

vorne: 1-6-11-16-21
hinten: 3-8-13-18-23;
5-10-15-20-25

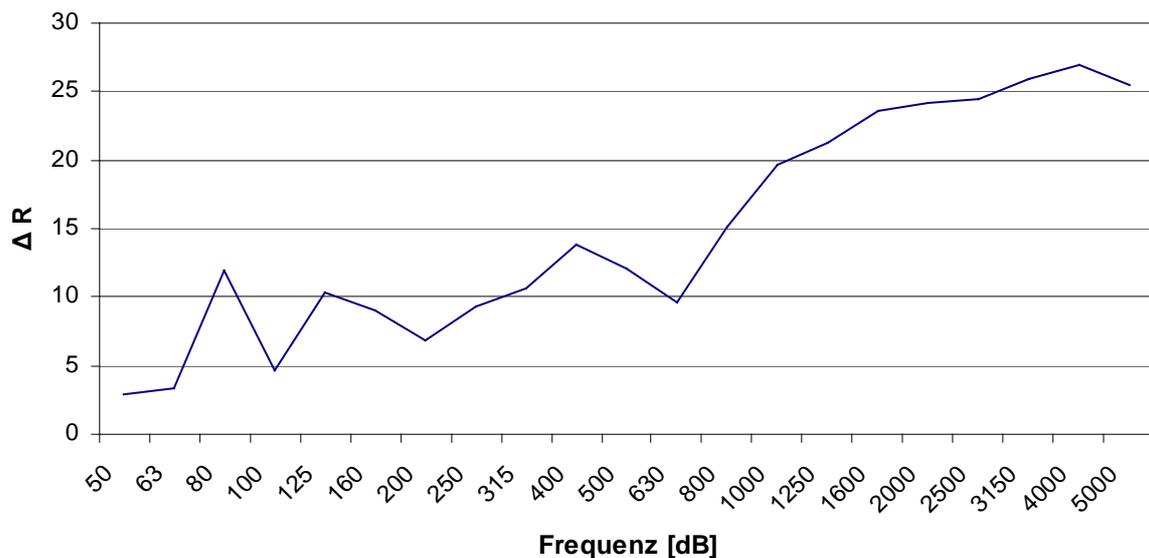
Diag. 6: Frühere Messreihen (durchgeführt von Josef Lechleitner und MSc Onurcan Çakir).

Diverse Analysen der Ergebnisse wurden bereits in [Çakir 2012] vorgenommen. Sie enthalten wesentliche Aussagen über grundlegende Eigenschaften des Prüfaufbaus. Die zwei wohl bedeutendsten seien hier noch einmal dargelegt.

Schließt man eine Seite der Wand vollständig, während die andere zur Gänze offen gelassen wird, so ergibt sich ein Schalldämm-Maß, dessen betragsmäßige Differenz zu jenem der total (also beidseitig) geschlossenen Wand einen deutlichen Anstieg in den oberen Frequenzen aufweist (s. Diag. 7 und Diag. 8).

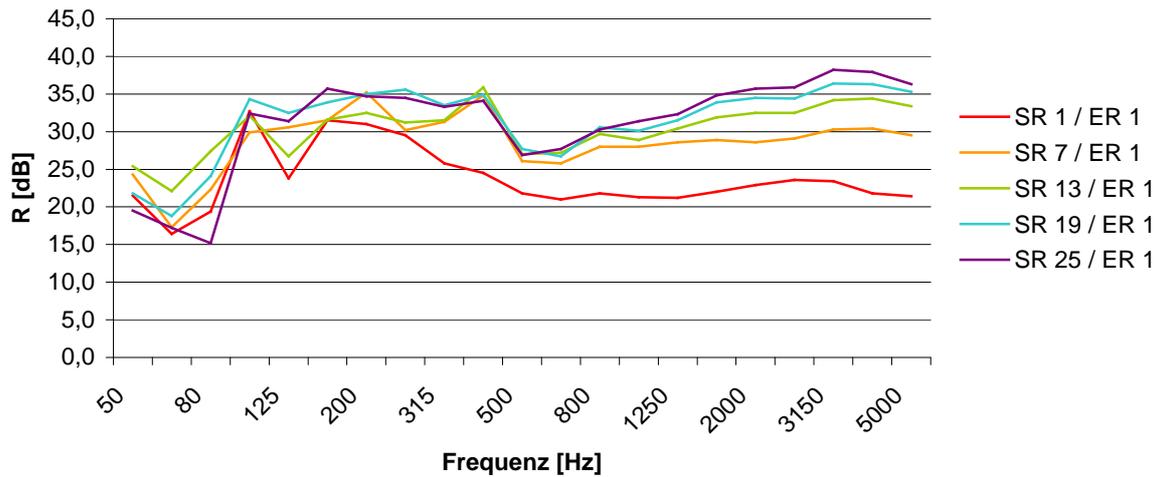


Diag. 7: R-Werte der Struktur beim vollständigen Verschluss einer bzw. beider Schale(n).



Diag. 8: Betragmäßige Differenz zwischen dem frequenzabhängigen R-Wert einer geschlossenen und zweier geschlossener Schale(n).

Dieses Merkmal spiegelt sich auch in den Resultaten der einzelnen Messreihen wider (s. Diag. 9), welche einen weiteren Sachverhalt erkennen lassen: Mit schrittweiser (linearer) Erhöhung des Versatzes nimmt die Wirkung dieser Maßnahme rapide ab. Oder anders betrachtet: Die Öffnungen müssen gar nicht erst allzu weit gegeneinander „verschoben“ werden, um eine deutliche Verbesserung der Schalldämmung zu erwirken.

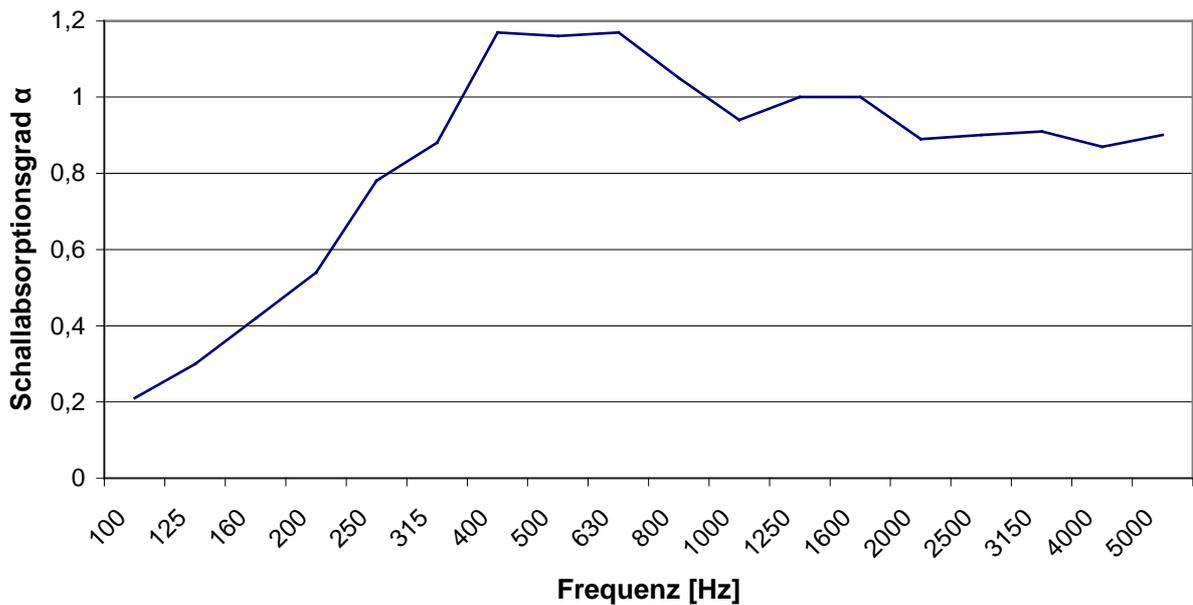


Diag. 9: Schalldämm-Maße der Messreihe 5.

4.4 Aktuelle Strategie

Obgleich die zuvor genannten Messreihen bereits ein großes Spektrum an möglichen Szenarien abdeckten, wurden sie allesamt ohne Applikation eines zusätzlichen Absorptionsmaterials im Schalenzwischenraum durchgeführt. Im Vorfeld der aktuellen Versuche entschied man sich deshalb, diese strategische Dimension einzubinden, und zwar im Zuge einer abermaligen Exekution der Reihen 2, 3 und 7, um eine direkte Vergleichbarkeit der neuen Ergebnisse mit den bereits vorhandenen zu begünstigen.

Unter Berücksichtigung der Frequenzverteilung von Straßenverkehrslärm (s. Kap.2.1.1) als ein entscheidendes Auslegungskriterium für Bedämpfungsmaßnahmen wurde ein Material gewählt (PUR SKIN 50 von Sonatech), dessen breitbandige Absorptionsspitze im Bereich von 400 bis 1600 Hz liegt (s. Diag. 10).



Diag. 10: Der Frequenzverlauf des Schallabsorptionsgrades des gewählten Absorptionsmaterials „Sonatech PUR SKIN 50“. Die Werte >1 könnten darauf hinweisen, dass es bei den Messungen des Herstellers zum Auftreten des Kanteneffekts kam. [Quelle: Sonatech]

Tab. 1: Die α -Werte von „Sonatech PUR SKIN 50“. [Quelle: Sonatech]

Frequenz	100	125	160	200	250	315	400	500	630
α	0,21	0,30	0,42	0,54	0,78	0,88	1,17	1,16	1,17
Frequenz	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
α	1,05	0,94	1,00	1,00	0,89	0,90	0,91	0,87	0,90

Um das 5,0 cm dicke Material an den Schaleninnenseiten applizieren zu können, wurde es auf eine Stückgröße von 42,2 cm (Breite) x 46,2 cm (Höhe) zurechtgeschnitten (s. Abb. 27).

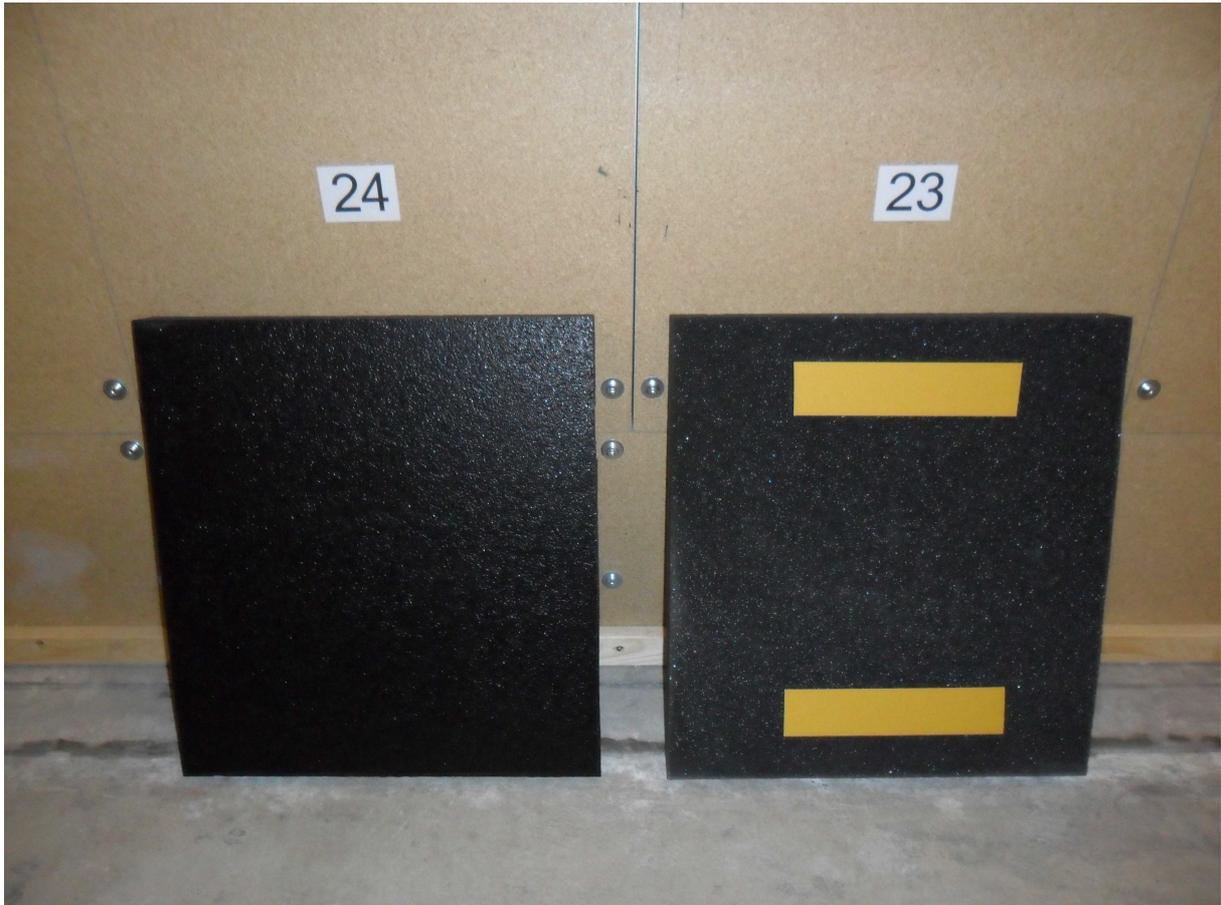


Abb. 27: Zwei zurechtgeschnittene Platten.

Von den vier Schmalseiten abgesehen, wiesen die Platten jeweils eine offen- und eine geschlossenporige Seite auf, wobei nur letzterer die vorhin beschriebenen akustischen Qualitäten zukamen. Dementsprechend wurde die offenporige Seite mit Klebestreifen ausgestattet (s. Abb. 28), um in weiterer Folge die erforderliche Fixierung des Materials zu gewährleisten (s. Abb. 29).



Abb. 28: Vorder- und Klebeseite einer Absorber-Platte.



Abb. 29: Die Innenseite der Empfangsschale. Man erkennt die Stützkonstruktion, die darauf montierten Spanplatten und das von innen auf die Platten geklebte Absorptionsmaterial.

5 Messungen an der Teststruktur

5.1 Messausrüstung

Sowohl im Sende- als auch im Empfangsraum wurde jeweils ein Mikrofon in 132 cm Höhe (Lage der Einlassöffnung) auf einem Stativ befestigt und über ein Kabel mit dem zugehörigen Analysegerät verbunden. Die drahtlose Datenübertragung in den Kontrollraum erfolgte mittels einer Sende-/Empfangseinheit in Form eines Messkoffers, an den der Analysator gekoppelt war. Der Koffer diente zudem als Schnittstelle zum Verstärker und dem daran angeschlossenen Lautsprecher (s. Abb. 30).

Tab. 2: Die für die Messungen verwandten Geräte und *Programme*

	Gerät	Typenbez.	Seriennr.
Senderraum	Mikrofon	Nor1225	
	Vorverstärker f. Mikrofon	Nor1209	12672
	Analysator	Nor140	1403188
	Messkoffer	Nor515	29799
Empfangsraum	Mikrofon	Nor1225	
	Vorverstärker f. Mikrofon	Nor1209	12686
	Analysator	Nor140	1403189
	Messkoffer	Nor515	29800
Kontrollraum	Steueranlage	Nor514	31294
	Notebook	---	---
	<i>CtrlBuild 2.3.88 (Messsoftware)</i>	<i>Nor1028/3</i>	---
	<i>NorBuild 2.3.48 (Analysesoftware)</i>	<i>Nor1028</i>	---
Sonstiges	Kalibrator (114 dB, 1 kHz) (+ Adapter)	Nor1251 (+ Nor1443)	32021
	Verstärker	Nor280	2803622
	Lautsprecher	Nor270(H)	30753

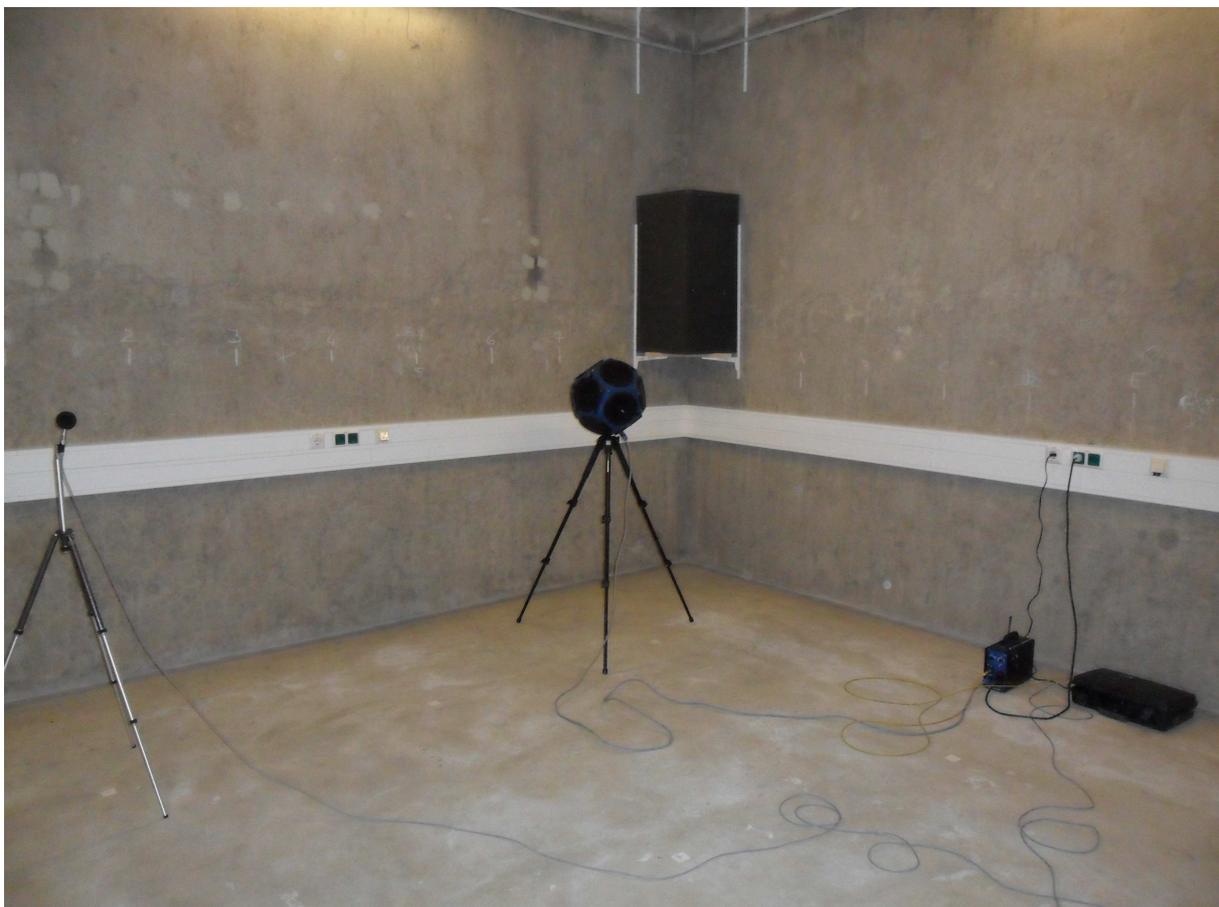


Abb. 30: Mikrofon, Lautsprecher, Verstärker und Messkoffer (v. l. n. r.). Schaumstoffprismen, wie jenes im Hintergrund, dienen im Empfangsraum der Anpassung der Nachhallzeit.

5.2 Messpositionen

Für Messungen der (Luft-)Schalldämmung von Gebäudeteilen im Prüfstand nennt die Norm (EN ISO 10140-4:2010, 4.2.2) einen Mindestabstand von 0,7 m zwischen der Mikrofonposition und den Raumbegrenzungen (bzw. etwaigen Diffusoren), sowie einen Mindestabstand von 1 m zwischen der Mikrofonposition und der Schallquelle. Um diesen Anforderungen in jedem Fall gerecht zu werden, wurden die Messpositionen (s. Abb. 31) so gewählt, dass alle eine Distanz $\geq 1,2$ m zu anderen Objekten aufwiesen (s. Abb. 32).

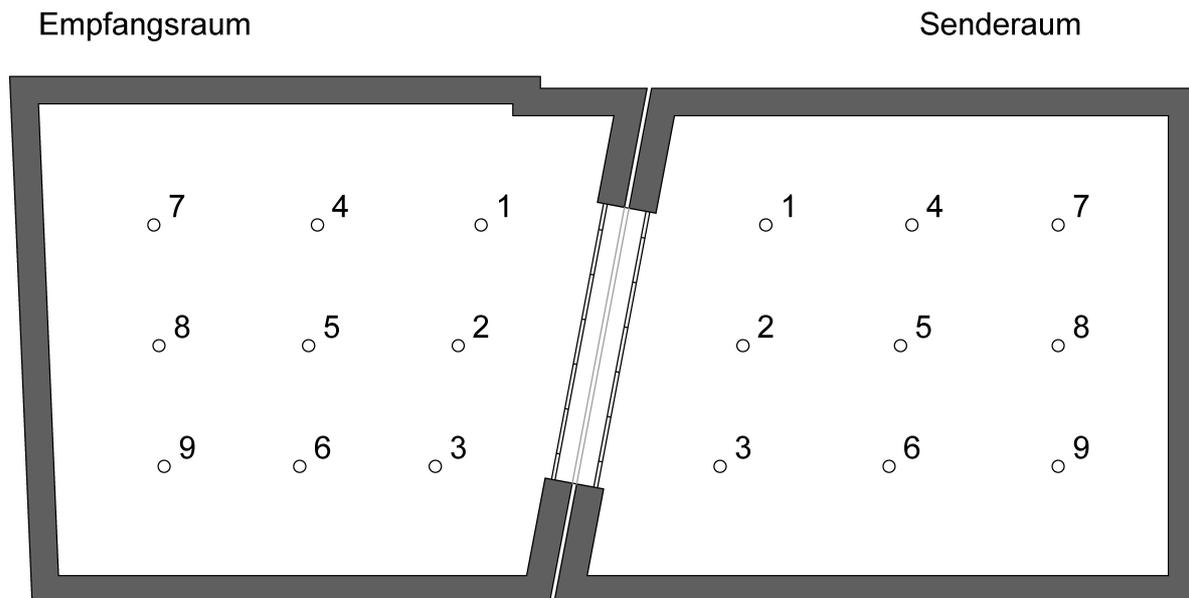


Abb. 31: Die Messpositionen

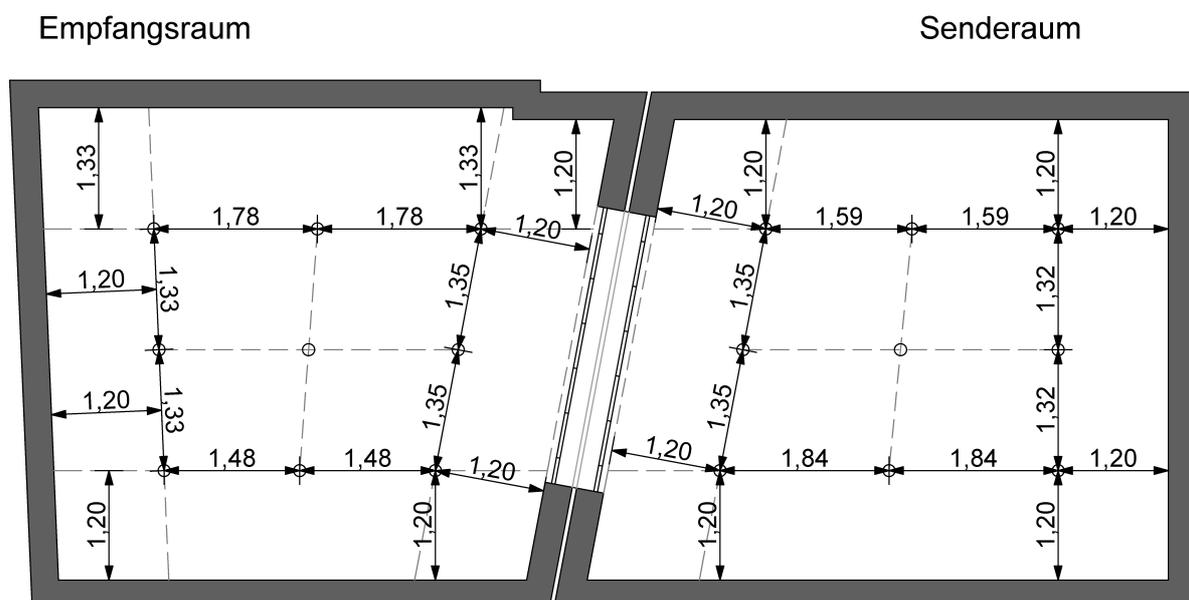


Abb. 32: Der Positionsraster

5.3 Ablauf

Die Ermittlung des Luftschalldämm-Maßes (gem. ÖNORM EN ISO 10140 bzw. ÖNORM EN ISO 717-1) einer beliebigen Konfiguration der zu testenden Doppelwand wurde über 27 Einzelmessungen realisiert, welche sich auf folgende drei Gruppen verteilen:

1. Nachhallzeitmessungen

Zur Eruiierung der Nachhallzeit mittels des Verfahrens mit abgeschaltetem Rauschen wurde der Lautsprecher (im Empfangsraum) entweder bei Pos. 3 oder Pos. 7 (s. Abb. 31) und das Mikrofon bei einer der übrigen Positionen aufgestellt. Mit ein und derselben Anordnung erfolgten dann 2 Messungen (Anregungszeit: 10 Sek.), bevor man das Mikrofon umstellte. Nach insgesamt dreimaligem Wechsel wurde der Lautsprecher zur anderen der beiden Positionen verschoben und das Procedere erneut durchgeführt, sodass also 16 Einzelmessungen zu Stande kamen.

2. Pegelmessungen

Für die eigentlichen Pegelmessungen wurde der Lautsprecher (im Senderraum) entweder bei Pos. 7 oder Pos. 9 (s. Abb. 31) und die beiden Mikrofone (je eines im SR und im ER) bei beliebigen, freien Positionen aufgestellt. Es erfolgte 1 Messung (Dauer: 20 Sek.) und dann eine Umstellung der Mikrofone. Nach insgesamt viermaligem Wechsel wurde der Lautsprecher zur anderen der beiden Positionen verschoben und das Procedere erneut durchgeführt, sodass also 10 Einzelmessungen zu Stande kamen.

3. Störgeräuschmessung

Der im ER vorherrschende Hintergrundgeräuschpegel wurde an einer beliebigen Rasterposition ein Mal (Dauer: 20 Sek.) gemessen.

Sämtliche Größen wurden mit Terzbandfiltern in den Mittenfrequenzen von 50 bis 8.000 Hertz ermittelt. Als Signal – so eines zum Einsatz kam – diente rosa Rauschen.

6 Ergebnisse

Die 32 gewählten und ausgeführten Messanordnungen sowie deren Werte können dem Anhang entnommen werden. Sie zeigen recht eindrücklich, dass die Anwendung des Absorptionsmaterials abseits des von den beiden Öffnungen aufgespannten Versatzes zu keiner wesentlichen Erhöhung des Schalldämm-Maßes führt. Direkt zwischen den Öffnungen konnten damit hingegen bis zu 10 dB bessere Ergebnisse (bzgl. R_w) erzielt werden, die für das menschliche Ohr eine Halbierung des wahrnehmbaren Lärms bedeuten.

Weitere (womöglich allzu überstürzte) Interpretationen wurden zugunsten der Synthese einer empirischen, prädiktiven Gleichung hintangestellt.

6.1 Auswertung vorhandener Gleichungen

Um eine rechnerischen Abschätzung des zu erwartenden frequenzabhängigen Schalldämm-Maßes R einer beliebigen Konfiguration der (absorberfreien) Testwand vornehmen zu können, wurde in [Mahdavi et al. 2011] das „hypothetische“ Schalldämm-Maß R_{cal} eingeführt und durch folgende Zusammenhänge definiert:

$$\Delta R_{cal} = 0,5 * R_{f,max} + 6 * \lg \left[\frac{d}{\lambda} * \left(\frac{S_{open}}{S_{ref}} \right)^2 \right] + 14 * \cos(\theta) + 5 \quad (5)$$

$$R_{cal} = R_{f,max} - \Delta R_{cal} \quad (6)$$

$R_{f,max}$	durch Messungen ermitteltes Schalldämm-Maß der Wandkonfiguration im vollständig geschlossenen Zustand bei der Frequenz f
R_{cal}	„hypothetisches“ Schalldämm-Maß der gewählten Konfiguration bei der Frequenz f
ΔR_{cal}	die betragsmäßige Differenz zwischen dem max. möglichen und dem für die vorliegende Konfiguration errechneten Schalldämm-Maß
d	Abstand (in m) zwischen den Öffnungsbereichen der beiden Wandschalen
λ	Schallwellenlänge (in m) bei der Frequenz f
S_{open}	Öffnungsfläche (in m ²) in einer der beiden Schalen (Es wurde von gleich großen Öffnungsflächen in beiden Schalen ausgegangen.)
S_{ref}	Gesamtfläche aller offenbaren Bereiche einer Schale: 6,25 m ²
θ	Versatzwinkel (in Grad) der beiden Öffnungsbereiche

Wie man den Formeln unschwer entnehmen kann, steht R_{cal} in einer direkten Abhängigkeit zu dem (ohne Absorber) maximal erreichbaren Schalldämm-Maß, wenn also beide Schalen zur Gänze geschlossen sind.

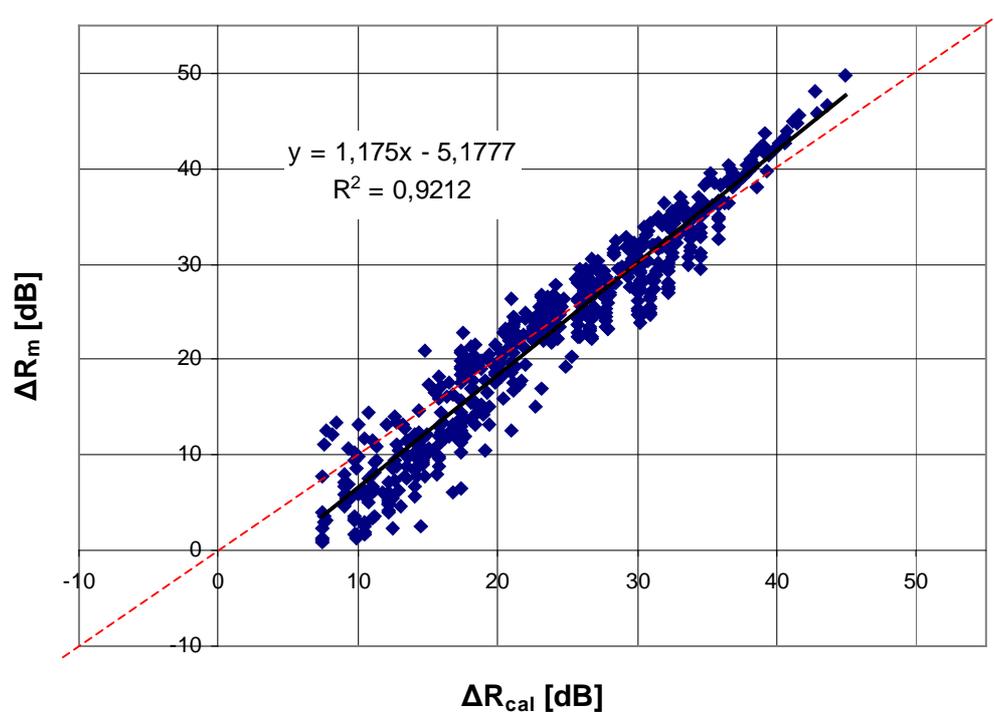
Auch für R_w wurde eine polynomische Näherung vorgestellt:

$$R_{w,cal} = -20 * \lg \frac{S_{open}}{S_{ref}} - 1,8 * \sqrt{\frac{S_{ref}}{d}} + 7 \quad (7)$$

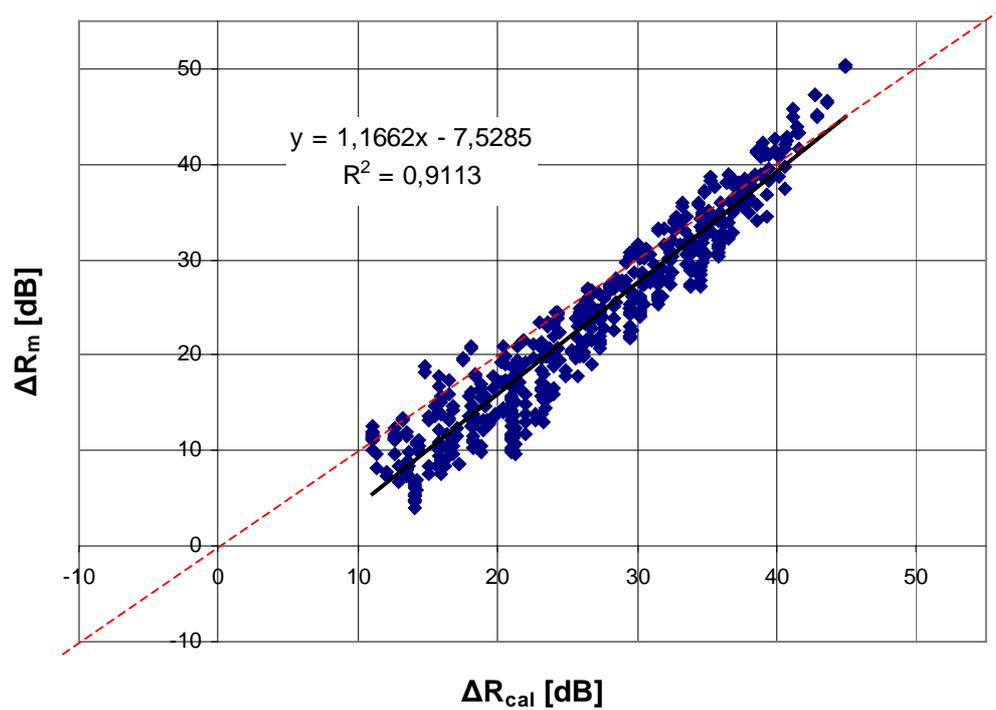
Weiteren Analysen ging die Frage voraus, inwieweit diese Gleichungen mit den unterschiedlichen Messresultaten korrelieren. Dazu wurden sie auf jeweils 32 mit bzw. ohne Absorber getestete Anordnungen angewandt und den entsprechenden Laborergebnissen gegenübergestellt.

6.1.1 Die öffnungsabhängige Reduktion des Schalldämm-Maßes

Der Vergleich der nach der Formel (5) errechneten (ΔR_{cal}) mit den tatsächlichen öffnungsabhängigen Reduktionen der Schalldämm-Maße (ΔR_{m}) ist den Diagrammen 11 und 12 zu entnehmen. Im ersten sind 32 Exp. ohne Absorber und im zweiten 32 Exp. mit Absorber aufgeschlüsselt. Das letztere lässt eine stärkere Überschätzung (und somit eine stärkere Unterschätzung der R-Werte) erkennen, was sich wohl vor allen Dingen darauf zurückführen lässt, dass in der Gleichung eine etwaige Bedämpfung nicht berücksichtigt wird.



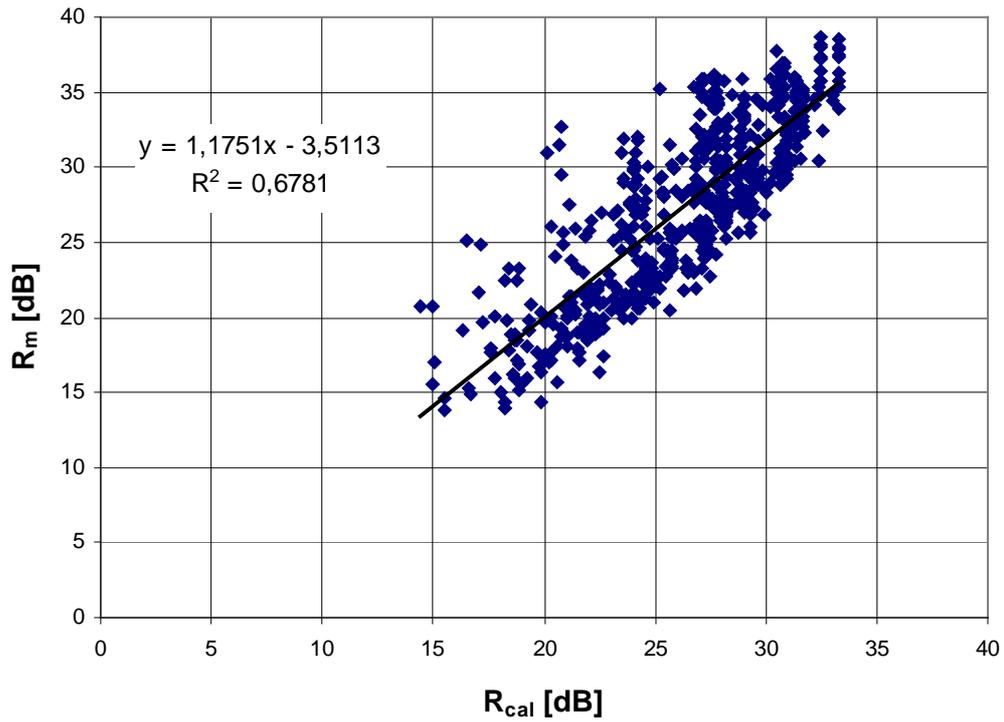
Diag. 11: Öffnungsabhängige Schalldämmreduktion von 32 Anordnungen **ohne** Absorber (100 – 5000 Hz).



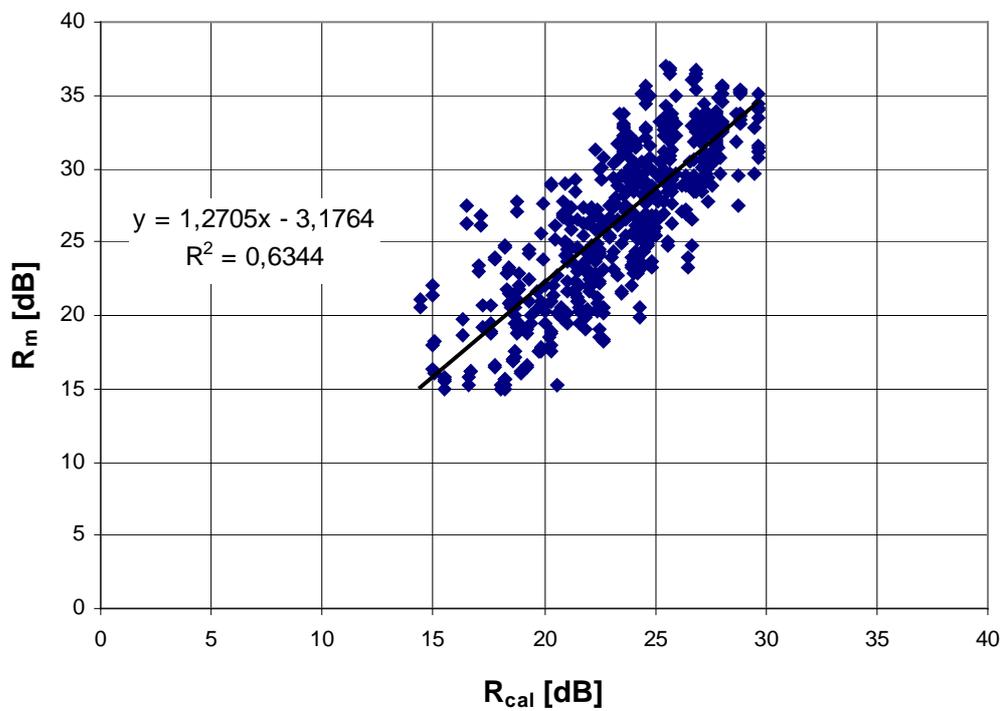
Diag. 12: Öffnungsabhängige Schalldämmreduktion von 32 Anordnungen **mit** Absorber (100 – 5000 Hz). Die Funktionsgerade liegt deutlich unter der Ideallinie $y=x$.

6.1.2 Das Schalldämm-Maß

Der Vergleich der nach der Formel (6) errechneten (R_{cal}) mit den tatsächlichen Schalldämm-Maßen (R_m) ist den Diagrammen 13 und 14 zu entnehmen.



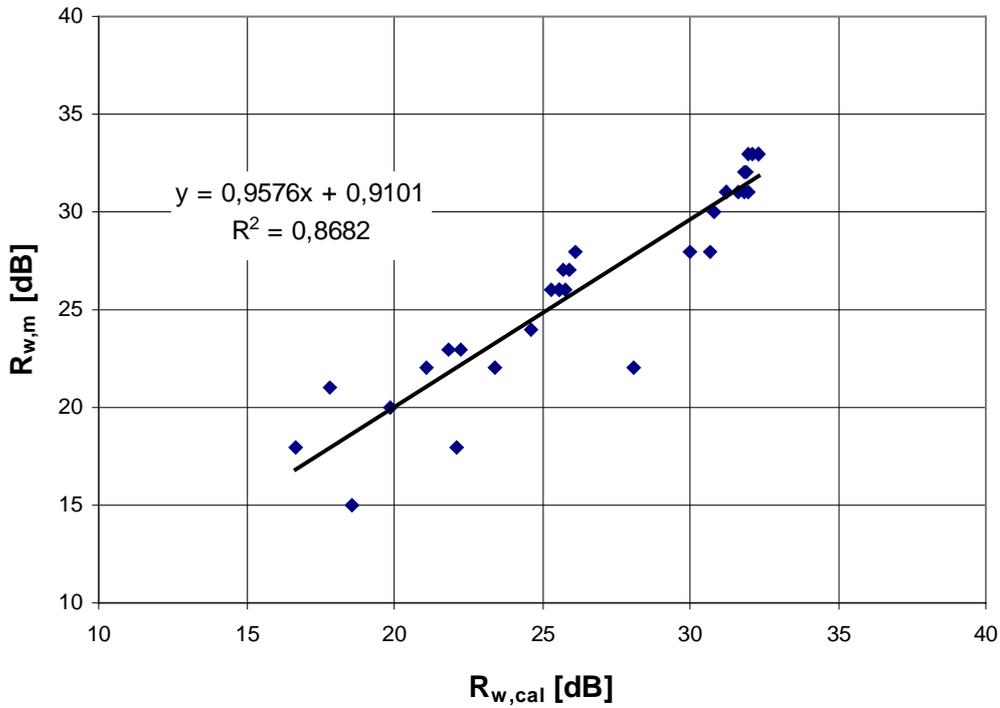
Diag. 13: Schalldämm-Maße von 32 Anordnungen ohne Absorber (100 – 5000 Hz).



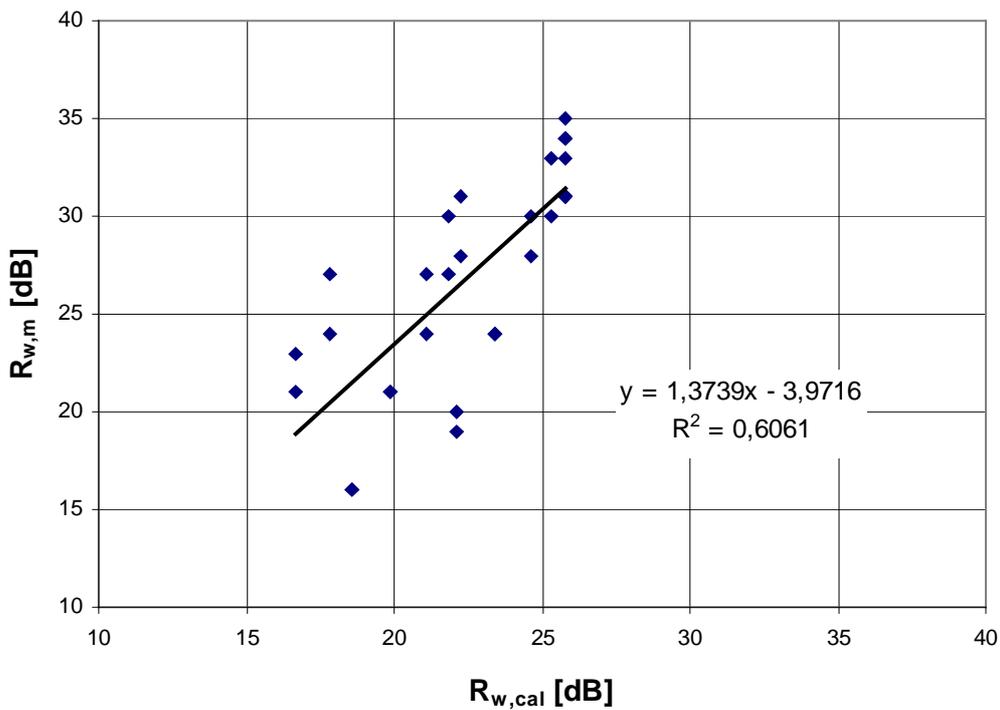
Diag. 14: Schalldämm-Maße von 32 Anordnungen mit Absorber (100 – 5000 Hz).

6.1.3 Das bewertete Schalldämm-Maß

Der Vergleich der nach der Formel (7) errechneten ($R_{w,cal}$) mit den gemessenen bewerteten Schalldämm-Maßen ($R_{w,m}$) führte zu den folgenden Resultaten.



Diag. 15: Bewertete Schalldämm-Maße von 32 Anordnungen ohne Absorber.



Diag. 16: Bewertete Schalldämm-Maße von 32 Anordnungen mit Absorber.

6.2 Herleitung einer Formfaktor-Formel

Da die ehemals entwickelten (und im vorigen Kap. vorgestellten) Gleichungen in Bezug auf die neuen Messungen teilweise keine brauchbare Bestimmtheit mehr erkennen ließen, wurden zwei Maßnahmen erwogen, nämlich zum einen die Erweiterung/Verallgemeinerung der vorhandenen Formeln und zum anderen die Erarbeitung einer neuen. Mit der Wahl des letztgenannten Weges entschied man sich für eine differenzierte Herangehensweise, die darin bestand, mehrere der sowohl in 6.1 als auch in Abb. 22 erwähnten Variablen durch eine einzige „Mastervariable“ zu ersetzen, und zwar dem Formfaktor (engl. „view factor“, kurz: VF).

Obwohl auch nur als Größe der Geometrie (zur bloßen Beschreibung des räumlichen Verhältnisses zweier Körper zueinander) interpretierbar, findet der View Factor heutzutage doch hauptsächlich in der Radiometrie Anwendung, sei es zur Berechnung des Wärmeübergangs von einem Bauteil zu einem anderen oder zur Anfertigung fotorealistischer Renderings. Seine Herleitung kann in einschlägiger Fachliteratur nachvollzogen werden; eine etwas ausführlichere Thematisierung findet sich im Anhang.

Wie beispielsweise in [Nosal 2002] und [Cianfrini et al. 1998] ersichtlich, gab und gibt es in der Forschung durchaus auch Bestrebungen, den VF in der Akustik einzusetzen. Entsprechende Ansätze erwiesen sich in der Vergangenheit gerade dann als erfolgreich, wenn es galt, diffuse Schallfelder in den höheren Frequenzen zu beschreiben, also dort, wo das Wellenverhalten eher in den Hintergrund tritt und man es vorwiegend mit „Schallstrahlen“ zu tun hat. Gerade dann kommt das dem VF immanente physikalische Konzept am meisten zum Tragen.

Die direkte Berechnung konkreter VF ist in vielen Fällen ausgesprochen kompliziert, weshalb im Laufe der Jahre Formelkataloge zusammengestellt wurden, die fallbezogene Lösungen von (41) enthalten (s. [Howell 2012]). Um eine zielgerichtete Wahl treffen zu können, sind ein paar vorbereitende Überlegungen in Hinblick auf die Geometrie, für welche man Formfaktoren eruiieren möchte, erforderlich.

Sämtliche Oberflächen der Testwand weisen die beiden Eigenschaften auf, rechteckig und relativ zu allen anderen Oberflächen in einem orthogonalen Raster angeordnet zu sein. Letzteres gilt auch für die Kanten. Aus diesem Grund ist es legitim, jede euklidisch-geometrische Beziehung, in der zwei beliebige Oberflächen zueinander stehen könnten, mit einem der beiden in den Abb. 33 und 34 dargestellten Fälle gleichzusetzen.

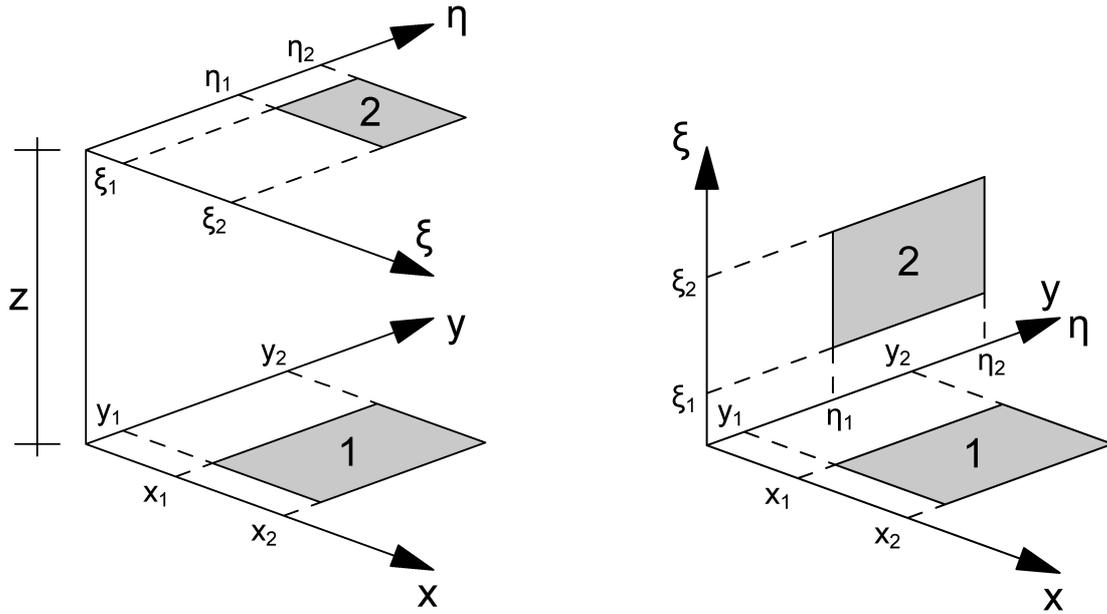


Abb. 33 + 34: Zwei Fälle der Anordnung rechteckiger Sende- (1) bzw. Empfangsflächen (2) zueinander. [Howell 2012]

Dabei gilt für die linke Anordnung:

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 [(-1)^{(i+j+k+l)} G(x_i, y_j, \eta_k, \xi_l)] \quad (8)$$

mit

$$G = \frac{1}{2\pi} \left(\begin{array}{l} (y - \eta)[(x - \xi)^2 + z^2]^{0,5} \tan^{-1} \left\{ \frac{y - \eta}{[(x - \xi)^2 + z^2]^{0,5}} \right\} \\ + (x - \xi)[(y - \eta)^2 + z^2]^{0,5} \tan^{-1} \left\{ \frac{x - \xi}{[(y - \eta)^2 + z^2]^{0,5}} \right\} \\ - \frac{z^2}{2} \ln[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2] \end{array} \right) \quad (9)$$

Für den rechten Fall ist ebenfalls (8) heranzuziehen, allerdings errechnet sich G gemäß:

$$G = \frac{1}{2\pi} \left\{ \begin{array}{l} (y - \eta)(x^2 + \xi^2)^{0,5} \tan^{-1}(K) \\ - \frac{1}{4} \left[(x^2 + \xi^2) \ln(1 + K^2) - (y - \eta)^2 \ln\left(1 + \frac{1}{K^2}\right) \right] \end{array} \right\} \quad (10)$$

mit

$$K \equiv \frac{(y - \eta)}{(x^2 + \xi^2)^{0,5}} \quad (11)$$

Um die Formeln auf die Teststruktur des Labors anzuwenden, könnte man ihre tatsächliche Geometrie betrachten. Tatsächlich wurde jedoch – aus praktischen Gründen – ein vereinfachtes Modell gewählt. Abb. 35 zeigt anschaulich, wie sich die Doppelwand als Quader interpretieren und in eine sinnvolle Anzahl an Elementen aufteilen lässt. 2 x 49 Rechtecke repräsentieren die beiden Layer: 25 (50 x 50 cm große) Quadrate bilden den Bereich der abnehmbaren Spanplatten, wobei sich die Segmentierung des Rahmens (=> 24 Teile statt nur 4; s. Abb. 26) an diesem Raster orientiert und so die Verteilung der dortigen Werte mit höherer „Auflösung“ ersichtlich macht. Ein 28-teiliger, 35 cm breiter (gedachter) Rand verbindet die beiden Scheiben und schließt das Modell zu einem System, in dem die Summe der Formfaktoren aller Empfängerflächen 1 (=> Kontrollgröße) ergeben muss. Die Werte für x, y, ξ, η leiten sich aus Abb. 25 ab.

$$\begin{aligned}
 (F_{S1 \rightarrow E1} + F_{S1 \rightarrow E2} + F_{S1 \rightarrow E3}) * S1 &= (0,000621 + 0,000549 + 0,000396) * 1/3 = 0,000522 \\
 (F_{S2 \rightarrow E1} + F_{S2 \rightarrow E2} + F_{S2 \rightarrow E3}) * S2 &= (0,000549 + 0,000621 + 0,000549) * 1/3 = 0,000573 \\
 (F_{S3 \rightarrow E1} + F_{S3 \rightarrow E2} + F_{S3 \rightarrow E3}) * S3 &= (0,000396 + 0,000549 + 0,000621) * 1/3 = 0,000522
 \end{aligned}$$

View Factor der Empfängeröffnung: 0,001617

	0,000154	0,000253	0,000396	0,000549	0,000621	
	0,000253	0,000490	0,000946	0,001604	0,001978	
	0,000396	0,000946	0,002531	0,006511	0,009979	
	0,000549	0,001604	0,006511	0,037728	0,094979	
	0,000621	0,001978	0,009979	0,094979	0,304417	

Abb. 36: Formfaktor-Tabelle (Schalenabstand: 35 cm). Die Sendefläche befindet sich gegenüber der Fläche mit der rot gekennzeichneten Zahl.

	E1				S1 (0,33)	
	E2				S2 (0,33)	
	E3				S3 (0,33)	

Abb. 37: Anschauungsbeispiel (hellgrau: senderraumseitige Öffnungen; dunkelgrau: empfangsraumseitige Öffnungen) unter der Annahme, dass die Sendefläche insg. 100 % Energie emittiert.

0,000154	0,000253	0,000396	0,000549	0,000621	0,000549	0,000396	0,000253	0,000154
0,000253	0,000490	0,000946	0,001604	0,001978	0,001604	0,000946	0,000490	0,000253
0,000396	0,000946	0,002531	0,006511	0,009979	0,006511	0,002531	0,000946	0,000396
0,000549	0,001604	0,006511	0,037728	0,094979	0,037728	0,006511	0,001604	0,000549
0,000621	0,001978	0,009979	0,094979	0,304417	0,094979	0,009979	0,001978	0,000621
0,000549	0,001604	0,006511	0,037728	0,094979	0,037728	0,006511	0,001604	0,000549
0,000396	0,000946	0,002531	0,006511	0,009979	0,006511	0,002531	0,000946	0,000396
0,000253	0,000490	0,000946	0,001604	0,001978	0,001604	0,000946	0,000490	0,000253
0,000154	0,000253	0,000396	0,000549	0,000621	0,000549	0,000396	0,000253	0,000154

Abb. 38: Das in die „aufgespiegelte“ Wertetab. eingesetzte Anschauungsbeispiel. Die in den dunkelgrauen Zellen ablesbaren Zahlen geben die VF dieser Felder (von S1 (rot) aus) an.

Der nächste Schritt könnte nun darin bestehen, zusätzlich zur direkten Transmission zwischen den Öffnungen sowohl die indirekten Anteile (\Rightarrow die auf ihrem Weg von der SR- zur ER-Öffnung an den Wandinnenseiten reflektierten Schallstrahlen) als auch den Einfluss des Absorptionsmaterials in die Berechnungen einzubeziehen. Da der erste Punkt wohl zu einer erheblichen Erhöhung der Komplexität eines Lösungsalgorithmus geführt hätte (was dem Ziel, dem Planer ein einfaches Werkzeug zur Auslegung solcher Fassaden verfügbar zu machen zuwider gelaufen wäre), nahm man vorerst davon Abstand, diesbezüglich vertiefende Überlegungen anzustellen.

Betreffend des zweiten Punktes sei der im Kap. 6 erwähnte Umstand, wonach die Absorber abseits des Versatzbereichs nur geringen Einfluss auf die Verbesserung des R-Wertes der Wand hatten, in Erinnerung gerufen. Demnach könnte der für eine rechnerische Abschätzung des R-Wertes relevante Absorptionsbereich wie in Abb. 39 ersichtlich festgelegt werden.

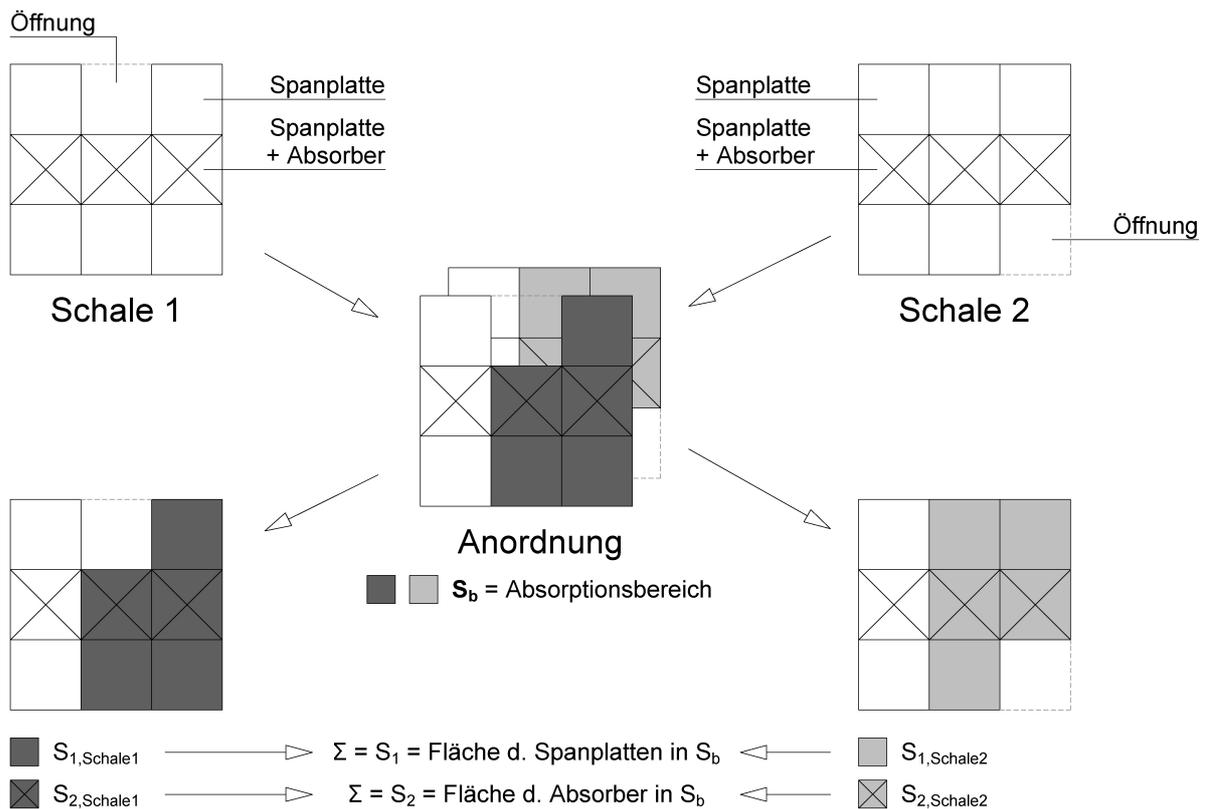


Abb. 39: Die Öffnungen definieren die zwei, beidseitig zwischen ihnen angeordneten Absorptionsbereiche. Zusammengenommen ergeben diese S_b.

Die Formel zur Berechnung des Absorptionsgrades α_b des betrachteten Bereichs ergibt sich direkt aus der Gleichung für den *flächengewogenen mittleren Absorptionsgrad* $\bar{\alpha}$ (s. Kap. 9.4) und lautet im Fall $S_b > 0$:

$$\alpha_b = \bar{\alpha}_b = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i * \alpha_i)}{S_b} \quad (12)$$

Dieser Zusammenhang ist zwar schon durch die Definiton von $\bar{\alpha}$ gegeben, kann jedoch auch ganz einfach nachgewiesen werden: Die äquivalente Absorptionsfläche A_b errechnet sich (gem. [Beranek 2006]) sowohl aus der gesamten betrachteten Fläche S_b und ihrem Absorptionsgrad α_b , als auch (alternativ) aus den Teilflächen S_i und deren Absorptionsgraden α_i :

$$A_b = S_b * \alpha_b \quad (13)$$

und

$$A_b = \sum_{i=1}^n (S_i * \alpha_i) \quad (14)$$

Umformen ergibt dann die Formel (12), wobei die Iterationsgrenze n im gegenständlichen Fall ohne weiteres auch auf 2 gesetzt werden darf, da es ja nur die beiden Möglichkeiten „Spanplatte“ und „Sonatech PUR SKIN 50“ gibt.

6.2.1 Das idealisierte Modell

Um den View Factor schlussendlich mit dem Schalldämm-Maß in Verbindung zu bringen, wurde folgendes Szenario angenommen: Zu der im Fall der vollkommen geschlossenen Wand übertragenen Leistung kommt im allgemeinen Fall jene Leistung hinzu, die durch die Öffnungen dringt (s. Abb. 40). Dabei wird die Absorption des Zwischenraums (s. im vorigen Abschnitt) in Form eines flächengewogenen mittleren Reflexions- resp. Transmissionsfaktors $(1 - \bar{\alpha})$ berücksichtigt.

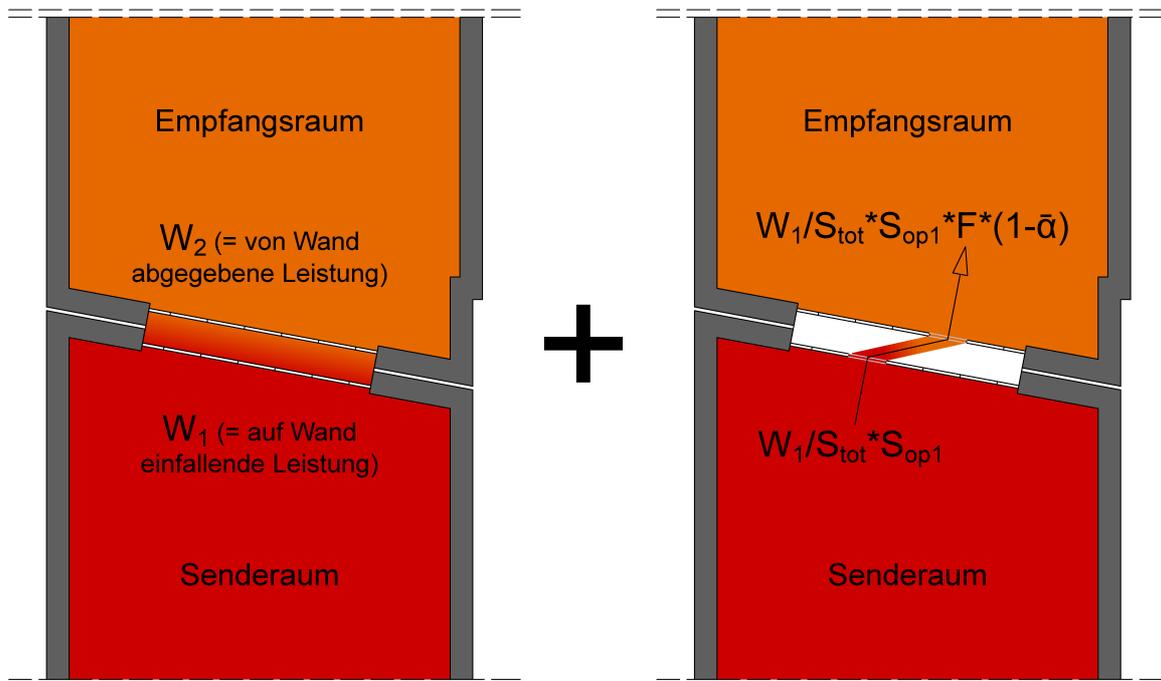


Abb. 40: Um die Gesamttransmission des Testobjekts zu bestimmen, wird zu der im vollkommen geschlossenen Zustand übertragenen „Grundleistung“ (links) die durch die Öffnungen entstehenden „Schallbrücken“ (rechts) hinzuaddiert.

W_1 und W_2 beziehen sich auf die gleiche Messung wie die in Kap. 6.1 verwandte Größe $R_{f,max}$, weshalb sie fortan konsequenterweise mit $W_{f,max,1}$ bzw. $W_{f,max,2}$ abgekürzt werden.

Wegen der allgemeinen Beziehung $R = -10 * \lg \left(\frac{W_2}{W_1} \right)$ gilt dann

$$R_{cal} = -10 * \lg \left[\frac{W_{f,max,2} + \frac{W_{f,max,1}}{S_{tot}} * S_{op1} * F_{op1 \rightarrow op2} * (1 - \bar{\alpha}_b)}{W_{f,max,1}} \right] = \quad (15)$$

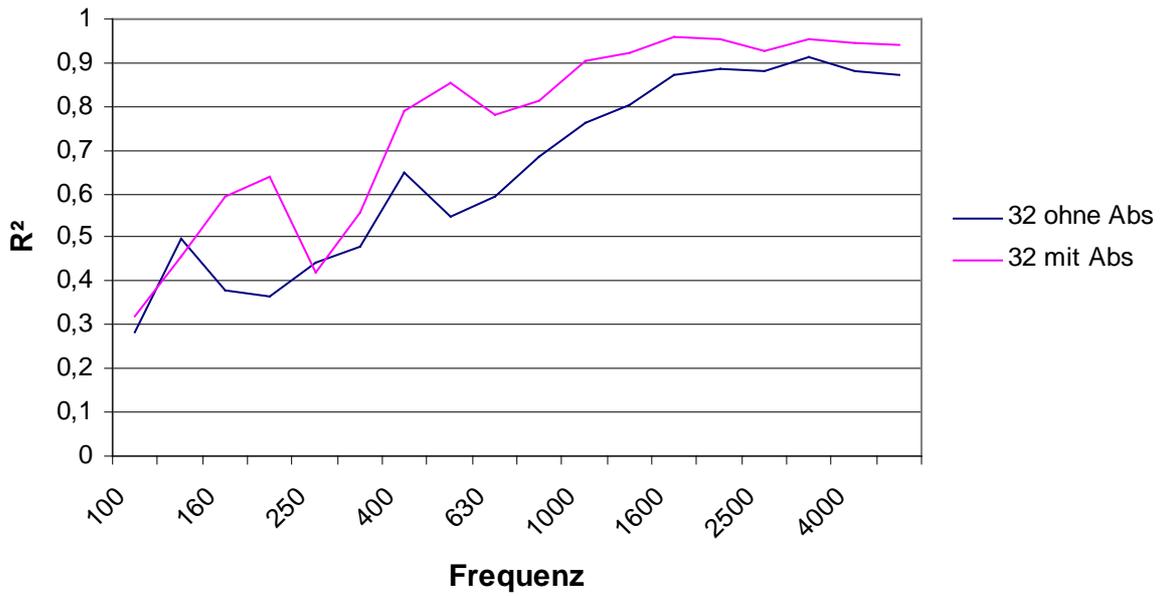
$$= -10 * \lg \left[\frac{W_{f,max,2}}{W_{f,max,1}} + \frac{S_{op1} * F_{op1 \rightarrow op2} * (1 - \bar{\alpha}_b)}{S_{tot}} \right]$$

und schließlich:

$$R_{cal} = -10 * \lg \left[10^{-0,1 * R_{f,max}} + \frac{S_{op1} * F_{op1 \rightarrow op2} * (1 - \bar{\alpha}_b)}{S_{tot}} \right] \quad (16)$$

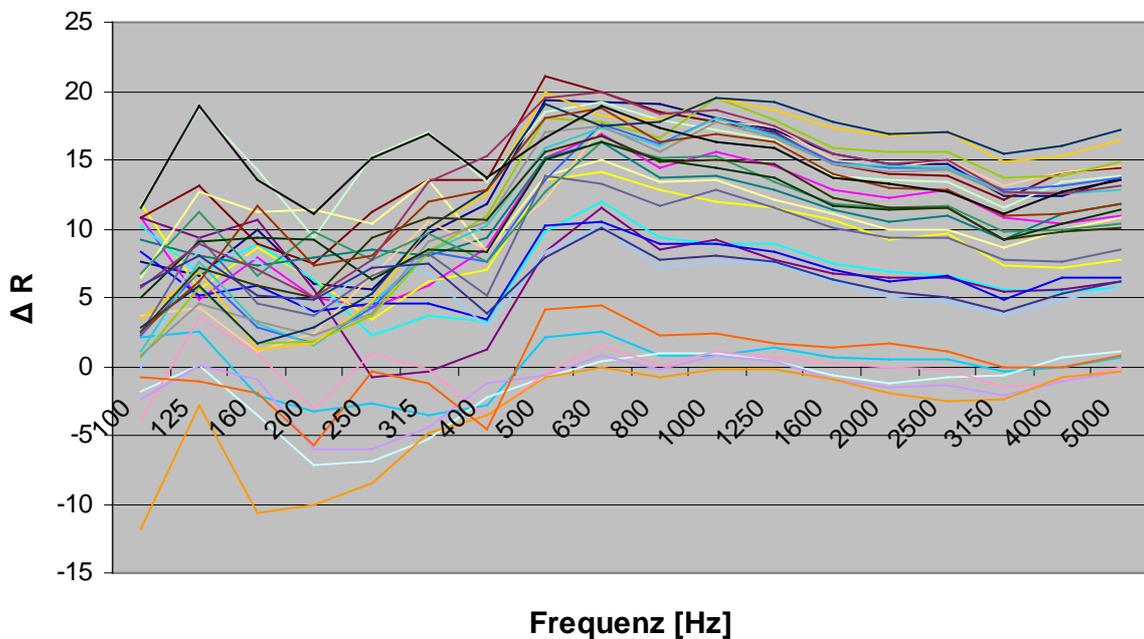
R_{cal}	„hypothetisches“ Schalldämm-Maß der gewählten Konfiguration bei der Frequenz f
$W_{f,max,1}$	Schalleistung bei der Frequenz f im Senderaum
$W_{f,max,2}$	Schalleistung im vollständig geschlossenen Zustand bei der Frequenz f im Empfangsraum
S_{op1}	Öffnungsfläche (in m ²) in der Schale des Senderaums
$F_{op1 \rightarrow op2}$	Gesamtformfaktor von den sende- zu den empfangsraumseitigen Öffnungen
$\bar{\alpha}_b$	flächengewogener mittlerer Absorptionsgrad gem. Kap. 6.2
S_{tot}	Gesamtfläche aller offenbaren Bereiche einer Schale: 6,25 m ²
$R_{f,max}$	durch Messungen ermitteltes Schalldämm-Maß der Wandkonfiguration im vollständig geschlossenen Zustand bei der Frequenz f

Wie in Diag. 17 ersichtlich, zeigt (16) in den höheren Frequenzen eine deutlich bessere Performance, als in den tiefen.

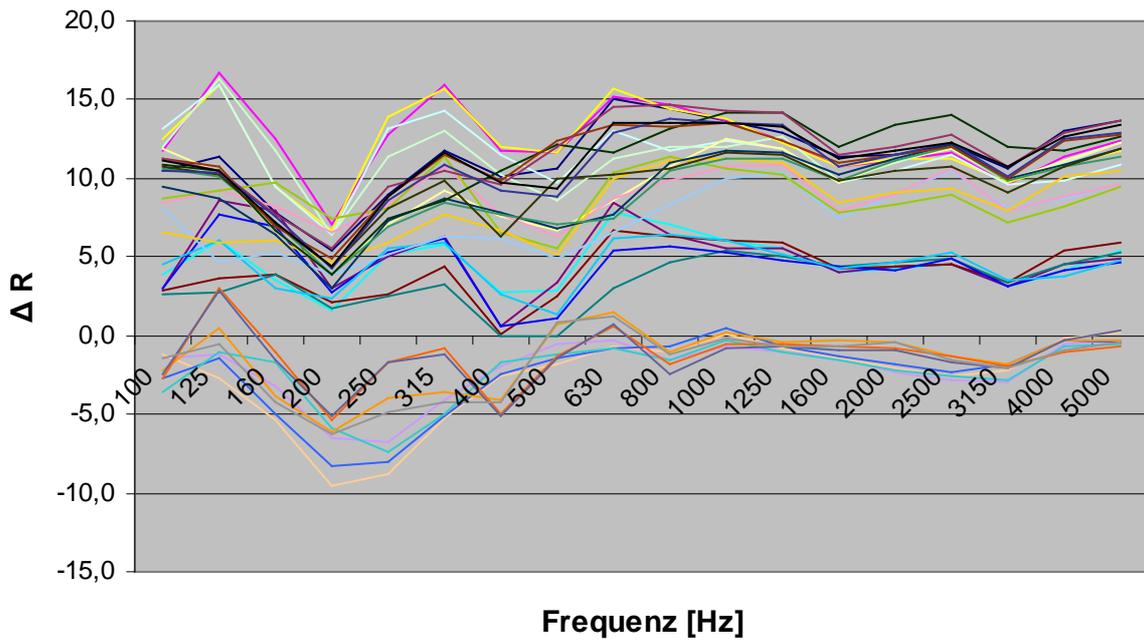


Diag. 17: Frequenzabhängige Bestimmtheit der 64 Fälle durch (16).

Schlüsselt man die Abweichungen der berechneten Schalldämm-Maße (von den gemessenen) der Frequenz nach auf (s. Diag. 18 und Diag. 19), so lässt sich ganz deutlich eine Abstufung ausmachen.



Diag. 18: Frequenzabhängige Differenz: $R_{cal} - R_m$ (32 Messungen ohne Absorber)



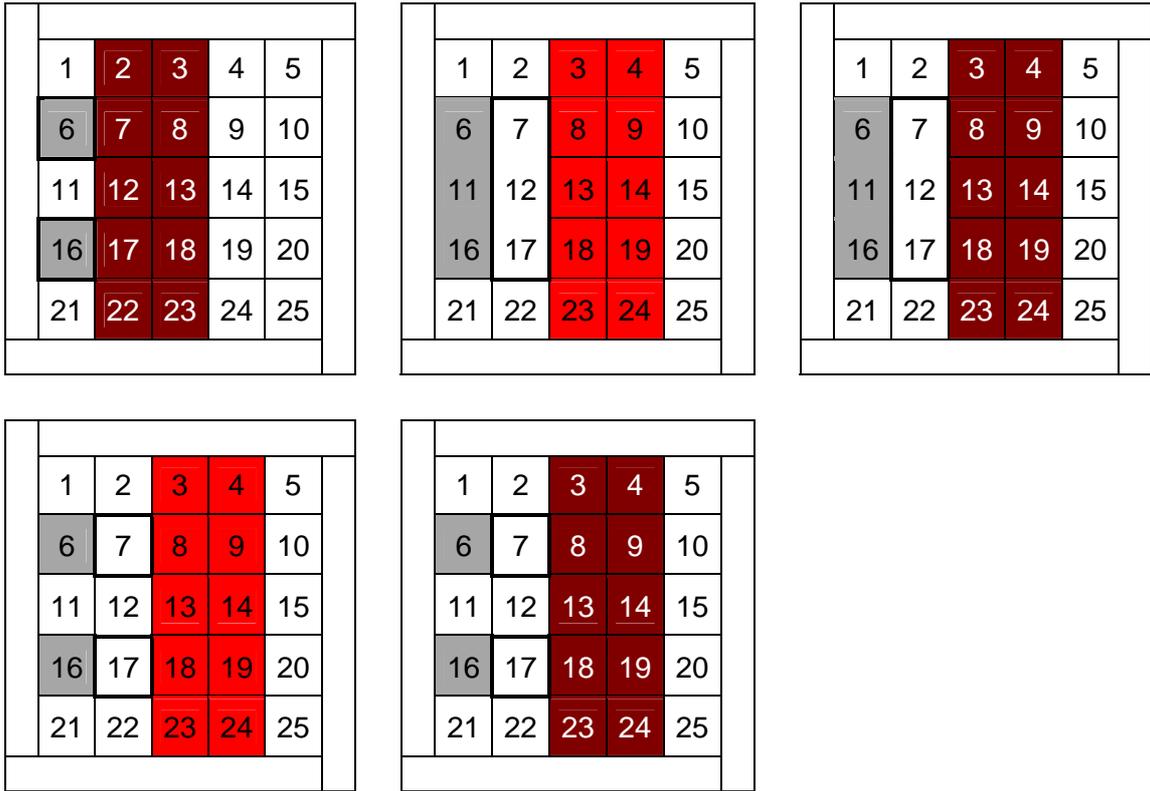
Diag. 19: Frequenzabhängige Differenz: $R_{cal} - R_m$ (32 Messungen mit Absorber)

Das unterste Kurvenbündel im Diag. 19 kann den in Diag. 20 dargestellten 8 Messanordnungen und das mittlere Bündel den in Diag. 21 dargestellten 6 Messanordnungen zugeordnet werden (grau: ER-seitige Öffnung(en); schwarz umrandet: SR-seitige Öffnung(en); hellrot: Absorber ER-seitig appliziert; dunkelrot: Absorber ER- und SR-seitig appliziert). Zusammen mit den übrigen 18 (oberstes Bündel) bilden sie die im Anhang angeführte Liste.

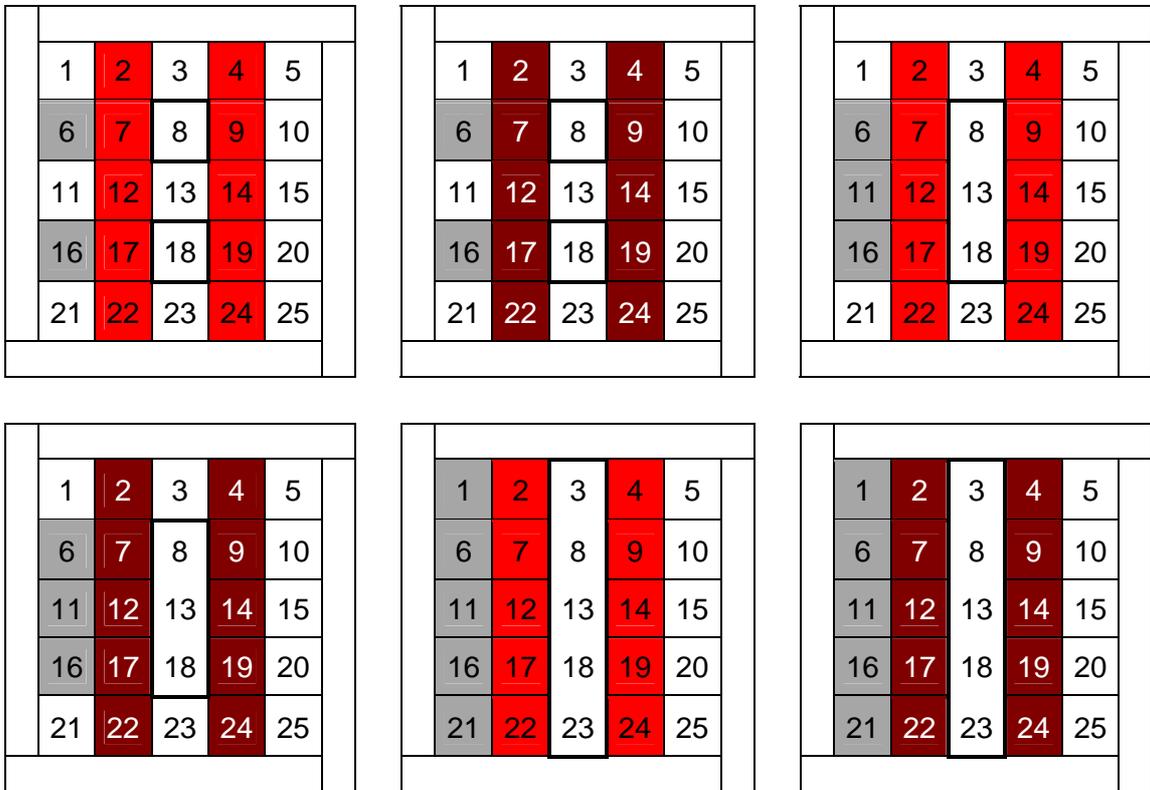
1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25



Diag. 20: Jene 8 Messanordnungen, die zur untersten Kurvenschar in Diag. 19 führten.



Diag. 21: Jene 6 Messanordnungen, die zur mittleren Kurvenschar in Diag. 19 führten.

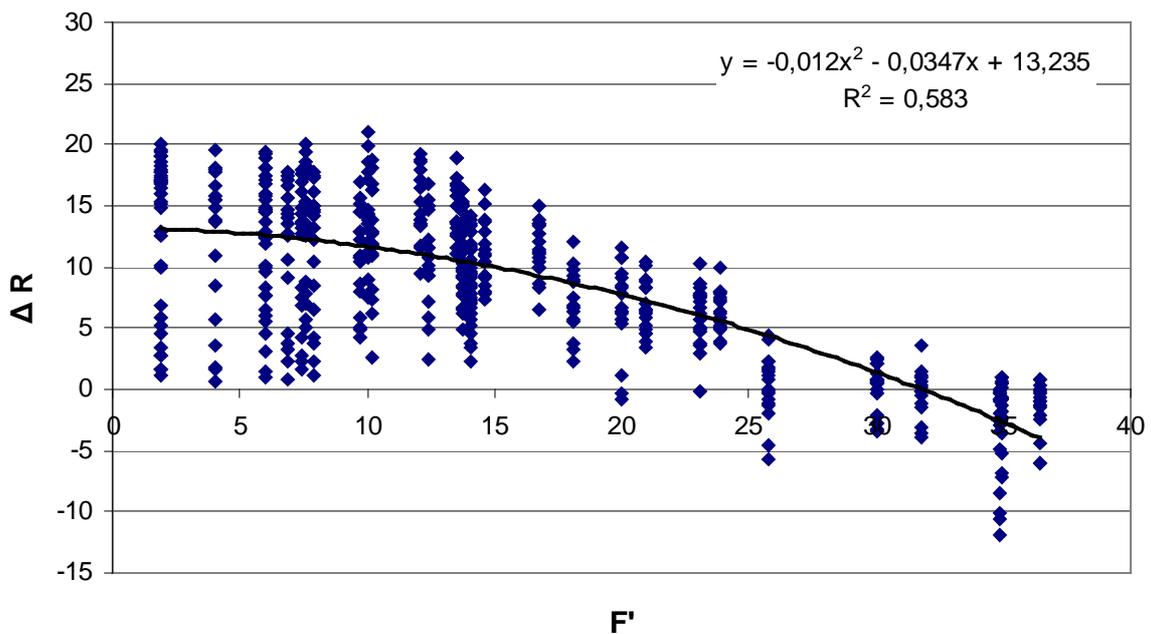
Um zu eruieren, ob ein Zusammenhang zwischen diesen Bündelungen und dem View Factor, der ja schließlich einige wesentliche Messparameter in sich vereint, besteht, wurde die (aus Gründen der Darstellbarkeit abgeleitete) Größe F' in Diag. 22, Diag. 23 u. Diag. 24 ΔR gegenübergestellt. Sie ist durch

$$F' = 10 * \lg\left(\frac{F_{1 \rightarrow 2}}{F_{ref}}\right) \quad (17)$$

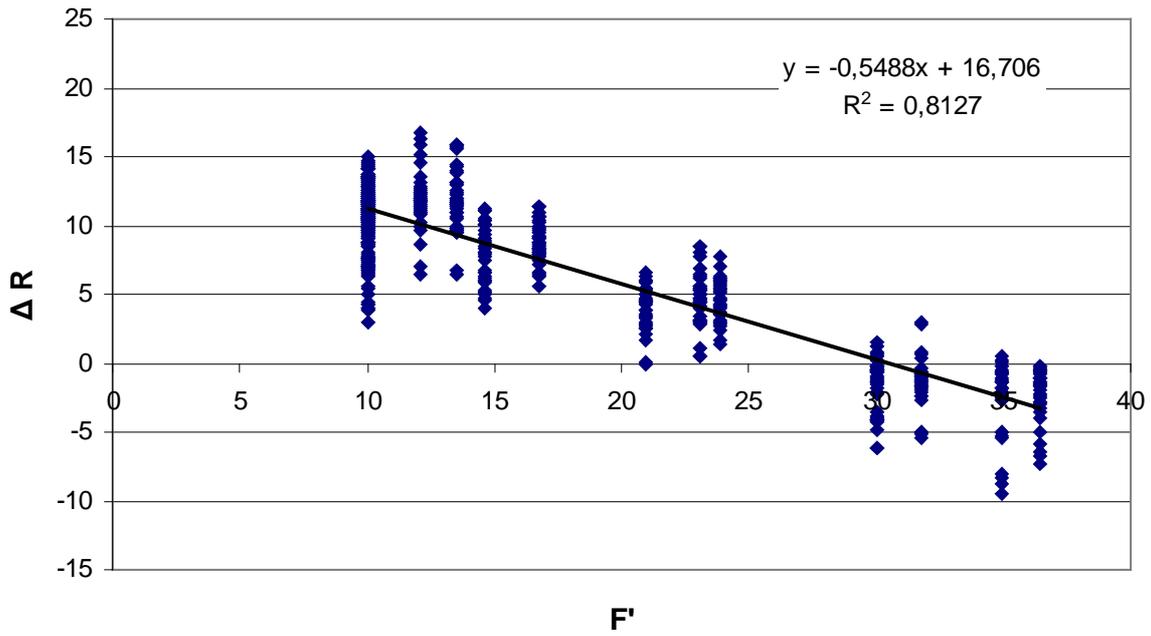
definiert, wobei $F_{ref} \in R \mid 0 < F_{ref} < F_{1 \rightarrow 2, \min}$.

$F_{1 \rightarrow 2, \min}$ wiederum ist der kleinste View Factor, der im Rahmen der betrachteten Messungen vorkommt; in unserem Fall: 0,000154. Mit $F_{ref} = 0,0001$ wird aus (17):

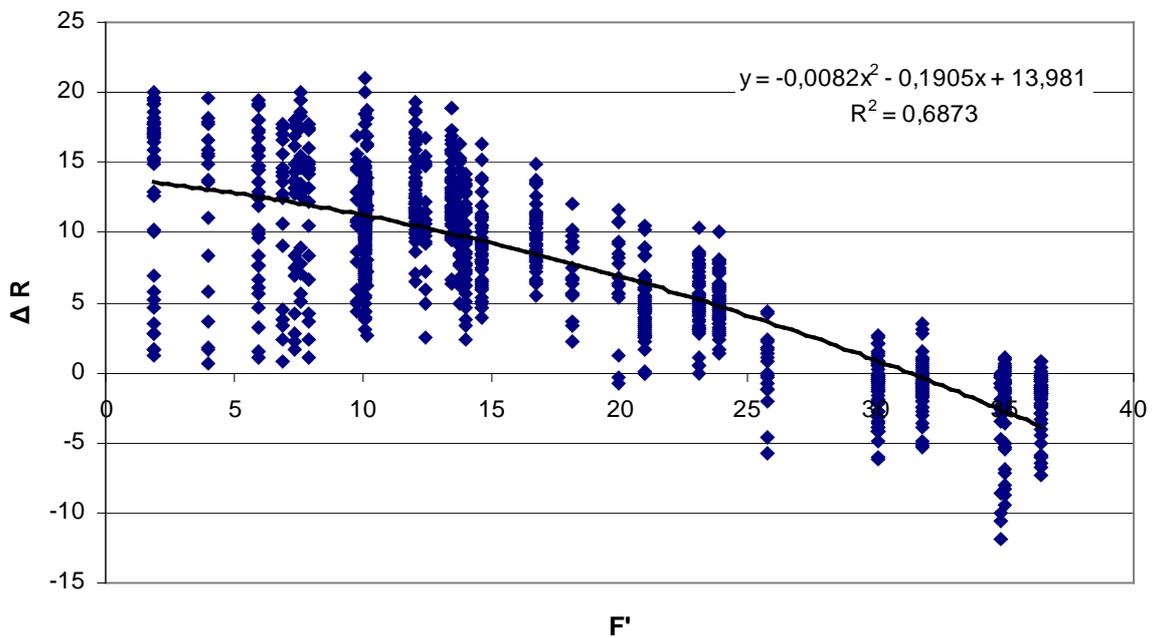
$$F' = 10 * \lg\left(\frac{F_{1 \rightarrow 2}}{0,0001}\right) \quad (18)$$



Diag. 22: Frequenzabhängige Differenz: $R_{cal} - R_m$, gem. (32 Messungen ohne Absorber)



Diag. 23: Frequenzabhängige Differenz: $R_{\text{cal}} - R_{\text{m}}$, gem. (32 Messungen mit Absorber)

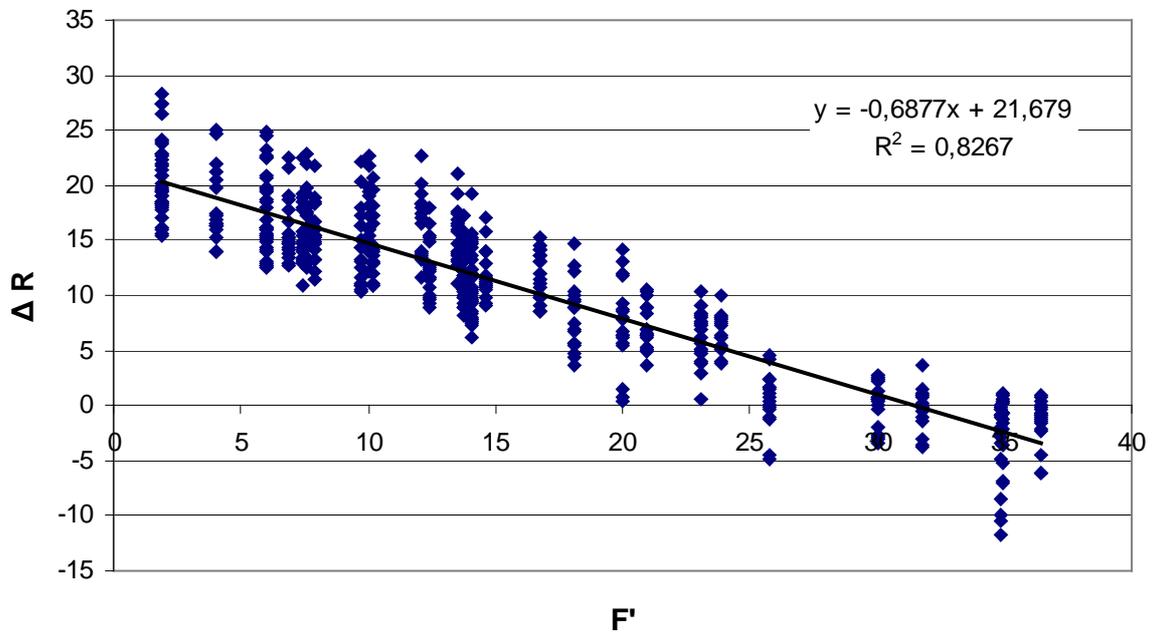


Diag. 24: Frequenzabhängige Differenz: $R_{\text{cal}} - R_{\text{m}}$, gem. (alle 64 Messungen)

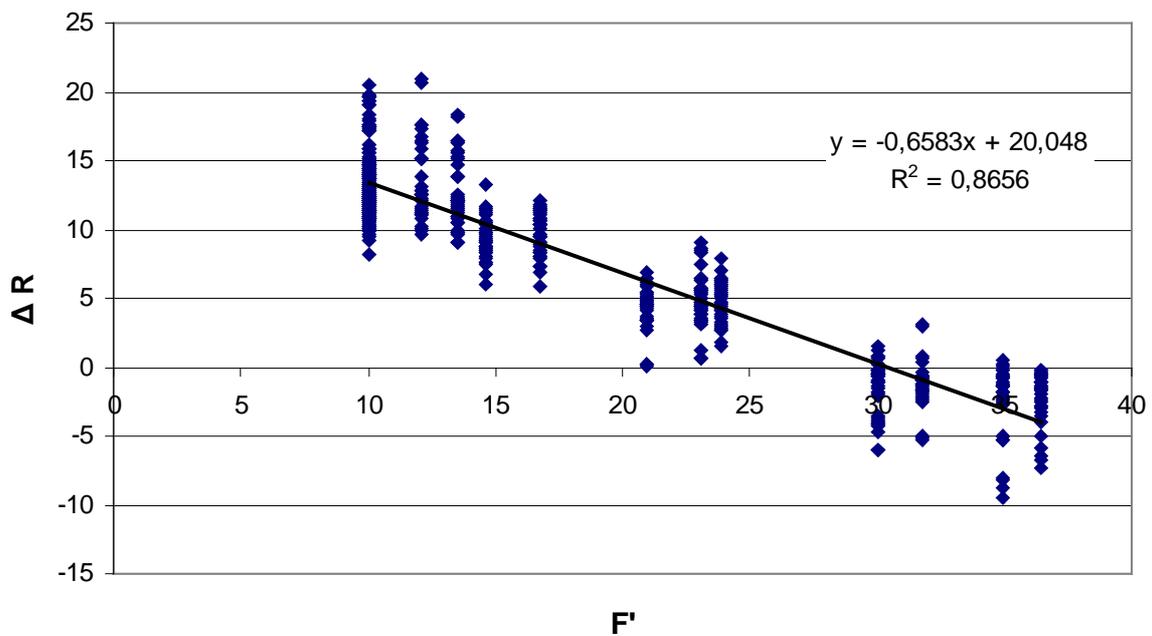
Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Vernachlässigung der „Grundleistung“ in (16) und somit die Reduktion auf

$$R_{cal} = -10 * \lg \left[\frac{S_{op1} * F_{op1 \rightarrow op2} * (1 - \bar{\alpha}_b)}{S_{tot}} \right] \quad (19)$$

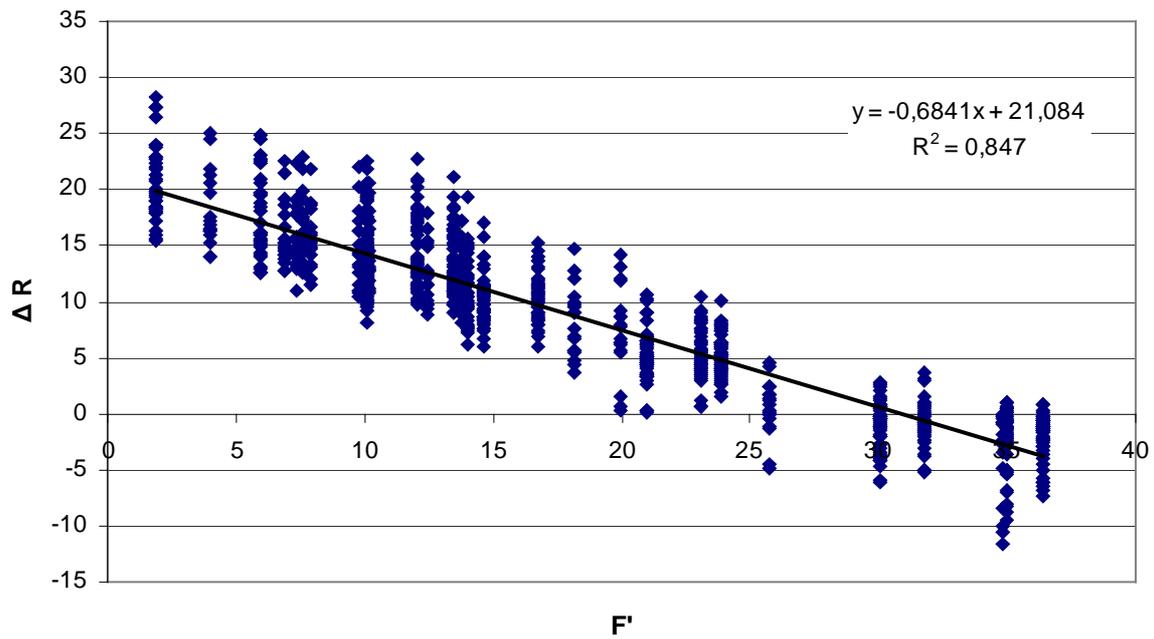
zu folgenden Ergebnissen führt:



Diag. 25: Frequenzabhängige Differenz: $R_{cal} - R_m$, gem. Formel (19) (32 Messungen ohne Absorber)



Diag. 26: Frequenzabhängige Differenz: $R_{cal} - R_m$, gem. Formel (19) (32 Messungen mit Absorber)

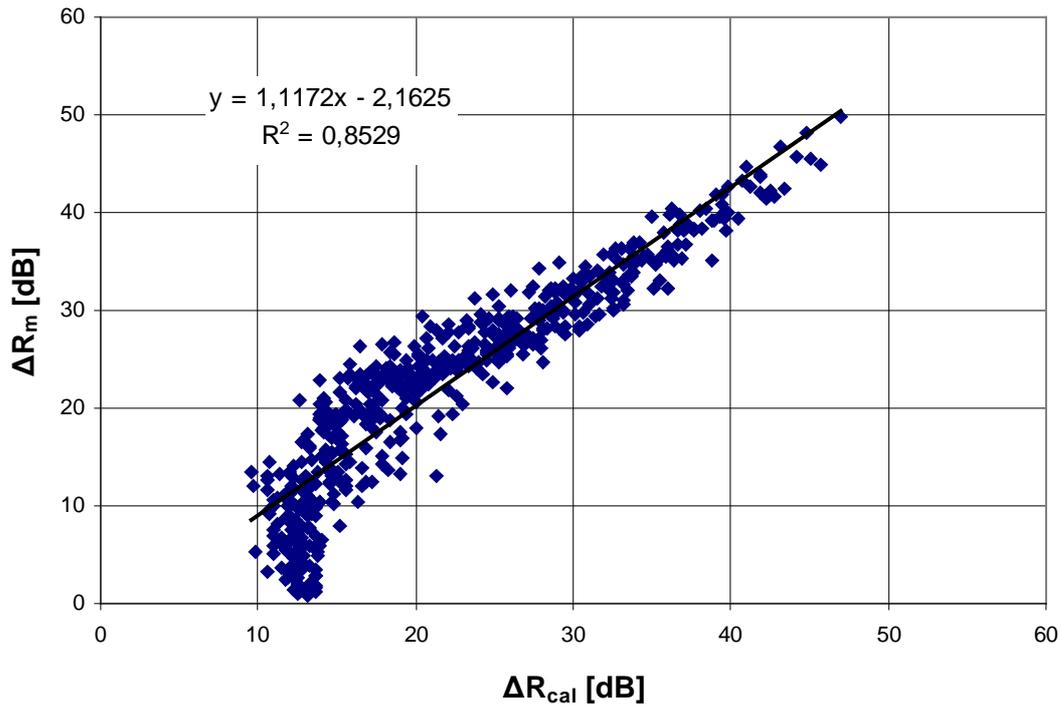


Diag. 27: Frequenzabhängige Differenz: $R_{cal} - R_m$, gem. Formel (19) (alle 64 Messungen)

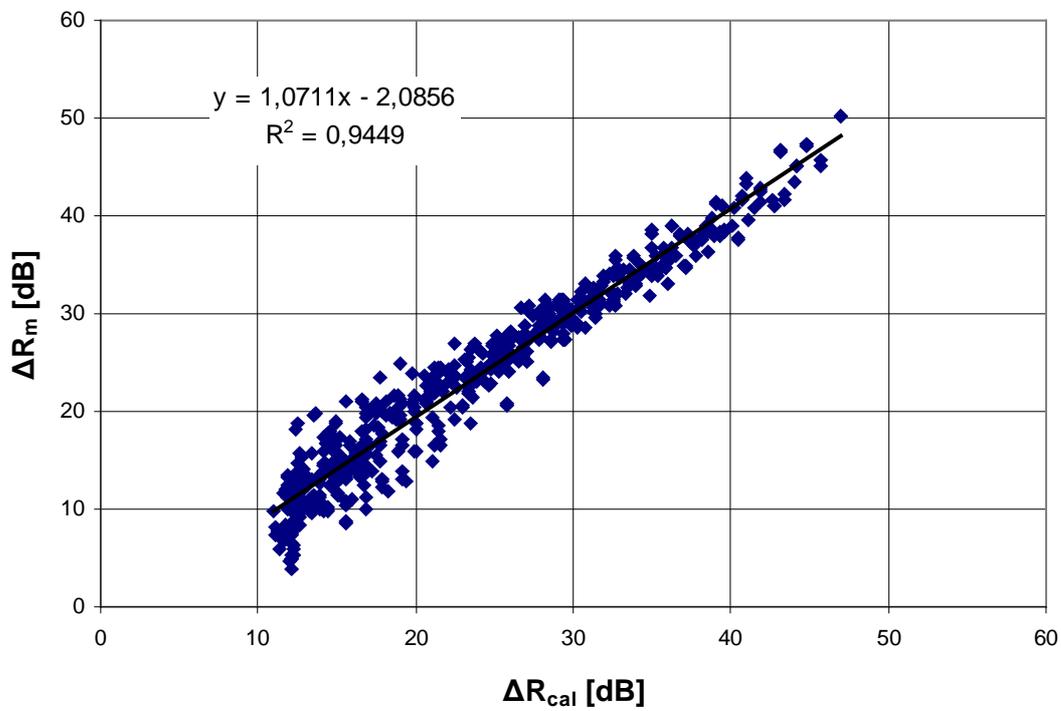
Berücksichtigt man nun Diag. 24 in (16), so erhält man

$$R_{cal} = -10 * \lg \left[10^{-0,1 * R_{f,max}} + \frac{S_{op1} * F_{op1 \rightarrow op2} * (1 - \bar{\alpha}_b)}{S_{tot}} \right] + 0,0082 * (F')^2 + 0,1905 * (F') - 13,981 \quad (20)$$

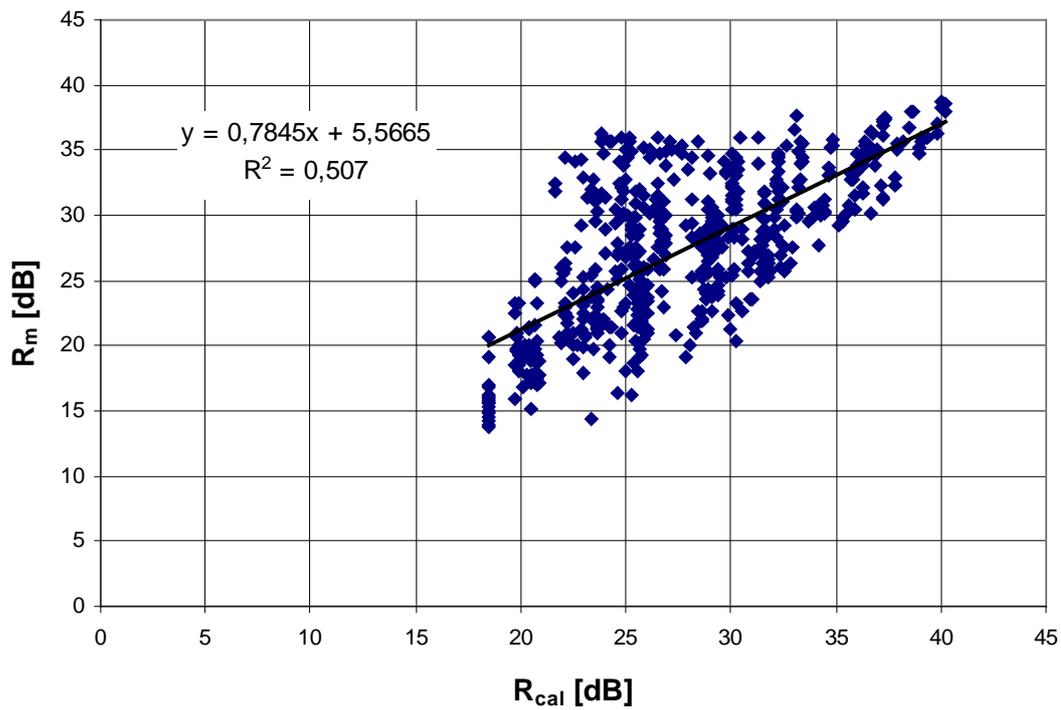
Die nachfolgenden Diagramme zeigen, inwieweit diese Formel nun mit den tatsächlich gemessenen Werten korrespondiert.



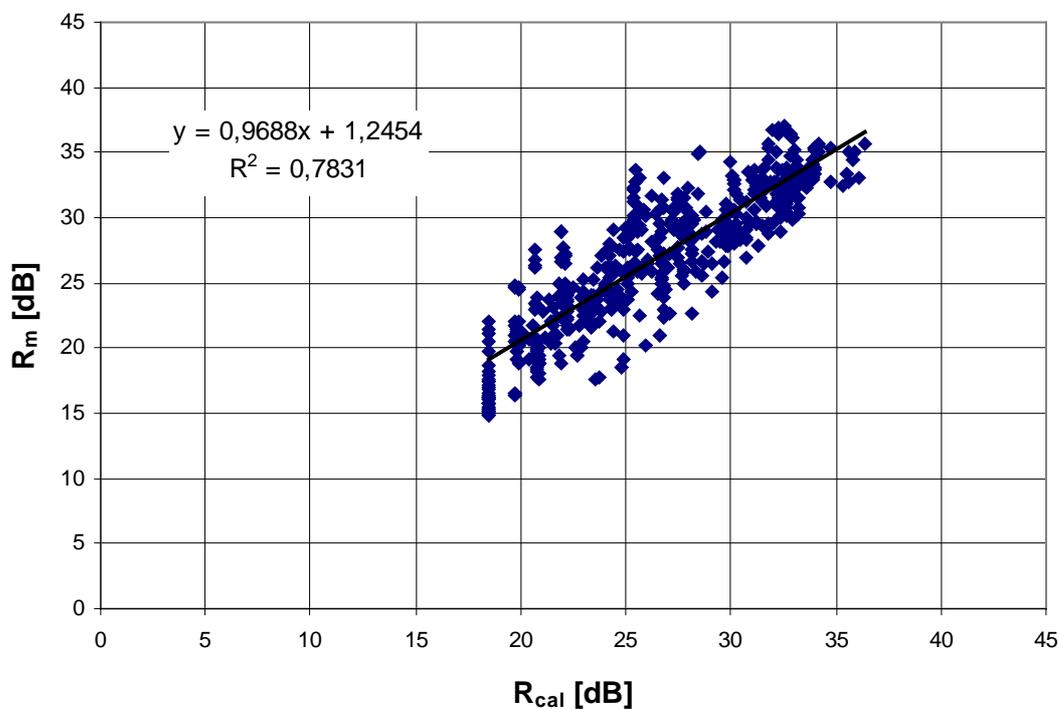
Diag. 28: Öffnungsabhängige Schalldämmreduktion von 32 Anordnungen **ohne** Absorber (100 – 5000 Hz).



Diag. 29: Öffnungsabhängige Schalldämmreduktion von 32 Anordnungen **mit** Absorber (100 – 5000 Hz).



Diag. 30: Schalldämm-Maße von 32 Anordnungen ohne Absorber (100 – 5000 Hz).



Diag. 31: Schalldämm-Maße von 32 Anordnungen mit Absorber (100 – 5000 Hz).

7 Ergänzendes

Im allgemeinen Fall kann nicht von einer Außenwand mit rein orthogonaler Struktur ausgegangen werden. Für die meisten frei geformten, unter Umständen sogar mehrfach gekrümmten Doppelfassaden wird sich in den VF-Katalogen keine Konfiguration finden, die anwendbar wäre. Aus diesem Grund ist es naheliegend, solche Geometrien durch räumliche FEM-Netze zu repräsentieren, für deren ebene drei- oder viereckige Maschen dann wesentlich einfacher Formfaktoren erchenbar sind. In [Fleischmann 2007] und [Anderssohn et al. 2006] werden solche Strategien erörtert.

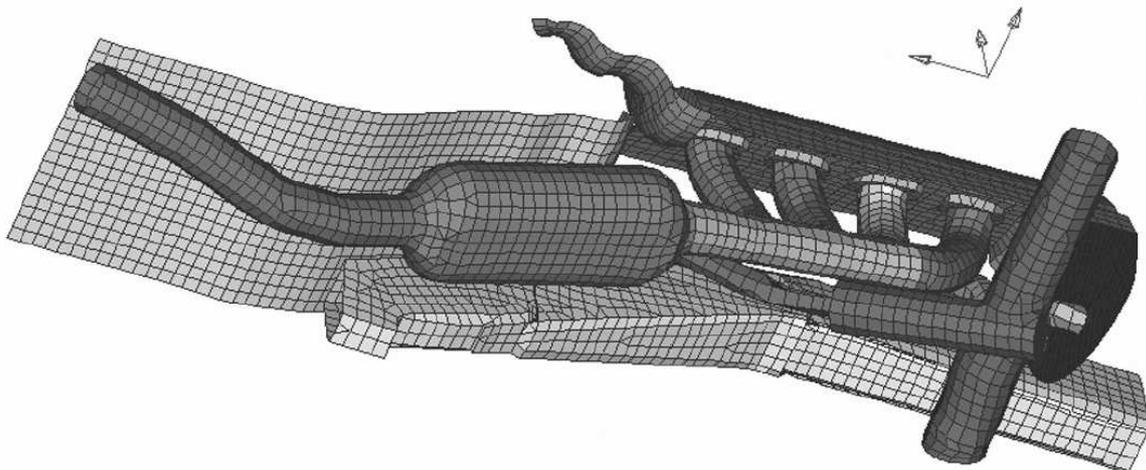
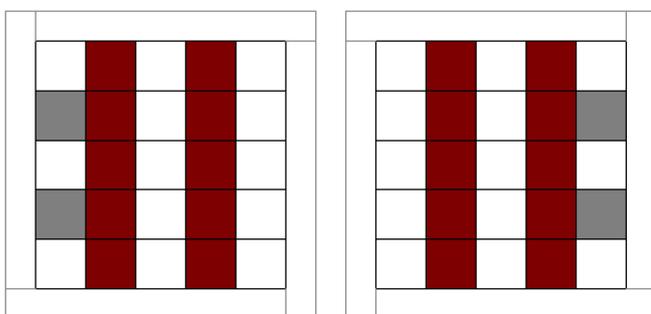


Abb. 41: FEM-Modell eines Kfz-Abgasstrangs. [Fleischmann 2007]

Die Maschenweiten könnten flexibel gewählt werden, um verschieden starke Krümmungen oder den Einfluss einer Fläche auf das Verhalten des Schallfeldes graduell berücksichtigen zu können und so den Rechenaufwand möglichst gering zu halten. Abb. 42 zeigt die aus dem tatsächlichen Fugenverlauf in den Testwandschalen abgeleiteten zweidimensionalen FEM-Repräsentationen derselbigen. Darin eingetragen ist das Setting Nr. 12 (lt. Anhang 9.1), wobei Bereiche unterschiedlicher Materialität farblich markiert sind.



Layer 1 (Empf.raum) (vom Empf.raum gesehen)
Layer 2 (Senderraum) (vom Empf.raum gesehen)

Abb. 42: Messsetting Nr. 12. (weiß: Spanplatte; rot: Spanplatte + Absorber; grau: Öffnung)

Auf ähnliche Weise könnte in einer Software die Belegung eines Feldes direkt gewählt werden (s. Abb. 43).

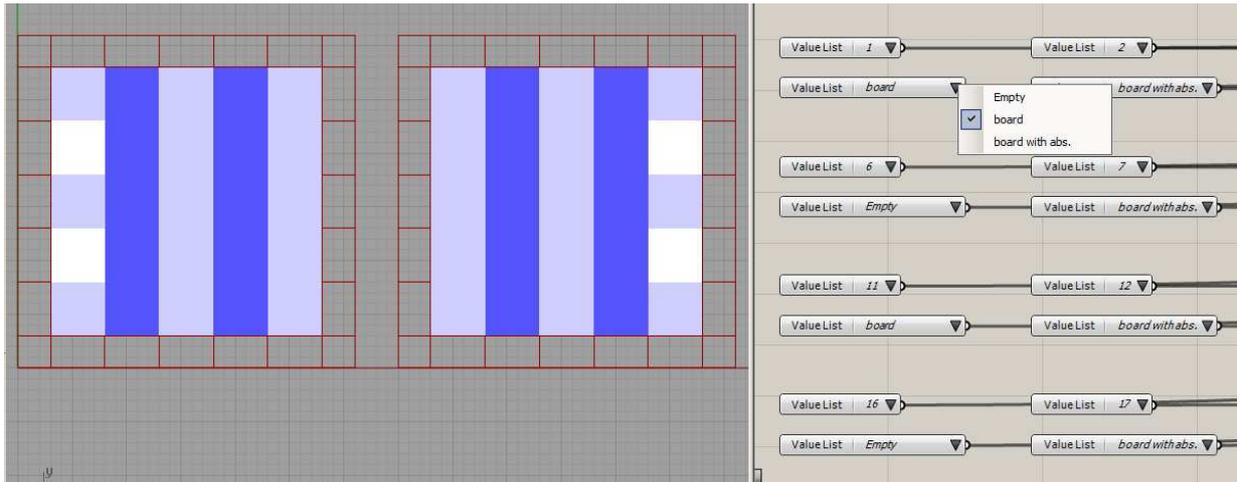


Abb. 43: Zweidimensionale, segmentweise veränderliche Repräsentationen der Testwandschalen (je 49 Elemente) in einer Anwendung (Grasshopper for Rhinoceros).

Ein nicht-adaptives Netz (mit fixer Maschengröße) würde bereits in einem solch überschaubaren Fall die Kalkulation einer großen Zahl an Formfaktoren erforderlich machen (s. Abb. 44), um das ganze System zu erfassen.

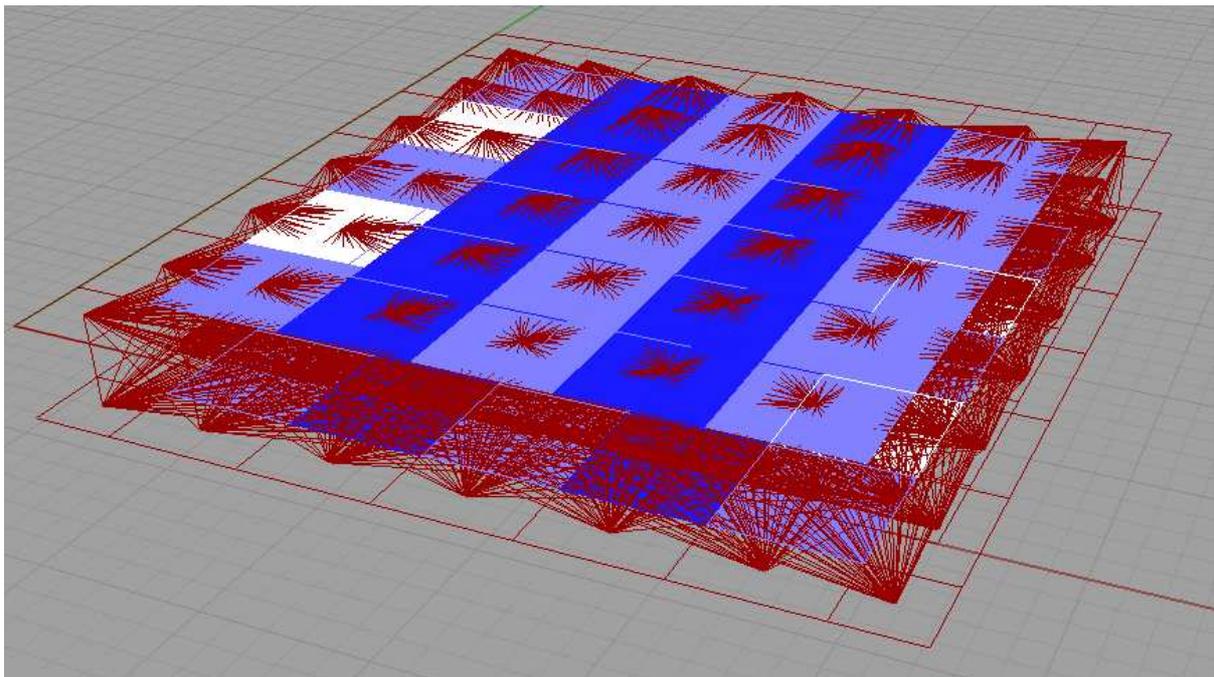


Abb. 44: Bei 49 Elementen pro Schale wären 2401 einzelne Kombinationen (rot dargestellt) zu berechnen.

Grenzt man jedoch jene Elementeigenschaften ein, die für die Berechnung von Bedeutung sind (zB die Materialitäten resp. die Transmissionsgrade der Segmente), lassen sich Maschen mit gleichen Eigenschaften zu größeren Maschen zusammenlegen (s. Abb. 45).

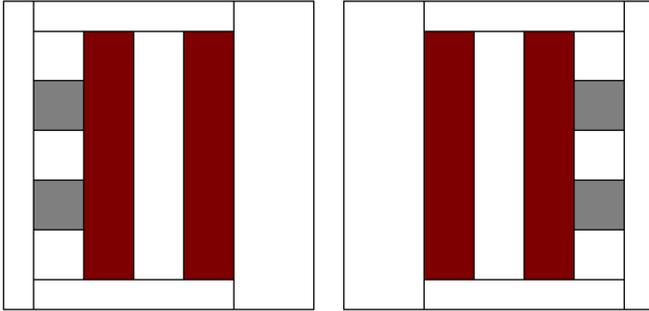


Abb. 45: Materialbezogene Minimalrasterung (jeweils 12 Elemente). Mit 144 Formfaktoren ist die Anzahl der möglichen Kombinationen um 94 % geringer als in Abb. 44.

Zusammen mit Gleichung (21) könnte an dieser Stelle eine computergestützte Analyse der ursprünglichen Aufgabenstellung ihren Ausgang nehmen.

$$W_{2,f} / W_{1,f} \equiv \sum_{i=1}^m \left\{ W_{i,f} * \tau_{i,f} * \left[\sum_{j=1}^n (F_{S_i \rightarrow S_j} * \tau_{j,f}) \right] \right\} \quad (21)$$

wobei:

- $W_{1,f}$ auf die Bauteilvorderseite einfallende Schalleistung (bei Frequ. f)
- $W_{2,f}$ von der Bauteilrücks. i. d. Empfangsr. abgeg. Schalleistung (bei Frequ. f)
- S_i Subelement Nr. i (von insg. m) der Bauteilvorderseite
- S_j Subelement Nr. j (von insg. n) der Bauteilrückseite
- $F_{S_i \rightarrow S_j}$ View Factor von S_i nach S_j
- $\tau_{i,f}$ (Pseudo-)Transmissionsgrad von S_i (bei Frequ. f)
- $\tau_{j,f}$ (Pseudo-)Transmissionsgrad von S_j (bei Frequ. f)
- $W_{i,f}$ auf S_i einfallender Anteil von W_1 (bei Frequ. f)

Da unter einem Subelement (gem. der vorliegenden Laborbedingungen) entweder eine Spanplatte, eine Spanplatte mit Absorber oder eine Öffnung zu verstehen ist, können τ_i und τ_j jeweils einen von insgesamt drei möglichen, frequenzabhängigen Werten annehmen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der durchgeführten Messungen wurde nachgewiesen, dass unter Verwendung von Absorbern bereits bei einem Öffnungsversatz von 2 Metern eine Verbesserung des R_w erzielt werden kann, die der stark fugendurchsetzten Testwand eine ebenso große Schalldämmung (35 dB) zukommen lässt, wie einem Fenster der Schallschutzklasse 2 nach VDI 2719.

Absorptionsmaßnahmen abseits des Versatzbereichs wurden dahingegen als nahezu wirkungslos identifiziert.

In Erwägung durchgehend transparenter Fassaden könnten weitere Forschungen den Einsatz alternativer Absorber (zB MPA, s.[Kang & Brocklesby 2005] und [Kang & Li 2007]) zum Inhalt haben. Außerdem sollte es möglich sein, durch besondere Ausformung der Schalen gewisse Reflexionseffekte hervorzurufen, die den lärmindernden Eigenschaften der Wand ebenfalls zuträglich wären.

Ob das gegenständliche Lüftungssystem im Gestaltungsprozess des Architekten als restriktive Größe oder doch eher als integraler Bestandteil verstanden würde, kann nur die Praxis zeigen.

In naher Zukunft wird der zentrale Gegenstand des Planers jedenfalls nicht mehr der Neubau, sondern das Bauen im Bestand sein, weshalb auch hier geeignete Lösungen zu entwickeln sind (s. Abb. 46).

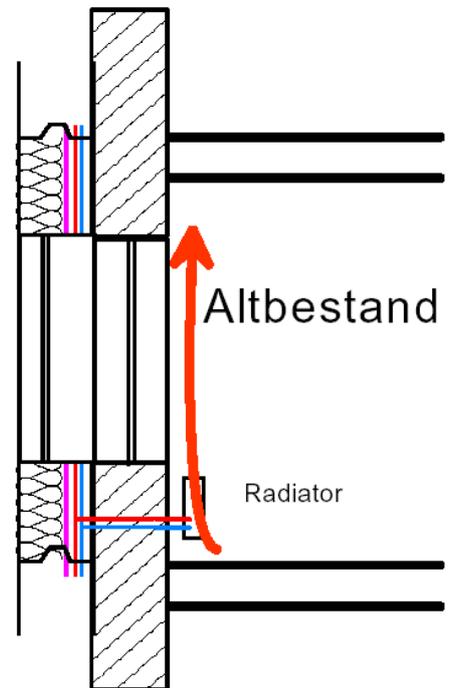


Abb. 46: Plug & Play-Fassade
[Streicher 2008]

9 Anhang

9.1 Die 32 Messungen

Vorderseite
(ER-seitiger Layer vom ER aus gesehen)

Rückseite
(SR-seitiger Layer vom ER aus gesehen)

Exp. # 29
(12. 06. 2012)

R_w : 31 (0 ; -1)
(prev.: 26)

VF_{35} : 0,001018
a: 0
b: 2
h: 0,43
D: 2,0457
 S_{op} : 0,5
 θ : 77,87

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 30
(12. 06. 2012)

R_w : 31 (0 ; -1)
(prev.: 26)

VF_{35} : 0,001018
a: 0
b: 2
h: 0,43
D: 2,0457
 S_{op} : 0,5
 θ : 77,87

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 32
(13. 06. 2012)

R_w : 31 (0 ; -1)
(prev.: 26)

VF_{35} : 0,001018
a: 0
b: 2
h: 0,43
D: 2,0457
 S_{op} : 0,5
 θ : 77,87

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Vorderseite
(ER-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Rückseite
(SR-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Exp. # 1

(10. 05. 2012)

R_w : 31 (0 ; -1)
(prev.: 26)

VF_{35} : 0,001018

a: 0

b: 2

h: 0,43

D: 2,0457

S_{op} : 0,5

θ : 77,87

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 31

(13. 06. 2012)

R_w : 31 (0 ; 0)
(prev.: 26)

VF_{35} : 0,001018

a: 0

b: 2

h: 0,43

D: 2,0457

S_{op} : 0,5

θ : 77,87

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 28

(11. 06. 2012)

R_w : 33 (0 ; -1)
(prev.: 26)

VF_{35} : 0,001018

a: 0

b: 2

h: 0,43

D: 2,0457

S_{op} : 0,5

θ : 77,87

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Vorderseite
(ER-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Rückseite
(SR-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Exp. # 27
(11. 06. 2012)

R_w : 34 (-1 ; -1)
(prev.: 26)

VF_{35} : 0,001018
a: 0
b: 2
h: 0,43
D: 2,0457
 S_{op} : 0,5
 θ : 77,87

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 25
(21. 05. 2012)

R_w : 34 (0 ; -1)
(prev.: 26)

VF_{35} : 0,001018
a: 0
b: 2
h: 0,43
D: 2,0457
 S_{op} : 0,5
 θ : 77,87

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 12
(21. 05. 2012)

R_w : 34 (0 ; -1)
(prev.: 26)

VF_{35} : 0,001018
a: 0
b: 2
h: 0,43
D: 2,0457
 S_{op} : 0,5
 θ : 77,87

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Vorderseite
(ER-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Rückseite
(SR-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Exp. # 26

(11. 06. 2012)

R_w : 35 (-1 ; -2)
(prev.: 26)

VF_{35} : 0,001018

a: 0

b: 2

h: 0,43

D: 2,0457

S_{op} : 0,5

θ : 77,87

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 20

(23. 05. 2012)

R_w : 30 (0 ; 0)
(prev.: 26)

VF_{35} : 0,002924

a: 0

b: 1,5

h: 0,43

D: 1,5604

S_{op} : 0,5

θ : 74,00

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 13

(21. 05. 2012)

R_w : 33 (0 ; 0)
(prev.: 26)

VF_{35} : 0,002924

a: 0

b: 1,5

h: 0,43

D: 1,5604

S_{op} : 0,5

θ : 74,00

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Vorderseite
(ER-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Rückseite
(SR-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Exp. # 6

(14. 05. 2012)

R_w : 28 (0 ; 0)
(prev.: 24)

VF_{35} : 0,01251

a: 0

b: 1

h: 0,43

D: 1,0885

S_{op} : 0,5

θ : 66,73

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 7

(15. 05. 2012)

R_w : 30 (0 ; 0)
(prev.: 24)

VF_{35} : 0,01251

a: 0

b: 1

h: 0,43

D: 1,0885

S_{op} : 0,5

θ : 66,73

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 21

(24. 05. 2012)

R_w : 24 (0 ; 0)
(prev.: 22)

VF_{35} : 0,10149

a: 0

b: 0,5

h: 0,43

D: 0,6595

S_{op} : 0,5

θ : 49,30

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Vorderseite
(ER-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Rückseite
(SR-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Exp. # 24

(24. 05. 2012)

R_w : 24 (0 ; 0)
(prev.: 22)

VF_{35} : 0,10149

a: 0

b: 0,5

h: 0,43

D: 0,6595

S_{op} : 0,5

θ : 49,30

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 17

(22. 05. 2012)

R_w : 19 (0 ; 0)
(prev.: 18)

VF_{35} : 0,314396

a: 0

b: 0

h: 0,43

D: 0

S_{op} : 0,5

θ : 0

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 16

(22. 05. 2012)

R_w : 20 (0 ; 0)
(prev.: 18)

VF_{35} : 0,314396

a: 0

b: 0

h: 0,43

D: 0

S_{op} : 0,5

θ : 0

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Vorderseite
(ER-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Rückseite
(SR-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Exp. # 2

(10. 05. 2012)

R_w : 28 (-1 ; -2)
(prev.: 23)

VF_{35} : 0,001617

a: 0

b: 2

h: 0,43

D: 2,0457

S_{op} : 0,75

θ : 77,87

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 11

(21. 05. 2012)

R_w : 31 (-1 ; -2)
(prev.: 23)

VF_{35} : 0,001617

a: 0

b: 2

h: 0,43

D: 2,0457

S_{op} : 0,75

θ : 77,87

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 19

(23. 05. 2012)

R_w : 27 (0 ; -1)
(prev.: 23)

VF_{35} : 0,004747

a: 0

b: 1,5

h: 0,43

D: 1,5604

S_{op} : 0,75

θ : 74,00

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Vorderseite
(ER-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Rückseite
(SR-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Exp. # 14

(21. 05. 2012)

R_w : 30 (-1 ; -1)
(prev.: 23)

VF_{35} : 0,004747

a: 0

b: 1,5

h: 0,43

D: 1,5604

S_{op} : 0,75

θ : 74,00

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 5

(14. 05. 2012)

R_w : 24 (0 ; 0)
(prev.: 22)

VF_{35} : 0,020347

a: 0

b: 1

h: 0,43

D: 1,0885

S_{op} : 0,75

θ : 66,73

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 8

(15. 05. 2012)

R_w : 27 (-1 ; -1)
(prev.: 22)

VF_{35} : 0,020347

a: 0

b: 1

h: 0,43

D: 1,0885

S_{op} : 0,75

θ : 66,73

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Vorderseite
(ER-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Rückseite
(SR-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Exp. # 22

(24. 05. 2012)

R_w : 21 (0 ; 0)
(prev.: 20)

VF_{35} : 0,149624

a: 0

b: 0,5

h: 0,43

D: 0,6595

S_{op} : 0,75

θ : 49,30

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 23

(24. 05. 2012)

R_w : 21 (0 ; 0)
(prev.: 20)

VF_{35} : 0,149624

a: 0

b: 0,5

h: 0,43

D: 0,6595

S_{op} : 0,75

θ : 49,30

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 18

(23. 05. 2012)

R_w : 16 (0 ; 0)
(prev.: 15)

VF_{35} : 0,437708

a: 0

b: 0

h: 0,43

D: 0

S_{op} : 0,75

θ : 0

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Vorderseite
(ER-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Rückseite
(SR-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Exp. # 15

(22. 05. 2012)

R_w : 16 (0 ; 0)
(prev.: 15)

VF_{35} : 0,437708

a: 0

b: 0

h: 0,43

D: 0

S_{op} : 0,75

θ : 0

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 3

(11. 05. 2012)

R_w : 24 (0 ; -1)
(prev.: 21)

VF_{35} : 0,00224

a: 0

b: 2

h: 0,43

D: 2,0457

S_{op} : 1,25

θ : 77,87

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 10

(16. 05. 2012)

R_w : 27 (0 ; -1)
(prev.: 21)

VF_{35} : 0,00224

a: 0

b: 2

h: 0,43

D: 2,0457

S_{op} : 1,25

θ : 77,87

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Vorderseite
(ER-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Rückseite
(SR-seitiger Layer vom
ER aus gesehen)

Exp. # 4

(14. 05. 2012)

R_w : 21 (0 ; 0)
(prev.: 18)

VF_{35} : 0,024351

a: 0

b: 1

h: 0,43

D: 1,0885

S_{op} : 1,25

θ : 66,73

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Exp. # 9

(16. 05. 2012)

R_w : 23 (0 ; 0)
(prev.: 18)

VF_{35} : 0,024351

a: 0

b: 1

h: 0,43

D: 1,0885

S_{op} : 1,25

θ : 66,73

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

9.2 Erläuterung der Messreihendarstellungen

Die Messreihendarstellungen im Kap. 4.3 („Vorarbeit“) seien anhand des Diag. 32 erläutert: In der zweiten Textzeile ist die Anzahl der Messungen (5) ersichtlich, die im Zuge der angegebenen Reihe durchgeführt wurden. Die Darstellung ist eine Ansicht der Wand vom ER aus. Rot umrandet (und unter „vorne“ gelistet) sind ER-seitige Öffnungen. Diese blieben über die gesamte Reihe hinweg gleich. Die SR-seitigen (und unter „hinten“ gelisteten) Öffnungen wurden Messung für Messung verändert, was durch die farblich hinterlegten Felder verdeutlicht werden soll. Felder gleiche Farbe bezeichnen Öffnungen ein und derselben Einzelmessung.

1	2	3	4	5	
6	7	8	9	10	
11	12	13	14	15	
16	17	18	19	20	
21	22	23	24	25	

Messreihe 2
5 Messungen:

vorne: 6-16
hinten: 10-20; 9-19; 8-18;
7-17; 6-16

Diag. 32: Ein Beispiel für eine kurzgekodierte Messreihe.

9.3 Herleitung des View Factors

Ganz allgemein gilt für eine Intensität (als Flächenleistungsdichte):

$$I = I_A = \frac{P_{\perp A}}{A} \quad (22)$$

Es wird also lediglich jene Leistung P berücksichtigt, die die Fläche A lokal orthogonal durchdringt. Mit anderen Worten: Von der Gesamtleistung P_{tot} , die eine Quelle abgibt, ist für die Berechnung der Intensität A überhaupt nur jener Anteil P_A von Interesse, der A passiert, und davon wiederum nur die Menge ($P_{\perp A}$) all jener „Energiequanten“, die auf A jeweils (sprich: lokal) senkrecht auftreffen.

Ein Spezialfall dieses generellen Verständnisses zielt darauf ab, die Geometrie von A an die Geometrie des Energieflusses anzupassen, sodass der **gesamte** Strom, der auf A einwirkt, dies

durchwegs „lokalorthogonal“ tut und daher bei der Ermittlung von I zur Gänze berücksichtigt werden kann. Für einen ausschließlich parallelen Fluss wäre A somit sein Querschnitt (d.h. eine ebene Fläche) und für einen ausschließlich radialen Fluss wäre A jener Teil, den der Strom aus einer Sphäre herauschneidet, die konzentrisch zur punktförmigen Energiequelle angeordnet ist (s. Abb. 47).

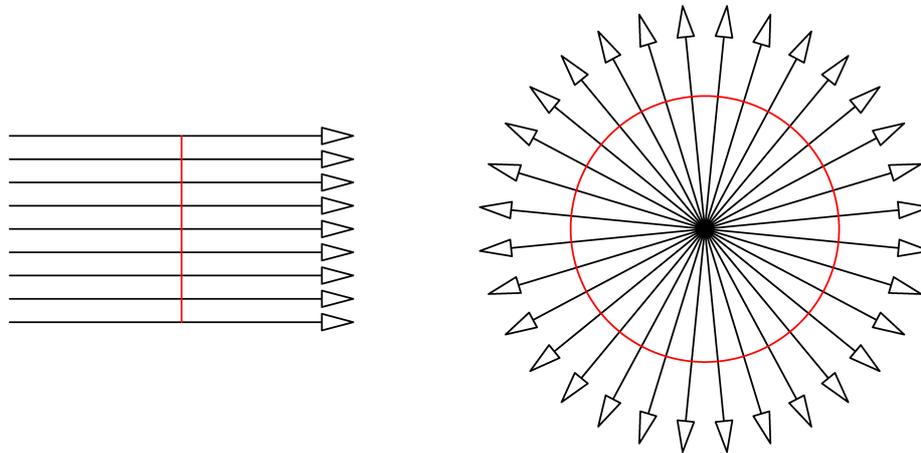


Abb. 47: A (rot) im Fall eines parallelen und eines radialen Energieflusses.

Über (22) erhält man somit für die Intensität einer Punktquelle folgenden Zusammenhang:

$$\bar{l}(d) = \frac{P_{tot}}{4 * d^2 * \pi} \quad (23)$$

wobei d die Distanz vom Ursprung angibt. (Die Intensität ist als gemittelte Größe angeschrieben, da in der Regel nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Quelle in alle Richtungen gleich viel Energie abgibt.) In der Radiometrie wird daraus:

$$\bar{l}_e(d) = \frac{\Phi_{e,tot}}{4 * d^2 * \pi} \quad (24)$$

Bezogen auf die Einheitskugel ergibt sich:

$$\bar{l}_e(1) = \bar{l}_e = \frac{\Phi_{e,tot}}{4 * 1^2 * \pi} = \frac{\Phi_{e,tot}}{\Omega_{tot}} = \frac{\Phi_{e,\Omega_{tot}}}{\Omega_{tot}} \quad (25)$$

Und für den Fall, dass man lediglich jenen Strahlungsfluss betrachtet, der in ein bestimmtes „Raumwinkelement“ Ω abgegeben wird, gilt allgemeiner:

$$\bar{l}_{e,\Omega} = \frac{\Phi_e(\Omega)}{\Omega} \quad (26)$$

Wie vorhin bereits angedeutet, erlaubt $\bar{I}_{e,\Omega}$ keinerlei Rückschlüsse auf den exakten Betrag der richtungsbezogenen Strahlstärke $I_{e,(\varphi, \theta)}$. Erst in Form eines Differentialquotienten können wir dies aus (26) ableiten:

$$I_{e,(\varphi, \theta)} = \frac{d\Phi_e(\Omega)}{d\Omega} \quad (27)$$

Selbstverständlich ist die von der punktförmigen Quelle entsandte Leistung für beliebige empfangende Objekte, die ein und dasselbe Ω einnehmen, ident (s. Abb. 48).

Um also zu ermitteln, wie viel Strahlungsleistung (einer Punktquelle 1) $\Phi_{1 \rightarrow 2}$ auf ein bestimmtes Objekt 2 einwirkt, muss lediglich die (für $d = 1$ (\Rightarrow Einheitskugel) und den vom Objekt eingenommenen Raumwinkel Ω gegebene) Strahlungsintensität I_Ω mit der Fläche des auf die Einheitskugel (\Rightarrow Bildebene) zentralprojizierten (Strahlungsquelle \Rightarrow Projektionszentrum) Objekts multipliziert werden (s. Abb. 48):

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = I_{e,\Omega} * A_{proj} \quad (28)$$

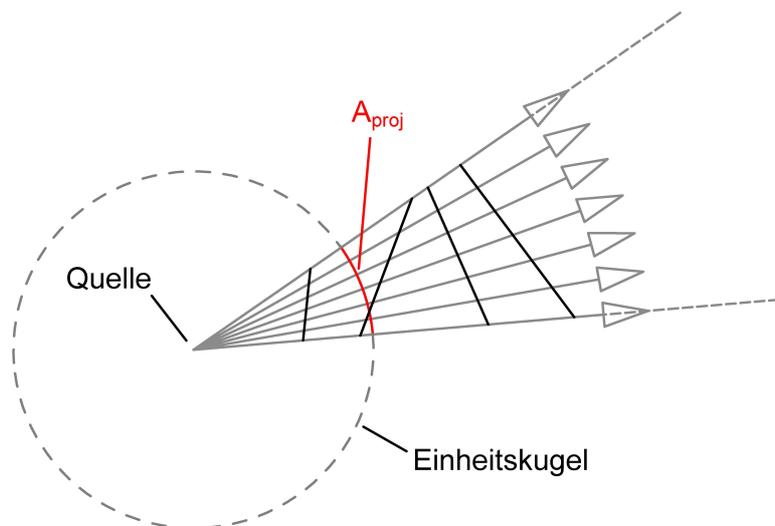


Abb. 48: Vier Objekte (schwarz), die den gleichen Raumwinkel einnehmen und deren Zentralprojektion A_{proj} auf die Einheitskugel.

Natürlich ist

$$\Omega = A_{proj,d} * \frac{\Omega_{tot}}{4 * d^2 * \pi} \quad (29)$$

mit dem Sonderfall $d = 1$:

$$\Omega = A_{proj} * \frac{\Omega_{tot}}{4 * \pi} \quad (30)$$

Gleichsetzung von (29) und (30) ergibt:

$$A_{proj} = \frac{A_{proj,d}}{d^2} \quad (31)$$

Somit wird (28) zur $\{d=1\}$ -Lösung des „Fotometrischen Grundgesetzes“

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = I_{e,\Omega} * \frac{A_{proj,d}}{d^2} \quad (32)$$

Da der Vergleich von $\Phi_{1 \rightarrow 2}$ mit $\Phi_{e,tot}$ gefragt ist (denn genau dieses Verhältnis ist ja der gesuchte View Factor), muss die Strahlungsstärke auf den Strahlungsfluss zurückgeführt werden. Ermöglicht wird dieser Schritt durch eine Annahme über das richtungsabhängige Verhalten der Strahlungsstärke: Die Energie aussendende Fläche ist im gegebenen Fall eine Öffnung in der senderaumseitigen Schale des Versuchsaufbaus. Wie bereits erwähnt, ist der Senderaum so geartet, dass er bei konstanter Beschallung die Ausbildung eines diffusen Schallfeldes begünstigt. Auch im Bereich der Öffnungen sollte sich dieses Merkmal bestätigt finden. In diesem Fall hätten wir es also mit einem diffusen Sender zu tun. Das bedeutet, dass die von ihm in einen Raumbereich von $2 * \pi$ [sr] abgegebene (akustische) Strahlung aus allen Richtungen des betroffenen Halbraums als gleich „stark“ wahrgenommen werden müsste.

Zur Beurteilung der „Stärke“ einer freigestellten Punktquelle wäre (32) geeignet. Bei mehrdimensionalen Quellen ist jedoch noch ein weiterer Faktor zu berücksichtigen: Auch wenn die Punktquellen, aus denen das strahlende Objekt besteht, in sämtliche Richtungen mit der gleichen Intensität strahlten, könnte ein beliebig gewähltes paralleles Strahlenbündel dennoch hinsichtlich seiner Stärke (im Bereich des sichtbaren Lichts ist damit die Helligkeit gemeint) variieren, je nachdem, wie dicht die Strahlen angeordnet sind (s. Abb. 49). Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird analog zu Abb. 47 die Parallelprojektion der Sendefläche (:= jene Fläche, deren Strahlung beurteilt werden soll) in Abstrahlrichtung ($\Rightarrow A * \cos \alpha$ (s. Abb. 50)) und weiters die „Spezifische Intensität“ bzw. „Strahldichte“ L_e ermittelt.

$$L_e = \frac{I_{e \perp A}}{A} \Rightarrow \frac{\frac{\Phi_e}{\Omega}}{A * \cos(\alpha)} = \frac{\Phi_e}{A * \cos(\alpha) * \Omega} \quad (33)$$

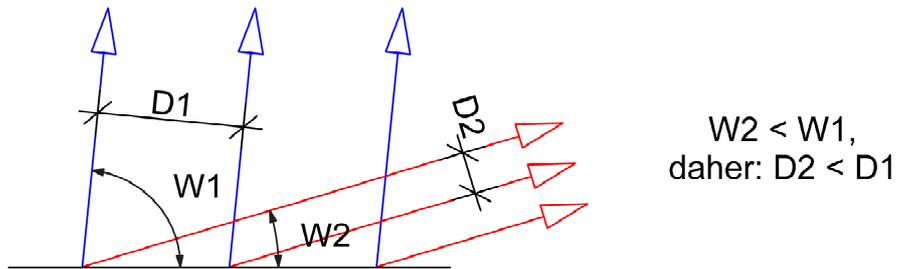


Abb. 49: Unter dem Winkel $W2$ erscheint die in alle Richtungen mit gleicher Intensität strahlende Quelle heller (als unter dem Winkel $W1$).

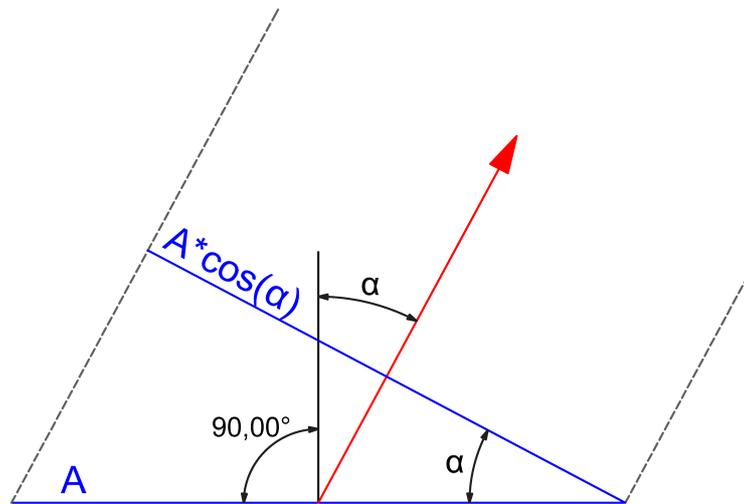


Abb. 50: Die Projektionsfläche von A in Strahlrichtung.

Der Grenzübergang ermöglicht uns nun die Beschreibung der „Stärke“ eines Oberflächenpunktes im Kontext seiner Umgebung:

$$L_{e,\Omega}(\theta) = \frac{d^2\Phi_e}{dA \cdot \cos(\alpha) \cdot d\Omega} = \frac{dl_e}{dA \cdot \cos(\alpha)} \quad (34)$$

Soll nun – wie oben erwähnt – die „Stärke“ isotrop sein, so muss L_e als konstant angenommen und die rechte Seite der Gleichung (34) zur Gewährleistung dieser Bedingung um einen Ausgleichsfaktor ($\cos \alpha$) erweitert werden:

$$L_{e,\Omega}(\theta) = \text{const.} \Leftrightarrow \frac{dl_e \cdot \cos(\alpha)}{dA \cdot \cos(\alpha)} \quad (35)$$

Bezogen auf die Intensität bedarf es im Falle eines diffusen Senders also der Kondition

$$l_e = l_{e,0} \cdot \cos(\alpha) \quad (36)$$

Dieser Zusammenhang (s. Abb. 51) wurde wohl erstmals von Johann Heinrich Lambert näher beschrieben. Aus diesem Grund werden diffuse Strahler auch Lambertsche Strahler genannt.

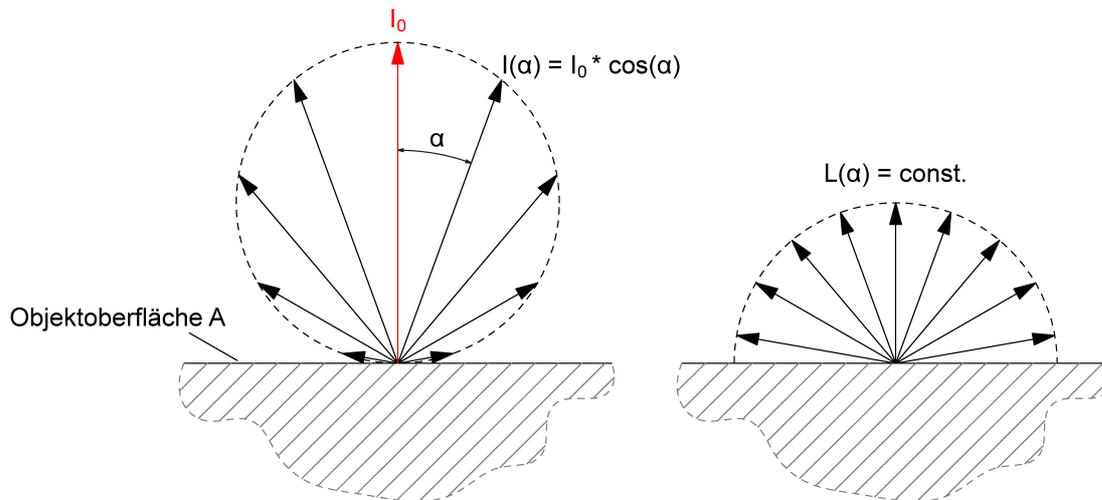


Abb. 51: Ein Lambert'scher Strahler. Um eine allseits konstante Strahldichte zu erreichen (rechts), muss die Intensität abseits der Oberflächennormale mit dem Faktor $\cos(\alpha)$ abnehmen.

Gem. (27) lässt sich I_e durch Integration über den Raumwinkel, der bei infinitesimalen Oberflächen, welche als ebene Flächenstücke aufgefasst werden dürfen, mit der halben Einheitskugel (= $2 \cdot \pi$) gleichzusetzen ist (\Rightarrow Energieabgabe nur zur objektabgewandten Seite), auf Φ_e zurückführen:

$$d\Phi_e = \int_0^{2\pi} I_e \cdot d\Omega = dI_{e,0} \cdot \pi \quad (37)$$

In der Grenzwert-Version von (32) können wir nun (37) und (36) kombinieren und erhalten für den Leistungstransfer von diffusen Strahlern:

$$d\Phi_{1 \rightarrow 2} = \frac{d\Phi_1}{\pi} \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{dA_{proj,d}}{d^2} \quad (38)$$

Für eine infinitesimale $A_{proj,d}$ (s. Abb. 52) gilt:

$$dA_{proj,d} = dA \cdot \cos(\beta) \quad (39)$$

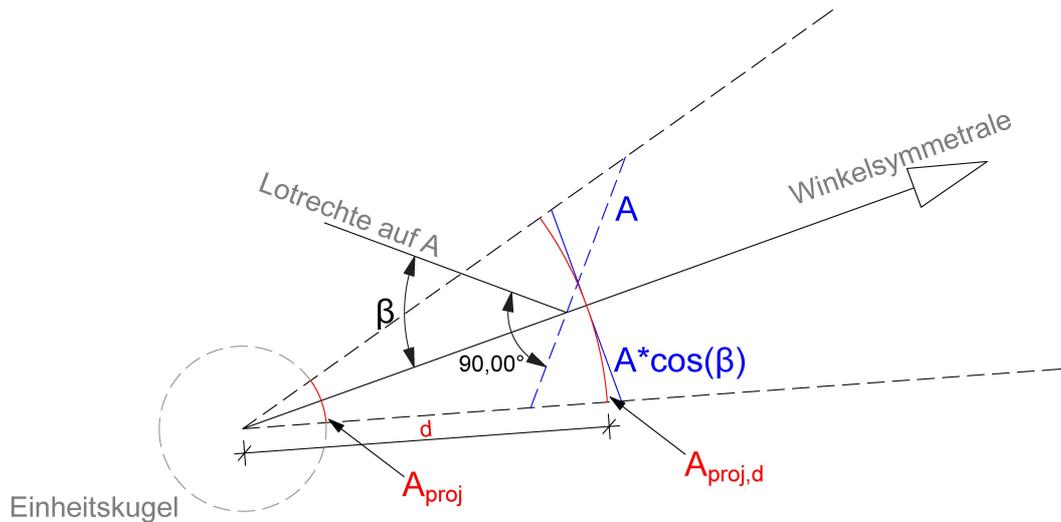


Abb. 52: Wird $A_{\text{proj},d}$ infinitesimal, so geht sie in $A \cdot \cos(\beta)$ über.

Die Gleichung für den Formfaktor zweier Oberflächenpunkte (von A_1 und A_2) lautet somit:

$$dF_{1 \rightarrow 2} = \frac{d\Phi_{1 \rightarrow 2}}{d\Phi_1} = \frac{\cos(\alpha) * dA_2 * \cos(\beta)}{\pi * d^2} \quad (40)$$

Und durch Integration erhält man schließlich für A_1 und A_2 selbst:

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{\pi * A_1} * \int_{A_1} \left(\int_{A_2} \frac{\cos(\alpha) * dA_2 * \cos(\beta)}{d^2} \right) dA_1 \quad (41)$$

9.4 Nachhall-Formeln

Zur Berechnung der Nachhallzeit ist im Allgemeinen die Eyringsche Nachhall-Gleichung anzuwenden:

$$T_{60} = \frac{24 * \ln 10 * V}{c * [4 * m * V - S * \ln(1 - \bar{\alpha})]} = \frac{24 * \ln 10 * V}{c * A'} \quad (42)$$

mit

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i * \alpha_i)}{S} \quad (43)$$

T	Nachhallzeit
V	Volumen des (Empfangs-)Raumes
c	Schallgeschwindigkeit
m	Dämpfungskonstante (in Luft)
$\bar{\alpha}$	flächengewogener mittlerer Absorptionsgrad
A'	äquivalente Schallabsorptionsfläche nach Eyring

Die wohlbekannte Sabinesche Formel stellt eine recht gute Näherung für $\bar{\alpha} < 0,2$ dar:

$$T_{60} = \frac{24 * \ln 10 * V}{c * (4 * m * V + S * \bar{\alpha})} = \frac{24 * \ln 10 * V}{c * A} \quad (44)$$

9.5 R_w vs. R_{1250}

Für alle 64 berücksichtigten Messergebnisse gilt näherungsweise:

$$\lceil R_{1250} \rceil \approx R_w \quad (45)$$

Das aufgerundete Schalldämm-Maß bei 1250 Hz streute um das bewertete Schalldämm-Maß mit max. 1 dB. Bei 68,75 % aller Messungen (21 der Messreihe ohne Absorber, 23 der Messreihe mit Absorber => insg. 44 von 64) stimmten die Werte präzise überein.

10 Literaturverzeichnis

- Anderssohn et al. 2006 Anderssohn R., Marburg S., Großmann C.: *FEM-based reconstruction of sound pressure field damped by partially absorbing boundary conditions*. In: *Mechanics Research Communications* 33, 2006, S. 851 – 859.
- Asdrubali & Buratti 2005 Asdrubali F., Buratti C.: *Sound intensity investigation of the acoustics performances of high insulation ventilating windows integrated with rolling shutter boxes*. In: *Applied Acoustics* 66, 2005, S. 1088 – 1101.
- Beranek 2006 Beranek L. L.: *Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption*. In: *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006.
- BMLFUW 2012 Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft: *Lärmkarten 2012*. – URL [\url{http://www.laerminfo.at}](http://www.laerminfo.at). – Datum des Abrufs: 05.08.12.
- Buchholz 2005 Buchholz K.: *Genderaspekte im Bereich Immissionsschutz: Luftverschmutzung und Lärmbelastungen*. Frankfurt am Main: genanet – Leitstelle Geschlechtergerechtigkeit & Nachhaltigkeit (LIFE e.V.); 2005.
- Buratti 2002 Buratti C.: *Indoor noise reduction index with open window*. In: *Applied Acoustics* 63, 2002, S. 431 – 451.
- Buratti 2006 Buratti C.: *Indoor Noise Reduction Index with an open window (Part II)*. In: *Applied Acoustics* 67, 2006, S. 383 – 401.
- Çakir 2011 Çakir O.: *Concurrent Natural Ventilation and Noise Control via Innovative Façade Constructions*. Wien: TU Wien, Abteilung für Bauphysik und Bauökologie; 2011.
- Çakir 2012 Çakir O.: *A System Proposal for Façade Apertures to Prevent Acoustic Problems of Naturally Ventilated Buildings* (Diplomarbeit). Istanbul: Technische Universität Istanbul, Abteilung für Architektur; 2012.
- Cianfrini et al. 1998 Cianfrini C., Corcione M., Fontana D. M.: *A Method for Predicting Non-uniform Steady Sound Fields Within Spaces Bounded by Diffusive Surfaces*. In: *Applied Acoustics* 54 (4), 1998, S. 305 – 321.
- De Salis et al. 2002 De Salis M. H. F., Oldham D. J., Sharples S.: *Noise control strategies for naturally ventilated buildings*. In: *Building and Environment* 37 (5), 2002, S. 471 – 484.

- Fisch 2008 Fisch M. N.: *F + E Projekt TwinSkin _ Abschlussbericht*. Braunschweig: TU Braunschweig, Institut f. Gebäude- u. Solartechnik; 2008.
- Fleischmann 2007 Fleischmann M.: *Verfahren zur Berechnung der Viewfaktoren für Strahlungsprobleme*. München: TU München, Fakultät f. Mathematik; 2007.
- Fuchs 2010 Fuchs H. V.: *Schallabsorber und Schalldämpfer (3. Auflage)*. Berlin: Springer-Verlag; 2010.
- Gratt W. et al. 2009 Gratt W. et al.: *Handbuch Umgebungslärm*. Wien: Bundesministerium f. Land- u. Forstwirtschaft, Umwelt- u. Wasserwirtschaft; 2009.
- Howell 2012 Howell J. R.: *Radiation Heat Transfer Configuration Factors*. – URL [\url{http://www.engr.uky.edu/rtl/Catalog/}](http://www.engr.uky.edu/rtl/Catalog/). – Datum des Abrufs: 03.07.12.
- ISO 354 ISO 2003: *EN ISO 354: Akustik – Messung der Schallabsorption in Hallräumen*.
- ISO 717-1 ISO 2006: *EN ISO 717-1: Akustik – Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 1: Luftschalldämmung*.
- ISO 10140-2 ISO 2010: *EN ISO 10140-2: Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 2: Messung der Luftschalldämmung*.
- ISO 10140-4 ISO 2010: *EN ISO 10140-4: Akustik – Messung der Schalldämmung von Gebäudeteilen im Prüfstand – Teil 4: Messverfahren und Anforderungen*.
- ISO 10140-5 ISO 2010: *EN ISO 10140-5: Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen*.
- Jakob & Möser 2003 Jakob A., Möser M.: *Active control of double-glazed windows _ Part I: Feedforward control*. In: *Applied Acoustics* 64, 2003, S. 163 – 182.
- Kang & Brocklesby 2005 Kang J., Brocklesby M. W.: *Feasibility of applying micro-perforated absorbers in acoustic window systems*. In: *Applied Acoustics* 66 (6), 2005, S. 669 – 689.
- Kang & Li 2007 Kang J., Li Z.: *Numerical Simulation of an Acoustic Window System Using Finite Element Method*. In: *Acta Acustica united with Acustica _ Technical and Applied Papers* 93, 2007, S. 152 – 163.

- Knaack et al. 2007 Knaack U., Klein T., Bilow M., Auer T.: *Fassaden; Prinzipien der Konstruktion*. Berlin: Birkhäuser Verlag AG; 2007.
- LB Aachen 2003 Landesinstitut für Bauwesen Aachen: *Planungshilfe Energiesparendes Bauen*. Aachen: Landesinstitut für Bauwesen (LB) des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.); 2003.
- Mahdavi et al. 2011 Mahdavi A., Çakir O., Pröglhöf C., Lechleitner J.: *Sound insulation of a double-leaf wall system with openings for natural ventilation*. Wien: TU Wien, Abteilung für Bauphysik und Bauökologie; 2011.
- Marty-Nussbaumer 2010 Marty-Nussbaumer A.: *Gesundheit und Lärm im Kanton Luzern*. Luzern: Kantonsärztliche Dienste; 2010.
- May 1979 May D. N.: *Freeway Noise and High-Rise Balconies*. In: Journal of the Acoustical Society of America, 1979.
- Nosal 2002 Nosal E.-M.: *Room Sound Field Prediction by Acoustical Radiosity*. Vancouver: University of British Columbia, Department of Mathematics; 2002.
- ÖNORM S 5004 ÖNORM 2008: *ÖNORM S 5004: Messung von Schallimmissionen*.
- Oldham & Mohsen 1980 Oldham D. J., Mohsen E. A.: *A technique for predicting the performance of self-protecting buildings*. In: Noise Control Engineering Journal 15 (1), 1980, S. 11 – 19.
- RL 2002/49/EG *Richtlinie 2002/49/EG über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm*. Straßburg: Europäisches Parlament und Europäischer Rat; 2002.
- Sandberg 2003 Sandberg U.: *The Multi-Coincidence Peak around 1000 Hz in Tyre/Road Noise Spectra*. Naples: Eurnoise; 2003.
- Stadt Wien 2006 Stadt Wien: *Wiener Umgebungslärmschutzverordnung S440-010*. Wien: LGBl. f. Wien 19/2006; 2006.
- Statistik Austria 2009 STATISTIK AUSTRIA (Wegscheider-Pichler A.): *Umweltbedingungen, Umweltverhalten _ Ergebnisse des Mikrozensus 2007 _ Kurzfassung*. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.); 2009.
- Streicher 2008 Streicher W.: *Doppelfassade ist nicht gleich Doppelfassade*. Graz: TU Graz, Institut für Wärmetechnik; 2008.
- Windelberg 2009 Windelberg D.: *Frequenzen von Straßen- und Schienenverkehrsgeräuschen*. Hannover: Universität Hannover, Institut f. Algebra, Zahlentheorie u. Diskrete Mathematik; 2009.

ALLEN, DIE DIESE ARBEIT ERMÖGLICHTEN,
DANKE ICH GANZ HERZLICH.