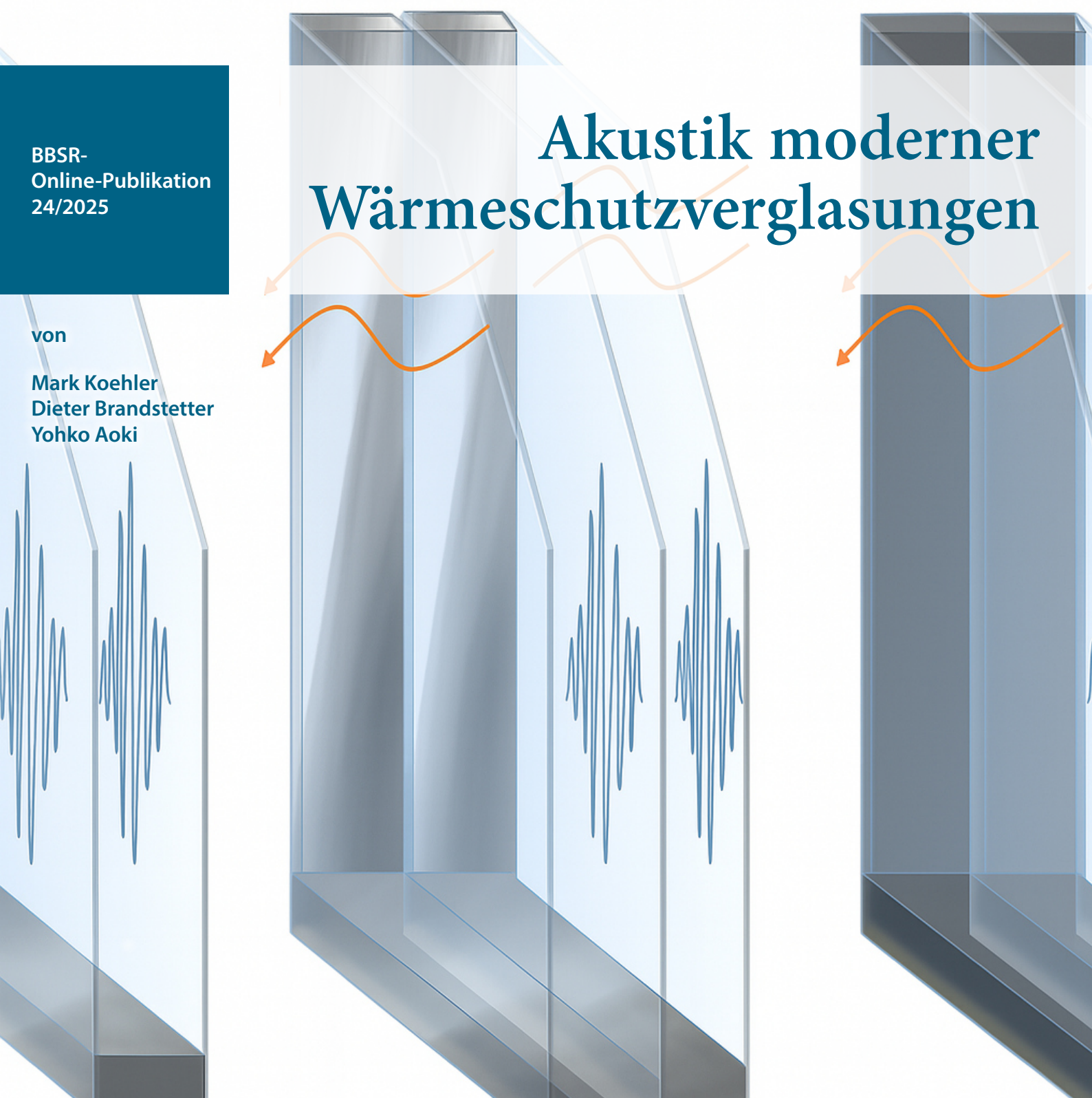


BBSR-
Online-Publikation
24/2025

von

Mark Koehler
Dieter Brandstetter
Yohko Aoki

Akustik moderner Wärmeschutzverglasungen



Akustik moderner Wärmeschutzverglasungen

Akustische Optimierung leichter, moderner Wärmeschutzverglasungen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.25

Projektlaufzeit: 10.2021 bis 11.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Steffen Kisseler, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart
Dipl.-Ing. (FH) Mark Koehler, M. BP. (Projektleitung)
mark.koehler@ibp.fraunhofer.de

Yohko Aoki, Ph. D.
yohko.aoki@ibp.fraunhofer.de

Redaktion

Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart
Dipl.-Ing. (FH) Mark Koehler, M. BP.
Yohko Aoki, Ph. D.

Stand

Juni 2025

Gestaltung

Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart
Dipl.-Ing. (FH) Mark Koehler, M. BP.
Yohko Aoki, Ph. D.

Bildnachweis

Titelbild: Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Alle weiteren Bilder und Grafiken: Fraunhofer-Institut für Bauphysik

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Koehler, M.; Aoki, Y., 2025: Akustik moderner Wärmeschutzverglasungen: Akustische Optimierung leichter, moderner Wärmeschutzverglasungen. BBSR-Online-Publikation 24/2025, Bonn. <https://doi.org/10.58007/ch21-as36>

DOI 10.58007/ch21-as36
ISSN 1868-0097

Bonn 2025

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Abstract	6
Schalldämm-Maß	10
Analyse von Messergebnissen aus der Datenbank - Grundlagen	21
Einfluss der Formatabhängigkeit von Mehrfachisolierverglasungen – Variation der Seitenverhältnisse bei gleichbleibender Fläche – Einfachverglasungen	22
Einfluss der Formatabhängigkeit von Mehrfachisolierverglasungen – Variation der Seitenverhältnisse bei gleichbleibender Fläche – Zweifach-Isolierverglasungen	22
Einfluss der Formatabhängigkeit von Mehrfachisolierverglasungen – Variation der Seitenverhältnisse bei gleichbleibender Fläche – Dreifach-Isolierverglasungen	23
Einfluss der Formatabhängigkeit von Mehrfachisolierverglasungen – Variation der Prüffläche bei gleichbleibenden Seitenverhältnissen – Einfachverglasungen	24
Einfluss der Formatabhängigkeit von Mehrfachisolierverglasungen – Variation der Prüffläche bei gleichbleibenden Seitenverhältnissen – Zweifach-Isolierverglasungen	25
Einfluss der Formatabhängigkeit von Mehrfachisolierverglasungen – Variation der Prüffläche bei gleichbleibenden Seitenverhältnissen – Dreifach-Isolierverglasungen	26
. Analytische Methode	27
. Numerische Methoden	28
. Fensterkitt	32
. Sekundäres Dichtungsmittel	32
. Randabstandhalter	33
. Schalldämm-Maß	39
. Bewertetes Schalldämm-Maß, R_w	40
. Analytisches Model, TL_ATMOS	43
. Messungen und FEM-Simulation	48
. Datenbank	53
. FEM Simulation mit unterschiedlicher Steifigkeit der Abstandhalter	54

Kurzfassung

In der modernen Architektur trägt die zunehmende Verwendung von Glasflächen in Gebäuden erheblich zur Übertragung von Außenlärm bei, hauptsächlich über Fenster, aufgrund ihres geringeren Schalldämm-Maßes im Vergleich zu Außenwänden. Dennoch liegt der Schwerpunkt bei der Entwicklung moderner Isolierglasseiben oft auf Energieeffizienz und Wärmedämmung, während die akustische Leistung weniger Beachtung findet. Die akustische Leistung von Fenstern wird typischerweise anhand von Prüfzeugnissen bewertet, die auf ISO-Standardmessungen in kontrollierte Prüfstelle basieren. Tatsächliche Baubedingungen, einschließlich Variationen in Fensterabmessungen, Randverbindungen und Einbauzuständen, können jedoch zu Abweichungen zwischen den zertifizierten Werten und der Leistung in der Praxis führen. Dieses Projekt hatte zum Ziel, Methoden zur Vorhersage der akustischen Leistung von Isolierglaseinheiten (IGUs) zu verfeinern.

Die Untersuchung konzentrierte sich auf Dreifachverglasungen und untersuchte Einflüsse wie Fensterabmessungen, Glasdicken und Konfigurationen der Randabstandhalter. Zwanzig IGUs mit verschiedenen Abmessungen und Glaskonfigurationen wurden gemäß DIN EN ISO 10140-Standards getestet, wobei Drittel-Oktaven- und Schmalbandfrequenzen abgedeckt wurden.

Die Studie zeigte, dass die Erhöhung der Dicke der äußeren Glasschicht die akustische Leistung erheblich verbessert, während die innere Schicht einen geringeren Einfluss hat. Zudem wurde festgestellt, dass die akustische Leistung mit zunehmender Oberfläche der IGUs tendenziell abnimmt. Daher kann die Verwendung von Zertifikaten standardgroßer IGUs zur Bewertung größerer IGUs zu Überschätzungen führen, was zu einer schlechten akustischen Isolierung in Räumen führt. Der Einfluss des Seitenverhältnisses auf die akustische Leistung wurde als vernachlässigbar befunden. Ein Korrekturfaktor für Verglasungsabmessungen wurde entwickelt, um die akustische Planung vor Ort zu verbessern und bei der Auswahl akustisch geeigneter Produkte zu unterstützen.

Ein detailliertes numerisches Modell des Mehrfachverglasungssystems wurde mit kommerzieller Finite-Elemente-Software entwickelt. Zusätzliche Experimente maßen den Elastizitätsmodul und die Verlustfaktoren von Materialien wie Fensterkitt und Abstandhaltern. Die gemessenen Daten aus diesen Bewertungen wurden als Eingabeparameter für das Finite-Elemente-Modell genutzt, um genaue Vorhersagen des Schalldämm-Maßes zu ermöglichen. Das Modell zeigte eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen, wobei die Steifigkeit der Abstandhalter entscheidend für die Verbesserung der Genauigkeit war. Eine reduzierte Steifigkeit der Abstandhalter führte zu einer verbesserten Schalldämmung.

Das entwickelte numerische Modell für Mehrfachverglasungen bietet Potenzial zur weiteren Verbesserung der akustischen Leistung von IGUs. Vorläufige Ergebnisse deuteten darauf hin, dass die Verwendung von CO₂-Gas in Isolierglaseinheiten die Schalldämmung weiter verbessern und ökologische Vorteile durch die Reduzierung von Treibhausgasemissionen bei der Produktion bieten könnte. Darüber hinaus ist das numerische Modell anpassbar für andere Bauelemente, wie abgehängte Decken und Doppelwände, und kann Luft- und Körperschall, Übertragungsfunktionen und Kurzschlusskräfte vorhersagen.

Abstract

In modern architecture, the growing use of glass surfaces in buildings significantly contributes to the transmission of exterior noise, primarily through windows, due to their lower sound transmission loss compared to outer walls. However, the development of modern insulating glass panes often prioritizes energy efficiency and thermal insulation, with less focus on acoustic performance. Typically, the acoustic performance of windows is assessed using test certificates based on ISO standard measurements in controlled laboratory environments. However, actual construction conditions, including variations in window dimensions, edge connections, and mounting conditions, can lead to discrepancies between certified values and real-world performance. This project aimed to refine methods for predicting the acoustic performance of insulating glass units (IGUs).

The investigation focused on triple glazing, examining influences such as window dimensions, glass layer thickness, and edge spacer configurations. Twenty IGU with various dimensions and glass layer configurations were tested according to DIN EN ISO 10140 standards, covering third octave and narrow band frequencies.

The study demonstrated that increasing the thickness of the outer glass layer significantly improves acoustic performance, while the inner layer has minor influence. The study also indicated that, as the surface area of IGUs increases, acoustic performance tends to decrease. Consequently, using certificates from standard-sized IGUs to evaluate larger units can result in overestimations, leading to poor acoustic insulation in rooms. The effect of aspect ratio on acoustic performance was found to be negligible. A correction factor for glazing dimensions was developed to enhance on-site acoustic planning and assist in selecting acoustically suitable products.

A detailed numerical model of the multi-glazing system was developed using commercial finite element software. Additional experiments measured the modulus of elasticity and loss factors of materials such as window putty and spacers. The measured data from these assessments were utilized as input parameters for the finite element model, allowing for accurate predictions of sound transmission loss. The model showed good agreement with experimental results, with spacer stiffness being crucial for improving accuracy. Reduced spacer stiffness was found to improve sound insulation.

The developed numerical model for multiple glazing offers potential for further enhancing the acoustic performance of IGUs. For instance, preliminary findings suggested that using CO₂ gas in insulating glass units could further improve sound insulation and provide environmental benefits by reducing greenhouse gas emissions during production. Furthermore, the numerical model is adaptable for other building components, such as suspended ceilings and double walls, and can predict air and structure-borne sound, transmission functions, and blocked forces.

Einführung

Fenster und Verglasungen spielen eine immer wichtigere Rolle im modernen Wohnungsbau. Die Trends gehen aktuell zu größeren Glasflächen und schmalen Rahmen. Raumhohe Panoramafenster lassen viel Tageslicht in Wohnräume und ermöglichen den ungehinderten Blick in die Umgebung. Neben den Ansprüchen an das Design erfüllen sie technische Anforderungen. Während die Frage nach manueller Bedienung oder vollautomatisiertem Smarthome noch Geschmackssache des Eigentümers ist, geht die Tendenz bei der Auswahl von Verglasungen eindeutig zu höheren Wärmedämmungen. Darüber hinaus werden zunehmend Ansprüche an Sicherheit und Schallschutz gestellt. In der Bauplanung kann die resultierende Schallübertragung von einem gegebenen Außenlärmpegel über die Fassade in das Gebäudeinnere rechnerisch ermittelt werden, sofern die Schalldämmung der einzelnen Fassadenkomponenten bekannt ist [1-9].

Normalerweise kommen am Bau deshalb nur Verglasungen zum Einsatz, von denen der Hersteller über ein akustisches Prüfzeugnis verfügt. Zusätzlich bieten die Glashersteller verschiedene Glaskonfigurationsprogramme an, mit denen sich die technischen Parameter der Scheiben vorhersagen lassen. Das Problem dabei besteht darin, dass die Herstellerangaben auf Schalldämm-Maßen beruhen, die nach DIN EN ISO 10140 mit einer genormten Einbaufläche von $B \times H = 1,23 \text{ m} \times 1,48 \text{ m}$, einer speziellen Montageweise und einem Alu-Butyl Randverbund gemessen wurden.

Da Fenster am Bau in der Regel andere Abmessungen und Randverbünde haben, unterscheidet sich die Schalldämmung am Bau von dem im Prüfzeugnis angegebenen Wert. Bei Messungen von außen nach innen verstärkt sich die Abweichung unter Umständen noch weiter. Den vorliegenden Messdaten zufolge können die Unterschiede beträchtlich sein, wobei vor allem bei großformatigen Scheiben mit einer deutlichen Verschlechterung der Schalldämmung von z. T. mehr als 5 dB (also mehr als einer ganzen Schallschutzklasse) zu rechnen ist [10 - 12]. Von Architekten und Planern wird deshalb häufig die Frage nach der Schalldämmung großformatiger Verglasungen gestellt.

Die Schalldämmung von modernen Isolierglasscheiben ist allerdings in erheblichem Maße von verschiedenen Details, wie z.B. dem Scheibenformat, dem gewählten Abstandshalter und der Gaszusammensetzung im Scheibenzwischenraum abhängig [10 - 14]. Alle diese Details werden in der Praxis meist jedoch nicht aus akustischen, sondern aus wärmetechnischen Gründen (z.B. Anpassung an EnEV/GEG) ausgewählt, da sie Bestandteil des Wärmeschutznachweises sind. Bislang sind keine zuverlässigen Angaben zur Abhängigkeit der Schalldämmung von Format, Abstandshalter, Gasmischung usw. von modernen Isolierverglasungen verfügbar, so dass die akustische Planungssicherheit in starkem Maße beeinträchtigt ist.

Bislang gibt es auf diese Fragen nur wenige Antworten, so dass bei der baulichen Schallschutzplanung vielfach mit erheblichen Mängeln zu rechnen ist. Ziel des Forschungsvorhabens ist es deshalb, geeignete Korrekturen zur Berücksichtigung der genannten Unsicherheiten zu entwickeln.

Isolierverglasungen

Die einfachste Art einer Verglasung bildet eine einzelne Glasscheibe, die heutzutage üblicherweise mit dem Floatglas Verfahren hergestellt wird. Dabei wird im Fertigungsprozess das flüssige Glas auf ein ebenfalls flüssiges Bad aus Zinn geleitet, wodurch sich glatte Oberflächen bilden. Bezüglich ihrer schalldämmenden Eigenschaften lässt sich eine solche Einfeldscheibe leicht berechnen. Anhand des Berger'schen Massegesetzes ist bekannt, dass sowohl bei einer Frequenzerhöhung um eine Oktave (Frequenzverdopplung) als auch bei einer Verdopplung der flächenbezogenen Masse, das Schalldämm-Maß jeweils um 6 dB ansteigt [6]. In der Schalldämmkurve einer Einfeldscheibe äußert sich dies im Frequenzbereich oberhalb der Plattenresonanzen und unterhalb der Koinzidenz Grenzfrequenz durch eine Gerade mit einer Steigung von 6 dB pro Oktave. Eventuelle Lichtreflektierende Schichten oder sicherheitsrelevante Vorspannungen wie bei Einscheibensicherheitsglas ESG haben keinen bedeutenden Einfluss auf die Schalldämmung.

Eine etwas aufwändigere Einfachverglasung bildet Verbundsicherheitsglas VSG. Dieses besteht aus zwei Einzelscheiben, die mit einer reißfesten Folie als Zwischenschicht verklebt sind. Ist diese Folie besonders zähelastisch, hat sie eine positive Wirkung auf die Schalldämmung der Scheibe im Bereich der Koinzidenz Grenzfrequenz. Neben der schalltechnischen Verbesserung zeichnet sich VSG zusätzlich durch sein Bruchverhalten aus. Bei mechanischer Überbelastung einer Scheibe haftet das Glas weiterhin an der Folie, wodurch sich eine wesentlich geringere Verletzungsgefahr ergibt. Beschrieben wird der Aufbau einer Verbundsicherheitsglasscheibe beispielsweise durch (4 / 0,76 / 4) mm. Dabei bilden die äußeren Zahlen die Scheibendicken in mm, also jeweils 4 mm. Die Folie wird durch 0,76 beschrieben. Eine alternative Schreibweise wäre VSG 44.2, was auf zwei 4 mm dicke Glasscheiben und zwei Folienlagen hinweisen würde.

Moderne Fenster werden aus Gründen der Wärmedämmung aus mehreren Einzelscheiben zusammengesetzt. Sogenanntes Mehrscheiben-Isolierglas MIG unterscheidet sich von Einfachverglasungen durch einen mit Luft oder Gas gefüllten Scheibenzwischenraum. Seit ca. 1978 sind Einzelscheiben im Wohnungsbau nicht mehr zulässig und wurden zunächst durch Zweischeiben Isolierglas abgelöst. Heutzutage findet aufgrund von Energieeinsparungsmaßnahmen hauptsächlich Dreischeiben Isolierglas Anwendung in der Baupraxis. Eine Dreifachverglasung besteht aus drei Scheiben und zwei Zwischenräumen.

Beispielsweise würde ein Scheibenaufbau einer Dreifachverglasung beschrieben durch [4 (12 Ar) 4 (12 Ar) 4] mm. „Ar“ beschreibt in diesem Fall, dass der Zwischenraum mit Argon statt Luft gefüllt ist. Allerdings besteht die Füllung produktionsbedingt nicht zwangsläufig aus 100 % Argon. „Gasfüllgrade sind vom Hersteller in der Systembeschreibung festgelegte Werte, die im Rahmen der Produktion um + 10 %-Punkte und – 5 %-Punkte schwanken dürfen. Gasfüllgrade über 90 % sind immer Mindestfüllgrade, die in der Produktion nicht unterschritten werden dürfen“ [9]. Akustisch verhält sich eine Füllung des Scheibenzwischenraumes mit Luft oder Argon sehr ähnlich. Wärmetechnisch bringt eine Argon Füllung allerdings Vorteile gegenüber normaler Luft.

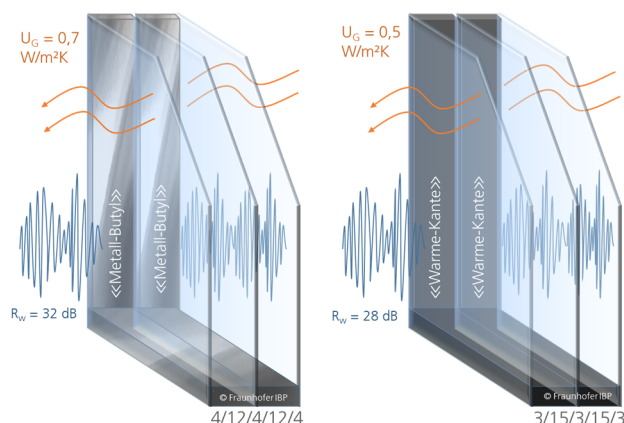
Die Theorie der Schalldämmung von MIG ist im Vergleich zur Einzelschichtstruktur wesentlich komplexer und weit weniger erforscht. Theoretisch steigt das Schalldämm-Maß einer Zweifachverglasung bei Frequenzerhöhung um eine Oktave im mittleren Frequenzbereich um ca. 12 dB und bei einer Dreifachverglasung um bis zu 18 dB an. Eine Dreifachverglasung schneidet in der Schalldämmung bei gleicher Gesamtglasmenge allerdings meist schlechter ab als eine Zweifachverglasung, was auf Resonanzeffekte zurückzuführen ist. Negativ wirken sich daher vor allem symmetrische Scheibenaufbauten auf die Schalldämmung aus, also Isolierverglasungen, die aus mehreren gleich dicken Scheiben und Zwischenräumen bestehen. Daher werden für Schallschutzverglasungen zumeist Scheiben unterschiedlicher Dicke verwendet.

Kantenabdichtungen: Randabstandhalter und Dichtstoff

Isolierglasscheiben bestehen aus mehreren Glasscheiben, die am Rand umlaufend durch einen Abstandhalter verbunden sind. Dieser Abstandhalter besteht aus Metall oder Kunststoff, wobei letztere aufgrund ihrer höheren Wärmedämmung immer häufiger eingesetzt werden (siehe Abbildung 1). Der Abstandhalter wird zwischen den beiden Glasscheiben angebracht und mit diesen verklebt. Er trägt dazu bei, die Glasscheiben voneinander zu trennen und einen gleichmäßigen Abstand zwischen ihnen aufrechtzuerhalten. Die Hauptfunktion eines Abstandhalters besteht darin, für strukturelle Stabilität zu sorgen und die richtige Ausrichtung der Glasscheiben zu gewährleisten. Abstandhalter sind meist hohl und mit Trockenmittel gefüllt, das die im Hohlraum vorhandene Feuchtigkeit absorbiert. Dadurch wird eine trockene Umgebung aufrechterhalten und Kondenswasserbildung verhindert.

Abbildung 1

Moderne Dreifach-Isolierverglasung mit klassischem Metall-Abstandshalter (links) und modernem Kunststoffabstandshalter (rechts).



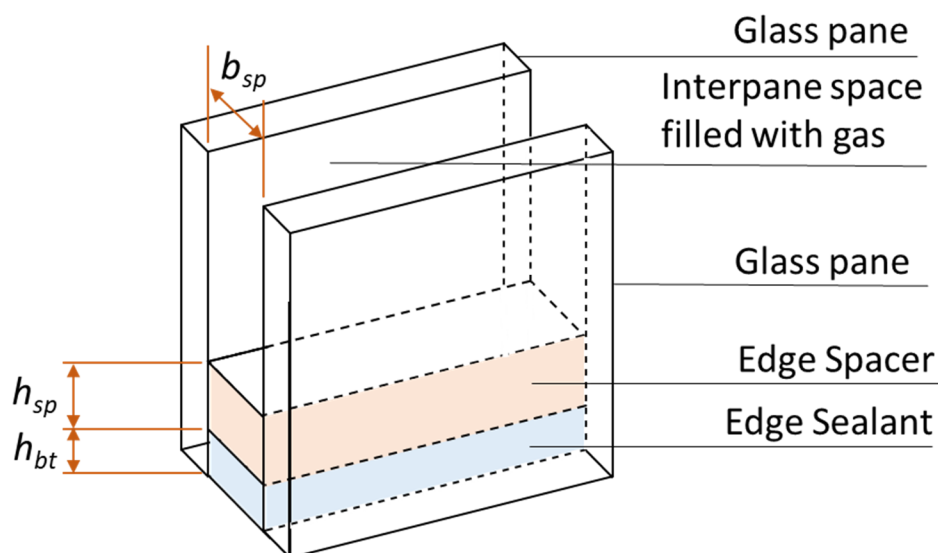
Quelle: IBP, Stuttgart

Der Rand wird durch eine Dichtungsmasse aus Butyl abgedichtet, um die Gasfüllung im Zwischenraum zu sichern und das Eindringen von Feuchtigkeit zu verhindern. Die Dichtungsmasse wird als "sekundäre" Dichtungsmasse bezeichnet. Als „primäre“ Dichtungsmasse wird der Klebstoff zwischen dem Abstandshalter und den Glasscheiben bezeichnet. Der Aufbau eines Randverbunds einer Verglasung ist in Abbildung 2 dargestellt.

Akustische Schwingungen der Glasscheibe auf der Sendeseite werden über den Lufthohlraum und über den Randverbund, auf die angrenzenden Scheiben übertragen. Während die Glasscheibe sich in der Mitte der Fläche akustisch, wie ein mehrschaliges Bauteil verhält, gleicht das Verhalten im Randbereich eher dem eines Sandwich Elements.

Abbildung 2

Schematische Darstellung des mit Trockenmittel gefüllten Abstandhalters und der Sekundärdichtung in einer Doppelverglasung.



Quelle: IBP, Stuttgart

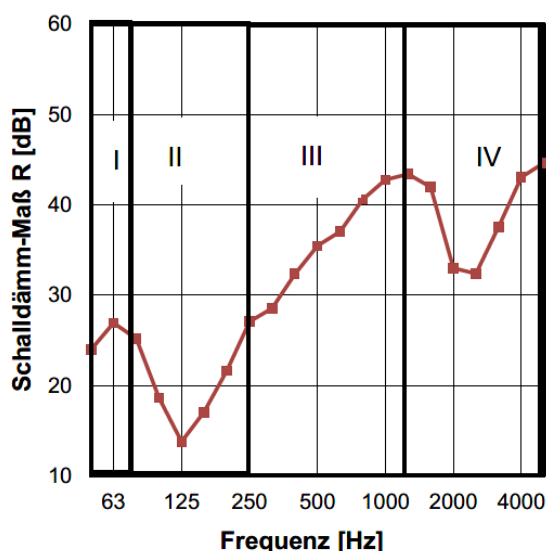
Grundlagen der Akustik

Schalldämm-Maß

Üblicherweise wird das Schalldämm-Maß in der Bauakustik in Terzen oder Oktaven mit festgelegten Mittenfrequenzen im Bereich von 50 bis 5000 Hz angegeben. Abbildung 3 stellt das Schalldämm-Maß einer Dreifachverglasung mit den Abmessungen 1230 x 1480 mm und dem Scheibenaufbau 4-(14 Ar)-4-(14 Ar)-4 mm dar. Zusätzlich sind verschiedene charakteristische Frequenzbereiche angegeben.

Abbildung 3

Ein Beispiel für die Kurve der Schalldämm-Maße, unterteilt in vier charakteristische Frequenzbereiche.



Quelle: IBP, Stuttgart

Bei tiefen Frequenzen, im Bereich I, wird das Schalldämm-Maß durch die Biegesteifigkeit der Platte bestimmt. Es gibt üblicherweise verschiedene Einbrüche bei den sogenannten Plattenresonanz Frequenzen. Diese sind unter anderem abhängig von der Länge und Breite der Glasscheibe. Bei Schalldämmmessungen nach Norm, bei denen der Luftschallpegel im Raum gemessen wird, ist dieser Bereich allerdings von Raummoden überlagert, was zu erheblichen Unsicherheiten führt, wenn dieselbe Scheibe in verschiedenen Räumen untersucht wird.

Im Bereich II tritt in diesem Beispiel in der 125 Hz Terz ein Minimum des Schalldämm-Maßes ein. Dieser Einbruch ist üblicherweise auf die Masse-Feder-Masse Resonanz zurückzuführen und ist damit abhängig von der Glasmasse und Abstand der Scheiben. Im Gegensatz zu den darunterliegenden Plattenresonanzen ist die Masse-Feder-Masse Resonanz nur abhängig vom Glasaufbau und liegt damit bei unterschiedlichen großen Scheiben mit gleichem Aufbau auch im gleichen Frequenzbereich.

Oberhalb der Resonanzfrequenz liegt der breitere Frequenzbereich III. Dieser Frequenzbereich wird aufgrund der annähernd linearen Abhängigkeit des Durchgangsverlustes von der Masse der Scheibe als Massengesetz-bereich bezeichnet. Der Durchgangsverlust für eine Dreifach Verglasung steigt mit der Frequenz in der Theorie um bis zu 18 dB pro Oktave, was allerdings in der Praxis selten erreicht wird.

Im Frequenzbereich IV tritt die Koinzidenz Grenzfrequenz auf. Hier stimmt die Biegewellenlänge in der Platte mit der Wellenlänge der akustischen Spur auf der Plattenoberfläche überein, was zu einem Einbruch in der Schalldämmung führt. Die Lage der Koinzidenz Grenzfrequenz ist abhängig von der Biegesteifigkeit der Platte also vom Elastizitätsmodul und der Dicke der Glasscheibe.

Bei sehr hohen Frequenzen schließlich steigt der Durchgangsverlust bei kontrollierter Dämpfung wieder an und nähert sich allmählich einer Verlängerung des ursprünglichen Massegesetz-Anteils der Kurve.

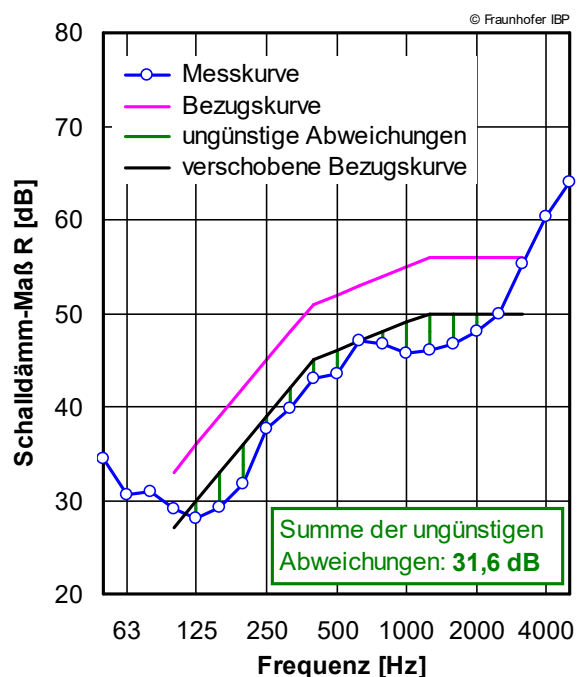
Bewertetes Schalldämm-Maß

Das Schalldämm-Maß ist ein frequenzabhängiges Spektrum und für den Laien schwer zu verstehen und für den Bauplaner schlecht anzuwenden. Deshalb ist in DIN EN ISO 717-1 [25] eine Methode zur Bewertung der Frequenzfunktion in einer einzigen Zahl definiert, dem bewerteten Schalldämm-Maß (R_w).

Um die Ergebnisse einer Schalldämmungsmessung in Terzbändern (oder Oktavbändern) zu bewerten, sind die Messdaten auf eine Dezimalstelle genau anzugeben. Die betreffende Bezugskurve (schwarze dünne Linie) ist in Schritten von 1 dB (0,1 dB für die Angabe der Unsicherheit) in Richtung der gemessenen Kurve (blaue Linie) zu verschieben, bis die Summe der ungünstigen Abweichungen so groß wie möglich, aber nicht größer als 32,0 dB ist (Messung in 16 Terzbändern). Der Wert der verschobenen Referenzkurve (rote Linie mit kreisförmigen Punkten) in Dezibel (oder 1/10 dB für den Ausdruck der Unsicherheit) der Referenzkurve bei 500 Hz wird als "bewertetes Schalldämm-Maß" bezeichnet. Abbildung 4 stellt das Verfahren zusammengefasst dar.

Da die Bezugskurve nur für den Frequenzbereich von 100 bis 3150 Hz definiert ist, werden in DIN EN ISO 717-1 zusätzlich Spektrum-Anpassungswerte zur Berücksichtigung der restlichen Frequenzbereiche und zur Berücksichtigung verschiedener Lärmarten angegeben. Diese werden jeweils auf den Einzahlwert R_w addiert, so dass wieder nur ein Einzahlwert mit den Anforderungen verglichen werden muss. In einigen europäischen Ländern ist es inzwischen üblich, diese in der Bauplanung anzuwenden, in Deutschland allerdings nur, wenn der Auftraggeber dies ausdrücklich fordert. Da der maßgebliche Außenlärm in den meisten Fällen tieffrequenter Straßenlärm ist, sollte aus technischer Sicht für Fenster und Fassaden in der Bauplanung immer $R_w + C_{tr,50-5000}$ angewendet werden. Für Konstruktionen, bei denen die Masse-Feder-Masse Resonanz unterhalb von 100 Hz liegt, können insbesondere die Werte für $C_{tr,50-5000}$ stark negativ ausfallen, was zu höheren Anforderungen führen würde.

Abbildung 4
Schalldämm-Maß mit der Referenzkurve nach DIN EN ISO 717.



Quelle: IBP, Stuttgart

Problemstellung

Stand der Forschung/Baupraxis in Deutschland

Aus bisherigen Versuchen in der Forschung lassen sich für manche Fälle zwar Tendenzen in der Formatabhängigkeit der Schalldämmung von Verglasungen erkennen, exakte Prognosen für bestimmte Produkte sind allerdings nicht möglich. Bisher sind aus verschiedenen Veröffentlichungen zur Untersuchung der Formatabhängigkeit folgende Erkenntnisse herauszulesen: - „Für große Scheiben (3 bis 6 m²) mit Luftfüllung muss mit einer deutlichen Abnahme der Schalldämmung gegenüber mittleren Formaten (etwa 1,5 m²) gerechnet werden“. Hier konnte ein Zusammenhang zwischen der Änderung des bewerteten Schalldämm-Maßes und der Scheibenfläche durch folgende Gleichung beschrieben werden: „ $\Delta R_w = -4,3 \text{ dB log (A)}$ mit A = Oberfläche in m²“ [2].

- „Quadratische Formate weisen in der Regel bessere Werte auf als rechteckige“ [4]. Auch Versuche bezüglich der Seitenverhältnisse wurden bereits durchgeführt und ausgewertet. Hier wird allerdings deutlich, dass zum Teil auch Aussagen getroffen werden, die sich widersprechen. „Square test specimen generally obtains a rather low α value“ [5]. Welcher Zusammenhang zwischen dem Seitenverhältnis von Verglasungen und deren Schalldämmung besteht, lässt sich aus diesen beiden Quellen nicht entnehmen.

- Bei kleinen Scheiben (< 1 m²) kann es zu sprunghaften Änderungen bei Variation der Kantenlängen kommen“. Als Ursache für diese Beobachtung werden von den Autoren Plattenresonanzen angenommen, die bei kleinen Kantenlängen in den bauakustischen Bereich fallen und somit Einbrüche in der Schalldämmung verursachen. - „Eine klare Korrelation zwischen den verschiedenen Geometrien lässt sich (noch) nicht herleiten“ [3]. Diese aus einer Veröffentlichung vom Juli 2013 gewonnenen Erkenntnisse entstanden aus einer umfangreichen Versuchsreihe, bei der neben der Formatabhängigkeit auch der Einfluss der Temperatur auf die Schalldämmung von Verglasungen untersucht wurde. Auf ein ähnliches, wenig aussagekräftiges Ergebnis ohne klaren Zusammenhang zwischen den gemessenen Ergebnissen kam auch die folgende Quelle aus dem Jahre 1981: „Eine quantitative Interpretation der Messkurven erscheint zum gegenwärtigen Zeitpunkt kaum möglich, da sich die Wirkung der einzelnen Einflussgrößen nicht beziffern lässt“.

- Veröffentlichungen zu systematischen Untersuchungen, welchen Einfluss das Material des Abstandshalters bzw. die Steifigkeit und der Verlustfaktor des Randverbunds auf die Schalldämmung haben, konnten nicht gefunden werden.

- „Eine bestimmte Gasfüllung des Zwischenraums führt neben der bekannten grundsätzlichen Verbesserung der Schalldämmung auch zu einer beträchtlichen Abschwächung der Formatabhängigkeit“. Das hier verwendete Schwergas Schwefelhexafluorid (SF₆) ist aufgrund von Umweltschutzgründen mittlerweile unter anderem für diesen Zweck nicht mehr erlaubt. Seit einigen Jahren wird mit Krypton experimentiert, wodurch die Schalldämmung der Anstieg der Schalldämmung im Mittleren Frequenzbereich gegenüber einer Füllung mit Luft oder Argon gesteigert werden kann. Allerdings ist die Gewinnung des Gases im Vergleich sehr aufwändig, sodass der Aufwand sich nur selten lohnt. Informationen zu weiteren Gasfüllungen sind nicht bekannt.

Forschungslücke/Entwicklungsbedarf

Es gilt herauszufinden, ob systematische Zusammenhänge zwischen folgenden Parametern und der Schalldämmung von Verglasungen existieren und wie sich diese in der Schallschutzplanung anwenden und berücksichtigen lassen.

- Scheibenformat und Größe
- Seitenverhältnis
- Abstandshalter und Eigenschaften des Randverbunds
- Gasfüllungen

Zielstellung

Konkrete Projektziele

Die konkreten Ziele können wie folgt zusammengefasst werden:

Entwicklung der Methodik

- Erstellung eines Bauteilkatalogs mit Messergebnissen zur Luftschalldämmung 20 verschiedener moderner Dreifach Isolierverglasungen mit Abstandshaltern aus Kunststoff. Die Auswahl erfolgt in Abstimmung mit den Industriepartnern
- Ermittlung der verschiedenen materialabhängigen Eingangsparameter
- Erstellung eines Rechnungsmodells
- Überprüfung des Rechnungsmodells mit Messergebnissen

Evaluation der Parameter für das Schalldämm-Maß

- 1) Der Einfluss des Verglasungsaufbaus und der Formatabhängigkeit auf die Schalldämmung ist bekannt.
- 2) Der Einfluss des Randverbundes auf die Schalldämmung.
- 3) Der Einfluss der Gaszusammensetzung auf die Schalldämmung.
- 4) Korrekturfaktoren zur Anpassung von Normmessungen an die Schallschutzplanung am Bau liegt vor

Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu

Die derzeit vorhandenen Kenntnislücken im Hinblick auf die Schalldämmung leichter, moderner Isolierverglasungen beeinträchtigen die Planungssicherheit beim baulichen Schallschutz. Dies erhöht die Gefahr von Schallschutzmängeln, beeinträchtigt das Wohlbefinden der Nutzer und vermindert den Gebrauchswert der betroffenen Gebäude. Die aufgezählten Probleme betreffen alle Arten von Schutzbedürftigen Räumen im Sinne der Schallschutzplanung. Dazu gehört der private und öffentliche Wohnungs- sowie Objektbau (Sozialwohnungen, Schulen, Büro- und Verwaltungsgebäude, Krankenhäuser, Alten- und Pflegeheime, Hotels) gleichermaßen. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelten Korrekturen beseitigen die bestehenden Probleme und tragen damit erheblich zur Verbesserung der Planungssicherheit und zur Vermeidung von Schallschutzmängeln bei. Durch die gewonnene Planungssicherheit profitiert die gesamte Wertschöpfungskette der Fenster und Verglasungen. Abstandshalter aus Kunststoff verbrauchen weniger Primärenergie bei der Herstellung als klassische Aluminium-Butyl Randverbünde und bieten gleichzeitig eine bessere Wärmedämmung und senken damit den Energieverbrauch der Gebäude.

Moderne Wärmeschutzverglasungen mit Abstandshaltern aus Kunststoff sind besonders dünn und leicht. Dadurch können vor allem Bestandsgebäude und Gebäude unter Denkmalschutz ohne Anpassung der Fensterrahmen auf ein modernes Energieniveau gebracht werden. Bisher geschieht dies in der Regel auf Kosten des Schallschutzes oder die Sanierung wird abgelehnt, da bereits etablierte Wärmeschutzverglasungen besonders dick und schwer sind, was eine Anpassung der Rahmen erfordert, was wiederum im Denkmalschutz unerwünscht ist. Durch die mögliche Prognose der Schalldämmung kann dabei die gestalterische und funktionale Qualität der Gebäude erhalten oder gar verbessert werden.

Forschungsdesign

Methodischer Ansatz

Zu Beginn des Projekts wurde eine Literaturstudie durchgeführt. Hierzu wurden verschiedene Literaturdatenbanken nach Stichworten wie z.B. Schallschutz, (Isolier-)Verglasungen oder Akustik durchsucht und zutreffende Texte analysiert und ausgewertet. Folgende Datenbanken wurden untersucht:

- Scopus (Elsevier B.V.)
- eLib (Fraunhofer Gesellschaft e.V.)
- Prüfzeugnis Archiv (Fraunhofer IBP)
- Fachzeitschriftenarchive (Bauphysik, Applied Acoustics, Glas+Rahmen, ...)
- Nautos Normenarchiv (DIN, VDI, CEN, TS)
- www.google.de

Das Forschungsprojekt wurde mit den folgenden Untersuchungsschritten fortgesetzt:

- 1) Auswahl der Prüfobjekte (AP2).
- 2) Schalldämm-Messungen an ausgewählten Prüfobjekten. Die Messungen erfolgen nach DIN EN ISO 10140 (AP3, AP4).
- 3) Experimentelle Bestimmung von Simulationsparametern, einschließlich der Randverbunde. (AP6)
- 4) Erstellung der Rechenmodelle mithilfe kommerzieller FEM-Software, wie zum Beispiel COMSOL. Das numerische Modell erfordert iterative Verbesserungen und die Verifizierung anhand von Messwerten. (AP6 and AP7).
- 5) Parametrische Untersuchung von Einfach- und Mehrfachverglasungen mit analytischen und numerischen Modellen (AP6).
- 6) Zusammenstellung aller gemessenen und simulierten Werte in einer Datenbank. Auswertung der Daten und Entwicklung von Richtlinien (AP5).

Es wurde eine Messreihe durchgeführt, bei der die Abmessungen der Scheiben systematisch variiert wurden. Den Schwerpunkt der Untersuchungen bilden moderne, leichte Dreifach-Isolierverglasungen mit energetisch optimiertem Randverbund. Insgesamt wurden 20 Schalldämm-Messungen abgeschlossen. Die Messungen wurden in einem am IBP vorhandenen Fensterprüfstand im Format 1,23 x 1,48 m nach DIN EN ISO 10140 durchgeführt.

Der Schalldämmung wurde zusätzlich zum Normverfahren mit einer erhöhten Auflösung von 1/24-Oktavbändern gemessen, um tief in die Physik einzudringen. Der gemessene Pegel wurde mit dem vorhergesagten, mithilfe der Finite-Elemente-Methode simulierten Wert verglichen, um das numerische Modell zu validieren. Nach der Validierung wurde das Simulationsmodell verwendet, um die fehlenden Proben zu ergänzen, insbesondere den Einfluss der Abstandhalter und der Gasfüllung im Scheibenzwischenraum auf die Schalldämmung.

Nach Abschluss der Messungen und der Simulation wurden die Ergebnisse in einer Datenbank zusammengefasst und hinsichtlich der akustisch relevanten Einflussgrößen (Verglasung, Fläche und Seitenverhältnis) ausgewertet.

Projektteam und Organisation, Kooperationspartner

Die Schalldämm-Messungen gemäß DIN EN ISO 10140 erfordern spezialisierte Laborprüfräume. Das Fraunhofer IBP in Stuttgart verfügt sowohl über diese geeigneten Laborprüfräume als auch über qualifiziertes Personal und spezielles Mess-Equipment.

Die Gesamtorganisation des Projekts lag beim Fraunhofer IBP. Die Projektteilnehmer wurden vom IBP einbezogen und während der Meilensteinbesprechungen sowie während der gesamten Durchführung des Projekts um ihre Unterstützung gebeten. Die Aufgaben der Industriepartner (Saint-Gobain, Interpane, Energy Glas) bestanden hauptsächlich in der Produktion und Lieferung der Dreifachverglasung. Darüber hinaus haben insgesamt vier Abstandhalterhersteller kostenlose Proben verschiedener Abstandhalter an das Fraunhofer IBP geliefert. Die Probe des Sekundärdichtstoffs wurde von einem der Projektpartner zur Verfügung gestellt.

Das Fraunhofer IBP war maßgeblich an der Durchführung der Messungen, der Datenanalyse, der Entwicklung des Prognosemodells und der Berichterstellung beteiligt.

Arbeitspakete und Meilensteine

AP1: Literatur und Produktrecherche

AP2: Versuchsplanung / Auswahl der Prüfaufbauten

AP3: Vorbereitung, Herstellung und Lieferung der Prüfobjekte

AP4: Montage, Durchführung und Auswertung der Messungen

AP5: Erstellung eines Bauteilkatalogs / einer Glasdatenbank

AP6: Erstellung der Rechenmodelle / Korrekturfaktoren

AP7: Validierung der Rechenmodelle / Korrekturfaktoren

AP8: Berichtslegung und Dokumentation

Projektverlauf – Hauptteil, „Beweisführung“

Beschreibung und Begründung von möglichen Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag

In der Projektplanungsphase wurde ein potenzielles Risiko ermittelt, nämlich die Möglichkeit, eine geringere Anzahl von Testobjekten zu erhalten als erforderlich. Obwohl die anfängliche Bewertung auf eine geringe Wahrscheinlichkeit dieses Risikos hindeutete, war die tatsächliche Anzahl der erhaltenen Testobjekte geringer als geplant. Während insgesamt etwa 50 Schalldämmmessungen geplant waren, wurden nur 20 Dreifachverglasungen mit einer maximalen Fläche von 1,82 m² geliefert. Grund hierfür waren die durch die Corona-Pandemie verursachten Probleme in der Lieferkette, die sich dann mit dem Energiepreisanstieg durch den Krieg in der Ukraine fortsetzten. Zudem wurde ein Produktionswerk des Industriepartner Saint-Gobain Glas Deutschland GmbH während der Flutkatastrophe im Ahrtal überschwemmt und musste die Produktion einstellen.

Die gelieferten Dreifachverglasungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1
Liste der geprüften Dreifachverglasungen

	Lx x Ly [m]	Kantenlängenverhältnis [--]	Fläche [m ²]	Dicke [mm]
Probe 1	1,23 x 1,48	0,83	1,82	3 (14 Ar) 2 (14 Ar) 3
Probe 2	1,23 x 1,48	0,83	1,82	3 (14 Ar) 3 (14 Ar) 3
Probe 3	1,23 x 1,48	0,83	1,82	4 (14 Ar) 2 (14 Ar) 3
Probe 4	1,23 x 1,48	0,83	1,82	4 (14 Ar) 3 (14 Ar) 3
Probe 5	0,97 x 1,17	0,83	1,13	3 (14 Ar) 2 (14 Ar) 3
Probe 6	0,97 x 1,17	0,83	1,13	3 (14 Ar) 3 (14 Ar) 3
Probe 7	0,97 x 1,17	0,83	1,13	4 (14 Ar) 2 (14 Ar) 3
Probe 8	0,97 x 1,17	0,83	1,13	4 (14 Ar) 3 (14 Ar) 3
Probe 9	0,87 x 1,05	0,83	0,91	3 (14 Ar) 2 (14 Ar) 3
Probe 10	0,87 x 1,05	0,83	0,91	3 (14 Ar) 3 (14 Ar) 3
Probe 11	0,87 x 1,05	0,83	0,91	4 (14 Ar) 2 (14 Ar) 3
Probe 12	0,87 x 1,05	0,83	0,91	4 (14 Ar) 3 (14 Ar) 3

	Lx x Ly [m]	Kantenlängenverhältnis [--]	Fläche [m ²]	Dicke [mm]
Probe 13	0,77 x 2,37	0,33	1,37	3 (14 Ar) 2 (14 Ar) 3
Probe 14	0,77 x 2,37	0,33	1,37	3 (14 Ar) 3 (14 Ar) 3
Probe 15	0,77 x 2,37	0,33	1,37	4 (14 Ar) 2 (14 Ar) 3
Probe 16	0,77 x 2,37	0,33	1,37	4 (14 Ar) 3 (14 Ar) 3
Probe 17	0,67 x 2,05	0,32	1,82	3 (14 Ar) 2 (14 Ar) 3
Probe 18	0,67 x 2,05	0,32	1,82	3 (14 Ar) 3 (14 Ar) 3
Probe 19	0,67 x 2,05	0,32	1,82	4 (14 Ar) 2 (14 Ar) 3
Probe 20	0,67 x 2,05	0,32	1,82	4 (14 Ar) 3 (14 Ar) 3

Quelle: IBP, Stuttgart

Die gelieferten Verglasungen können aufgrund ihrer Abmessungen in 5 Gruppen eingeteilt werden. Jede Gruppe umfasste vier Glasaufbauten mit verschiedenen Kombinationen von drei Einzelglasscheiben mit unterschiedlicher Dicke. Von den fünf Abmessungen der Verglasungen haben drei das gleiche Seitenverhältnis bei unterschiedlicher Fläche und zwei die gleiche Fläche bei unterschiedlichem Seitenverhältnis. Für eine systematische Untersuchung des Einflusses der Abmessungen auf das Schalldämm-Maß war die Anzahl der Proben nicht ausreichend und die Fläche zu klein. Darüber hinaus wurden die 20 gelieferten Probekörper aus identischem Floatglas mit dem gleichen Abstand von 14 mm und dem gleichen Abstandhalter hergestellt, und der Luftzwischenraum war immer mit 90% Argon gefüllt. Daher konnte der Einfluss von (1) Sicherheitsglas, (2) Abstandhalter und (3) Gasfüllung auf das Schalldämm-Maß nicht anhand der Messreihe experimentell untersucht werden.

Dieses Versorgungsproblem führte dazu, dass der Forschungsansatz zu überdacht werden musste. Es wurden zusätzliche Anstrengungen unternommen, um ein zuverlässiges Simulationswerkzeug unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode zu entwickeln. Experimente liefern zuverlässige Daten über die untersuchten Proben, sie sind aber in der Regel auch teurer, da Materialien, Ausrüstung, Lieferung und spezielle Prüfeinrichtungen mit geschultem Personal erforderlich sind. Darüber hinaus werden gemessene Daten oft von Umgebungsfaktoren wie dem Klima, der Anlage oder den normativ festgelegten Bedingungen beeinflusst und zeigen möglicherweise nicht die gesamte Physik hinter den Experimenten. Im Gegensatz dazu können Simulationen virtuell durchgeführt werden und das gesamte Spektrum physikalischer Phänomene vorhersagen, die in der Realität nicht einfach gemessen werden können, wie z. B. die Reaktionskraft, die Schwingungsform und die Schallintensität. Während des iterativen Prozesses der Produktentwicklung bieten Simulationen einen kostengünstigeren und umweltfreundlicheren Ansatz. Obwohl die Anzahl der gelieferten Verglasungen (20) für eine umfassende Parameterstudie nicht ausreichte, war sie für die Verifizierung des Simulationsmodells mehr als ausreichend.

Darüber hinaus verfügt das IBP über ein analytisches Werkzeug zur Berechnung des Schalldämm-Maßes eines einschichtigen homogenen Materials unter verschiedenen Randbedingungen [21]. Neben dem numerischen Modell wurde dieses analytische Modell im Projekt auch verwendet, um den Einfluss der Abmessungen auf

den Schalldämmwert zu untersuchen. Im Vergleich zur FE-Methode benötigt das analytische Werkzeug wesentlich weniger Simulationszeit und eignet sich daher besser für eine groß angelegte parametrische Studie.

Tabelle 2 fasst die im Rahmen des Projekts angewandten modifizierten Methoden zusammen.

Tabelle 2
Angewandte Methoden im Rahmen des Projekts.

	DIN EN ISO 10140	Datenbank	FEM	Analytisch
Frequenz-bereich	50-5000	50-5000	< 1.4 kHz	< 5.7 kHz
Frequenzauflösung	24th	3rd	alle	alle
# Proben	20	App. 800	App. 70	App. 200
Kosten/Zeit	4 Proben/Tag	---	1 Tag	1 Stunde
Zuverlässigkeit	hoch	hoch	mittel	gering
Anwendung	Verglasungs-konstruktion	Modell-überprüfung	Mehrfach-verglasung	Einfachverglasung, Abmessungen

Quelle: IBP, Stuttgart

Messtechnik für das Schalldämm-Maß

Das Schalldämm-Maß von Dreifachverglasungen wurde nach DIN EN ISO 10140 gemessen. Die internationale Norm DIN EN ISO 10140 enthält Regeln für die Durchführung von Laborprüfungen zur Bestimmung des Schalldämm-Maßes von Bauteilen, u.a. Verglasungen. Die Schalldämm-Maße der Musterverglasungen 1-12 (siehe Tabelle 1) wurden im Fensterprüfstand (P4, siehe linke Seite in Abbildung 5) des IBP, Stuttgart, gemessen, während die Schalldämm-Maße der Muster 13-20 (siehe Tabelle 1) im Fassadenprüfstand (P9A P10A, siehe rechte Seite in Abbildung 5) gemessen wurden. Die Verglasungen wurden dafür im P9A P10A in einer Holzmaske zwischen diesen Prüfräumen montiert, während die Verglasungen im P4 auf einer massiven Struktur, wie sie in DIN EN ISO 10140 beschreiben ist, montiert wurden. Die Holzmaske bestand aus einer Leichtbaukonstruktion. Das Schalldämm-Maß der Maske war mindestens 15 dB (Ausnahme 63 Hz, 12 dB) höher als das der besten Dreifachverglasung der Testreihe (siehe Abbildung 7), sodass keine Beeinträchtigung der Messdaten durch die Maske erfolgte. Die physikalischen Eigenschaften der Prüfeinrichtungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Verglasung wurde in beiden Einrichtungen nach dem in DIN EN ISO 10140 festgelegten Verfahren mit Holzleisten und normiertem Fensterkitt (siehe Abbildung 6) eingebaut. Die Messdurchführung entsprach ebenfalls in beiden Fällen der in der Norm beschriebenen.

Abbildung 5

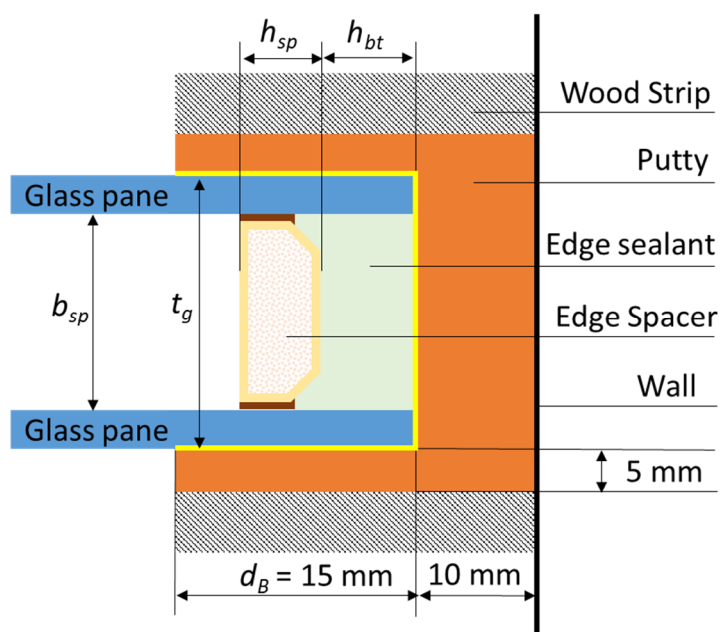
Der akkreditierte Fensterprüfstand (P4) mit der Probenöffnung (links); die Öffnung zwischen zwei benachbarten Prüfanständen (P9A und P10A), abgedeckt durch die Holzmaske (rechts).



Quelle: IBP, Stuttgart

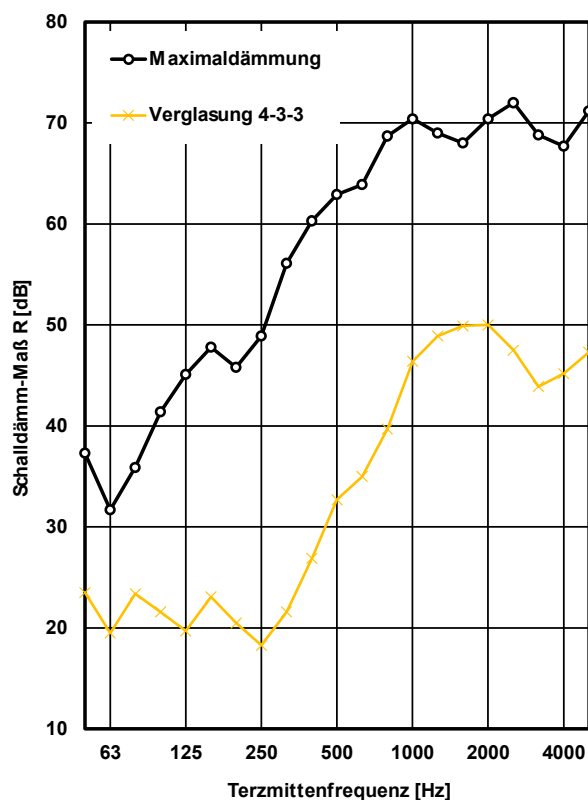
Abbildung 6

Ein doppelschichtiges Isolierglas mit einem Randabstandshalter und einer Randversiegelung im Rahmen.



Quelle: IBP, Stuttgart

Abbildung 7
Gemessenes Schalldämm-Maß der Holzmaske zwischen P9A und P10A.



Quelle: IBP, Stuttgart

Tabelle 3
Räumliche Anordnung der Prüfstände

	Parameter	P4	P9A-P10A
Senderraum	Raumvolumen	67	62
	Prüföffnung (H x B)	1,25 x 1,5	1,24 x 3,2
	Schallquelle	Dodekaeder (beweglich)	Dodekaeder (beweglich)
	Sensor	Mikrofon auf drehbarem Ausleger	Mikrofon auf drehbarem Ausleger
Empfangsraum	Raumvolumen	52	70
	Prüföffnung (H x B)	1,37 m x 1,56	1,28 x 3,2
	Sensor	Mikrofon auf drehbarem Ausleger	Mikrofon auf drehbarem Ausleger

Quelle: IBP, Stuttgart

Datenbank

In den vergangenen 20 Jahren wurden mehr als 800 Verglasungen in der nach DIN EN ISO 10140 akkreditierten Prüfstelle am Fraunhofer IBP in Stuttgart geprüft. Davon waren ca. 600 Zweifachverglasungen und 129 Dreifachverglasungen. Das gemessene Schalldämm-Maß in einem Terzband wird in der internen Datenbank gespeichert. Neben der Produktbezeichnung und dem Hersteller enthält die Datenbank folgende Daten:

- Datum der Messungen
- Glasgeometrie (Höhe, Breite und Glasdicke)
- Art des Glases
- Im Falle von Verbundsicherheitsglas die Art der Folie

Bei Mehrscheibenverglasungen werden zusätzlich folgende Informationen gespeichert:

- Abstand zwischen den Gläsern, gemessen in der Mitte der Verglasung und an den Rändern
- Gasfüllung in jedem Hohlraum
- Material des Abstandhalters und dessen Hersteller

An ausgewählten Messdaten aus der Datenbank sollen Analysen im Sinne der Forschungsfragen durchgeführt werden.

Analyse von Messergebnissen aus der Datenbank - Grundlagen

Für die Interpretation der Messergebnisse werden nachfolgende Einflüsse auf das gemessene Schalldämm-Maß analytisch berechnet. Die Schalldämmung von mehrschaligen Bauteilen folgt üblicherweise der Theorie aus Abbildung 3.

Nach folgender Formel wird für die Wärmeschutzverglasungen die Masse-Feder-Masse-Resonanzfrequenz berechnet (Abbildung 3, Bereich II), wobei die Flächengewichte der äußeren Glasscheiben die Massen und die dynamische Steifigkeit des eingeschlossenen Gases die Feder beschreiben:

$$f_r = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{s' \cdot \left(\frac{1}{m_1''} + \frac{1}{m_3''} \right)} \quad (1)$$

Mit:

- s' = dynamische Steifigkeit der inneren Schicht [MN/m³]
- m_1'' / m_3'' = flächenbezogene Masse der äußeren Schichten [kg/m²]
und m_i'' = Dichte ρ [kg/m³] / Dicke d [m]

Nach folgender Formel wird für die Wärmeschutzverglasungen die Koinzidenzfrequenz (Abbildung 3, Bereich VI) berechnet:

$$f_k = \frac{c_L^2}{2 \cdot \pi \cdot \sin^2 \vartheta} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot 12 \cdot (1 - \mu^2)}{E \cdot d^2}} \quad (2)$$

Mit:

- c_L = Ausbreitungsgeschwindigkeit in Luft [m/s]
- ρ = Dichte Glas [kg/m³]
- E = Elastizitätsmodul Glas [MN/m²]
- d = Bauteildicke [m]
- ϑ = Schalleinfallswinkel [°]
- μ = Querkontraktionszahl []

Die Eigenschaften für Glas werden wie folgt definiert:

- ρ = 2480 kg/m³
- μ = 0,25
- E = 65 GN/m²
- c_L = 340 m/s

Einfluss der Formatabhängigkeit von Mehrfachisolierverglasungen – Variation der Seitenverhältnisse bei gleichbleibender Fläche – Einfachverglasungen

Alle verwendeten Verglasungen bestehen aus 6 mm Floatglas.

Für die spätere Entwicklung verschiedener Prognosemodelle ist es notwendig zu wissen, wie sich Einzelscheiben bei gleichem Aufbau im Vergleich zu Mehrscheiben Isolierverglasungen akustisch verhalten. Aus den Ergebnissen der Vergleiche können später die Simulationsmodelle angepasst werden.

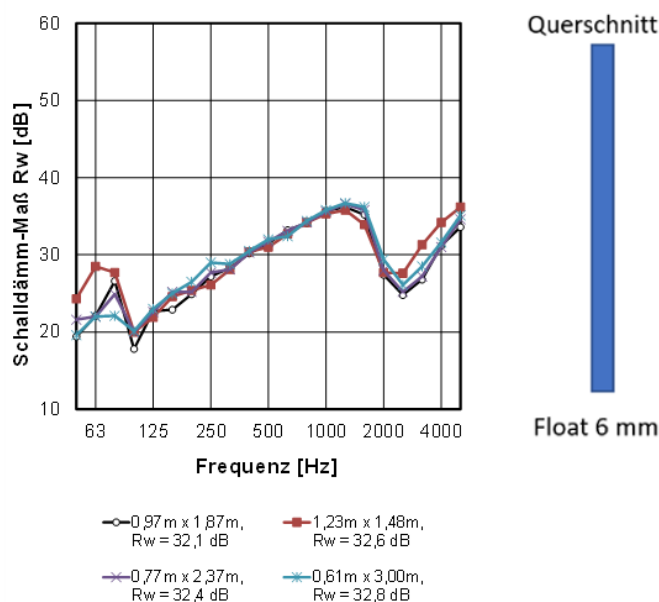
Verglichen werden Verglasungen mit demselben Querschnitt, derselben Prüffläche und unterschiedlichen Seitenverhältnissen. Alle verwendeten Verglasungen haben eine Fläche von $1,82 \text{ m}^2$. Es wurden folgende Abmessungen der Verglasung verglichen:

- 0,97 m x 1,87 m
- 1,23 m x 1,48 m
- 0,77 m x 2,37 m
- 0,61 m x 3,00 m

Die Kurvenverläufe der Einzelscheiben Abbildung 8 sind jeweils für die gemessenen Formate nahezu deckungsgleich. Bei 100 Hz zeigt sich bei allen Scheiben ein Resonanzeffekt, der bei Einzelscheiben theoretisch nur auf die Plattenmoden zurückgeführt werden kann. Bis zum Einbruch der Koinzidenz verlaufen die Kurven bis auf minimale Schwankungen sehr gleichmäßig. Auch die Koinzidenzgrenzfrequenzen weisen in beiden Fällen keine Auffälligkeiten auf. Lediglich fällt auch hier auf, dass bei den Einzelscheiben die rechnerische Koinzidenzgrenzfrequenz von 1970 Hz in der Realität um eine Terz höher, nämlich bei 2500 Hz liegt. Sie bleibt jedoch für jede Abmessung konstant sowohl bei der Frequenz als auch der Tiefe des Einbruchs.

Abbildung 8

Gemessenes Schalldämm-Maß von Zweifach-Isolierverglasungen mit gleicher Fläche und verschiedenen Seitenverhältnissen



Einfluss der Formatabhängigkeit von Mehrfachisolierverglasungen – Variation der Seitenverhältnisse bei gleichbleibender Fläche – Zweifach-Isolierverglasungen

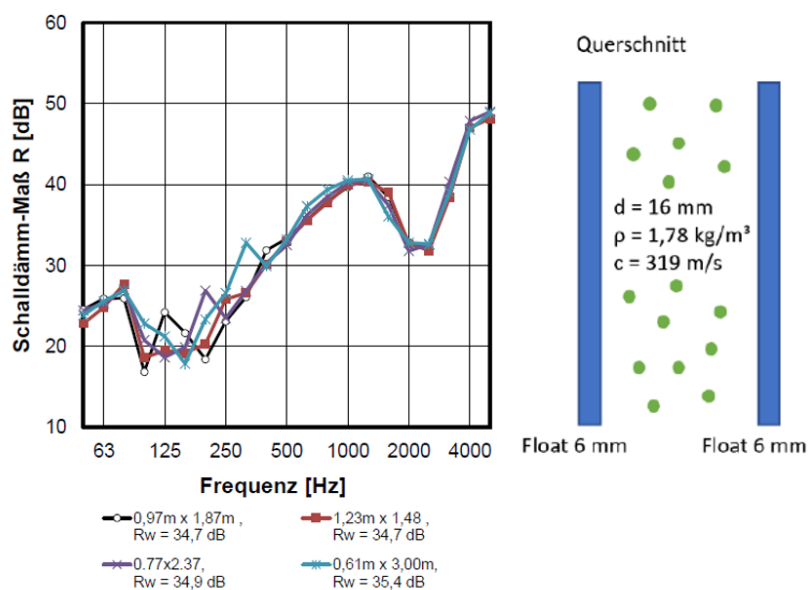
Alle verwendeten Verglasungen haben den Querschnitt 6/16 Ar/6.

Die berechnete Resonanzfrequenz der untersuchten Verglasungen liegt nach Gleichung (1) bei ca. $f_r \approx 200 \text{ Hz}$. In den Kurven in Abbildung 9 weichen diese leicht ab. Die Messkurven haben trotz des gleichen Glasaufbaus

unterschiedliche Einbrüche im tiefen Frequenzbereich. Dies ist vermutlich mit Blick auf die Ergebnisse der Einfachscheiben auf unterschiedliche Plattenresonanzen durch die verschiedenen Seitenverhältnisse zurückzuführen. Ab 500 Hz sind die Verläufe nahezu identisch. Nach Gleichung (2) berechnet sich für alle eingebauten Prüfobjekte eine Koinzidenzfrequenz von $f_k \approx 2000$ Hz. Dies ist auch an einem deutlichen Einbruch in allen Kurvenverläufen zwischen 2000 und 2500 Hz zu erkennen. Die bewerteten Schalldämm-Maße unterscheiden sich um ca. 0,3 dB vom Mittelwert, wobei keine Tendenz bezüglich der Seitenverhältnisse zu erkennen ist.

Abbildung 9

Gemessenes Schalldämm-Maß von Zweifach-Isolierverglasungen mit gleicher Fläche und verschiedenen Seitenverhältnissen

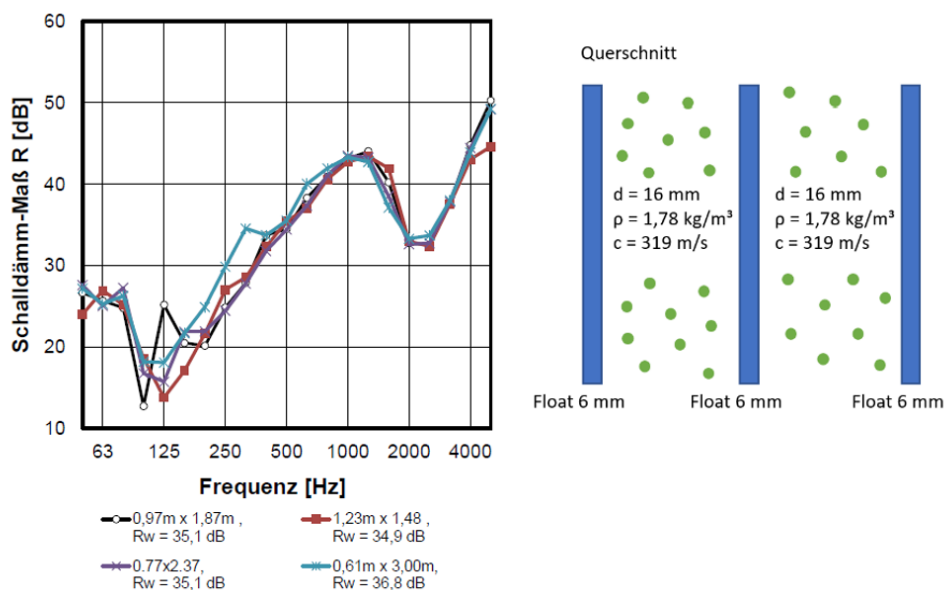


Einfluss der Formatabhängigkeit von Mehrfachisolierverglasungen – Variation der Seitenverhältnisse bei gleichbleibender Fläche – Dreifach-Isolierverglasungen

Alle verwendeten Verglasungen haben den Querschnitt 6/16 Ar/6/16 Ar/6.

Die berechnete Resonanzfrequenz der untersuchten Verglasungen liegt nach Gleichung (1) bei ca. $f_r \approx 140$ Hz. In den Kurven in Abbildung 10 erkennt man diesen Trend zur tieferen Resonanzfrequenz im Vergleich zu Abbildung 9 deutlich. Die Resonanzeinbrüche liegen enger zusammen als bei den Zweifach-Isolierverglasungen. Dies ist vermutlich auf unterschiedliche Plattenresonanzen durch die verschiedenen Seitenverhältnisse zurückzuführen. Ab 500 Hz sind die Verläufe wiederum nahezu identisch, auch bei den Einbrüchen in der Koinzidenzfrequenz bei 2000 Hz. Die bewerteten Schalldämm-Maße unterscheiden sich um ca. 1,0 dB vom Mittelwert, wobei keine Tendenz bezüglich der Seitenverhältnisse zu erkennen ist.

Abbildung 10
Gemessenes Schalldämm-Maß von Dreifach-Isolierverglasungen mit gleicher Fläche und verschiedenen Seitenverhältnissen



Sowohl bei den Zweifach- als auch bei den Dreifach-Isolierverglasungen lässt sich keine eindeutige Abhängigkeit der bewerteten Schalldämm-Maße vom Seitenverhältnis ableiten. In beiden Fällen hat die Scheibe mit 0,61 m Breite und 3,0 m Höhe das höchst bewertete Schalldämm-Maß und die Scheibe im Norm-Format mit 1,23 m Breite und 1,48 m Höhe den niedrigsten Wert.

Einfluss der Formatabhängigkeit von Mehrfachisolierverglasungen – Variation der Prüffläche bei gleichbleibenden Seitenverhältnissen – Einfachverglasungen

Verglichen werden Verglasungen mit demselben Querschnitt, derselben Prüffläche und unterschiedlichen Seitenverhältnissen. Alle verwendeten Verglasungen haben eine Fläche von $1,82 \text{ m}^2$. Es wurden folgende Abmessungen der Verglasung verglichen:

- 0,87 m x 1,05 m
- 1,23 m x 1,48 m
- 0,44 m x 0,52 m
- 0,62 m x 0,74 m

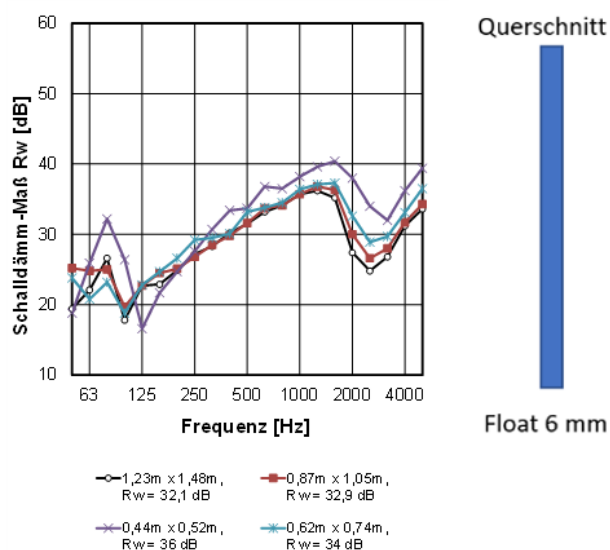
In den Kurvenverläufen der Einfachverglasungen Abbildung 11 ist bis zum Auftreten der Koinzidenzeffekte grundsätzlich eine große Ähnlichkeit festzustellen. Die Steigung der Schalldämmung verläuft bis zur Frequenz von 1250 Hz bei den Einzelscheiben für die drei größeren Scheibengrößen gleich. Die kleinste Scheibe mit den Abmessungen 0,44 m x 0,52 m weicht etwas ab. Sie zeigt einen deutlicheren Resonanzeffekt im tieffrequenten Bereich und anschließend eine größere Steigung. Dieser Einbruch der Schalldämmung bei 125 Hz lässt sich nach einer rechnerischen Überprüfung auf eine Eigenmode zurückführen, welche beim vorhandenen Format rechnerisch bei 134 Hz zu erwarten ist. Werden die Formate größer, tritt ein Einbruch des Schalldämm-Maßes durch Eigenmoden bereits bei tieferen Frequenzen ein und befindet sich somit außerhalb des für die Auswertung relevanten Frequenzbereiches. Als Folge ist dieser Effekt im vorliegenden Fall ausschließlich beim kleinsten der verwendeten Formate zu beobachten.

Bei Betrachtung der Messkurven oberhalb von 2000 Hz ist deutlich zu erkennen, dass Koinzidenzeffekte unterschiedlich starker Ausprägung auftreten. Ein Vergleich der Kurven mit den dazugehörigen Abmessungen der Prüfobjekte zeigt, dass mit zunehmender Scheibenfläche die Ausprägung der Koinzidenz stärker wird. Zu erklären ist diese Steigerung dadurch, dass auf großflächigeren Scheiben bei gegebener Grenzfrequenz eine größere Anzahl von BiegeWellenlängen passen. Je großflächiger also eine Scheibe ist, desto ungestörter kann

sich das Biegewellenfeld ausbilden und dadurch die Koinzidenz entsprechend verstärkt auftreten lassen. Außerdem ist hier das Verhältnis aus Umfang zu Fläche am größten, was zu einer größeren Bedämpfung der Scheiben durch den Fensterkitt führt. Die kleinste Scheibe hat mit $R_w = 36$ dB auch das größte bewertete Schalldämm-Maß und liegt damit ca. 3 dB über dem Mittelwert.

Abbildung 11

Gemessenes Schalldämm-Maß von Zweifach-Isolierverglasungen mit gleicher Fläche und verschiedenen Seitenverhältnissen

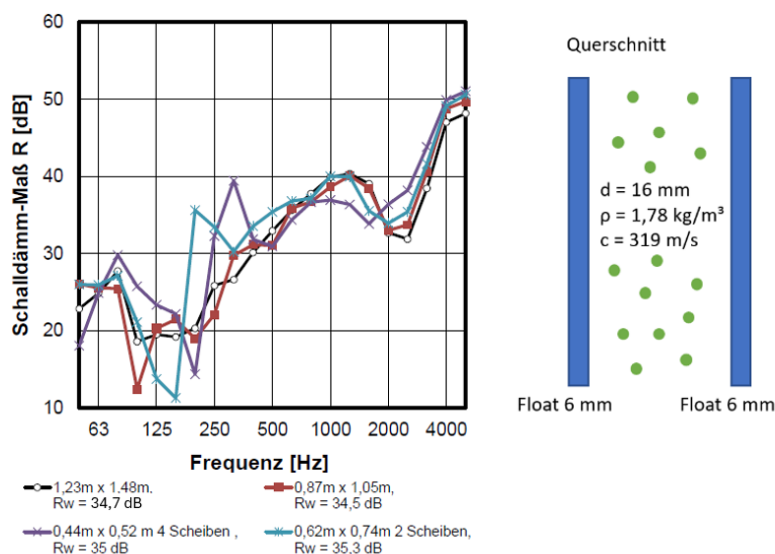


Einfluss der Formatabhängigkeit von Mehrfachisolierverglasungen – Variation der Prüffläche bei gleichbleibenden Seitenverhältnissen – Zweifach-Isolierverglasungen

Im Vergleich zur Variation der Seitenverhältnisse (Abbildungen 9 und 10) lässt sich eine deutlich größere Abhängigkeit der gemessenen Schalldämmung von der Prüffläche, also der Größe der Verglasung erkennen (Abbildungen 12 und 13). Sowohl die Lage der gemessenen Resonanzfrequenzen als auch der Anstieg der Messkurven ab 500 Hz weichen deutlich voneinander ab. Während in Abbildung 12 die Resonanzfrequenz bei der größten Scheibe am niedrigsten liegt, liegt die Koinzidenzfrequenz bei der größten Scheibe am höchsten und mit abnehmender Scheibenfläche kehrt sich das Verhalten um. Das wirkt sich entsprechend auf das bewertete Schalldämm-Maß aus. Die größte Scheibe hat das höchste bewertete Schalldämm-Maß und die Abweichungen vom Mittelwert betragen ca. $\pm 1,5$ dB.

Abbildung 12

Gemessenes Schalldämm-Maß von Zweifach-Isolierverglasungen mit gleicher Fläche und verschiedenen Seitenverhältnissen

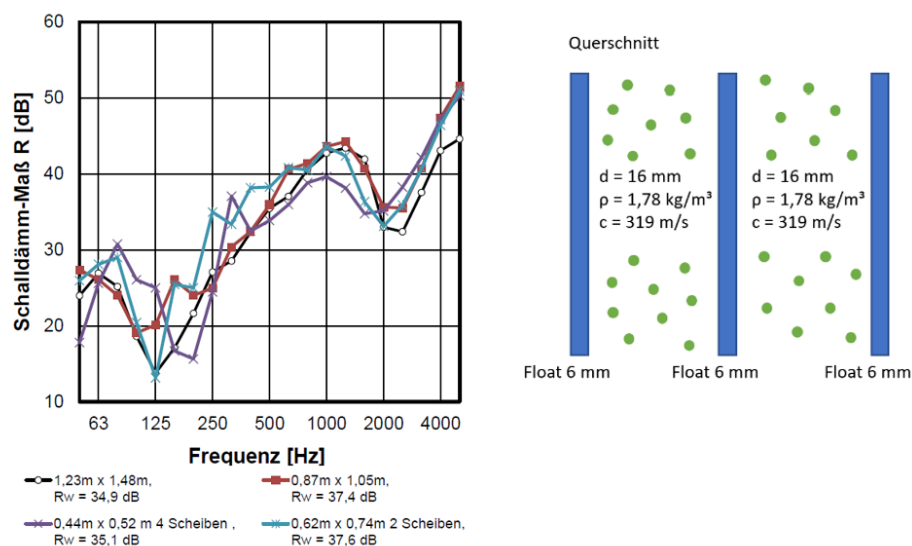


Einfluss der Formatabhängigkeit von Mehrfachisolierverglasungen – Variation der Prüffläche bei gleichbleibenden Seitenverhältnissen – Dreifach-Isolierverglasungen

Ähnlich wie bei Zweifachverglasungen unterscheiden sich die Kurvenverläufe der einzelnen Messungen auch bei Dreifachverglasungen in Abbildung 13. Sowohl die Koinzidenzfrequenz als auch die Resonanzfrequenz lassen sich keiner bestimmten Frequenz zuordnen. Bei den untersuchten Dreifachverglasungen ist das bewertete Schalldämm-Maß bei der kleinsten Scheibe am höchsten und bei der größten Scheibe am niedrigsten.

Abbildung 13

Gemessenes Schalldämm-Maß von Dreifach-Isolierverglasungen mit gleicher Fläche und verschiedenen Seitenverhältnissen



Fazit: Je kleiner die Scheibe ist, desto größer ist der Einfluss des Randverbunds auf die Schalldämmung der Verglasung. Der Einfluss vom Flächengewicht und der Scheibenabstand haben bei größeren Verglasungen einen zunehmenden Einfluss auf die Schalldämmung. Gängige Prognosemodelle und Katalogwerte der Hersteller beziehen sich fast ausschließlich auf den Verglasungsquerschnitt.

Simulationsmodelle

Das Schalldämm-Maß wurde mit Hilfe von analytischen und numerischen Modellen vorhergesagt. Das Fraunhofer IBP verfügt über eine umfangreiche experimentelle Datenbank, die gemessene Werte für Schalldämm-Maße von über 800 Glasscheiben enthält (siehe Abbildung 51 und 52). Diese Datenbank umfasst detaillierte Parameter für jede Verglasungen und wird weiter ausgebaut. Die experimentellen Parameter werden auf Anfrage der industriellen Auftraggeber gesammelt, und daher variieren diese in der Datenbank in einem breiten Spektrum. Diese Vielfalt ist vorteilhaft zur Validierung von Simulationsmodellen, da es ein breites Spektrum von Parametern erfordert, um Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Simulationsmodells sicherzustellen. Andererseits stellt die nicht-systematische Veränderung der Parameter in der Datenbank Herausforderungen für parametrische Studien dar. Selbst wenn experimentelle Ergebnisse von zwei ähnlichen Verglasungen vorliegen, variieren oft mehrere Parameter gleichzeitig, sodass es schwierig ist, die Auswirkungen bestimmten Parameteränderungen zuzuordnen. In diesen Situationen können Simulationen mit weiteren, nicht gemessenen Verglasungen den Nutzen der Datenbankergebnisse erhöhen und eine effizientere Analyse der Parameterauswirkungen ermöglichen. Zudem sind bei allen bisher durchgeführten Messungen, die üblicherweise nach dem Verfahren gemäß DIN EN ISO 10140, früher DIN EN ISO 140-3 bzw. DIN EN 20140-3 durchgeführt und ausgewertet werden, die akustisch relevanten Parameter wie z.B. Feder- und Dämpfungskonstante des Randverbunds unbekannt. Um diese Lücke zu schließen, mussten Schwingungsmessungen an Einzelproben verschiedener Abstandshalter sowie Kleb- und Dichtstoffe durchgeführt werden (siehe Seite 31).

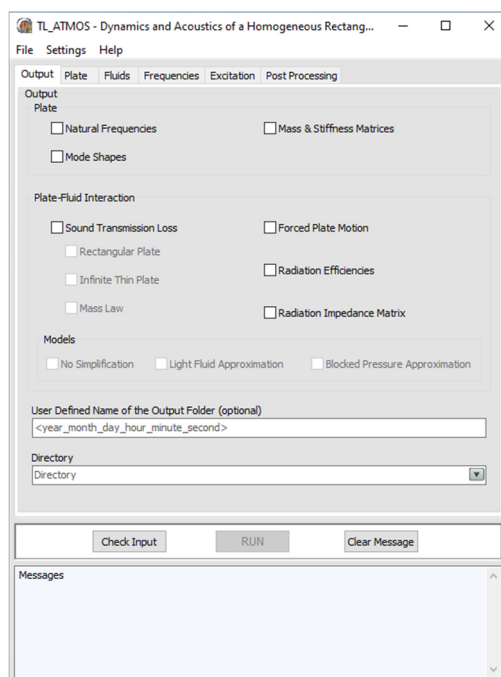
Analytische Methode

Seit 2008 hat das IBP eine nicht-kommerzielle Software namens TL_ATMOS (siehe Abbildung 14) entwickelt, um das Schalldämm-Maß einer einzelnen Schicht einer dünnen, rechteckigen, homogenen Platte vorherzusagen, die sich in einer unbegrenzten, starren Schallwand zwischen zwei mit Flüssigkeit gefüllten Bereichen befindet. Die Platte kann durch lineare und rotierende Federn entlang ihrer vier Kanten elastisch gelagert werden.

Wenn eine ebene Schallwelle auf die Struktur trifft, wird die Struktur durch den auf die Platte wirkenden Nettodruck angeregt, der der Druckdifferenz zwischen Sende- und Empfangsseite der Platte entspricht. Auf der Sendeseite wirkt die Summe der eintreffenden und reflektierten ebenen Schallwelle sowie der von der Struktur abgestrahlte Schall auf die Struktur, während auf der Empfangsseite nur der von der Struktur abgestrahlte Schall wirksam wird.

Das Schalldämm-Maß bei diffuser Feldanregung wurde mit Hilfe der Pariser Formel vorhergesagt, d.h. durch Integration des Schalldämm-Maßes über den Polar- und Azimuthwinkel der einfallenden Schallwelle. Die Simulation der Verglasung in der Standardgröße dauert einige Stunden, um den gesamten Frequenzbereich bis 5,7 kHz abzudecken, der die Obergrenze der 4 kHz-Mittenfrequenz des Oktavbandes darstellt.

Abbildung 14
GUI des vom IBP entwickelten Analysetools TL_ATMOS.



Quelle: IBP, Stuttgart

Numerische Methoden

Mit der kommerziellen FE-Software COMSOL (Version 6.1) wurden numerische Modelle von Einfach-, Zweifach- und Dreifachverglasungen für die Vorhersage des Schalldämm-Maßes bei diffuser Feldanregung erstellt, wie in Abbildung 15 dargestellt. Ziel des numerischen Modells ist es, eine hohe Genauigkeit zu erreichen, so dass die Experimente zumindest teilweise durch dieses numerische Werkzeug ersetzt werden können

FE-Berechnungen für sehr komplizierte Modelle mit komplexen Geometrien, zahlreichen Elementen und detaillierten Materialeigenschaften können die Rechenzeit erheblich verlängern. Daher ist es rechnerisch sehr aufwendig und praktisch unmöglich, alle Details der Prüfeinrichtung und der Verglasungsgeometrie genau zu modellieren. Es ist deshalb wichtig, das Modell zu vereinfachen und dabei ein Gleichgewicht zwischen Simulationsgenauigkeit und Recheneffizienz zu finden.

Die folgenden Vereinfachungen wurden für das Modell vorgenommen: (1) Das akustische Feld auf der Sendeseite wird eliminiert. Auf diese Weise wird der Effekt der Fluidbelastung auf der Sendeseite ignoriert. Diese Annahme ist durch die geringe Masse der Luft begründet. Die Struktur wird durch die numerisch berechnete blockierte Kraft der Summe von 500 einfallenden ebenen Wellen mit zufälliger Phase und Winkeln angeregt, anstatt durch das ideale diffuse Feld, bei dem alle ebenen Wellen mit gleicher Wahrscheinlichkeit auf die Struktur treffen. Die Schallabstrahlung von der Struktur zur Senderseite wird vernachlässigt. Diese Annahme kann für relativ steife Strukturen mit geringen Schallabsorptionseigenschaften, wie z. B. Glasscheiben, gerechtfertigt sein. (2) Die Struktur wird durch dünne Schalenelemente modelliert und in die unbegrenzte Schallwand eingebaut. Daher wird der Nischeneffekt der Einbauöffnung vernachlässigt. (3) Die Struktur überträgt den Schall in das Freifeld mit dem schalltoten Abschluss. Auf diese Weise wird der Effekt der akustischen Moden des Empfangsraums eliminiert. (4) Der Fensterkitt wird durch Volumenelemente modelliert. Die von der Öffnungsfläche und den Holzkugeln bedeckte Fläche wird als feste Randbedingung modelliert. Die Materialeigenschaften wurden im Rahmen des Projektes experimentell ermittelt. (5) Im Falle einer Mehrfachverglasung wurden Abstandhalter und Sekundärdichtstoff kombiniert und mit Hilfe der "boundary spring connection" in COMSOL modelliert. Die äquivalente Steifigkeit des kombinierten Randverbundsystems wird durch Hintereinanderschaltung von zwei Federn ausgedrückt:

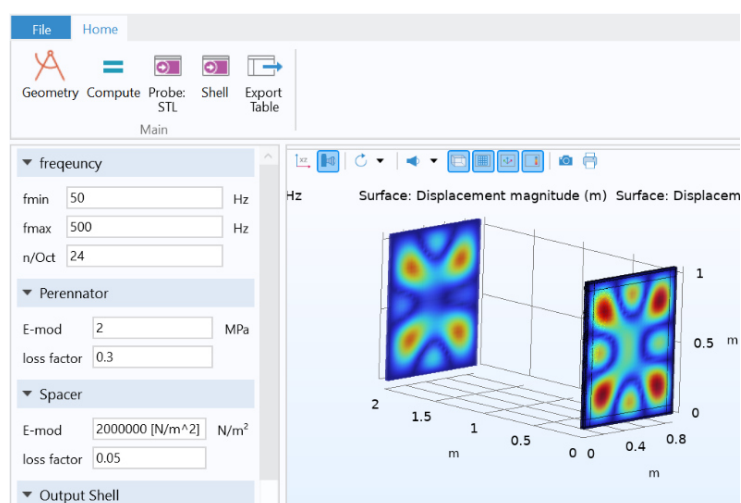
$$k_{av} = \frac{h_{sp}}{h_{sp} + h_{bt}} k_{sp} + \frac{h_{bt}}{h_{sp} + h_{bt}} \frac{E_{s2}}{b_{sp}} \quad (3)$$

wobei h_{sp} und h_{bt} jeweils die Dicke des Abstandshalters und der Dichtungsmittel bezeichnen, und b_{sp} die Dicke des Hohlraums ist (siehe Abbildung 6). k_{sp} ist die äquivalente Steifigkeit des Abstandshalters, und E_{s2} bezeichnet das Elastizitätsmodul der Dichtungsmittel.

Abbildung 16 visualisiert das numerische Modell zur Vorhersage des Schalldämm-Maßes. Die Vereinfachungen (1)-(3) sind auf der linken Seite dargestellt, während (4) und (5) auf der rechten Seite gezeigt werden.

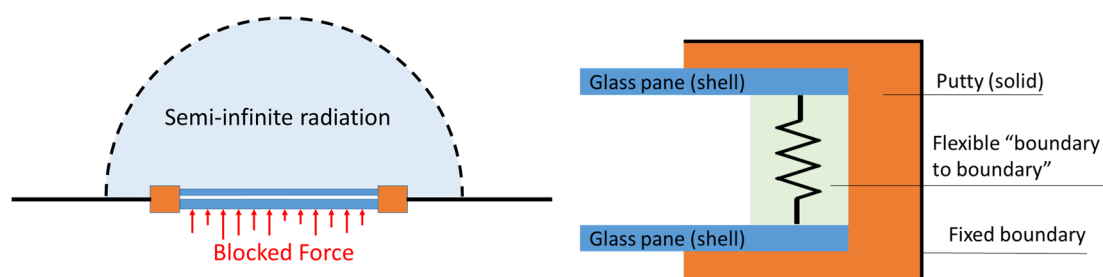
Nach Anwendung aller Vereinfachungen dauert die Simulation etwa 20 Stunden, um das Schalldämm-Maß einer Dreifachverglasung der Standardgröße 1230 x 1480 mm mit einer Frequenzauflösung von 1/48-Oktavband- zwischen 44 Hz und 1,4 kHz vorherzusagen, was der unteren bzw. oberen Frequenzgrenze des Oktavbandes entspricht, das bei 62,5 Hz und 1 kHz zentriert ist. Da die geprüften Dreifachverglasungen einen hohen Durchgangsverlust aufweisen, ist die Frequenz bis 1,4 kHz ausreichend, um das bewertete Schalldämm-Maß gemäß ISO 717 vorherzusagen. Es ist möglich, die Frequenz bis 5,66 kHz abzudecken, was der oberen Frequenzgrenze des Oktavbandes entspricht, das bei 4 kHz zentriert ist, aber es dauert fast eine Woche, um die gesamte Bandbreite zu simulieren. Daher wird in diesem Bericht der Frequenzbereich der numerischen Simulation auf unter 1,4 kHz begrenzt.

Abbildung 15
COMSOL Anwendungsentwickler



Quelle: IBP, Stuttgart

Abbildung 16
Schematische Darstellung des numerischen Modells zur Vorhersage des Schalldämm-Maßes (links) und die vergrößerte Ansicht um die Randabstandshalter (rechts).



Quelle: IBP, Stuttgart

Messverfahren für die dynamischen mechanischen Eigenschaften

Um genaue Werte für die Eingangsparameter der Simulation zu erhalten, müssen die strukturellen Parameter der Verglasungskomponenten und des Befestigungsrahmens genau bestimmt werden. Durch die Verwendung der genau geschätzten strukturellen Parameter kann die Simulation zuverlässigere und realistischere Ergebnisse liefern, die zur Gesamtanalyse und zum Verständnis des Systems beitragen.

Die dynamisch-mechanischen Eigenschaften, der dynamische Elastizitätsmodul und der Verlustfaktor, wurden gemäß DIN EN ISO 6721-4 [22] gemessen. Wie in der Norm festgelegt, wurde die Probe zwischen zwei kreisförmige Aluminiumscheiben mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Dicke von 4 mm platziert. Abbildung 17 zeigt einige Beispiele der angefertigten Proben.

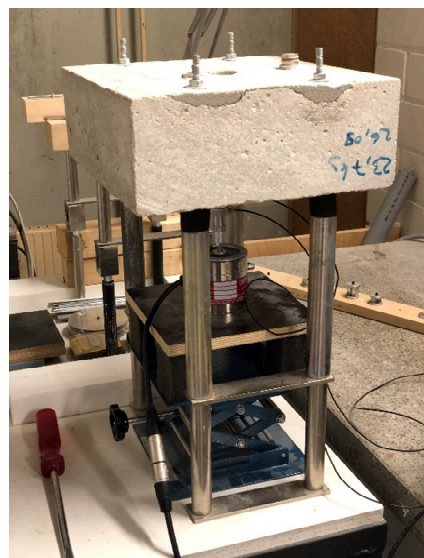
Abbildung 17
Zusammengesetzte Proben für die dynamisch-mechanische Prüfung.



Quelle: IBP, Stuttgart

Die Probe wurde auf dem in Abbildung 18 dargestellten Prüfstand befestigt und einer Kraft ausgesetzt, die von dem darunter angebrachten Schwingungserreger erzeugt wurde. Die Amplituden der auf die Probe wirkenden Kraft (F_a) und Verschiebungszyklen (ΔL_a) sowie der Phasenwinkel (δ_a) zwischen diesen Zyklen wurden gemessen. Die Messung wurde für jede Probe viermal wiederholt. Nach jeder Messung wurde die Probe aus dem Prüfstand genommen und umgedreht.

Abbildung 18
Prüfstand für die dynamisch-mechanische Prüfung nach DIN EN ISO 6721-4.



Quelle: IBP, Stuttgart

Der Speichermodul der Probe E' und der Verlustmodul E'' können geschätzt werden durch:

$$E'(f) = \frac{F_a(f) \cdot L}{\Delta L_a(f) \cdot S} \cos \delta_a(f) \quad (4)$$

$$E''(f) = E'(f) \tan \delta_a(f) \quad (5)$$

wobei f die Frequenz in Hertz ist, und L und S bezeichnen die Probendicke bzw. die Probenoberfläche. Der Verlustfaktor ist definiert als das Verhältnis des Verlustmoduls zum Speichermodul,

$$\eta(f) = \tan(\delta_a(f)) = \frac{E''(f)}{E'(f)} \quad (6)$$

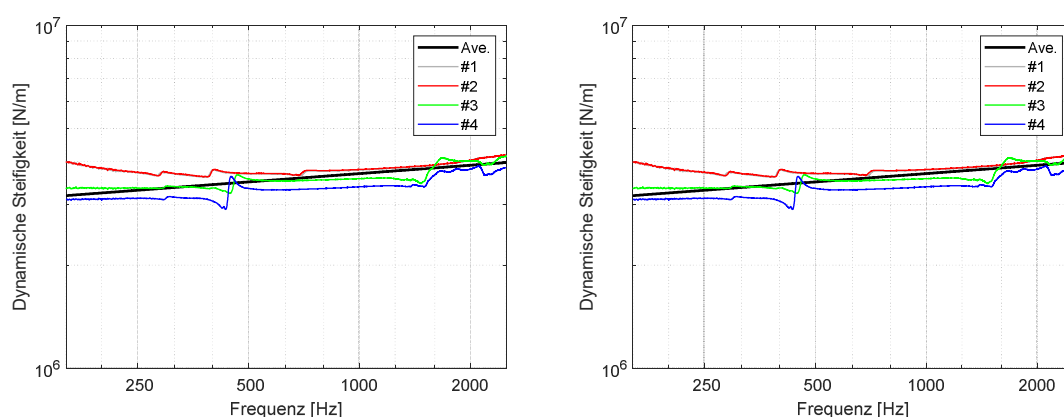
Der dynamische E-Modul E_{dyn} wird angegeben als die Summe des Speichermoduls E' und den Verlustmodul E'' .

$$E_{dyn}(f) = E'(f) + jE''(f) = |E_{dyn}(f)|(1 + j\eta(f)) \quad (7)$$

Abbildung 19 zeigt ein Beispiel für den Absolutwert des gemessenen dynamischen Moduls des Prüfkörpers (links) sowie den Verlustfaktor (rechts). Die dynamische Steifigkeit und der Verlustfaktor wurden mit Hilfe der linearen Funktion im doppelten logarithmischen Maßstab approximiert (schwarze durchgezogene Kurven). Schließlich wurden die frequenzkonstante Steifigkeit und der Verlustfaktor anhand der genäherten Kurve bei 500 Hz bewertet.

Abbildung 19

Ein Beispiel für die gemessene dynamische Steifigkeit (links) und den Verlustfaktor (rechts).



Quelle: IBP, Stuttgart

Experimentelle Bestimmung der Steifigkeit und des Verlustfaktors

In diesem Kapitel werden die gemessenen dynamischen mechanischen Eigenschaften von (1) dem Fensterkitt, (2) dem Sekundärdichtstoff entlang der Glaskanten und (3) den Randabstandhaltern zusammengefasst. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die gemessenen strukturellen Kennwerte.

Tabelle 4

Gemessene strukturelle Parameter.

	(Equivalente) Steifigkeit	Verlustfaktor
Kitt	$3,0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$	0,5
Sekundärer Dichtstoff	$2,1 \times 10^7 \text{ N/m}^2$	0,05
Randabstandhalter	$20 \times 10^9 \text{ N/m}^3 - 200 \times 10^9 \text{ N/m}^3$	0,01 – 0,06
Kantensystem (Randabstandhalter und Sekundärdichtstoff)	$41 \times 10^9 \text{ N/m}^3 - 221 \times 10^9 \text{ N/m}^3$	0,01 - 0,06

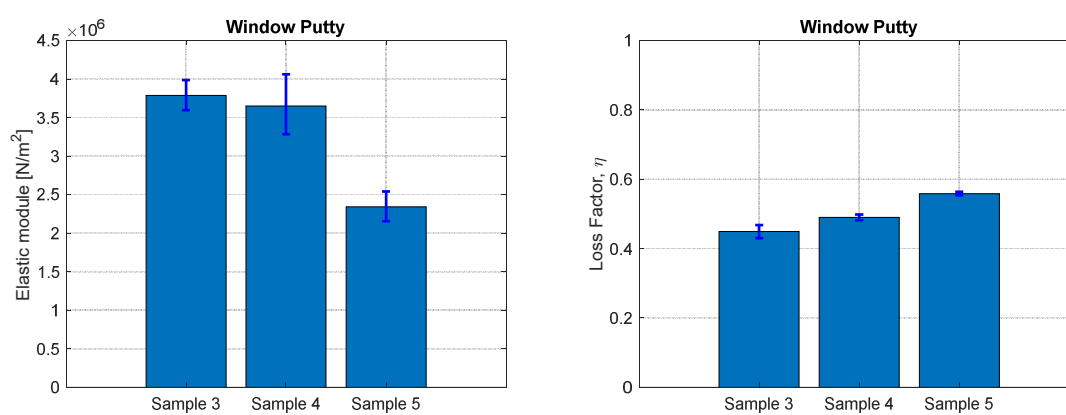
Quelle: IBP, Stuttgart

Fensterkitt

Bei dem Kitt handelt es sich um einen elastischen Dichtstoff auf Silikonbasis, der zur Abdichtung des Spaltes zwischen dem Verglasungsrahmen und der Öffnung der Fensterprüfanlage verwendet wird. Die dynamische Steifigkeit des Kitts und sein Verlustfaktor sind der Schlüssel zum Verständnis der Randbedingungen des Prüfobjekts in der Prüfanlage, die insbesondere bei niedrigen Frequenzen eine wichtige Rolle spielen.

Es wurden drei Proben mit dem Kitt hergestellt, um mögliche Abweichungen zwischen den einzelnen Proben zu berücksichtigen, wie z. B. Fertigungstoleranzen oder Materialschwankungen. Dann wurden alle Proben sofort geprüft, um Aushärtungseffekte zu vermeiden. Abbildung 20 zeigt den gemessenen Elastizitätsmodul und den Verlustfaktor des Kitts. Der vertikale Balken zeigt den Fehlerbereich nach vier Messungen an einer Probe. Schließlich wurden der Elastizitätsmodul und der Verlustfaktor des Kitts auf 3,0 MPa bzw. 0,5 geschätzt.

Abbildung 20
Gemessener Elastizitätsmodul (links) und der Verlustfaktor (rechts) des Kittes.



Quelle: IBP, Stuttgart

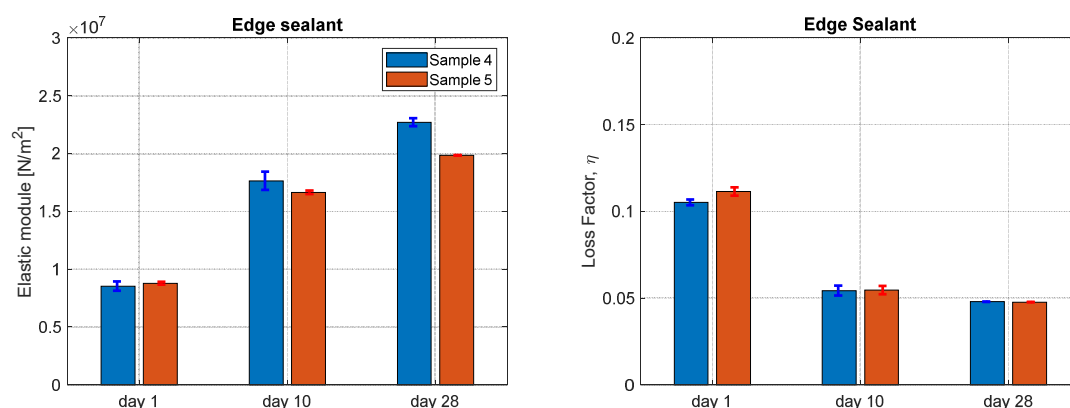
Sekundäres Dichtungsmittel

Bei der Sekundärdichtung handelt es sich in der Regel um einen Zweikomponentenklebstoff, der die Außenkante der Mehrfachverglasung abdichtet, um die Luftdichtheit des Scheibenzwischenraumes zu gewährleisten und das Eindringen von Feuchtigkeit zu verhindern. Um eine homogene Mischung der beiden Komponenten zu gewährleisten, wird für die Probenerstellung eine größere Menge des Klebstoffs gründlich gemischt und anschließend eine Probe aus der Mitte des Mischeimers entnommen.

Abbildung 21 zeigt das gemessene Elastizitätsmodul und den Verlustfaktor der Sekundärdichtung. Es wurden zwei Proben hergestellt und am Tag 1, Tag 10 und Tag 28 nach der Herstellung wiederholt gemessen. Es wurde festgestellt, dass mit zunehmender Aushärtung des Dichtstoffs die Steifigkeit allmählich zunimmt, während der Verlustfaktor abnimmt. Diese Eigenschaften nähern sich mit der Zeit an. Unter Berücksichtigung der Herstellungs- und Lieferzeit ist es realistisch anzunehmen, dass die geprüfte Verglasung älter als einen Monat ist. Daher wurde der am 28. Tag ermittelte Wert für die Simulation verwendet, d.h. ein Elastizitätsmodul von 21 MPa und ein Verlustfaktor von 0,05.

Abbildung 21

Gemessener Elastizitätsmodul (links) und Verlustfaktor (rechts) des Sekundärdichtstoffs, gemessen an den verschiedenen Tagen.



Quelle: IBP, Stuttgart

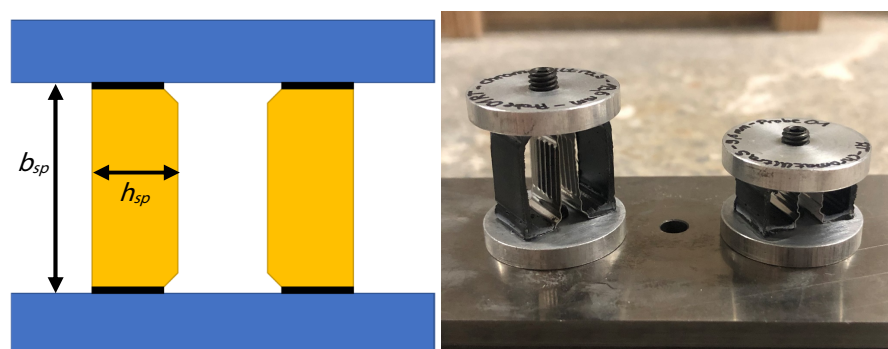
Randabstandhalter

Die parallel ausgerichteten Glasscheiben einer MIG werden durch einen Abstandhalter mechanisch miteinander verbunden. Der Abstandhalter ist ein Rahmen aus Metall oder neuerdings auch aus Polymeren, der zwischen den beiden Glasscheiben angebracht und mit ihnen verklebt wird. Die Hauptfunktion des Abstandhalters besteht darin, die strukturelle Stabilität zu gewährleisten und die korrekte Ausrichtung der Glasscheiben sicherzustellen. Durch diesen Verbund hat der Abstandshalter allerdings einen Einfluss auf die Schalldämmung der MIG. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurde die Steifigkeit der Abstandshalter bestimmt.

Für den Versuch wurde ein Abstandhalterprofil in 10 mm lange Stücke geschnitten. Um eine gleichmäßige Verteilung der einwirkenden Kraft zu gewährleisten, wurden zwei Zuschnitte symmetrisch mit einem Abstand von etwa 4 mm zwischen zwei Scheiben aus Aluminium geklebt, in welche jeweils ein Schraubgewinde zum Anschluss von Körperschallaufnehmer bzw. Schwingerreger (Shaker) zu ermöglichen. Abbildung 22 zeigt die schematische Darstellung des Probenaufbaus (links) und das Bild von zwei Proben (rechts). Tabelle 5 gibt einen Überblick über die geprüften Proben.

Abbildung 22

Abstandhalterproben für die dynamische Steifigkeitsprüfung



Quelle: IBP, Stuttgart

Tabelle 5

Liste der geprüften Abstandhalterproben

Name der Probe	Material	Breite, b_{sp} [mm]	Höhe, h_{sp} [mm]
P1	SAN mit 35% GF	9,6/11,6/13,6/17,6/19,6	6,5

Name der Probe	Material	Breite, b_{sp} [mm]	Höhe, h_{sp} [mm]
H1	Hybrid: Edelstahl und Polypropylen (PP)	9,6/11,6/13,6/17,6/19,6	6,85
S1	Stahl	9,6/11,6/13,6/15,6/17,6	6,5
P2a	SAN mit 35% GF	14	6,5
P2b	SAN mit 35% GF	14	6,5
P2c	ABS-GF	14	6,85
A1	Aluminium	9,5 / 19,5	6,5 / 8,0

Quelle: IBP, Stuttgart

Da ein Abstandhalter eine eigene Struktur hat, kann nur die äquivalente Steifigkeit pro Längeneinheit, k_{sp} [N/m³] aus der gemessenen dynamischen Antwort wie folgt abgeleitet werden:

$$k_{sp}(f) = \left| \frac{F_a(f)}{\Delta L_a(f) \cdot S_{sp}} \right| (1 + j\eta_{sp}(f)) \quad (8)$$

wobei $\eta_{sp}(f)$ den gemessenen Verlustfaktor der Abstandhalterproben bezeichnet und S_{sp} die Gesamtfläche, der auf eine Seite der Basisscheibe geklebten Abstandhalterproben ist.

$$S_{sp} = 2 \cdot 0,01 \, h_{sp} \quad (9)$$

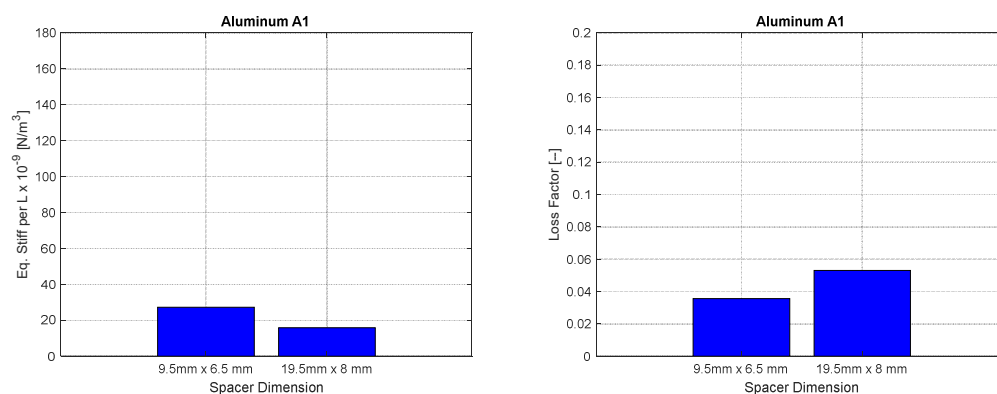
wobei h_{sp} die Höhe des Abstandhalters angibt, die häufig etwa 6-8 mm beträgt (siehe Tabelle 5). Wie in Abbildung 22 zu sehen ist, ist die Länge der auf die Aluminiumscheibe geklebten Probe aufgrund der Kanten-schräge etwas kürzer als ihre Höhe, aber dieser Effekt wird vernachlässigt. Der Koeffizient 2 in Gleichung (9) ergibt sich aus zwei Probenstücken und 0,01 m der Schnittlänge jeder Probe.

Die Abbildungen 23 bis 27 zeigen die gemessene äquivalente Steifigkeit (linke Seite) und den Verlustfaktor (rechte Seite) der Abstandhalterproben. Für einen Stahl-Abstandhalter in Abbildung 27 wurde der Verlustfaktor nicht dargestellt, da der Wert zu niedrig war und nicht korrekt gemessen wurde. Die Abstandhalter aus Polymer und den Hybridmaterialien aus Polymer und Metall werden aufgrund ihrer hohen thermischen Leistung als "warme Kante" bezeichnet. Die Steifigkeit und der Verlustfaktor der "warmen Kante" sind als orange-farbene Balken dargestellt, die anderen als blaue Balken.

Mit zunehmender Dicke des Abstandhalters nimmt die äquivalente Steifigkeit bei geringen Schwingungen ab. Polymere Abstandhalter sind aufgrund ihrer massiven Bauweise im Allgemeinen etwas steifer als Abstandhalter aus Aluminium. Der Hybrid-Abstandhalter H1 weist die geringste Steifigkeit und einen deutlich höheren Verlustfaktor als die anderen auf. Die äquivalente Steifigkeit der getesteten Abstandhalter reicht von 20×10^9 N/m³ bis 200×10^9 N/m³, während der Verlustfaktor zwischen 0,01 und 0,06 schwankt. Obwohl es auf dem Markt weitaus mehr Varianten von Randabstandhaltern gibt, decken die geprüften Proben den Bereich der üblicherweise verwendeten Materialien wie Aluminium, Stahl, Polymer und Hybridstrukturen ab. Daraus kann geschlossen werden, dass der gemessene Bereich der Steifigkeit und des Verlustfaktors die Vielfalt der auf dem Markt erhältlichen Produkte widerspiegelt.

Abbildung 23

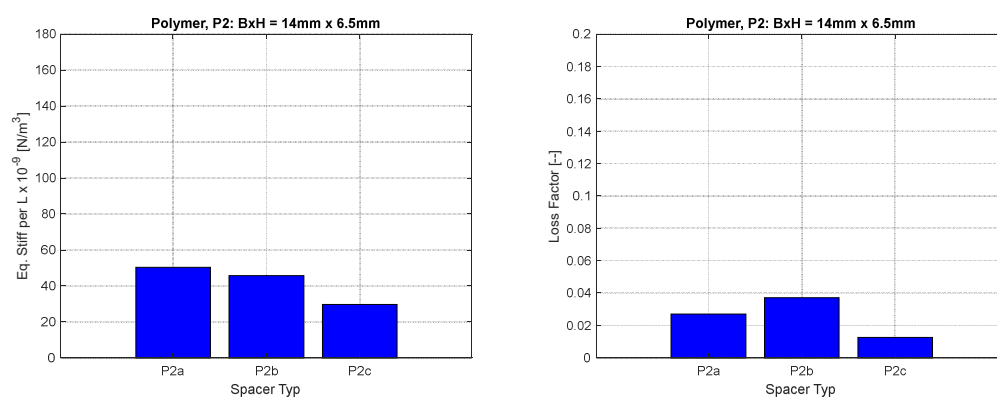
Gemessene äquivalente Steifigkeit (links) und der Verlustfaktor von A1 (rechts).



Quelle: IBP, Stuttgart

Abbildung 24

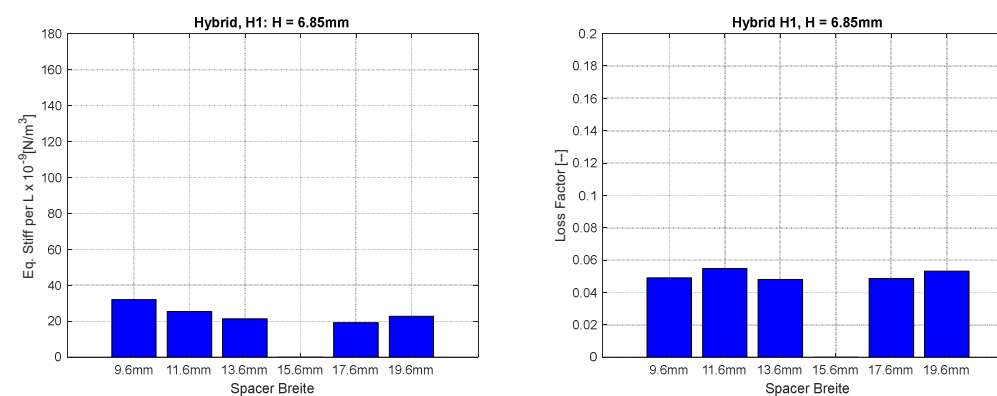
Gemessene äquivalente Steifigkeit (links) und der Verlustfaktor von P2 (rechts).



Quelle: IBP, Stuttgart

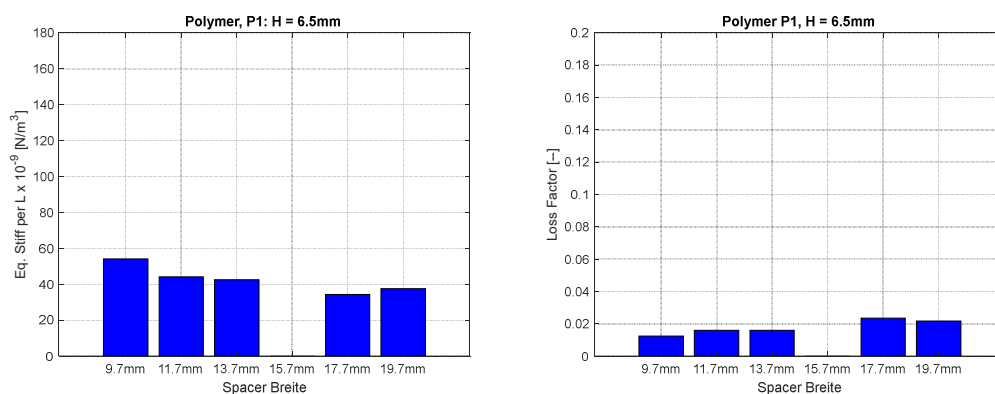
Abbildung 25

Gemessene äquivalente Steifigkeit (links) und der Verlustfaktor von H1 (rechts).



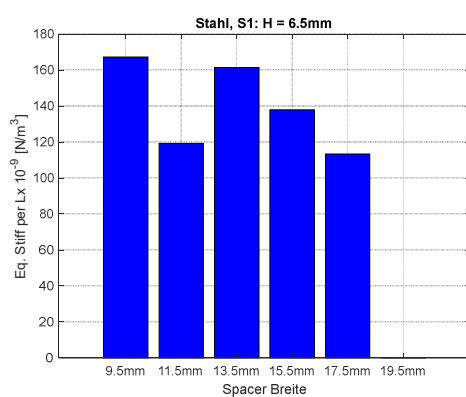
Quelle: IBP, Stuttgart

Abbildung 26
Gemessene äquivalente Steifigkeit (links) und der Verlustfaktor von P2 (rechts).



Quelle: IBP, Stuttgart

Abbildung 27
Gemessene äquivalente Steifigkeit von S1.



Quelle: IBP, Stuttgart

Überprüfung der analytischen und numerischen Modelle: Einfachverglasung

In diesem Abschnitt wurden die Simulationsmodelle anhand des gemessenen Schalldämm-Maßes der Stahlplatte 1230 x 1480 x 2 mm unter Einwirkung eines diffusen Schallfeldes validiert. Die in der Simulation verwendeten Materialparameter der Strukturen und der Luft sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

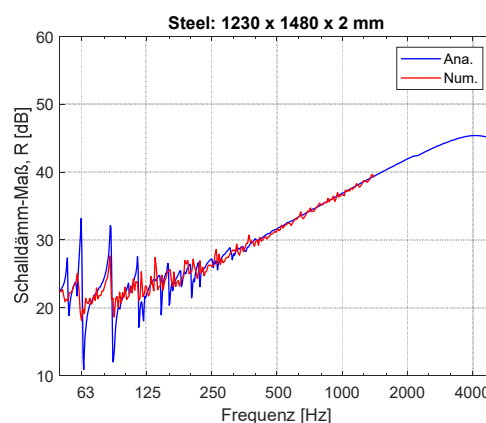
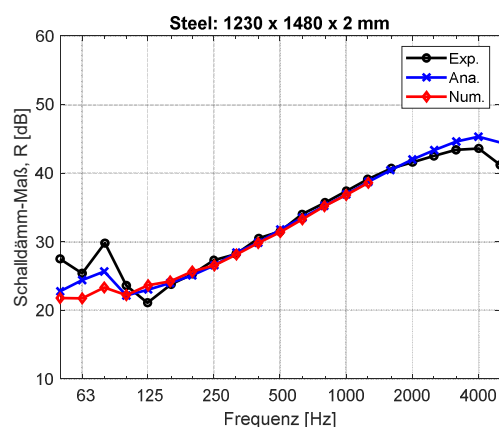
Tabelle 6
Material und Geometrieparameter für die Simulation einer Einfachverglasung mit TL_ATMOS.

Parameter		Einheit	Wert
Stahl	Elastizitätsmodul	N/m ²	200 x 10 ⁹
	Poisson-Zahl	--	0,3
	Verlustfaktor	--	0,002

Parameter		Einheit	Wert
	Dichte	kg/m ³	7850
Kitt	Lineare Steifigkeit	N/m ²	$30 \times (1 + 0,5j) \times 10^6$
	Rotationssteifigkeit	N/m	$30 \times (1 + 0,5j) \times 10^3$
Luft	Geschwindigkeit des Schalls	m/sec	343
	Dichte	kg/m ³	1,23

Abbildung 28

Schalldämm-Maß einer 1230 x 1480 x 2 mm großen Stahlplatte, gemessen in P4 (schwarzer Balken mit Kreis), vorhergesagt durch das analytische Modell (blau mit x) und durch das numerische Modell (rot mit Rauten), gemittelt über das 1/3rd Oktavband (links) und das 1/48th Oktavband (rechts).



Quelle: IBP, Stuttgart

In Abbildung 28 werden die nach DIN EN ISO 10140 gemessenen Schalldämm-Maße (schwarze Linie mit Punkten) mit denen durch das analytische Modell ermittelten (rote Linie mit Trapezen) und dem numerischen Modell mit FEM (blaue Linie mit Kreuzen) simulierten Wert verglichen. Die Unterschiede zwischen den beiden vorhergesagten Schalldämm-Maßen tritt nur unterhalb von 100 Hz auf. Die Werte nach FEM sind hier niedriger als die analytisch ermittelten. Einer der möglichen Gründe für diesen Unterschied ist der mögliche Verlust entlang der Grenzfläche. In der FEM deckt das elastische Material (Kitt) eine Fläche von 15 mm Breite von der Kante entlang des Umfangs der Struktur ab, während die Kante im analytischen Modell durch die linearen und rotierenden Federn entlang der Kante elastisch begrenzt wird. Obwohl die Steifigkeiten der beiden Modi sehr ähnlich sind und die Resonanzen daher bei ähnlichen Frequenzen auftreten, ist das erste Modell in der Lage, die Energie effizienter abzubauen. Infolgedessen ist der Abfall des numerisch vorhergesagten Schalldämm-Maßes weniger ausgeprägt, wie in Abbildung 28 zu sehen ist. Daher ist das über das Band gemittelte Schalldämm-Maß des numerischen Modells geringer als das des analytischen Modells.

Bei tiefen Frequenzen unter 100 Hz sind die Messwerte höher als die berechneten, unabhängig vom Modell. Darüber hinaus gibt es bei niedrigen Frequenzen auch Unterschiede in Bezug in der Schärfe der Spitze und des Einbruchs. Die Messkurve zeigt einen signifikanten Abfall des Schalldämm-Maßes bei 125 Hz im 1/3-Ok-

tavband, während das numerische Modell keine ausgeprägte Spitze oder Senke bei tiefen Frequenzen aufweist. Die Diskrepanz zwischen der Simulation und der Messung kann auf die folgenden zwei Gründe zurückgeführt werden.

1. Das raumakustische Verhalten: In der Simulation wird ein idealisiertes diffuses Feld angenommen, d.h. alle Schallwellen kommen mit gleicher Wahrscheinlichkeit aus allen Richtungen. Diese Annahme gilt prinzipiell auch für das Messverfahren nach DIN EN ISO 10140, allerdings wird das Schallfeld im realen Raum unterhalb von 100 Hz aufgrund der langen Wellenlängen selten diffus ausfallen. Der räumlich-zeitlich gemittelte Schalldruckpegel im Sende- und Empfangsraum der Prüfeinrichtung kann durch die raumakustischen Moden stark beeinflusst werden. Daher ist das in beschriebene Messverfahren im bei tiefen Frequenzen vergleichsweise ungenau, was bei Einhaltung der Messprozedur meistens zu einer Überbewertung führt.

2. Band-Mittelung: Die Schärfe der Spitzen und Einbrüche in den bandgemittelten Spektren wird stark von den Resonanzen und Antiresonanzen beeinflusst, die in dem jeweiligen Frequenzband enthalten sind. Wie im Einführungskapitel erwähnt, wird der erste Dip oft mit der ersten Resonanzfrequenz der Platte in Verbindung gebracht, aber dies ist nicht immer der Fall. Die erste Resonanzfrequenz einer elastisch gelagerten, 1230 x 1480 x 2 mm großen Stahlplatte liegt ungefähr bei 10 Hz, also weit unterhalb des dargestellten Bereichs. Dennoch zeigt die Messung einen deutlichen Einbruch bei etwa 125 Hz. Der Einbruch wurde eher in der Nähe der Resonanzfrequenzen der höheren Moden mit guter Abstrahlung beobachtet. Wird die Resonanz- oder Antiresonanzfrequenz leicht nach oben oder unten verschoben und in das benachbarte Frequenzband verschoben, so nimmt das bandgemittelte Schalldämm-Maß in diesen unterschiedlichen Bändern stark ab oder zu. Da die Resonanzfrequenz leicht durch eine geringfügige Änderung der Randbedingungen beeinflusst werden kann, ist es schwierig, in diesem Frequenzbereich eine ausgezeichnete Übereinstimmung zu erzielen.

Oberhalb von 250 Hz stimmt das numerische Modell im Allgemeinen gut mit den gemessenen Ergebnissen überein. Prinzipiell sind die Werte oberhalb der zweifachen Frequenz des Resonanzeinbruchs in der Messkurve immer etwas niedriger als die des experimentellen Modells.

Überprüfung des numerischen Modells: Dreifachverglasung

Die theoretischen Überlegungen und Vergleiche der Messverfahren aus dem vorangegangenen Abschnitt sollen nun auf das komplexe Verhalten von Dreifach Isolierverglasungen übertragen werden. Insgesamt wurden dazu Schalldämm-Maße von 20 verschiedenen Verglasungen (siehe Tabelle 1) gemessen. Anschließend wurden die Messergebnisse mit simulierten Ergebnissen unter Verwendung des aufgestellten FEM-Modells verglichen.

Für die Mehrfachverglasung wurden zwei zusätzliche Komplexitäten in das numerische Modell aufgenommen: (1) der Hohlraum zwischen den Glasschichten und (2) die dynamische Kopplung der benachbarten Glasschichten. Im FE-Modell wird der Hohlraum mit einer idealen, verlustfreien Flüssigkeit gefüllt und durch schalldichte Wände abgedichtet. Die drei Schichten der Glasscheiben wurden durch den Hohlraum und den Kitt entlang der Ränder miteinander verbunden. Die Steifigkeit des Randsystems wurde in diesem Kapitel mit Null angenommen. Tabelle 7 fasst die Materialparameter zusammen, die für das FE-Modell der Dreifachverglasung verwendet wurden.

Tabelle 7
Material und geometrische Parameter der im FE-Modell verwendeten Dreifachverglasung.

Parameter		Einheit	Wert
Glas	Elastizitätsmodul	N/m ²	72 x 10 ⁹
	Poisson-Zahl	--	0,3
	Verlustfaktor	--	0,005
	Dichte	kg/m ³	2500

Parameter		Einheit	Wert
Kitt	Steifigkeit	N/m ²	30 x 10 ⁶
	Verlustfaktor	--	0,5
Rand-Verbundsystem	Äquivalente Steifigkeit	N/m ³	0
	Verlustfaktor	--	0
CO ₂	Geschwindigkeit des Schalls	m/sec	319
	Dichte	kg/m ³	1,65
CO ₂	Geschwindigkeit des Schalls	m/sec	266
	Dichte	kg/m ³	1,83
Luft	Geschwindigkeit des Schalls	m/sec	343
	Dichte	kg/m ³	1,21

Quelle: Tabelle

Schalldämm-Maß

In Abbildung 29 ist das Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 1230 mm x 1480 mm (links) und 770 mm x 2370 (rechts) mit 3-14(Ar)-2-14(Ar)-3 mm, gemessen am IBP (schwarze Linie mit Punkten) und vorhergesagt durch das numerische Modell (rote Linie mit Rauten) dargestellt. Diese beiden Fälle wurden ausgewählt, weil die Oberflächen der beiden Verglasungen identisch sind, sie aber unterschiedliche Seitenverhältnisse besitzen und sie in unterschiedlichen Prüfeinrichtungen gemessen wurden.

Der Vergleich zwischen dem gemessenen und dem simulierten Schalldämm-Maß im Diagramm links zeigt parallelen zu der Vorbetrachtung mit der Stahlplatte. Das gemessene Schalldämm-Maß zeigt bei niedrigen Frequenzen unter 100 Hz einen höheren Wert als das simulierte. Der Unterschied zwischen den beiden Kurven ist jedoch bei der Dreifachverglasung größer, obwohl angenommen wird, dass der Unterschied durch die akustischen Eigenschaften der Kammern bestimmt wird und somit unabhängig von der Verglasung sein sollte. Ein Grund dafür ist die Kontaktfläche des Fensterkittes zur Verglasung in der Simulation. Da Glas im Allgemeinen einen geringen Verlustfaktor hat, kann ein großer Teil der einfallenden Schallleistung durch den Kitt entlang der Grenzfläche abgeleitet werden. Je größer vom Kitt bedeckte Fläche ist, desto mehr Schallleistung kann entlang der Grenzfläche abgeleitet werden. In der Simulation wird die Platte durch ein dünnes Schalelement modelliert, und die Dicke wird daher auf Null gesetzt. Schließlich wurde die Dicke der drei Glasschichten (8 mm bis 10 mm) nicht berücksichtigt. Dies kann zu einer geringeren Ableitung der einfallenden Leistung und damit zu dem geringeren Schalldämm-Maß in der Simulation führen.

Das gemessene Schalldämm-Maß zeigt einen Abfall zwischen 200 Hz und 250 Hz, während der Abfall des Schalldämm-Maßes bei niedrigeren Frequenzen in einem 1/3-Oktav-Frequenzbereich zwischen 160 und 200 Hz auftritt. Wie im vorigen Abschnitt erwähnt, können diese Unterschiede auf die Diffusität des Sendefeldes und die Verschiebung der Resonanzfrequenzen zurückgeführt werden.

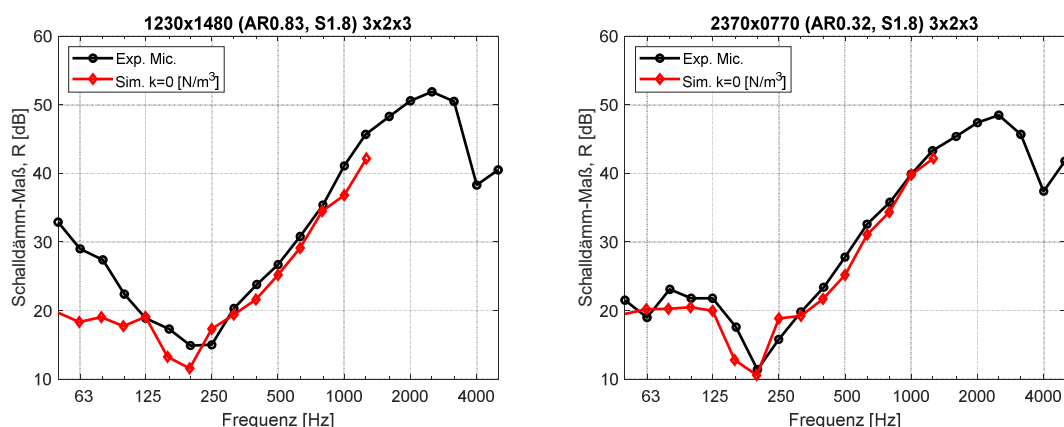
Im Diagramm rechts ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation bei niedrigen Frequenzen deutlich besser. Die Messung wurde aufgrund der Probengröße in einem anderen Prüfstand durchgeführt. Der

Prüfraum hatte zur Unterdrückung der Flankenübertragung Vorsatzschalen, die tieffrequente Moden dämpfen, während der Fensterprüfstand zu diesem Zweck über eine Trennfuge verfügt. Dies verstärkt den Verdacht, dass die gemessenen Werte bei tiefen Frequenzen durch Raummoden beeinflusst wird. Eine bessere Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung, aber auch zwischen Messungen in verschiedenen Laboren erhält man vermutlich, wenn man bei tiefen Frequenzen die Nahhallzeiten möglichst kurz (< 1 s) abstimmt.

Oberhalb von 250 Hz zeigen beide Diagramme eine ähnliche Tendenz. Die Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung ist recht gut, allerdings ist die simulierte Schalldämmung im Allgemeinen etwas geringer als die Gemessene. Gründe hierfür könnten verschiedene Annahmen bei der Simulation sein. So wird der Scheibenzwischenraum mit einem idealen, verlustfreien Gasfüllung berechnet. Außerdem wird die Oberfläche des Abstandhalters als eine harte, undurchlässige Wand modelliert. In Wirklichkeit hat der Abstandhalter jedoch kleine Löcher für die Luftzirkulation und ist mit Trockenmittel gefüllt, das aus porösem Material besteht. Letztendlich kann die Struktur des Abstandhalters als eine mikroperforierte Platte mit geringer Perforation betrachtet werden, hinter der sich ein poröser Schallabsorber befindet. Obwohl die Absorption aufgrund der geringen Perforationsrate der Abstandhalteroberfläche und der geringen Porosität des Trockenmittels nicht hoch ist, kann der Effekt im Vergleich zu einem System ohne Absorption sichtbar sein, insbesondere bei hohen Frequenzen.

Abbildung 29

Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 1230 x 1480 x 3-2-3 mm (links) und 2370 x 770 x 3-2-3 mm (rechts), gemessen in P4 (schwarz mit Kreis) und mit dem numerischen Modell vorhergesagt mit $k_{eq} = 0$ N/m³ (rot mit Rauten).



Quelle: IBP, Stuttgart

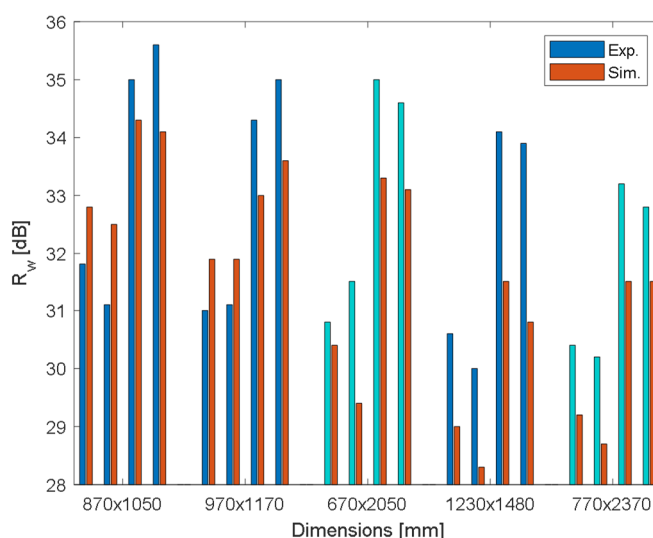
Bewertetes Schalldämm-Maß, R_w

In Abbildung 30 wird das gemessene und simulierte bewertete Schalldämm-Maß R_w der 20 Scheiben verglichen. Die Daten sind nach ihren Abmessungen in 5 Gruppen eingeteilt. In jeder Gruppe sind 4 Balkenpaare dargestellt, die experimentellen Daten (1. Balken in blau) und die simulierten Daten (2. Balken in rot). Jedes Paar entspricht einem anderen Glasaufbau: 3-2-3 mm (1. Paar), 3-3-3 mm (2. Paar), 4-2-3 mm (3. Paar) und 4-3-3 mm (4. Paar). In der dritten und fünften Gruppe, d. h. bei den Abmessungen 670 x 2050 mm bzw. 770 x 2370 mm, sind die Balken der Versuchsdaten hellblau statt blau gefärbt, da diese Messdaten in P9A P10A und nicht in P4 aufgenommen wurden. Es ist zu beachten, dass R_w anhand des Schalldämm-Maßes zwischen 100 Hz und 3150 Hz geschätzt wird und dass der Wert unter 100 Hz keinen Einfluss auf R_w hat. Unter diesem Gesichtspunkt gibt es keinen großen Unterschied zwischen den beiden Messeinrichtungen aufgrund der akustischen Eigenschaften der Räume.

Abbildung 30

Bewertetes Schalldämm-Maß: Gemessen (blau oder hellblau) und durch das numerische Modell (rot) in Bezug auf die Verglasungsmaße

vorhergesagt. Jede Gruppe enthält vier Sätze. Von links nach rechts: Drei Glasschichtdicken 3-2-3 mm, 3-3-3 mm, 4-2-3 mm, und 4-3-3 mm.



Quelle: IBP, Stuttgart

Abbildung 30 zeigt, dass das simulierte bewertete Schalldämm-Maß R_w im Allgemeinen niedriger ist als das gemessene, mit Ausnahme von den vier Scheiben mit kleinen Abmessungen von 870 x 1050 mm und 970 x 1170 mm. Ein möglicher Grund für das höhere Schalldämm-Maß des simulierten Modells mit kleinen Scheiben ist die Steifigkeit des Abstandhalters, die in der Simulation auf null gesetzt wird. Das bedeutet, dass die Platten nur durch den Hohlraum und den Kitt miteinander verbunden sind. Da die Steifigkeit des Kitts geringer ist als die der Sekundärdichtung und des Abstandhalters, ist insbesondere die mittlere Scheibe im Vergleich zur Realität lockerer mit den äußeren Glasschichten verbunden. Da die Randbedingung bei einer kleineren Scheibe eine größere Rolle spielt, führt die Eliminierung des Randverbundes zu einer Überschätzung des Schalldämm-Maßes einer kleineren Scheibe. Bei größeren Verglasungen ist das simulierte Schalldämm-Maß geringer als das gemessene, wobei die Differenz mit zunehmender Abmessung größer wird. Dies ist wahrscheinlich auf das geringe Schalldämm-Maß bei hohen Frequenzen zurückzuführen, da in der Simulation keine Hohlraumdissipation auftritt, wie im letzten Abschnitt erläutert.

Ein weiterer Grund für die Gesamtabweichung ist die Unvollkommenheit der Prüfkörper. In der Simulation sind die Platten idealerweise in gleichen Abständen angeordnet, und der Werkzeuginnendruck ist idealerweise immer auf den atmosphärischen Druck eingestellt. In der Realität gibt es eine akzeptable Schwankungsbreite der Werkzeuginnendicke, ohne dass dies als Fehler angesehen wird. Außerdem kann sich der Luftdruck in der Kavität aufgrund verschiedener Faktoren wie Temperaturschwankungen und Schwankungen des atmosphärischen Drucks ändern. Diese Faktoren können dazu führen, dass sich die Luft im Hohlraum ausdehnt oder zusammenzieht, was zu Druckveränderungen führt. Die Glasplatte kann durch den Luftdruck im Scheibenzwischenraum unter Vorspannung stehen, und die Materialsteifigkeit der einzelnen Scheiben kann geringfügig voneinander abweichen. Infolgedessen können die Resonanzfrequenzen der Glasplatten sowie die von zwei Hohlräumen gleicher Dicke bei den Messungen leicht voneinander abweichen, während sie in der Simulation völlig identisch sind. Es ist schwierig, diese Unzulänglichkeiten im numerischen Modell zu berücksichtigen.

Tabelle 8 fasst die Faktoren zusammen, die die Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment beeinflussen. Der Einfluss ist abhängig von der Frequenz und den Abmessungen der Verglasung. Je nach Größe der einzelnen Faktoren kann die Simulation das Schalldämm-Maß unter- oder überschätzen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung bei Mehrfachverglasungen im Vergleich zu Einfachverglasungen leicht abnimmt, aber die Übereinstimmung ist für die parametrische Studie ausreichend hoch ist, um den Einfluss eines Parameters auf das Schalldämm-Maß hervorzuheben.

Tabelle 8

Auflistung der möglichen Ursachen für die Abweichung zwischen der Simulation und den Messungen.

Parameter	Frequenzbereich	Wirkung in Bezug auf die Größe	Wirkung FEM ist...
Hohlraumverlust	hoch	Abnahme mit der Größe	unterschätzt
Weniger mit Kitt bedeckte Fläche	tief	Abnahme mit der Größe	unterschätzt
Keine Kantensteifigkeit	tief - mittel	Abnahme mit der Größe	überschätzt
Ideale Abstände	tief	---	fallweise

Quelle: IBP, Stuttgart

Ergebnisse

In diesem Kapitel wird der Einfluss der vier Parameter auf das Schalldämm-Maß der Dreifachverglasungen dargestellt. Aufgrund der begrenzten Anzahl gelieferter Dreifachverglasungen wurden die Messungen durch die Simulation der Finite-Elemente-Methode (FE) und die analytische Methode ergänzt. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die untersuchten Parameter und die angewandten Methoden.

Wenn in diesem Kapitel von "experimentellen Daten" die Rede ist, ist damit implizit gemeint, dass die Daten den nach DIN EN ISO 10140 ermittelten Werten entsprechen.

Tabelle 9

Liste der untersuchten Parameter der Dreifachverglasung und der angewandten Methoden.

Parameter	Methoden
Abmessungen und Seitenverhältnisse	Experimente, TL_ATMOS
Glasschichten	Experimente
Abstandhalter + Dichtungsmasse	FEM, Datenbank, Experimente
Gasfüllung	FEM

Quelle: IBP, Stuttgart

Einfluss der Formatabhängigkeit

Im Rahmen des Projekts wurden insgesamt 5 verschiedene Abmessungen von Dreifachverglasungen getestet. Die Anzahl der Proben ist nicht ausreichend, um eine allgemeine Aussage treffen zu können. Außerdem sind die getesteten Dreifachverglasungen kleiner oder gleich der Standardgröße von 1230 x 1480 mm.

Da die rechnerische Prognose des Schalldämm-Maßes einer Dreifachverglasung mit dem FE-Modell fast einen Tag dauert, ist es für eine groß angelegte parametrische Studie nicht geeignet. Außerdem ist das Modell der Dreifachverglasung deutlich komplizierter als das Modell der Einfachverglasung, da akustische Moden des Lufthohlraums zwischen den Scheiben und der Randeffect aufgrund des Abstandhalters berücksichtigt werden müssen. Daher ist das analytische Modell einer Einfachverglasung am besten geeignet, um den Einfluss der Glasabmessungen auf das Schalldämm-Maß aufzuzeigen. Nach der analytischen Untersuchung werden die experimentellen Ergebnisse überprüft, um festzustellen, ob die aus der analytischen

. Analytisches Model, TL_ATMOS

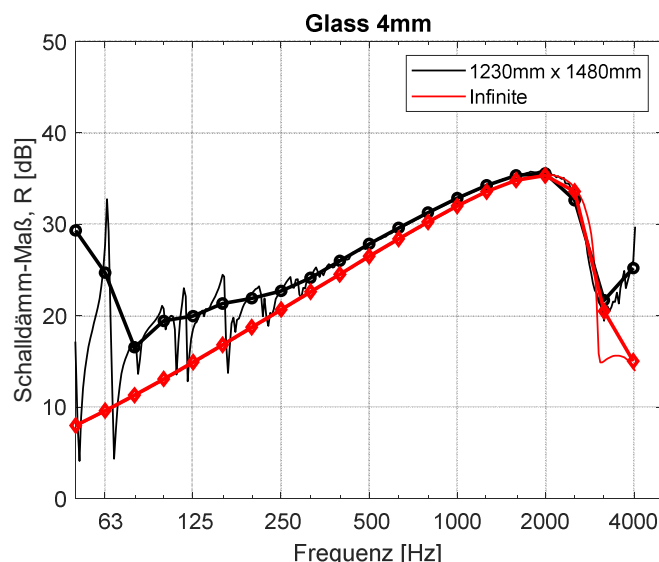
Das vom IBP intern entwickelte Analysetool TL_ATOMOS wurde verwendet, um den Einfluss der Abmessungen der Einfachverglasung auf das Schalldämm-Maß zu analysieren. Die Platte wird durch lineare Federn und Drehfedern [21] elastisch gelagert. Die komplexe Steifigkeit dieser Federn wird mit Hilfe der im vorherigen Kapitel vorgestellten Ergebnisse der Steifigkeit des Kitts bestimmt.

Abbildung 31 zeigt das simulierte Schalldämm-Maß einer 4 mm dicken Glasplatte mit den Abmessungen 1230 x 1480 mm (schwarz) und den der unendlichen Platte (rot) bei Anregung durch ein diffuses Schallfeld. Die erste Plattenresonanzfrequenz der elastisch gelagerten Glasscheibe mit den Abmessungen 1230 x 1480 x 4 mm liegt bei etwa 16 Hz. Der Einbruch wird jedoch bei 80 Hz im 1/3-Oktavband beobachtet, wo einige gut abstrahlende Moden höherer Ordnung enthalten sind. Der Unterschied im Schalldämm-Maß zwischen dem endlichen und dem unendlichen Modell nimmt oberhalb von 2 kHz ab. Daher wird in der parametrischen

Studie das Schalldämm-Maß einer 4 mm dicken Glasscheibe bis zu 2 kHz mit dem endlichen Modell vorhergesagt, und dann das Modell auf die unendliche Platte umgestellt, um Simulationszeit zu sparen.

Abbildung 31

Schalldämm-Maß der einfachen Glasscheibe mit den Abmessungen 1230x1480x 4mm (schwarz mit Kreis) und der unbegrenzten Scheibe aus 4mm Glas (rot mit Rauten).



Quelle: IBP, Stuttgart

Auswirkung der Abmessungen

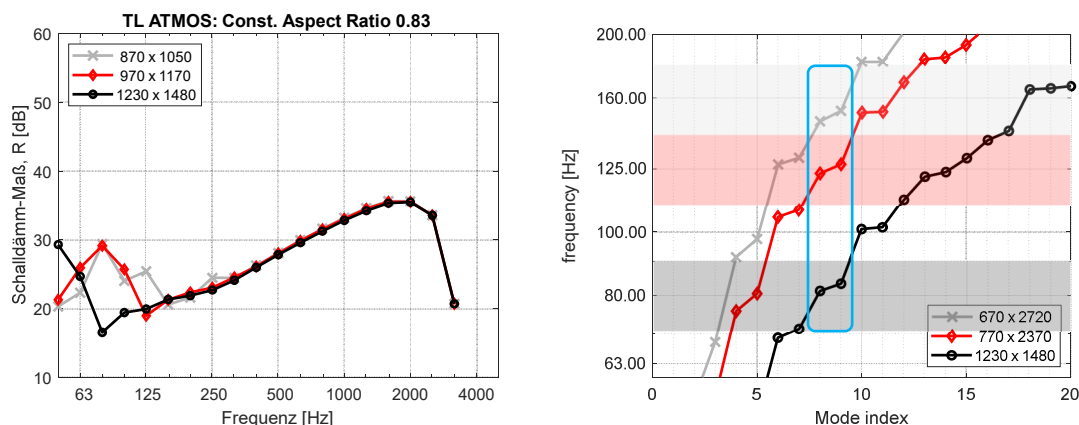
Zunächst wurde die Auswirkung der Fläche auf das Schalldämm-Maß untersucht. Das Diagramm links in Abbildung 32 vergleicht drei simulierte Schalldämm-Maße von 4 mm dicken Glasscheiben mit den Abmessungen 870 x 1050 mm (grau), 970 x 1170 mm (rot) und 1230 x 1480 mm (schwarz). Dies entspricht einer Oberfläche von 0,91 m², 1,13 m² und 1,82 m² bei einem konstanten Seitenverhältnis von 0,83. Mit abnehmender Fläche verschiebt sich die Senke des Schalldämm-Maßes von tieferen zu höheren Frequenzen und wird weniger ausgeprägt. Die Senke steht nicht immer in direktem Zusammenhang mit der ersten Resonanzfrequenz, sondern oft mit den gut abstrahlenden Moden höherer Ordnung.

Das Diagramm rechts zeigt die Resonanzfrequenzen der drei Scheiben bis zur 20. Mode. Die Resonanzfrequenzen nehmen mit zunehmender Größe der Struktur ab, aber die Reihenfolge der Moden bleibt unverändert, da das Seitenverhältnis der Platten gleich war und die gleichen Randbedingungen verwendet wurden. Daher zeigen alle drei Kurven ähnliche Spektren, aber die Gesamtamplitude nimmt mit abnehmender Größe zu. Der Hintergrund der Grafik ist teilweise grau, rot oder schwarz eingefärbt. Diese farbigen Bereiche entsprechen dem Terzband, in dem die Einbuchtung des Schalldämm-Maßes in der linken Grafik auftritt. Dieses Diagramm zeigt, dass die Senke immer mit sehr nahe gelegenen 8. und 9. Moden der Platten verbunden ist, die (3,2) bzw. (1,4) Moden sind.

Im nächsten Schritt wurde die Auswirkung des Seitenverhältnisses auf das Schalldämm-Maß untersucht. Das Diagramm auf der linken Seite von Abbildung 33 vergleicht drei simulierte Schalldämm-Maße der 4 mm dicken Glasscheiben mit den Abmessungen 770 x 2370 mm, 890 x 2050 mm und 1230 x 1480 mm, was einem Seitenverhältnis von 0,31 (grün), 0,43 (magenta) und 0,83 (schwarz) bei einer konstanten Fläche von 1,82 m² entspricht. Ähnlich wie bei der Änderung der Scheibenfläche wird der Frequenzabfall mit abnehmendem Seitenverhältnis in Richtung höherer Frequenzen verschoben, während die Tiefe des Abfalls unverändert bleibt. Wie aus dem Diagramm rechts hervorgeht, sind die Resonanzmoden im Frequenzband des Abfalls jedoch nicht dieselben.

Abbildung 32

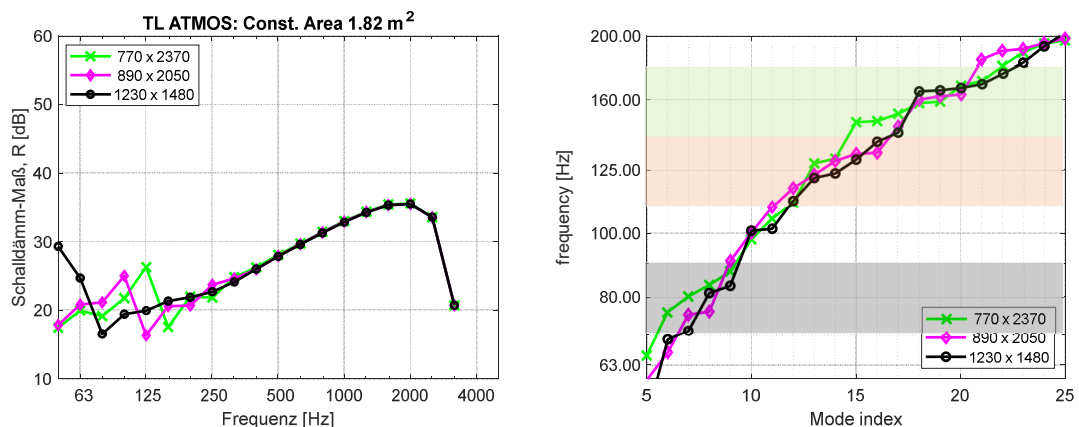
Schalldämm-Maß (links) und Resonanzfrequenzen (rechts) der Einfachverglasung mit den Abmessungen 870 x 1050 mm (grau mit x), 970 x 1170 mm (rot mit Rauten) und 1230 x 1480 mm (schwarz mit Kreis).



Quelle: IBP, Stuttgart

Abbildung 33

Schalldämm-Maß (links) und Resonanzfrequenzen (rechts) der Einfachverglasung mit den Abmessungen 770 x 2370 mm (grün mit x), 890 x 2050 mm (magenta mit Rauten) und 1230 x 1480 mm (schwarz mit Kreis).



Quelle: IBP, Stuttgart

Bewertetes Schalldämm-Maß R_w

Die Auswirkung der Abmessungen auf das Schalldämm-Maß lässt sich anhand des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w allgemeiner veranschaulichen. Die beiden Diagramme in Abbildung 34 zeigen die Abweichung des R_w der Glasscheibe vom Referenzwert, d. h. dem R_w der 4 mm dicken Glasscheibe mit einer Fläche von $1,82 \text{ m}^2$ (links) und mit einem Seitenverhältnis von 0,83 (rechts).

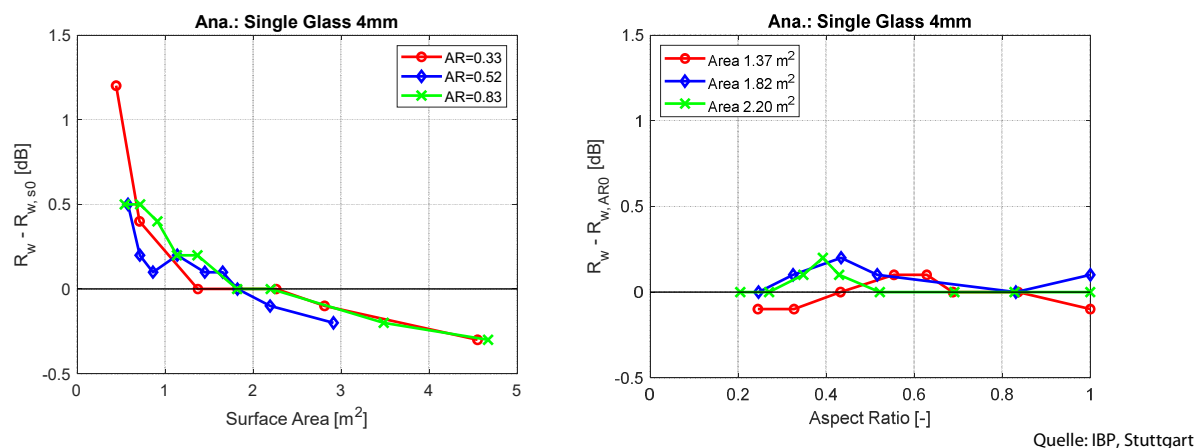
$$\Delta R = R_{w,eq} - R_{w,ref} \quad [\text{dB}] \quad (8)$$

Das Diagramm auf der linken Seite veranschaulicht die Abweichung von R_w in Bezug auf die Fläche zwischen $0,8 \text{ m}^2$ und 4 m^2 bei einem konstanten Seitenverhältnis von 0,33 (rot), 0,52 (blau) oder 0,83 (grün). Das Diagramm auf der rechten Seite zeigt die Abweichung von R_w in Bezug auf das Seitenverhältnis zwischen 0,2 und 1,0 bei einer konstanten Oberfläche von $S = 1,37 \text{ m}^2$ (rot), $1,82 \text{ m}^2$ (blau) und $2,21 \text{ m}^2$ (grün). Es ist wichtig zu beachten, dass der Referenzwert, $R_{w,ref}$, für jede Kurve unterschiedlich ist. Zum Beispiel entspricht der Referenzwert in der linken Abbildung ($AR = 0,33$) dem R_w der IGU mit den Abmessungen $H = 2,35 \text{ m}$ und $W = 0,78 \text{ m}$, was zu einem Seitenverhältnis von $AR = 0,33$ und einer Fläche von $S = 1,82 \text{ m}^2$ führt, die der Fläche eines Standard-IGU entspricht.

In beiden Diagrammen zeigen jeweils alle drei Kurven die gleiche Tendenz. Im linken Diagramm von Abbildung 34 nehmen die Abweichungskurven mit zunehmender Verglasungsgröße mit geringfügigen Schwankungen ab. Dies bestätigt, dass R_w bei kleineren Scheiben überschätzt wird, während es bei größeren Scheiben leicht unterschätzt wird und dass es sinnvoll wäre, R_w entsprechend der Verglasungsfläche zu korrigieren. Das rechte Diagramm in Abbildung 34 zeigt, dass die Abweichungskurve durch die Änderung des Seitenverhältnisses fast nicht beeinflusst wird.

Abbildung 34

Rechts: Abweichung des R_w von 4 mm Glasplatten in Bezug auf die Oberfläche bei einem konstanten Seitenverhältnis von 0,33 (rot mit Kreis), 0,52 (blau mit Rauten) und 0,83 (grün mit x) unter Verwendung des R_w von 4mm Glasplatten mit einer Oberfläche von 1,82 m² als Referenz. Links: Abweichung von R_w einer 4 mm Glasplatte in Bezug auf das Seitenverhältnis bei einer konstanten Fläche von 1,37 m² (rot mit Kreis), 1,82 m² (blau mit Rauten) und 2,20 m² (grün mit x) unter Verwendung von R_w einer 4mm Glasplatte mit einem Seitenverhältnis von 0,83 als Referenz.



Verhältnis zwischen der Oberfläche und der mit Spachtelmasse bedeckten Fläche

Die analytischen Ergebnisse zeigen, dass die Fläche das Schalldämm-Maß beeinflusst, das Seitenverhältnis jedoch nicht. Dies ist wahrscheinlich auf die Dämpfung der Verglasung zurückzuführen. Da Glas im Allgemeinen in sehr schwach dämpfendes Material, kann ein großer Teil der eintreffenden Schallleistung über die elastischen Begrenzungen, die durch den Kitt abgedeckt sind, abgeleitet werden. Je größer die mit Kitt bedeckte Fläche ist, desto mehr Schallleistung kann entlang der Grenzfläche abgeleitet werden, wobei die einfallende Schallleistung proportional zur Fläche ist. Daher muss der Einfluss der Grenzflächendissipation in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen der mit Spachtelmasse bedeckten Fläche und der Oberfläche bewertet werden (siehe unten):

$$r_p = \frac{L_p(2d_B + t_g)}{S_w} \quad [-] \quad (9)$$

wobei d_B und t_g die Dicke der vom Kitt bedeckten Fläche bzw. die Gesamtdicke der Verglasung sind (dicke gelbe Fläche in Abbildung 6). Die Gesamtdicke der Mehrfachverglasung entspricht der Summe der Dicken der Glasscheiben plus der Summe der Dicken der Scheibenzwischenräume. S_w und L_p sind die Fläche und der Umfang der Verglasung mit der Höhe H_g und der Breite W_g .

$$S_w = H_g W_g \quad [\text{m}^2] \quad (10)$$

$$L_p = 2(H_g + W_g) \quad [\text{m}] \quad (11)$$

Gemäß DIN EN ISO 10140 bedeckt der Fensterkitt beim Einbau von Verglasungen im Prüfstand umlaufend zwischen 12 und 15 mm des Glases. An Fraunhofer Institut IBP wird stets eine Dicke von 15 mm verwendet, $d_B = 15\text{mm}$. Die Dicke der Einfachverglasung entspricht der Dicke der Glasscheibe. i.e., 4mm.

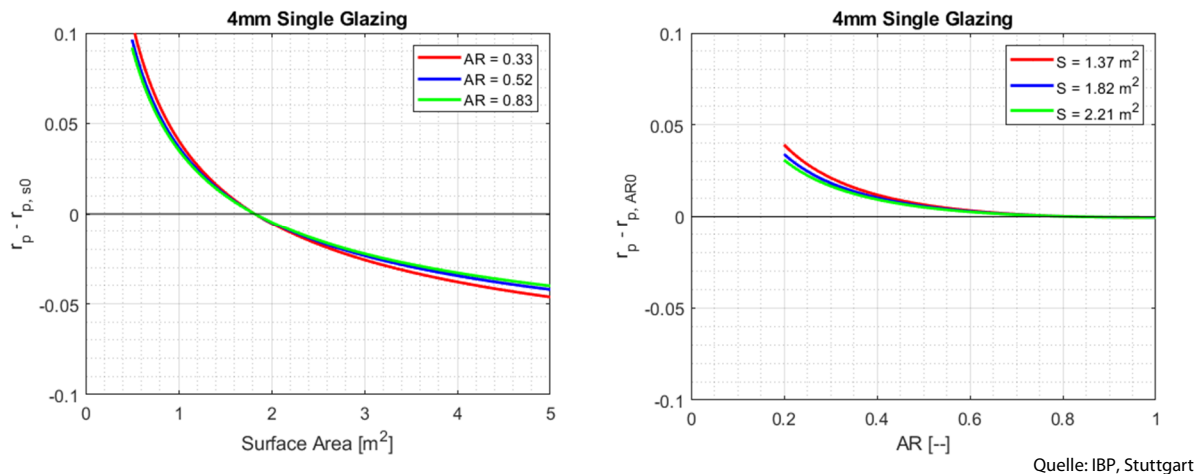
Die beiden Diagramme in Abbildung 35 zeigen die Abweichung des r_p vom Referenzwert, d. h. dem r_p der 4 mm dicken Glasscheibe mit einer Fläche von 1,82 m² (links) und mit einem Seitenverhältnis von 0,83 (rechts).

Noch einmal ist es wichtig zu beachten, dass der Referenzwert $r_{p,ref}$ für jede Kurve unterschiedlich ist, ähnlich wie das R_w , das in Abbildung 34 gezeigt wird.

$$\Delta r_p = r_p - r_{p,ref} \quad [-] \quad (12)$$

Abbildung 35

Rechts: Abweichung des r_p von 4 mm Glasplatten in Bezug auf die Oberfläche bei einem konstanten Seitenverhältnis von 0,33 (rot mit Kreis), 0,52 (blau mit Rauten) und 0,83 (grün mit x) unter Verwendung des r_p von 4 mm Glasplatten mit einer Oberfläche von 1,82 m² als Referenz. Links: Abweichung von r_p einer 4 mm Glasplatte in Bezug auf das Seitenverhältnis bei einer konstanten Fläche von 1,37 m² (rot mit Kreis), 1,82 m² (blau mit Rauten) und 2,20 m² (grün mit x) unter Verwendung von r_p einer 4 mm Glasplatte mit einem Seitenverhältnis von 0,83 als Referenz.



Es ist zu erkennen, dass die Form der Δr_p -Funktionen in Abbildung 35 der von ΔR in Abbildung 34 sehr ähnlich ist. Daher wird angenommen, dass ΔR als lineare Funktion des Flächenverhältnisses Δr_p dargestellt werden kann:

$$\begin{aligned} \Delta R &= k \Delta r_p = k (r_p - r_{p,ref}) \\ \rightarrow R_w - R_{w,ref} &= k (r_p - r_{p,ref}) \quad [\text{dB}] \quad (13) \end{aligned}$$

wobei k der unbestimmte Koeffizient ist. Wie bereits erwähnt, ist der Referenzwert nicht immer R_{w0} des Standard-IGU mit $S_0 = 1,82 \text{ m}^2$ und $AR_0 = 0,83$. Zum Beispiel sollte für ein IGU mit einer Fläche von S_1 und einem Seitenverhältnis von AR_1 , die beide von dem Standard-IGU abweichen, das Referenz-IGU entweder als S_0 mit AR_1 oder S_1 mit AR_0 definiert werden.

Das aktuelle Bewertungsverfahren ist unpraktisch, da es viele "Referenzmessungen" zusätzlich zu den Messungen von Testobjekten mit unterschiedlichen Dimensionen erfordert. Außerdem müssen die Ergebnisse in zwei Gruppen eingeteilt werden: die Gruppe mit "identischem Seitenverhältnis" (links in Abbildung 34, 35) und die Gruppe mit "identischer Oberfläche" (rechts in Abbildung 34, 35). Da das Flächenverhältnis r_p sowohl die Fläche als auch das Seitenverhältnis umfasst, können die beiden Diagramme in Abbildung 35 in Bezug auf r_p zusammengeführt werden. Zudem zeigen beide Diagramme, dass die Unterschiede zwischen den drei Kurven unbedeutend sind. Änderungen im Seitenverhältnis (links) oder in der Oberfläche (rechts) haben kaum Auswirkungen auf die Abweichungskurve von r_p (siehe Abbildung 35). Daher ist es sinnvoll, einen einzigen Referenzwert zu verwenden, was den Modellierungsprozess vereinfacht und die Unannehmlichkeiten der Verwendung mehrerer Referenzwerte beseitigt.

$$R_w - R_{w0} = k (r_p - r_{p0}) \quad [\text{dB}] \quad (14)$$

Die obenstehende Formel zeigt, dass die Abweichung von R_w für ein IGU mit beliebigen Abmessungen relativ zum R_{w0} , Standard-IGU, ausgedrückt werden kann. Die obenstehende Formel kann wie folgt verallgemeinert werden:

$$\Delta R = R_w - R_{w0} = c_0 \left(\frac{r_p}{r_{p0}} - 1 \right) \quad [\text{dB}] \quad (15)$$

Der Koeffizient c_0 kann mit der LMS-Methode numerisch bestimmt werden, um die Summe der Unterschiede zwischen dem simulierten ΔR und dem geschätzten ΔR unter Verwendung der Gleichung (16) zu minimieren.

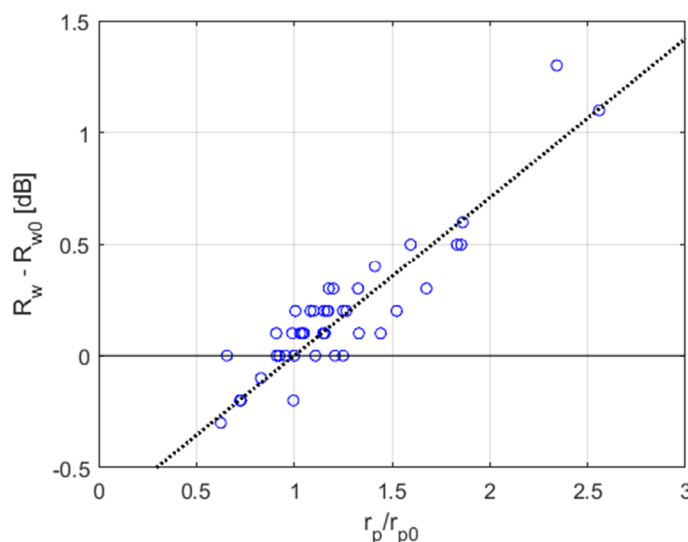
$$\epsilon = \sum_k^N \left| R_{w1}(H_k, W_k) - R_{w0} - c_0 \left(\frac{r_p(H_k, W_k)}{r_{p0}} - 1 \right) \right|^2 \quad (16)$$

wobei k steht für die Anzahl der in jedem Fall einbezogenen Proben. Für die in Abbildung 34 dargestellten Ergebnisse wurde der Koeffizient auf 0,71 bestimmt.

In Abbildung 36 wird ΔR (durchgezogene Linien) zusammen mit den Ergebnissen aus Gleichung (16) unter Verwendung von $c_0 = 0,71$ (schwarz gepunktete Linie) dargestellt. Abbildung 36 bestätigt, dass die Änderung von R_w aufgrund der Größe der Struktur eng mit dem Flächenverhältnis zusammenhängt.

Abbildung 36

Die Abweichung von R_w einer 4 mm Glasplatte von der Referenzplatte mit den Abmessungen 1230 x 1480 x 4 mm (blau mit Kreisen). Die berechnete ΔR in Gleichung (15) unter Verwendung des Korrekturfaktors $c_0 = 0,71$.



Quelle: IBP, Stuttgart

Daher kann das Schalldämm-Maß der Verglasung mit beliebigen Abmessungen empirisch nach Beziehung (15) vorhergesagt werden, sobald der Koeffizient c_0 identifiziert ist, sofern das bewertete Schalldämm-Maß mit den Normabmessungen R_{w0} nach DIN EN ISO 10140 gemessen wurde. Der Korrekturfaktor c_0 muss experimentell ermittelt werden. Der Koeffizient c_0 wird stark von der Gesamtdicke der Verglasung, sowie von anderen Parametern, wie der Randsteifigkeit und der Dämpfung des Glases, beeinflusst.

• Messungen und FEM-Simulation

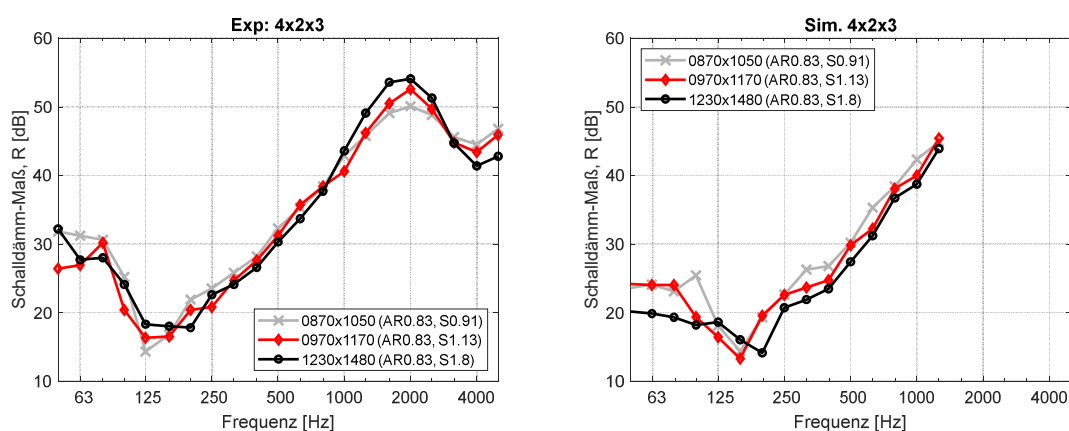
Schalldämm-Maß

Insgesamt wurden 5 verschiedene Abmessungen von Verglasungen getestet, von denen 3 ein gemeinsames Seitenverhältnis von 0,83 haben, während die übrigen ein Seitenverhältnis von 0,33 haben. Abbildung 37 vergleicht das gemessene (links) und simulierte (rechts) Schalldämm-Maß dieser Dreifachverglasungen mit einem AR von 0,83.

Das gemessene und das simulierte Schalldämm-Maß zeigt eine ganz ähnliche Tendenz. Im Gegensatz zur Einfachverglasung verschiebt sich die erste Senke bei ca. 125 Hz mit zunehmender Scheibengröße in beiden Diagrammen zu höheren Frequenzen. Bei der Einfachverglasung steht die Verschiebung der Senke in direktem Zusammenhang mit der Verschiebung der spezifischen gut abstrahlenden Moden der Platte. Bei Mehrfachverglasungen, insbesondere bei unterschiedlich dicken Glasplatten, hängt der Dip mit den gut abstrahlenden Moden der einzelnen Platten und den akustischen Moden des Hohlraums zusammen und kann daher nicht ohne weiteres anhand der Abmessungen abgeschätzt werden. Nach dem Dip beginnen die Spektren mit leichten Schwingungen anzusteigen. Die kleinste Verglasung (grüne Linie) weist den höchsten Transmissionsverlust auf. Die Reihenfolge der drei Spektren wechselt bei etwa 1 kHz. Dies ist wahrscheinlich auf den Verlust im Hohlraum zurückzuführen.

Abbildung 37

Gemessenes (links) und mit Hilfe des numerischen Modells vorhergesagtes (rechts) Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung 4-14 (Ar)-2-14 (Ar)-3 mm mit den Abmessungen 870 x 1050 mm (grau mit x), 970 x 1170 mm (rot mit Rauten), 1230 x 1480 mm (schwarz mit Kreis) mit dem gleichen Seitenverhältnis von 0,83.



Quelle: IBP, Stuttgart

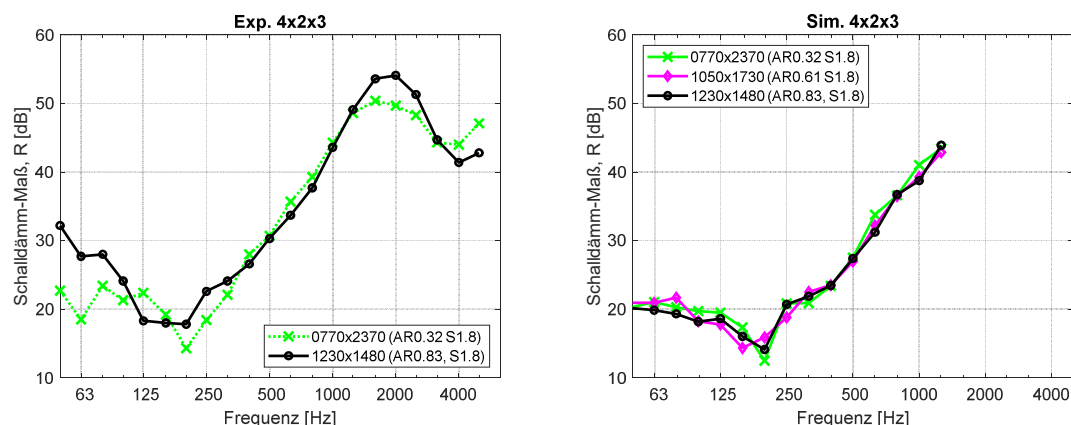
Insgesamt wurden nur zwei verschiedene Abmessungen mit einer konstanten Fläche von $1,82 \text{ m}^2$ in das Messprogramm aufgenommen. Es ist nicht möglich, anhand von nur zwei Proben eine allgemeine Schlussfolgerung zu ziehen. Daher wurde zusätzlich eine Dreifachverglasung von $1,050 \text{ m} \times 1,73 \text{ m}$ mit einer Fläche von $1,82 \text{ m}^2$ mit dem COMSOL-Modell simuliert.

Abbildung 38 zeigt das gemessene (links) und simulierte (rechts) Schalldämm-Maß der Verglasungen mit dem Aufbau 4-14 (Ar)-2-14 (Ar)-3 mm und der Fläche von $1,82 \text{ m}^2$. Zwischen den drei mit dem FE-Modell simulierten Spektren gibt es keinen wesentlichen Unterschied. Zwei gemessene Spektren unterscheiden sich jedoch deutlich. Es ist zu beachten, dass die beiden Schalldämm-Maße in der Differenzanlage gemessen wurden. Die durchgezogene Kurve wurde in der akkreditierten Prüfeinrichtung P4 gemessen, während das gepunktete Spektrum in P9 mit dem Holzadapter gemessen wurde (siehe Abbildung 5). Der Unterschied zwischen den beiden gemessenen Schalldämm-Maßen unterhalb von 100 Hz ist auf die unterschiedlichen akustischen Modi der Prüfeinrichtungen zurückzuführen.

Abbildung 38

Gemessenes (links) und mit dem numerischen Modell vorhergesagtes (rechts) Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung von 4-14 (Ar)-2-

14 (Ar)-3 mm, mit den Abmessungen 770 x 2370 mm (grün mit x), 1050 x 1730 mm (magenta mit Rauten), 1230 x 1480 mm (schwarz mit Kreis) mit einer identischen Oberfläche von 1,82 m².



Quelle: IBP, Stuttgart

Bewertetes Schalldämm-Maß

Der Einfluss der Abmessungen auf das Schalldämm-Maß wurde in Abbildung 39 (Exp.) und Abbildung 40 (FEM) anhand der Abweichung von R_w von der Standard-Dreifachverglasung mit den Abmessungen 1230 x 1480 mm dargestellt.

Der Einfluss der Oberfläche ist in den Diagrammen links dargestellt. Sowohl die gemessenen als auch die simulierten Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Abweichung von R_w mit zunehmender Größe abnimmt. Allerdings ist die Steigung der simulierten Kurve deutlich steiler als die der gemessenen Kurve. Dies hängt wahrscheinlich mit der Steifigkeit der Randabstandhalter zusammen, die in der Simulation auf Null gesetzt wird. Wenn die angrenzenden Schichten lockerer miteinander verbunden sind als in der Realität, kann der Schallübertragungsverlust überschätzt werden. Es wird erwartet, dass die Implementierung einer realistischen Steifigkeit des Randverbundes den simulierten Schallübertragungsverlust reduziert. Da der Randeffect bei einer kleineren Platte stärker ist, wird das Schalldämm-Maß einer kleineren Platte stärker überschätzt, und der Gradient in der simulierten Platte wird steiler.

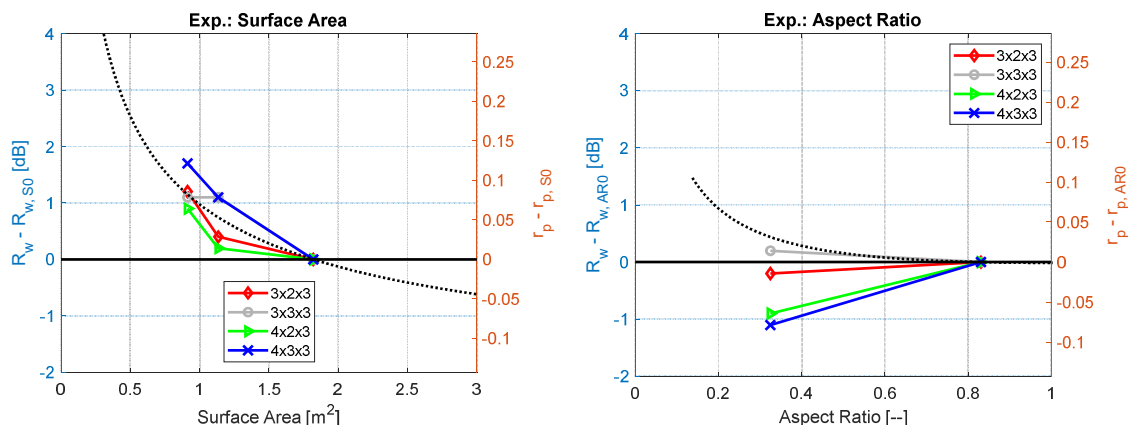
Die Auswirkungen des Seitenverhältnisses sind in Abbildung 39 und Abbildung 40 in der rechten Grafik zusammengefasst. Bei den Messungen wurden nur zwei Seitenverhältnisse mit gleichen Abmessungen untersucht, so dass keine allgemeine Schlussfolgerung gezogen werden konnte. Die simulierten Ergebnisse zeigen, dass das Seitenverhältnis der Dreifachverglasung einen sehr geringen Einfluss auf das Schalldämm-Maß hat, ähnlich wie bei der Einfachverglasung.

Die Abweichung des gemessenen R_w vom Referenzwert R_{w0} , ΔR in Bezug auf das normierte Flächenverhältnis ist in Abbildung 41 dargestellt. Die berechnete ΔR in Gleichung (15) unter Verwendung des Korrekturfaktors c_0 wird zusätzlich durch eine gepunktete Linie dargestellt. Der Korrekturfaktor für Dreifachverglasung wurde unter Verwendung der LMS-Methode geschätzt, basierend auf der in Gleichung (16) definierten Fehlerfunktion. Der geschätzte Korrekturfaktor, der aus den experimentellen Daten gewonnen wurde, betrug $c_0=2,37$, während der aus den Simulationsdaten abgeleitete Wert $c_0=7,40$ war. Obwohl der Unterschied groß ist, sind beide Werte viel höher als die Konstante für die Einfachverglasung, $c_0=0.71$. Dies zeigt, dass die Mehrfachverglasung einen höheren Korrekturfaktor erfordert als die Einfachverglasung.

Abbildung 39

Abweichung des gemessenen R_w vom Referenzwert der 1230 x 1480 mm mit einer Glasdicke von 3-2-3 mm (rot mit Rauten), 3-3-3 mm

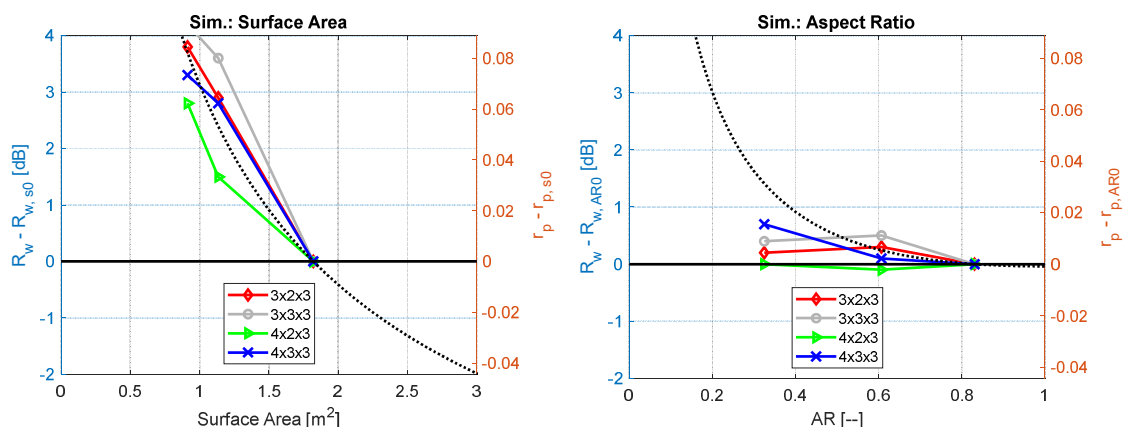
(grau mit Kreisen), 4-2-3 mm (grün mit Dreiecken) und 4-3-3 mm (blau mit Kreuzen) in Abhängigkeit von der Fläche (links) und dem Seitenverhältnis (rechts). Verhältnis von Umfang zu Oberfläche der rechteckigen Platte mit einem Seitenverhältnis von 0,83. Abweichung des Flächenverhältnisses r_p (schwarz gestrichelte Linie) von der Referenzplatte mit den Abmessungen 1230 x 1480 x 3-3-3 mm.



Quelle: IBP, Stuttgart

Abbildung 40

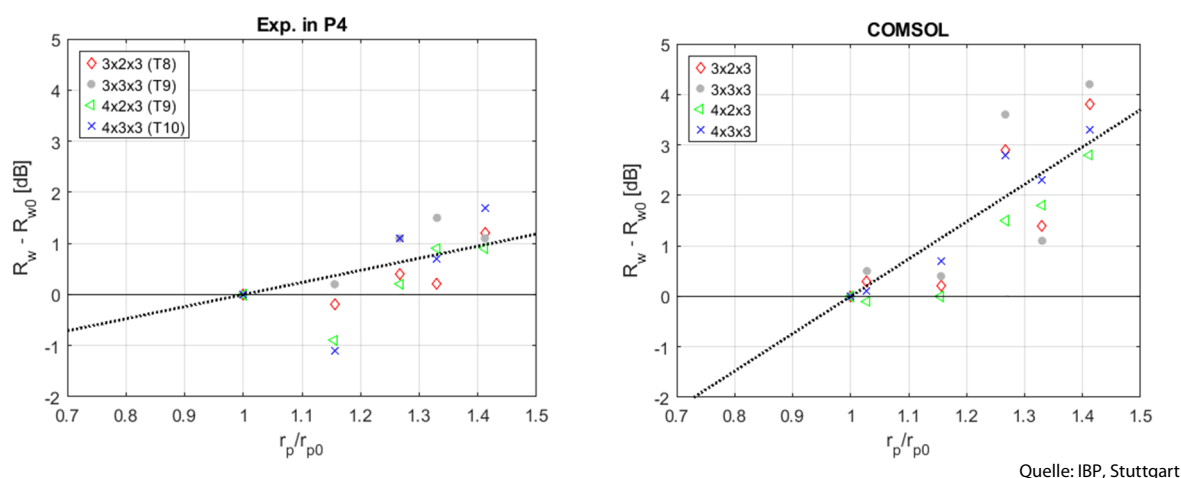
Abweichung des simulierten R_w vom Referenzwert der Platte 1230 x 1480 mm mit den Glasdicken 3-2-3 mm (rot mit Rauten), 3-3-3 mm (grau mit Kreis), 4-2-3 mm (grün mit <) und 4-3-3 mm (blau mit x) in Abhängigkeit von der Fläche (links) und dem Seitenverhältnis (rechts). Verhältnis von Umfang zu Fläche der rechteckigen Platte mit einem Seitenverhältnis von 0,83. Abweichung des Flächenverhältnisses r_p (schwarz gestrichelte Linie) von der Referenzplatte mit den Abmessungen 1230 x 1480 x 3-3-3 mm.



Quelle: IBP, Stuttgart

Abbildung 41

Experiments (links) und Simulation (rechts): Abweichung des simulierten R_w vom Referenzwert der Platte 1230 x 1480 mm mit den Glasdicken 3-2-3 mm (rot mit Rauten), 3-3-3 mm (grau mit Kreis), 4-2-3 mm (grün mit <) und 4-3-3 mm (blau mit x). Die berechnete ΔR in Gleichung (15) unter Verwendung des Korrekturfaktors $c_0 = 2,37$ (links) und $c_0 = 7,40$ (rechts).



Einfluss des Glassaufbaus

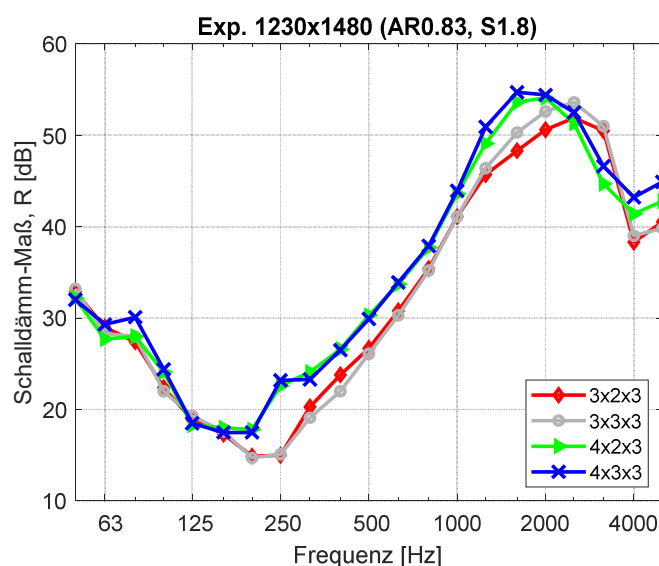
Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, wurden vier verschiedene Kombinationen von Glasplattendicken, bestehend aus drei Schichten, experimentell untersucht. Die Glasplatten sind entweder 2 mm, 3 mm oder 4 mm dick. Der Abstand zwischen den Scheiben beträgt jeweils 14 mm, und der Luftspalt wurde mit Argon gefüllt. Die dünnste Dreifachverglasung besteht aus 3 mm-2 mm-3 mm Glasscheiben (im Folgenden als 3-2-3 bezeichnet), also insgesamt 8 mm Glasdicke, während die dickste 4 mm-3 mm-3 mm (4-3-3) hat, also insgesamt 10 mm dick ist. Die beiden anderen haben die gleiche Gesamtdicke von 9 mm, aber eine der Scheiben ist 3 mm-3 mm-3 mm (3-3-3) dick, während die andere 3 mm-2 mm-4 mm (3-2-4) dick ist.

Abbildung 42 zeigt das gemessene Schalldämm-Maß von vier Dreifachverglasungen mit den Abmessungen 1230 x 1480 mm. Die grünen (4-2-3) und blauen (4-3-3) Linien überlagern sich gut, während die roten (3-2-3) und grauen (3-3-3) Linien sich ebenfalls überlagern. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Unterschied von 1 mm in der mittleren Schichtdicke vernachlässigbare Auswirkungen auf das Schalldämm-Maß hat. Dagegen führt eine Erhöhung der äußeren Schichtdicke um 1 mm zu einer deutlichen Verbesserung der akustischen Leistung. Der Unterschied zwischen rot (3-2-3) und grün (4-2-3) sowie zwischen grau (3-3-3) und blau (4-3-3) ist größer als 2 dB unter 2 kHz. Die gleiche Tendenz ist bei anderen Dreifachverglasungen mit den Abmessungen 970 x 1170 mm, 870 x 1050 mm, 770 x 2370 mm und 670 x 2050 mm zu beobachten. Die gemessenen Schalldämmmassen der anderen vier Formate sind in Abbildung 48 bis Abbildung 51 im Anhang dargestellt.

Der Einfluss der Glasdicke wird anhand des in Abbildung 43 dargestellten bewerteten Schalldämm-Maßes R_w deutlicher sichtbar. Wenn beide äußeren Glasschichten die gleiche Dicke haben, d. h. grüne (4-2-3) und blaue (4-3-3) Kurven sowie rote (3-2-3) und graue (3-3-3) Kurven, ist die Schalldämmung vergleichbar. Der Unterschied von weniger als 1 dB sollte bei den Messunsicherheiten berücksichtigt werden. Wie bereits erwähnt, hat ein Unterschied von 1 mm in der mittleren Schichtdicke einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Schallübertragungsverlust. Schließlich haben 3-3-3 (rot) und 4-2-3 (schwarz) die gleiche Gesamtdicke von 9 mm, aber die 4-2-3 (schwarz) zeigt eine um mehr als 3 dB höhere Schalldämmung.

Abbildung 42

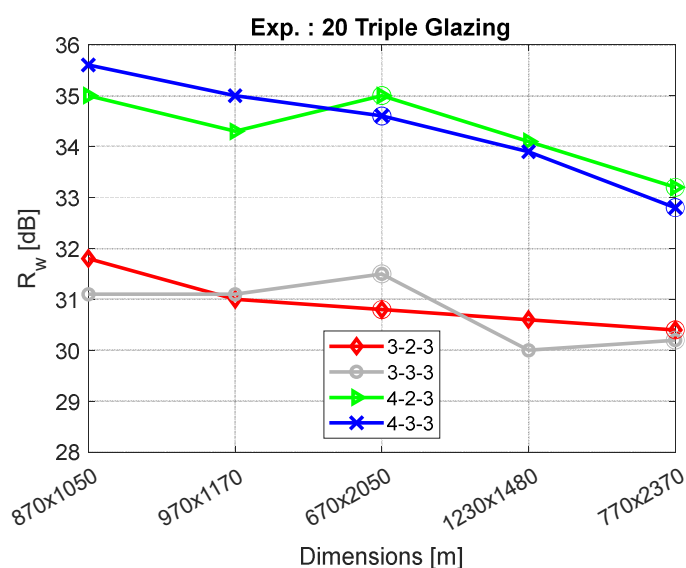
Gemessenes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 1230 x 1480 x 3-2-3 mm (rot mit Rauten), 3-3-3 mm (grau mit Kreis), 4-2-3 mm (grün mit <) und 4-3-3 mm (blau mit x).



Quelle: IBP, Stuttgart

Abbildung 43

Gemessenes bewertetes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 1230 x 1480 x 3-2-3 mm (rot mit Rauten), 3-3-3 mm (grau mit Kreisen), 4-2-3 mm (grün mit Dreiecken) und 4-3-3 mm (blau mit Kreuzen).



Quelle: IBP, Stuttgart

Wirkung der Abstandhalter und der Sekundärdichtungen

In diesem Kapitel wird der Einfluss von Randabstandhaltern und sekundären Dichtstoffen auf das Schalldämm-Maß von Dreifachverglasungen anhand der IBP-internen Datenbank mit geprüften Fenstern und einer Parameterstudie mit dem FE-Modell der Dreifachverglasung untersucht.

Datenbank

In der Datenbank wurden zwei Sätze gemessener Schalldämm-Maße für Zweifach Isolierverglasungen mit verschiedenen Abstandhaltern gefunden: 6 mm-12 mm (Ar)-4 mm und 4 mm-14 mm (Ar)-4 mm. Jeder Satz umfasst zwei Schalldämm-Maße der Verglasung mit unterschiedlichen Abstandhaltern: Metall und Kunststoff. Es

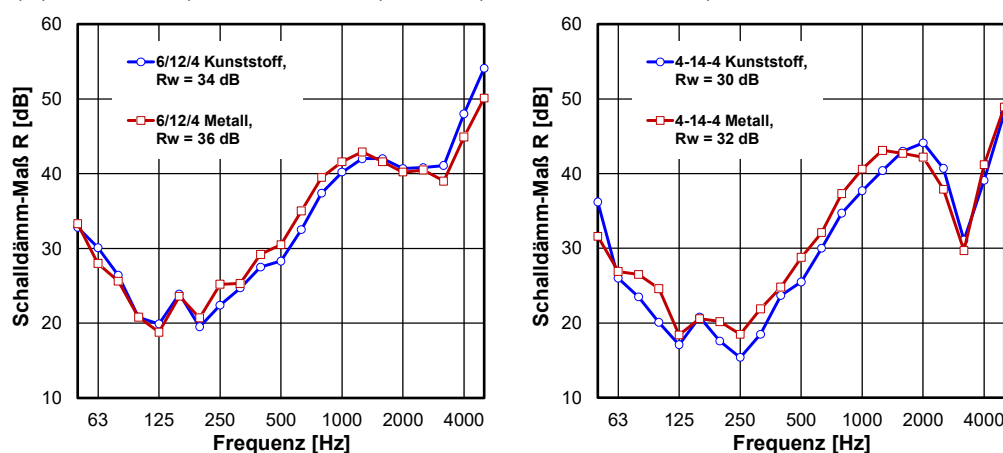
ist wichtig zu beachten, dass die Messungen nicht am selben Tag, sondern im Abstand von mehreren Jahren durchgeführt wurden.

In Abbildung 44 sind zwei Diagramme dargestellt, in denen die beiden Schalldämm-Maße der einzelnen Sätze verglichen werden. Sie zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf: Die rote Kurve (Doppelverglasung mit Metall-Abstandhalter) ist im massebestimmten Bereich zwischen 200 Hz und 1000 Hz um 2-3 dB höher als die blauen Spektren (Kunststoff-Abstandhalter). Der Grund für das unterschiedliche Schalldämm-Maß muss auf den Abstandhalter zurückgeführt werden. Die Datenbank enthält jedoch nur die Daten zum Schalldämm-Maß in Terzbändern, ohne die detaillierten Material- und Geometrieparameter der verwendeten Abstandhalter anzugeben. Im Prüfbericht wird der Abstandhalter als "Metall" bezeichnet, ohne nähere Angaben darüber, ob es sich um Edelstahl oder Aluminium handelt.

Aus den Abbildungen 23 bis 27 geht hervor, dass Aluminium-Abstandhalter eine geringere Steifigkeit aufweisen als Kunststoff-Abstandhalter. Die Steifigkeit des Abstandhalters hängt jedoch sowohl vom Material als auch von der Konstruktion ab, so dass nicht eindeutig festgestellt werden kann, welcher Abstandhalter bei diesen Doppelverglasungen steifer war. Daher lässt sich der Grund für die Überlegenheit von Doppelverglasungen mit Metall-Abstandhaltern gegenüber solchen mit Kunststoff-Abstandhaltern nicht ermitteln. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um den Einfluss des Abstandhalters auf das Schalldämm-Maß zu bewerten. Im folgenden Kapitel wird der Einfluss der Steifigkeit des Abstandhalters auf das Schalldämm-Maß numerisch untersucht.

Abbildung 44

Gemessenes Schalldämm-Maß der Doppelverglasung mit dem Kunststoff-Abstandhalter (blau mit Kreisen) und dem Metall-Abstandhalter (rot mit Quadraten). Links: 6-12(Ar) -4 mm, gemessen in 2012 (Metall-Abstandhalter) und 2016 (Kunststoff-Abstandhalter). Rechts: 6-12(Ar) -4 mm in 2012 (Metall-Abstandhalter) und 2016 (Kunststoff-Abstandhalter).



Quelle: IBP, Stuttgart

FEM Simulation mit unterschiedlicher Steifigkeit der Abstandhalter

Bei den im vorangegangenen Abschnitt dargestellten FE-Simulationsergebnissen wurde die mechanische Verbindung zwischen den benachbarten Glasscheiben entlang des Randes durch den Abstandhalter und die Sekundärdichtung vernachlässigt, da die notwendigen Parameter bislang unbekannt waren. Zwei benachbarte Glasscheiben wurden nur durch den Lufthohlraum und den Kitt entlang des Randes miteinander verbunden.

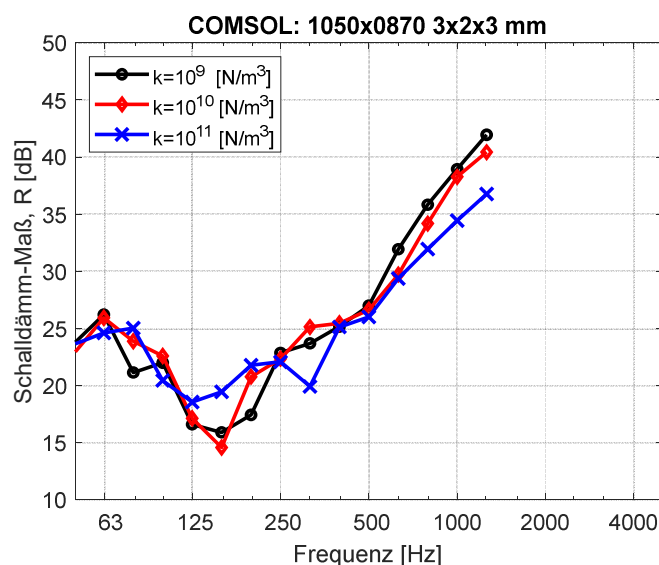
Die Randverbindung mit komplexer Steifigkeit wird in diesem Abschnitt erstmals vorgestellt. Abbildung 45 vergleicht das Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit einer Steifigkeit des Randverbundes von Null ($k_{av}^* = 0$ N/m³, schwarze durchgezogene Linie), mit $k_{av}^* = 10 \times 10^9$ N/m³ (rote Linie), und mit $k_{av}^* = 100 \times 10^9$ N/m³ (blaue Linie). Bei niedrigen Frequenzen unter 125 Hz gibt es keinen deutlichen Unterschied zwischen den drei Fällen. Zwischen 125 Hz und 500 Hz sind die Spektren durch starke Einbrüche gekennzeichnet, die auf die

Masse-Feder-Masse-Resonanz der Glasscheiben und des Abstandhalters zurückzuführen sind. Oberhalb von 500 Hz zeigt die Dreifachverglasung mit steifem Abstandhalter eine deutlich geringere Schalldämmung.

Abbildung 46 zeigt eine Zusammenfassung des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w der Dreifachverglasung in Abhängigkeit von der Steifigkeit des Abstandhalters. Die horizontale gestrichelte Linie zeigt den gemessenen R_w -Wert der entsprechenden Dreifachverglasung der gleichen Farbe. Die geprüfte Dreifachverglasung verwendet einen der in Tabelle 5 aufgeführten P2-Abstandhalter, dessen Steifigkeit etwa zwischen 30×10^9 und 50×10^9 N/m³ liegt. Addiert man die Steifigkeit des sekundären Dichtstoffs hinzu, liegt die äquivalente Steifigkeit des Randverbundsystems pro Längeneinheit ungefähr zwischen 50×10^9 und 70×10^9 N/m³.

Abbildung 45

Simuliertes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 870 x 1050 x 4-14 (Ar)-2-14 (Ar)-3 mm mit den unterschiedlichen Steifigkeiten der Abstandhalter: $k_{eq} = 0$ N/m³ (schwarz mit Kreis), $k_{eq} = 10^{10}$ N/m³ (rot mit Rauten), $k_{eq} = 10^{11}$ N/m³ (blau mit x).



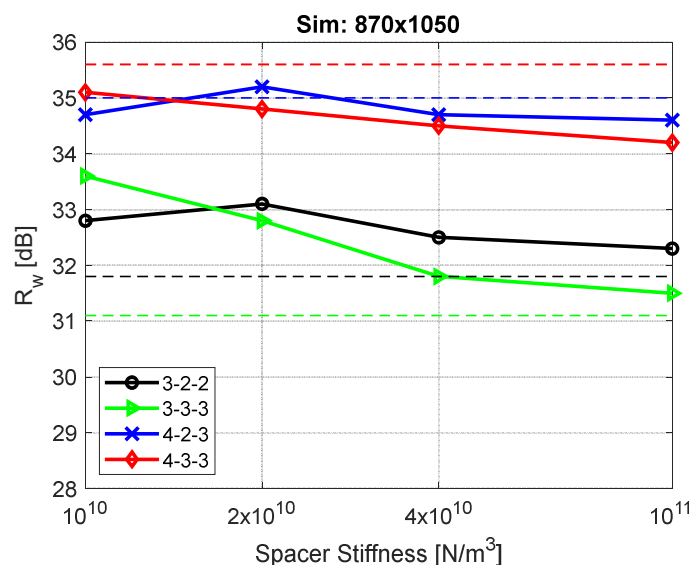
Quelle: IBP, Stuttgart

Mit zunehmender Steifigkeit nimmt der simulierte R_w -Wert mit geringfügigen Schwankungen weiter ab. Außerdem vergrößert sich der Abstand zwischen den beiden oberen Kurven (blau und rot) und den beiden unteren Kurven (grün und schwarz) leicht und nähert sich dem Abstand zwischen den beiden Gruppen des gemessenen R_w . Daraus lässt sich schließen, dass (1) die Qualität des Simulationsmodells durch die Verwendung einer richtig gewählten Steifigkeit des Randverbundes verbessert werden kann und (2) der weichere Abstandhalter in Bezug auf die Schalldämmung von Vorteil ist, da die benachbarten Glasscheiben lockerer verbunden sind und somit weniger Schallleistung auf die Empfangsseite übertragen wird.

Die gemessene äquivalente Steifigkeit des Kantensystems mit Abstandhaltern der "warmen Kante" liegt jedoch zwischen 40×10^9 N/m³ und 80×10^9 N/m³. Abbildung 46 zeigt, dass die Wirkung des Randverbundes von der Glasdicke abhängt, aber die maximale Verschlechterung der akustischen Leistung um 1 dB bei einer Verdoppelung der Steifigkeit des Abstandhalters beobachtet wurde. Dieser Effekt kann bei größeren Verglasungen noch weiter reduziert werden, da der Randeffect bei kleineren Verglasungen stärker ausgeprägt ist. Diese numerische Untersuchung zeigt, dass die größte Korrektur bei der Steifigkeit des Abstandhalters erforderlich ist, obwohl der weichere Abstandhalter akustisch bevorzugt wird.

Abbildung 46

Simuliertes bewertetes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 870 x 1050 x 3-2-3 mm (rot mit Rauten), 3-3-3 mm (schwarz mit Kreis), 4-2-3 mm (grün mit <) und 4-3-3 mm (blau mit x) in Abhängigkeit von der Steifigkeit des Abstandhalters.



Quelle: IBP, Stuttgart

Der Einfluss des Gases im Zwischenraum

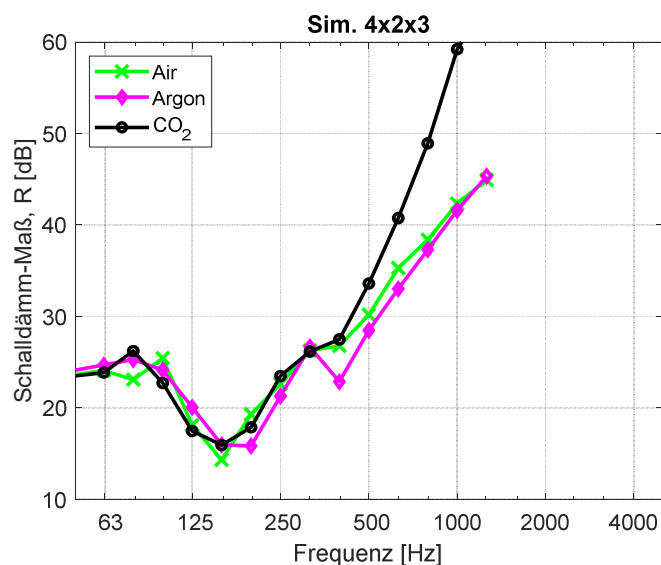
Der Hohlraum der Verglasungen wird heute fast immer mit Edelgasen gefüllt, um die Wärmedämmung zu verbessern. Das Gas muss dabei chemisch stabil und für den Menschen ungefährlich sein. Argon ist daher seit vielen Jahren die am häufigsten verwendete Gasfüllung für Fenster. Da es in reiner Form auf der Erde nicht vorkommt, muss es aus der Atmosphäre extrahiert werden. Da die Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen unterschiedlich ist, ändert sich damit im Allgemeinen auch das Schalldämm-Maß. Im früher verwendeten Gas Schwefelhexafluorid ist die Schallgeschwindigkeit deutlich niedriger als in Luft. Dadurch konnte die Schalldämmung von Verglasungen durch den Einsatz des Gases um einige Dezibel verbessert werden.

Da bei der Herstellung von Floatglas Erdgas verbrannt wird, gelangt im Verbrennungsabgas sehr viel relativ reines Kohlenstoffdioxid CO₂ in die Erdatmosphäre. Um diesen Prozess mit Blick auf den Treibhauseffekt und den daraus resultierenden menschengemachten Klimawandel zu verzögern, wäre es denkbar, das CO₂ aufzufangen und im Scheibenzwischenraum zu speichern. Daher wurde in diesem Projekt eine theoretische Verglasung mit CO₂-Gasfüllung mit der FE-Methode simuliert. Abbildung 47 zeigt, dass es keinen großen Unterschied zwischen Argon und trockener Luft gibt, dass aber CO₂ aufgrund der niedrigen Schallgeschwindigkeit die Schalldämmung der Dreifachverglasung erheblich verbessern kann.

Im Laufe dieses Projekts konnte kein Hersteller gefunden werden, der einen entsprechenden Verglasungsprototyp produziert. Dies liegt nach Rücksprache mit den Projektpartnern vor allem am ungünstigen Verhältnis aus Risiko und Kosten. Mit Hilfe des entwickelten Simulationsmodells kann nun die Schalldämmung prognostiziert und damit das Risiko reduziert werden. Innerhalb der Laufzeit des Projekts konnte die Idee zwar nicht mehr umgesetzt werden, dennoch ist sie ein äußerst positives Beispiel für die Möglichkeiten, die mit Hilfe des entwickelten Modells entstanden sind.

Abbildung 47

Simuliertes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 870 x 1050 x 4-2-3 mm unter Verwendung der verschiedenen Gasfüllungen. Luft (grün mit x), Argon (magenta mit Rauten) und CO₂ (schwarz mit Kreis).



Quelle: IBP, Stuttgart

Bewertung/Diskussion/Zielerreichung – Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext inkl. möglicherweise bekannt gewordenen Ergebnissen von dritter Seite

Im Forschungsprojekt wurde eine systematische Untersuchung des Einflusses der Abmessungen und des Randverbundes von Mehrfachverglasungen auf das Schalldämm-Maß durchgeführt. Auf der Grundlage von Mess- und Simulationsergebnissen werden Erkenntnisse darüber präsentiert, wie die von der jeweiligen Prüfnorm abweichenden Verglasungsabmessungen die Schalldämmung beeinflussen können. Der entwickelte Korrekturfaktor für die Verglasungsabmessungen kann die akustische Planung vor Ort deutlich verbessern und Architekten bei der Auswahl akustisch geeigneter Produkte unterstützen. Die Qualität des Korrekturfaktors sollte durch zusätzliche Messungen weiter verbessert werden.

Durch die systematische Untersuchung von Dreifachverglasungen mit Kunststoff Abstandshaltern konnte auch der Einfluss der Glasdicke der drei Schichten auf die akustischen Eigenschaften aufgezeigt werden. Die Experimente zeigten deutlich, dass ein Unterschied von 1 mm in der mittleren Schicht einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Schalldämm-Maß hat, während eine Erhöhung der Dicke der äußeren Schicht um 1 mm eine Verbesserung von mehr als 3 dB des R_w -Wertes bewirkt.

Um die im Vergleich zur Planung geringere Anzahl an Prüfobjekten zu kompensieren, wurde ein numerisches Modell einer Dreifachverglasung mit einer kommerziellen FE-Software entwickelt. Das Simulationsmodell wurde im Vergleich mit Messungen von 20 Dreifachverglasungen eingehend untersucht. Der Vergleich zeigt, dass die Bestimmung der Steifigkeit der Abstandhalter entscheidend ist, um die Übereinstimmung zu verbessern. Nach der Implementierung der gemessenen Steifigkeit des Abstandhaltersystems zeigt das simulierte Schalldämm-Maß eine ausreichende Ergebnisqualität. Es wurde festgestellt, dass die Verringerung der Abstandhaltersteifigkeit die Schalldämmung verbessert, aber der Effekt ist nicht signifikant im Vergleich zu den gemessenen Steifigkeiten der getesteten Abstandhalter. Sowohl das Simulationsmodell als auch die Validierung sollten in Zukunft erweitert werden, um die Vorhersagequalität weiter zu verbessern. Die Vorstudie zur Gasfüllung zeigt, dass CO₂-Gas Potenzial zur weiteren Verbesserung der Schalldämmung von Isolierglas bei gleichzeitiger Reduzierung der Emission von Treibhausgasen bei der Herstellung hat.

Das für Mehrfachverglasungen entwickelte numerische Modell kann leicht für andere Bauelemente modifiziert werden, z. B. für abgehängte Decken, doppelte Böden/Wände mit Stützen und Fassaden. Das numerische Modell kann beispielsweise zur Vorhersage von Luft- und Körperschall, Übertragungsfunktionen und blockierten Kräften verwendet werden.

Wie bereits erwähnt, ist Glas im Allgemeinen ein sehr gering dissipatives Material, so dass die eintreffende Schallenergie größtenteils entlang der durch den Kitt bedeckten Grenzfläche abgeleitet wird. Bei realen Fenstersystemen ist die Verglasung in den Holz-/Metallfensterrahmen eingebaut. Daher hängt der Einbauzustand der Verglasung vom Fensterrahmen ab. Dies ist ein weiterer Faktor, der den Unterschied zwischen der akustischen Leistung im Labor und in der Praxis beeinflusst. Um die akustische Leistung einer Verglasung im Labor auf ein Fenster in-situ zu übertragen, muss der Einfluss des Fensterrahmens bewertet werden.

Wissenschaftliche Abschlussfähigkeit

Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) führt akustische Untersuchungen an Einfach- und Mehrfachverglasungen durch. Industriepartner sind Hersteller und Verarbeiter entsprechender Produkte. Beide Seiten profitieren von den vorgestellten Ergebnissen und einem Berechnungstool zur besseren Produktplanung.

Das Projekt plante ursprünglich, 50 Proben zu verwenden, um parametrische Studien zu drei Schlüsselparametern durchzuführen: Glassaufbau, Seitenverhältnis und Oberfläche. Es wurden jedoch nur 20 Proben erhalten, die ausreichend waren für die Untersuchung der Glassaufbaus, aber unzureichend für die Bewertung des Seitenverhältnisses und der Oberfläche. Zusätzlich blieben Parameter wie Glasart, Abstandhalter und Gasfüllung über alle Proben hinweg konstant, was einen experimentellen Vergleich dieser Effekte verhinderte.

Um die reduzierte Anzahl an Proben auszugleichen, wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, um ein detailliertes numerisches Modell des Mehrfachverglasungssystems zu entwickeln. Dieses Modell umfasst die elastische Installation des IGU auf der Prüfstelle, die Effekte des Abstandhalters, Sicherheitsglas und Gasfüllung. Das Modell zeigte eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen. Obwohl 20 Proben für alle parametrischen Studien unzureichend waren, lieferten sie ausreichende Daten, um das numerische Modell zu verifizieren. Das Modell wurde sowohl durch direkte Eins-zu-eins-Vergleiche zwischen Simulation und Messung als auch durch die Analyse von Parameteränderungstendenzen validiert.

Als Fazit zur Reduzierung der Probenanzahl:

1. Das numerische Modell kompensierte effektiv die begrenzte Anzahl an Proben in Bezug auf "Seitenverhältnis" und "Oberfläche". Die Genauigkeit des Korrekturfaktors könnte jedoch mit einer größeren Probenanzahl weiter verbessert werden.
2. Die mechanischen Eigenschaften des Abstandhalters wurden erfolgreich experimentell identifiziert und in das numerische Modell integriert, das eine starke Übereinstimmung mit den in der Datenbank beobachteten, Tendenzen zeigte. Dies bestätigt, dass das Fehlen von Variationen im "Abstandhalter" bei den gelieferten IGU-Proben effektiv durch andere Maßnahmen kompensiert wurde.
3. Es werden mehr Proben für Glasart und Gasfüllung benötigt, um umfassende Schlussfolgerungen zu ziehen und den Korrekturfaktor zu verfeinern, da das numerische Modell in diesen Bereichen weitere Überprüfung erfordert.

Es kann gezeigt werden, dass für eine bessere rechnerische Vorhersage weitere Forschung notwendig ist. Ein numerisches Modell muss weiter verbessert werden, um eine genauere Vorhersage zu ermöglichen und die Simulationszeit zu verkürzen. Weitere experimentelle Untersuchungen sind auch erforderlich, um den Korrekturfaktor der Verglasungsgröße für das bewertete Schalldämm-Maß zu bestimmen. Nach weiteren Untersuchungen besteht die Möglichkeit, dass die Industriepartner ihren Kunden ein verbessertes Prognosewerkzeug zur Verfügung stellen können. Aus den Ergebnissen werden keine zusätzlichen Produkte entstehen, und eine kommerzielle Vermarktung ist nicht geplant.

Die Forschungsergebnisse werden auf zwei Konferenzen im Jahr 2024 veröffentlicht.

- 2024 DAGA 50. Jahrestagung für Akustik, 18.-21. März 2024, Hannover

- 2024 ICSV 30th International congress on Sound & Vibration, 8.-11. July, Amsterdam

Schlussworte (Fazit, Ausblick etc.)

Im Anschluss an das Projekt wurden mit zwei potenziellen Industriepartnern, die ursprünglich nicht an diesem Projekt beteiligt waren, Gespräche über die weitere Entwicklung der Isolierglaseinheit geführt. Diese Gespräche konzentrierten sich auf die folgenden drei spezifischen zukünftigen Entwicklungen:

(1) CO₂-Gas im Scheibenzwischenraum:

Aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit von CO₂ im Vergleich zu Luft kann auch CO₂ als Gasfüllung im Scheibenzwischenraum in Betracht gezogen werden. Darüber hinaus hat CO₂ in Bezug auf die Akustik einen leichten Vorteil, da die Schallausbreitungsgeschwindigkeit im Vergleich zu Argon wesentlich geringer ist.

Die Wärmeleitfähigkeiten von CO₂ und Argon sind jedoch sehr ähnlich, so dass durch den Ersatz von Argon durch CO₂ keine großen Verbesserungen zu erwarten sind, obwohl die Kosten für CO₂ wesentlich höher sind als für Argon. Die CO₂-Konzentration von 0,03-0,04 % in der Umgebungsluft beträgt etwa 1/30 der Argon-Konzentration von 0,9 %. Das bedeutet, dass die Gewinnung von CO₂ viel aufwendiger ist als die von Argon. Daher wird CO₂ in der Fensterindustrie bisher noch nicht verwendet.

Dennoch sind "Carbon Dioxide Removal (CDR)" und "Kohlenstoffneutralität (oder Netto-Null-Emissionen)" der Schlüssel für die Entwicklung der EU-Technologie. Die Abscheidung von CO₂ aus der Umgebungsluft ist eine der Säulen, um den Klimawandel aufzuhalten, und Unternehmen investieren bereits Millionen in die Entwicklung von Verfahren. Angesichts der hohen Kosten für die CO₂-Abscheidung wird CO₂ in viel höheren Konzentrationen durch industrielle Wärmeprozesse freigesetzt, auch in der Glas produzierenden Industrie. Die CO₂-Abscheidungstechnologie, z. B. Zeolith, wurde in den letzten Jahrzehnten intensiv weiterentwickelt. Das abgeschiedene CO₂-Gas kann in Isoliergläsern zumindest für die Dauer ihres Lebenszyklus gespeichert werden. Es kann sogar zurückgewonnen werden, sofern das CO₂-gefüllte Fenster nicht zerstört wird. Auf diese Weise kann man sich der "Netto-Null-Emission" eines Fensters annähern.

Nach den vorläufigen Berechnungen können, wenn das Gas im Lufthohlraum der Isolierglaseinheit vollständig durch CO₂ ersetzt wird, auf dem japanischen IGU-Markt etwa 125 Tonnen pro Jahr gespeichert werden. In der EU ist die Zahl noch viel höher, da in den meisten Ländern die Verwendung von IGU in neuen Gebäuden vorgeschrieben ist.

(2) Abstandhalter mit Absorber:

Die Oberfläche eines Abstandhalters ist perforiert, um eine angemessene Belüftung zu gewährleisten, die Ansammlung von Kondenswasser zu verhindern und das Entweichen von eingeschlossenen Gasen oder Feuchtigkeit zu erleichtern. Diese kleinen Löcher tragen auch dazu bei, einen gleichmäßigen Druck zwischen den Glasscheiben aufrechtzuerhalten, wodurch die strukturelle Integrität und die thermische Effizienz gewährleistet werden. Um zu verhindern, dass kleine Trockenmittelgranulate in den Luftraum gelangen, sind diese Belüftungslöcher in der Regel kleiner als ein Millimeter. Diese Konstruktion ähnelt sehr der einer mikroperforierten Platte (MPP), die als Schallabsorber dient. Außerdem bestehen die Trockenmittel oft aus porösem Material, das ebenfalls als Schallabsorber wirkt. Das Problem besteht darin, dass sowohl die Perforationsrate der Distanzschicht als auch die Porosität der Trockenmittel zu gering sind, um eine wirksame Absorption zu gewährleisten. Durch Erhöhung der Perforationsrate des Abstandhalters und der Porosität der Trockenmittel oder durch Ersetzen eines Teils der Trockenmittel durch den Schallabsorber kann der Abstandhalter auch als effizienter Schallabsorber im Lufthohlraum der Mehrfachverglasung wirken, und es wird eine erhebliche Verbesserung der Schalldämmung der Mehrfachverglasung erwartet.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Perforationsrate des Abstandhalters in der Regel gering bleibt, um eine Sättigung der Trockenmittel während des Herstellungsprozesses zu vermeiden. Es ist wichtig, ein Gleichgewicht zwischen den akustischen Vorteilen einer größeren Perforation und den möglichen Nachteilen zu finden, um eine optimale Leistung zu gewährleisten.

(3) Sicherheitsglas und Metamaterial-Fenster

Verbundsicherheitsglas hat aufgrund der höheren Materialdämpfung in der Regel ein höheres Schalldämmmaß als Floatglas gleicher Glasdicke. Daher kann durch die Verwendung von Verbundsicherheitsglas die Menge des Glasmaterials (Dicke) bei gleichbleibender Schalldämmung reduziert werden. In dieser Hinsicht ist das Verbundsicherheitsglas energiesparender. Andererseits behindert die Folie zwischen den Glasschichten den Recyclingprozess. Die Lebensdauer eines Fensters beträgt in der Regel mehr als 30 Jahre. Es ist daher nicht klar, welche Variante aus ökologischer Sicht vorzuziehen ist. Ein dickeres Floatglas, das sich gut recyceln lässt, oder ein dünneres Verbundsicherheitsglas mit Kunststofffolie, das sich aber schlechter recyceln lässt. Eine Lebenszyklusanalyse ist deshalb erforderlich.

Die Folie im Verbundsicherheitsglas kann auch als Metamaterial verwendet zu werden. Metamaterialien sind künstlich hergestellte Strukturen mit Eigenschaften, die in der Natur nicht vorkommen. Das Vorhandensein von Sperrbereichen ist eine der einzigartigen Eigenschaften von Metamaterialien. Sperrbereiche sind Frequenzbereiche, in denen Metamaterialien die Ausbreitung von Wellen effektiv blockieren oder dämpfen können. Typischerweise verfügt ein Metamaterial über sich wiederholende Muster auf, deren Maßstab kleiner ist als die Wellenlänge der daraus resultierenden besonderen Eigenschaften. Die Periodizität eines akustischen Metamaterials wird häufig erreicht durch (1) das periodische Anbringen kleiner Objekte oder (2) durch das periodische Entfernen oder Ersetzen der Grundstruktur oder (3) durch Kombinationen davon. Diese Ideen können nicht auf Glas angewandt werden, da eine Glasoberfläche undurchlässig und transparent sein sollte. Eine Möglichkeit ist die Entwicklung eines Metamaterialfilms für ein Verbundglas. Wenn die Sperrschicht des Verbundglases auf die Dip-Frequenz des Schallübertragungsverlustes abgestimmt ist, kann eine deutliche Verbesserung der Schalldämmung erzielt werden.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Koehler, Mark (Fraunhofer-Institut für Bauphysik)

Aoki, Yohko (Fraunhofer-Institut für Bauphysik)

Weitere Mitwirkende

Öhler, Sven (Fraunhofer-Institut für Bauphysik)

Brandstetter, Klaus-Dieter (Fraunhofer-Institut für Bauphysik)

Busse, Thomas (Fraunhofer-Institut für Bauphysik)

Kaltbeitzel, Bernd (Fraunhofer-Institut für Bauphysik)

Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

SAINT-GOBAIN GLASS DEUTSCHLAND GmbH

Nikolausstraße 1 ,52222 Stolberg, Deutschland

ENERGY GLAS GmbH,

Zur Frado 1, 34466 Wolfhagen, Deutschland

Fachliche Betreuung

Dipl.-Ing. Steffen Kisseler

42107 Wuppertal

Kurzbiographien

**Herr Mark Koehler**

Mark Koehler hat im Jahr 2003 sein Diplom im Fachbereich Maschinenbau in der Studienrichtung Energie- und Umwelttechnik an der Hochschule Bremen absolviert. Anschließend arbeitete er bei der Firma KAEFER Isoliertechnik GmbH in Bremen als Schallschutz- und Akustikplaner im Industrie- und Schiffbau. Im Jahr 2007 wechselte er zum Fraunhofer-Institut für Bauphysik wo er zunächst als Mitarbeiter in der akkreditierten Prüfstelle und Abschluss seines Masterstudiums im Fachbereich Bauphysik im Jahr 2012 zunehmend auch als Wissenschaftler in der Forschung in den Fachbereichen Bauakustik und Schallimmissionsschutz.

**Dr. Yohko Aoki**

Dr. Aoki hat im Jahr 2004 ihr Masterstudium im Studiengang Luft- und Raumfahrtstechnik abgeschlossen. Anschließend promovierte sie 2008 am Institute of Sound and Vibration Research (ISVR) an der University of Southampton, UK. Seit 2009 arbeitet sie als Wissenschaftlerin in der Abteilung Akustik am Fraunhofer-Institut für Bauphysik.

Literaturverzeichnis

- [1] VDI 2719: Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen (Aug. 1987).
 - [2] DIN EN 14351-1: Fenster und Türen - Produktnorm, Leistungseigenschaften - Teil 1: Fenster und Außentüren (Dez. 2016).
 - [3] DIN EN 12758: Glas im Bauwesen - Glas und Luftschalldämmung - Produktbeschreibungen und Bestimmung der Eigenschaften (April 2011).
 - [4] DIN 4109-35: Schallschutz im Hochbau - Teil 35: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Elemente, Fenster, Türen, Vorhangfassaden (Juli 2016).
 - [5] Haas-Arndt, D.; Ranft, F.: Tageslichttechnik in Gebäuden. C. F. Müller Verlag / Energieagentur NRW (2006).
- Anlage zum BBSR-Antrag "Schalldämmung Verglasungen", Nov. 2017 Seite 7 von 7
- [6] Diefenbach, N; Cischinsky, H.; Rodenfels, M.; Clausnitzer, K.-D.: Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt, 2010.
 - [7] Statistik des Lärmschutzes an Bundesfernstraßen 2013. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Abteilung Straßenbau (2013).
 - [8] Bericht zur Situation der Lärmwirkungsforschung in Deutschland - Fokus Verkehrslärm. Forschungsverbund Leiser Verkehr (2013).
 - [9] DIN EN ISO 10140-2: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 2: Messung der Luftschalldämmung (Dez. 2010).
 - [10] Derner, P.; Reichmann, P.: Einfluss der Scheibengröße auf die Schalldämmung von Isolierglas. Glastechn. Ber. 55 (1982), 183 - 186.
 - [11] Froelich, H.: Einfluss von Größe und Format auf MIG mit unterschiedlichem Scheibenaufbau. Vortrag, Technische Akademie Esslingen (1995).
 - [12] Kuster, J.; Pfefferkorn, H.: Schallschutz von Fassaden in Abhängigkeit von Geometrie und Temperatur. Lärmbekämpfung Bd. 8 (2013), Nr. 4, 160 - 162.
 - [13] Dietz, D.: Formatabhängigkeit der Schalldämmung von Isolierglasscheiben. BSc-Thesis an der Universität Stuttgart und dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (2013).
 - [14] Weber, L.; Dietz, D.; Brandstetter, K.-D.: Formatabhängigkeit der Schalldämmung von Verglasungen. Fortschritte der Akustik - DAGA 2014 (2014), S. 652 - 653.
 - [15] Fenstermarktstudie 2017. Heinze GmbH / Verband Fenster + Fassade (VFF) (Mai 2017).
 - [16] Umsätze der Glasindustrie 2005 und 2016: Bundesverband Glasindustrie e.V. (Nov. 2017).
 - [17] Preise für Fenster im Überblick: <https://www.daemmen-und-sanieren.de/fenster/preise> (Nov 2017).
 - [18] DIN EN ISO 10140-5: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen (Sept. 2014).

-
- [19] DIN EN ISO 16283-3: Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil 3: Fassadenschalldämmung (Sept. 2016).
- [20] DIN EN ISO 10140-1: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 1: Anwendungsregeln für bestimmte Produkte (Dez. 2016).
- [21] Woodcock, R.; Nicolas, J.: A generalized model for predicting the sound transmission properties of generally orthotropic plates with arbitrary boundary conditions, *J. Acoust. Soc. Am.*, 97(2), 1099 – 1112 (1995).
- [22] DIN EN ISO 6721-1:2019-09: Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundlagen (ISO 6721-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 6721-1:2019 (2019-09)
- [23] R. Foret, C. Guigou-Carter, P. Jean, and J.-B. Chéné. Effect of spacer designs on acoustic performance of windows. In *Proceedings of EURONOISE, the International Modal Analysis Conference*, Edinburgh, Scotland, 2009.
- [24] David A. Bies, Colin H. Hansen, *Engineering Noise Control: Theory and Practice*, Fourth Edition, Ch 8.2.4, Spon Press, 2010.
- [25] DIN EN ISO 717-1:2021-05: Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 1: Luftschalldämmung (ISO 717-1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 717-1:2020 (2021-05)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Moderne Dreifach-Isolierverglasung mit klassischem Metall-Abstandshalter (links) und modernem Kunststoffabstandshalter (rechts).	9
Abbildung 2	Schematische Darstellung des mit Trockenmittel gefüllten Abstandhalters und der Sekundärdichtung in einer Doppelverglasung.	9
Abbildung 3	Ein Beispiel für die Kurve der Schalldämm-Maße, unterteilt in vier charakteristische Frequenzbereiche.	10
Abbildung 4	Schalldämm-Maß mit der Referenzkurve nach DIN EN ISO 717.	11
Abbildung 5	Der akkreditierte Fensterprüfstand (P4) mit der Probenöffnung (links); die Öffnung zwischen zwei benachbarten Prüfanständen (P9A und P10A), abgedeckt durch die Holzmaske (rechts).	19
Abbildung 6	"Ein doppelschichtiges Isolierglas mit einem Randabstandshalter und einer Randversiegelung im Rahmen."	19
Abbildung 7	Gemessenes Schalldämm-Maß der Holzmaske zwischen P9A und P10A.	20
Abbildung 8	Gemessenes Schalldämm-Maß von Zweifach-Isolierverglasungen mit gleicher Fläche und verschiedenen Seitenverhältnissen	22
Abbildung 9	Gemessenes Schalldämm-Maß von Zweifach-Isolierverglasungen mit gleicher Fläche und verschiedenen Seitenverhältnissen	23
Abbildung 10	Gemessenes Schalldämm-Maß von Dreifach-Isolierverglasungen mit gleicher Fläche und verschiedenen Seitenverhältnissen	24
Abbildung 11	Gemessenes Schalldämm-Maß von Zweifach-Isolierverglasungen mit gleicher Fläche und verschiedenen Seitenverhältnissen	25
Abbildung 12	Gemessenes Schalldämm-Maß von Zweifach-Isolierverglasungen mit gleicher Fläche und verschiedenen Seitenverhältnissen	26
Abbildung 13	Gemessenes Schalldämm-Maß von Dreifach-Isolierverglasungen mit gleicher Fläche und verschiedenen Seitenverhältnissen	26
Abbildung 14	GUI des vom IBP entwickelten Analysetools TL_ATMOS.	28
Abbildung 15	COMSOL Anwendungsentwickler	29
Abbildung 16	Schematische Darstellung des numerischen Modells zur Vorhersage des Schalldämm-Maßes (links) und die vergrößerte Ansicht um die Randabstandshalter (rechts).	29
Abbildung 17	Zusammengesetzte Proben für die dynamisch-mechanische Prüfung.	30
Abbildung 18	Prüfstand für die dynamisch-mechanische Prüfung nach DIN EN ISO 6721-4.	30
Abbildung 19	Ein Beispiel für die gemessene dynamische Steifigkeit (links) und den Verlustfaktor (rechts).	31
Abbildung 20	Gemessener Elastizitätsmodul (links) und der Verlustfaktor (rechts) des Kittes.	32
Abbildung 21	Gemessener Elastizitätsmodul (links) und Verlustfaktor (rechts) des Sekundärdichtstoffs, gemessen an den verschiedenen Tagen.	33
Abbildung 22	Abstandhalterproben für die dynamische Steifigkeitsprüfung	33
Abbildung 23	Gemessene äquivalente Steifigkeit (links) und der Verlustfaktor von A1 (rechts).	35
Abbildung 24	Gemessene äquivalente Steifigkeit (links) und der Verlustfaktor von P2 (rechts).	35

Abbildung 25 Gemessene äquivalente Steifigkeit (links) und der Verlustfaktor von H1 (rechts).	35
Abbildung 26 Gemessene äquivalente Steifigkeit (links) und der Verlustfaktor von P2 (rechts).	36
Abbildung 27 Gemessene äquivalente Steifigkeit von S1.	36
Abbildung 28 Schalldämm-Maß einer 1230 x 1480 x 2 mm großen Stahlplatte, gemessen in P4 (schwarzer Balken mit Kreis), vorhergesagt durch das analytische Modell (blau mit x) und durch das numerische Modell (rot mit Rauten), gemittelt über das 1/3 rd Oktavband (links) und das 1/48 th Oktavband (rechts).	37
Abbildung 29 Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 1230 x 1480 x 3-2-3 mm (links) und 2370 x 770 x 3-2-3 mm (rechts), gemessen in P4 (schwarz mit Kreis) und mit dem numerischen Modell vorhergesagt mit $k_{eq} = 0 \text{ N/m}^3$ (rot mit Rauten).	40
Abbildung 30 Bewertetes Schalldämm-Maß: Gemessen (blau oder hellblau) und durch das numerische Modell (rot) in Bezug auf die Verglasungsmaße vorhergesagt. Jede Gruppe enthält vier Sätze. Von links nach rechts: Drei Glasschichtdicken 3-2-3 mm, 3-3-3 mm, 4-2-3 mm, und 4-3-3 mm.	40
Abbildung 31 Schalldämm-Maß der einfachen Glasscheibe mit den Abmessungen 1230x1480x 4mm (schwarz mit Kreis) und der unbegrenzten Scheibe aus 4mm Glas (rot mit Rauten).	44
Abbildung 32 Schalldämm-Maß (links) und Resonanzfrequenzen (rechts) der Einfachverglasung mit den Abmessungen 870 x 1050 mm (grau mit x), 970 x 1170 mm (rot mit Rauten) und 1230 x 1480 mm (schwarz mit Kreis).	45
Abbildung 33 Schalldämm-Maß (links) und Resonanzfrequenzen (rechts) der Einfachverglasung mit den Abmessungen 770 x 2370 mm (grün mit x), 890 x 2050 mm (magenta mit Rauten) und 1230 x 1480 mm (schwarz mit Kreis).	45
Abbildung 34 Rechts: Abweichung des R_w von 4 mm Glasplatten in Bezug auf die Oberfläche bei einem konstanten Seitenverhältnis von 0,33 (rot mit Kreis), 0,52 (blau mit Rauten) und 0,83 (grün mit x) unter Verwendung des R_w von 4mm Glasplatten mit einer Oberfläche von 1,82 m ² als Referenz. Links: Abweichung von R_w einer 4 mm Glasplatte in Bezug auf das Seitenverhältnis bei einer konstanten Fläche von 1,37 m ² (rot mit Kreis), 1,82 m ² (blau mit Rauten) und 2,20 m ² (grün mit x) unter Verwendung von R_w einer 4mm Glasplatte mit einem Seitenverhältnis von 0,83 als Referenz.	46
Abbildung 35 Rechts: Abweichung des rP von 4 mm Glasplatten in Bezug auf die Oberfläche bei einem konstanten Seitenverhältnis von 0,33 (rot mit Kreis), 0,52 (blau mit Rauten) und 0,83 (grün mit x) unter Verwendung des rP von 4mm Glasplatten mit einer Oberfläche von 1,82 m ² als Referenz. Links: Abweichung von rP einer 4 mm Glasplatte in Bezug auf das Seitenverhältnis bei einer konstanten Fläche von 1,37 m ² (rot mit Kreis), 1,82 m ² (blau mit Rauten) und 2,20 m ² (grün mit x) unter Verwendung von rP einer 4mm Glasplatte mit einem Seitenverhältnis von 0,83 als Referenz.	47
Abbildung 36 Die Abweichung von R_w einer 4 mm Glasplatte von der Referenzplatte mit den Abmessungen 1230 x 1480 x 4 mm (blau mit Kreisen). Die berechnete ΔR in Gleichung (15) unter Verwendung des Korrekturfaktors $c_0 = 0,71$.	48
Abbildung 37 Gemessenes (links) und mit Hilfe des numerischen Modells vorhergesagtes (rechts) Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung 4-14 (Ar)-2-14 (Ar)-3 mm mit den Abmessungen 870 x 1050 mm (grau mit x), 970 x 1170 mm (rot mit Rauten), 1230 x 1480 mm (schwarz mit Kreis) mit dem gleichen Seitenverhältnis von 0,83.	49
Abbildung 38 Gemessenes (links) und mit dem numerischen Modell vorhergesagtes (rechts) Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung von 4-14 (Ar)-2-14 (Ar)-3 mm, mit den Abmessungen 770 x 2370 mm (grün mit x), 1050 x 1730 mm (magenta mit Rauten), 1230 x 1480 mm (schwarz mit Kreis) mit einer identischen Oberfläche von 1,82 m ² .	49
Abbildung 39 Abweichung des gemessenen R_w vom Referenzwert der 1230 x 1480 mm mit einer Glasdicke von 3-2-3 mm (rot mit Rauten), 3-3-3 mm (grau mit Kreisen), 4-2-3 mm (grün mit Dreiecken) und 4-3-3 mm	

(blau mit Kreuzen) in Abhängigkeit von der Fläche (links) und dem Seitenverhältnis (rechts). Verhältnis von Umfang zu Oberfläche der rechteckigen Platte mit einem Seitenverhältnis von 0,83. Abweichung des Flächenverhältnisses rP (schwarz gestrichelte Linie) von der Referenzplatte mit den Abmessungen 1230 x 1480 x 3-3-3 mm. 50

Abbildung 40 Abweichung des simulierten R_w vom Referenzwert der Platte 1230 x 1480 mm mit den Glasdicken 3-2-3 mm (rot mit Rauten), 3-3-3 mm (grau mit Kreis), 4-2-3 mm (grün mit <) und 4-3-3 mm (blau mit x) in Abhängigkeit von der Fläche (links) und dem Seitenverhältnis (rechts). Verhältnis von Umfang zu Fläche der rechteckigen Platte mit einem Seitenverhältnis von 0,83. Abweichung des Flächenverhältnisses rP (schwarz gestrichelte Linie) von der Referenzplatte mit den Abmessungen 1230 x 1480 x 3-3-3 mm. 51

Abbildung 41 Experiments (links) und Simulation (recht): Abweichung des simulierten R_w vom Referenzwert der Platte 1230 x 1480 mm mit den Glasdicken 3-2-3 mm (rot mit Rauten), 3-3-3 mm (grau mit Kreis), 4-2-3 mm (grün mit <) und 4-3-3 mm (blau mit x). Die berechnete ΔR in Gleichung (15) unter Verwendung des Korrekturfaktors $c_0 = 2,37$ (links) und $c_0 = 7,40$ (recht). 52

Abbildung 42 Gemessenes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 1230 x 1480 x 3-2-3 mm (rot mit Rauten), 3-3-3 mm (grau mit Kreis), 4-2-3 mm (grün mit <) und 4-3-3 mm (blau mit x). 53

Abbildung 43 Gemessenes bewertetes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 1230 x 1480 x 3-2-3 mm (rot mit Rauten), 3-3-3 mm (grau mit Kreisen), 4-2-3 mm (grün mit Dreiecken) und 4-3-3 mm (blau mit Kreuzen). 53

Abbildung 44 Gemessenes Schalldämm-Maß der Doppelverglasung mit dem Kunststoff-Abstandhalter (blau mit Kreisen) und dem Metall-Abstandhalter (rot mit Quadraten). Links: 6-12(Ar) -4 mm, gemessen in 2012 (Metall-Abstandhalter) and 2016 (Kunststoff-Abstandhalter). Rechts: 6-12(Ar) -4 mm in 2012 (Metall-Abstandhalter) and 2016 (Kunststoff-Abstandhalter). 54

Abbildung 45 Simuliertes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 870 x 1050 x 4-14 (Ar)-2-14 (Ar)-3 mm mit den unterschiedlichen Steifigkeiten der Abstandhalter: $k_{eq} = 0 \text{ N/m}^3$ (schwarz mit Kreis), $k_{eq} = 10^{10} \text{ N/m}^3$ (rot mit Rauten), $k_{eq} = 10^{11} \text{ N/m}^3$ (blau mit x). 55

Abbildung 46 Simuliertes bewertetes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 870 x 1050 x 3-2-3 mm (rot mit Rauten), 3-3-3 mm (schwarz mit Kreis), 4-2-3 mm (grün mit <) und 4-3-3 mm (blau mit x) in Abhängigkeit von der Steifigkeit des Abstandhalters. 56

Abbildung 47 Simuliertes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 870 x 1050 x 4-2-3 mm unter Verwendung der verschiedenen Gasfüllungen. Luft (grün mit x), Argon (magenta mit Rauten) und CO_2 (schwarz mit Kreis). 57

Abbildung 48 Gemessenes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 770 x 2370 x 3-2-3 mm (rot), 3-3-3 mm (grau), 4-2-3 mm (grün) und 4-3-3 mm (blau). 70

Abbildung 49 Gemessenes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 670 x 2050 x 3-2-3 mm (rot), 3-3-3 mm (grau), 4-2-3 mm (grün) und 4-3-3 mm (blau). 70

Abbildung 50 Gemessenes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 970 x 1170 x 3-2-3 mm (rot), 3-3-3 mm (grau), 4-2-3 mm (grün) und 4-3-3 mm (blau). 71

Abbildung 51 Gemessenes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 870 x 1050 mm x 3-2-3 mm (rot), 3-3-3 mm (grau), 4-2-3 mm (grün), und 4-3-3 mm (blau). 71

Abbildung 52 Auszug aus der Datenbank, Zweifach-Isolierverglasungen, flächenbezogene Massen und Scheibenzwischenräume, Schalldämm-Maße mit markierter Resonanzfrequenz, Teil 1 72

Abbildung 53 Auszug aus der Datenbank Zweifach-Isolierverglasungen, flächenbezogene Massen und Scheibenzwischenräume, Schalldämm-Maße mit markierter Resonanzfrequenz, Teil 2 73

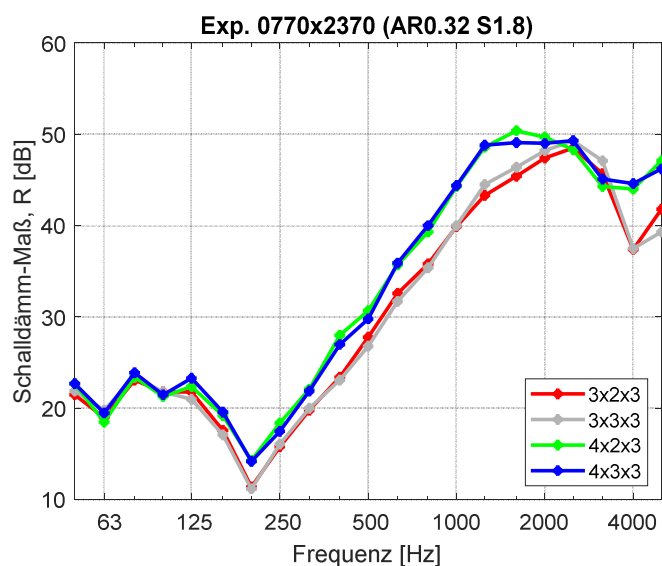
Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Liste der geprüften Dreifachverglasungen	16
Tabelle 2	Angewandte Methoden im Rahmen des Projekts.	18
Tabelle 3	Räumliche Anordnung der Prüfstände	20
Tabelle 4	Gemessene strukturmechanische Parameter.	31
Tabelle 5	Liste der geprüften Abstandhalterproben	33
Tabelle 6	Material und Geometrieparameter für die Simulation einer Einfachverglasung mit TL_ATMOS.	36
Tabelle 7	Material und geometrische Parameter der im FE-Modell verwendeten Dreifachverglasung.	38
Tabelle 8	Auflistung der möglichen Ursachen für die Abweichung zwischen der Simulation und den Messungen.	42
Tabelle 9	Liste der untersuchten Parameter der Dreifachverglasung und der angewandten Methoden.	43

Anlagen

Abbildung 48

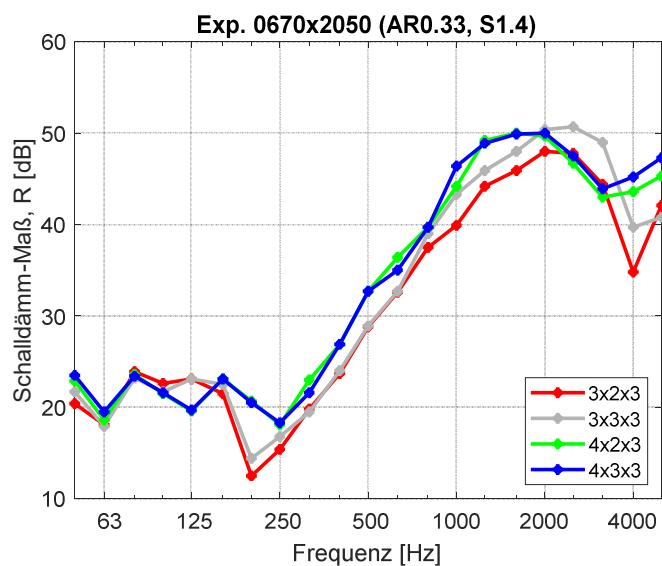
Gemessenes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 770 x 2370 x 3-2-3 mm (rot), 3-3-3 mm (grau), 4-2-3 mm (grün) und 4-3-3 mm (blau).



Quelle: IBP, Stuttgart

Abbildung 49

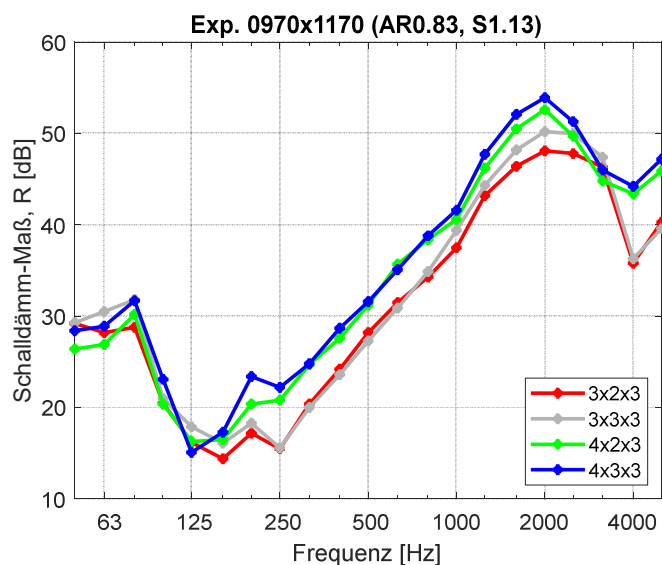
Gemessenes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 670 x 2050 x 3-2-3 mm (rot), 3-3-3 mm (grau), 4-2-3 mm (grün) und 4-3-3 mm (blau).



Quelle: IBP, Stuttgart

Abbildung 50

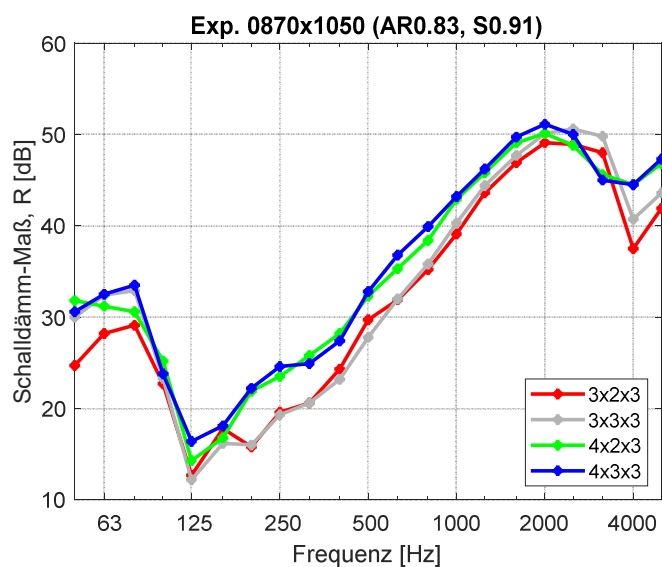
Gemessenes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 970 x 1170 x 3-2-3 mm (rot), 3-3-3 mm (grau), 4-2-3 mm (grün) und 4-3-3 mm (blau).



Quelle: IBP, Stuttgart

Abbildung 51

Gemessenes Schalldämm-Maß der Dreifachverglasung mit den Abmessungen 870 x 1050 mm x 3-2-3 mm (rot), 3-3-3 mm (grau), 4-2-3 mm (grün), und 4-3-3 mm (blau).



Quelle: IBP, Stuttgart

Abbildung 52

Auszug aus der Datenbank, Zweifach-Isolierverglasungen, flächenbezogene Massen und Scheibenzwischenräume, Schalldämm-Maße mit markierter Resonanzfrequenz, Teil 1

	Abmessungen und Masse						Einzelnwerte [dB]										Schalldämm-Maße R in dB												
							Rw	C				Ctr		STC + OITC															
	Gesamtstärke [mm] (Mitte / Rand)	Abmessungen Scheibe B x H [mm]	Flächenmasse [kg/m²]	Abstandhalter Dichtung Abstandhalter	Randversiegelung		RwP	100 - 3150	100 - 5000	50 - 3150	50 - 5000	100 - 3150	100 - 5000	50 - 3150	50 - 5000	STC	OITC	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630
14	24,0/23,5	1230x1480	19,3	MHP	B	PS	30	-1	0	-	-	-3	-3	-	-	30	-	-	21,5	20,5	20,1	17,8	17,8	21,5	23,4	27,0	31,2		
15	25,0/24,5	1230x1480	19,8	?	?	?	31	-1	0	-	-	-4	-4	-	-	31	-	-	23,8	19,8	21,3	19,2	17,8	22,0	23,9	27,4	32,5		
18	24,0/23,7	1230x1480	19,8	?	?	?	32	-1	0	-	-	-4	-4	-	-	32	-	-	24,6	18,4	20,6	20,2	18,5	21,9	24,8	28,8	32,1		
19	25	1230x1480	25,2	MHP	B	PS	32	-13	-12	-	-	-11	-11	-	-	14	-	-	22,7	21,1	22,5	20,5	25,0	28,3	29,9	31,7	35,6		
22	27,0/26,5	1230x1480	24,7	?	?	?	33	-2	-1	-	-	-6	-6	-	-	33	-	-	23,4	19,5	13,4	19,9	20,6	22,1	28,1	31,3	34,7		
23	28,5	1230x1480	45,4	MHP	B	PS	33	-3	-2	-3	-2	-6	-6	-6	-6	29	25	25,1	21,4	20,7	16,4	17,9	24,7	27,3	29,3	21,0	35,2		
30	17,7/17,2	1230x1480	22,3	?	?	?	34	-3	-2	-	-	-6	-6	-	-	28	-	-	24,4	22,4	24,4	25,6	23,2	16,4	25,3	34,5	37,5		
31	26	1230x1480	24	AHP	-	-	34	-1	0	-	-	-5	-5	-	-	35	-	-	21,0	19,2	20,9	18,9	22,6	24,5	26,9	30,2	34,5		
36	29,5/29,0	1230x1480	29,9	?	?	?	35	-2	-1	-	-	-5	-5	-	-	35	-	-	24,5	19,7	19,2	18,1	25,0	26,0	31,1	32,6	36,0		
37	25,75	1230x1480	24,6	MHP	B	PS	35	-1	0	-	-	-5	-5	-	-	35	-	-	21,8	21,2	20,5	19,2	23,3	26,9	28,1	30,6	34,5		
38	25,75	1230x1480	24,6	MHP	B	PS	35	-1	0	-	-	-5	-5	-	-	35	-	-	21,8	21,2	20,5	19,2	23,3	26,9	28,1	30,6	34,5		
39	25,75	1230x1480	24,6	MHP	B	PS	35	-1	0	-	-	-5	-5	-	-	35	-	-	21,8	21,2	20,5	19,2	23,3	26,9	28,1	30,6	34,5		
40	25,75	1230x1480	24,6	MHP	B	PS	35	-1	0	-	-	-5	-5	-	-	35	-	-	21,8	21,2	20,5	19,2	23,3	26,9	28,1	30,6	34,5		
41	28,25	1230x1480	25,8	S*	U	35	-3	-2	-	-	-7	-7	-	-	33	-	-	20,2	21,1	18,6	15,4	21,3	26,1	32,6	38,6	43,7			
42	29,75	1230x1480	31	S*	U	35	-2	-1	-	-	-6	-6	-	-	36	-	-	20,8	18,3	16,5	17,8	24,2	29,3	37,8	41,3	42,7			
43	26,25	1230x1480	25,1	MP	B	PS	35	-3	-2	-	-	-8	-8	-	-	34	-	-	19,9	14,8	14,1	16,2	23,4	32,9	38,3	39,0	44,1		
44	24,75	1230x1480	30,4	MHP	B	zeR	35	-2	-1	-	-	-5	-5	-	-	36	-	-	23,8	18,9	22,5	20,6	21,1	24,8	28,2	32,9	36,3		
55	28,0/28,0	1230x1480	29,8	MHP	B	PS	36	-2	-1	-	-	-6	-6	-	-	36	-	-	23,0	20,6	20,7	20,2	23,1	25,8	29,2	33,5	38,7		
56	26,0/25,5	1230x1480	25	?	?	?	36	-2	-1	-	-	-5	-5	-	-	36	-	-	25,9	21,6	24,0	21,0	25,0	25,1	28,7	31,0	34,4		
57	25,5/25,5	1230x1480	25,2	?	?	?	36	-2	-1	-	-	-5	-5	-	-	36	-	-	25,7	21,2	24,5	20,8	25,5	25,9	28,9	30,9	33,7		
58	28,5	1230x1480	29,7	MHP	B	PS	36	-2	-1	-	-	-6	-6	-	-	36	-	-	20,5	21,6	20,6	18,5	24,9	25,4	29,7	32,7	37,6		
59	26,25	1230x1480	25,1	MP	B	U	36	-3	-2	-	-	-8	-8	-	-	36	-	-	18,8	14,6	14,8	17,7	24,0	32,9	37,9	38,6	43,9		
60	26,5	1230x1480	25,1	MP	B	PS	36	-3	-2	-	-	-8	-8	-	-	35	-	-	20,8	15,9	15,1	16,8	22,8	32,2	38,0	39,0	43,1		
63	26,3/26,3	1230x1480	25,6	MHP	B	PU	36,3	-2	-1	-2	-1	-5	-5	-5	-5	?	?	24,4	23,3	28,8	24,2	20,3	22,5	20,3	23,9	27,6	29,2	30,8	34,0
64	26,3/26,3	1230x1480	25,6	ALU	B	PU	36,3	-2	-1	-2	-1	-5	-5	-5	-5	?	?	24,4	23,3	28,8	24,2	20,3	22,5	20,3	23,9	27,6	29,2	30,8	34,0
65	26,3/26,3	1230x1480	25,6	ALU	B	PU	36,3	-2	-1	-2	-1	-5	-5	-5	-5	?	?	24,4	23,3	28,8	24,2	20,3	22,5	20,3	23,9	27,6	29,2	30,8	34,0
88	26,5/26,0	1230x1480	34,6	KHP	B	PS	37	-2	-1	-2	-1	-6	-6	-6	-6	37	29	28,7	30,2	28,5	26,5	22,8	23,6	19,0	22,4	30,8	38,3	43,2	43,9
89	27,5/27,0	1230x1480	54,4	-	-	-	37	-2	-1	-2	-1	-6	-6	-6	-6	36	29	35,8	31,7	26,6	24,1	21,4	22,2	21,4	23,1	25,8	29,4	33,3	37,9
90	25,0/25,0	1230x1480	32,5	MHP	B	PS	37	-1	0	-1	0	-5	-5	-5	-5	37	30	34,8	31,6	26,3	24,6	23,3	21,5	23,0	24,2	28,7	32,5	34,8	36,0
91	35,0/34,5	1230x1480	50,8	MHP	B	PS	37	-1	0	-1	0	-5	-5	-5	-5	37	30	38,3	29,8	21,3	29,7	28,2	20,4	21,4	29,7	29,8	32,6	36,4	38,4
92	25,5/26,5	1230x1480	25,3	AHP	B	PS	37	-2	-1	-2	-1	-6	-6	-6	-6	37	29	34,6	31,3	26,2	21,0	21,2	21,1	19,3	26,7	28,9	30,1	33,4	37,0
93	26,0/26,0	1230x1480	25,4	MHP	B	PS	37	-2	-1	-	-	-6	-6	-	-	37	-	-	22,5	21,3	20,9	19,3	22,4	27,4	34,3	38,7	41,9		
94	30,0/29,5	1230x1480	31,0	MHP	B	PS	37	-2	-1	-2	-1	-6	-6	-6	-6	36	29	33,5	30,3	29,8	23,0	23,5	20,5	18,3	24,0	28,5	32,2	35,7	38,5
95	22,5/22,0	1230x1480	24,7	?	?	?	37	-2	-1	-	-	-6	-6	-	-	36	-	-	23,1	20,3	20,7	20,0	21,2	28,7	37,0	40,1	42,7		
96	31,0/30,5	1230x1480	37,4	?	?	?	37	-2	-1	-	-	-6	-6	-	-	37	-	-	27,6	22,8	18,5	22,1	25,4	26,2	32,4	37,0	39,4		
97	27,2/27,2	1230x1480	30	?	?	?	37	-1	-1	-	-	-5	-5	-	-	37	-	-	24,4	22,2	23,2	23,5	27,2	26,1	29,2	32,6	36,5		
98	30,5/30,0	1230x1480	35,2	?	?	?	37	-1	0	-	-	-5	-5	-	-	37	-	-	25,5	18,3	21,6	22,7	29,1	33,1	35,0	36,5	40,6		
99	30,5/30,0	1230x1480	35,2	?	?	?	37	-2	-1	-	-	-5	-5	-	-	37	-	-	24,0	20,8	19,1	20,8	29,0	33,3	38,0	41,2	43,2		
100	26,2/26,0	1230x1480	24,9	?	?	?	37	-3	-2	-	-	-7	-7	-	-	36	-	-	18,6	20,1	22,6	17,6	23,4	29,1	34,3	38,1	41,2		
101	26,5/26,5	1230x1480	25	?	?	?	37	-2	-1	-	-	-6	-6	-	-	36	-	-	24,5	24,2	23,0	18,0	21,6	28,4	35,3	39,3	41,9		
102	32,5/32,5	1230x1480	30,7	?	?	?	37	-2	-1	-	-	-6	-6	-	-	37	-	-	24,3	22,5	18,4	19,2	27,3	28,8	30,7	34,9	38,6		
103	28,5/28,5	1230x1480	30,5	?	?	?	37	-2	-1	-	-	-5	-5	-	-	37	-	-	24,3	23,8	22,7	22,5	25,0	27,4	28,2	33,5	37,8		
104	22,2/22,2	1230x1480	24,9	?	?	?	37	-3	-2	-	-	-6	-6	-	-	36	-	-	25,6	23,4	24,1	16,3	20,7	26,5	35,2	39,1	41,6		
105	25,2/25,2	1230x1480	25,1	?	?	?	37	-4	-3	-	-	-8	-8	-	-	33	-	-	24,4	21,7	20,8	14,9	23,9	29,2	35,0	38,1	41,5		
106	22,0/21,7	1230x1480	24,4	?	?	?	37	-3	-2	-	-	-8	-8	-	-	34	-	-	24,2	21,8	22,7	17,7	19,2	26,6	34,0	37,9	42,3		
107	32,0/32,0	1230x1480	30	?	?	?	37	-2	-1	-	-	-6	-6	-	-	37	-	-	24,2	22,3	20,2	20,6	25,7	27,1	29,9	33,7	38,5		
108	28,5/28,0	1230x1480	30,4	?	?	?	37	-2	-1	-	-	-5	-5	-	-	37	-	-	24,2	23,2	22,5	23,2	24,8	26,3	28,9	33,2	37,4		
109	26,7/26,0	1230																											

Abbildung 53

Auszug aus der Datenbank Zweifach-Isolierverglasungen, flächenbezogene Massen und Scheibenzwischenräume, Schalldämm-Maße mit markierter Resonanzfrequenz, Teil 2

D	H	Abmessungen und Parameter	Rand	Einschleuchte [dB]										STC+0/10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
				Ru	C					Ctr	STC+0/10					STC+0/10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
D	H	Abmessungen und Parameter	Rand	Ru	C						Ctr	STC+0/10					STC+0/10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
					100-1350	100-5000	50-1350	50-5000	100-1350	100-5000		50-1350	50-5000	STC	0/10	0/10	0/10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
10	20	20x20x20	20x20	AMP	B	PSE	39	-2	-1	-2	-1	-7	-7	-7	39	39	39,6	39	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	