

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

Programm „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ (BWPLUS)

**„Energetische und akustische Sanierung von Wohngebäuden –
vom Altbau zum akustisch optimierten Passivhaus“**

Dr. Dirk Pietruschka, Dipl. Ing. Edit Varga,
Dipl.-Ing.(FH) Andreas Drechsler, Dipl.-Ing.(FH) Robert Marin,
Prof. Dr. Ursula Eicker, Prof. Dr. Heinz-Martin Fischer

HOCHSCHULE FÜR TECHNIK STUTTGART

Förderkennzeichen: BWU27005, 05/08 – 09/10

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

März 2012

Institut für angewandte Forschung
Zentrum für akustische und thermische Bauphysik

Abschlussbericht

Projekt Nr.: 122 002 08P

Energetische und akustische Sanierung von Wohngebäuden – vom Altbau zum akustisch op- timierten Passivhaus

Projektlaufzeit 1.5.2008 bis 30.9.2010

Hochschule
für Technik
Stuttgart

Dr. Dirk Pietruschka, Dipl. Ing. Edit Varga, Dipl.-Ing.(FH) Andreas Drechsler,
Dipl.-Ing.(FH) Robert Marin, Prof. Dr. Ursula Eicker, Prof. Dr. Heinz-Martin Fischer

Programm „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ (BWPLUS)

Förderkennzeichen: BWU27005, 05/08 – 09/10

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

März 2012

Der Bericht umfasst:

104 Seiten Text

48 Seiten Anhänge

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

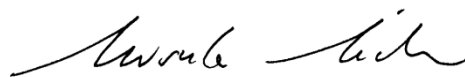
Stuttgart, den 6. März 2012

Bearbeiter:

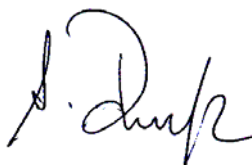
Projektleiter:



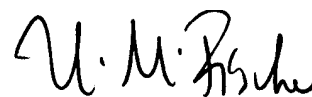
Dr. Dirk Pietruschka



Prof. Dr. Ursula Eicker



Dipl. Ing. (FH) Andreas Drechsler



Prof. Dr.-Ing. H.M. Fischer

Danksagung

Die vorliegenden Untersuchungen wurden vom Land Baden-Württemberg, im Rahmen des Programms „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ (BWPLUS), finanziert. Diesem sei an dieser Stelle für Bewilligung und Förderung des Vorhabens gedankt. Die konkrete Zusammenarbeit erfolgte mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Projektträger Karlsruhe, Baden-Württemberg Programme (PTKA-BWP). Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Trägers gilt unser Dank für die gute und erfolgreiche Zusammenarbeit.

Das Forschungsvorhaben war neben der Finanzierung auf eine enge Kooperation mit Herstellern angewiesen. Aktuelle Entwicklungen und neue Materialien, neue Bauprodukte und haustechnische Anlagen sollten direkt in das Projekt mit einbezogen werden. Dies gelang durch die Unterstützung zahlreicher Firmen und die teilweise kostenlose Bereitstellung neuer Materialien und Bauprodukte. Deshalb an dieser Stelle auch ein Dankeschön für diese Hilfe an:

BASF AG, Rockwool International A/S, Hasit Trockenmörtel GmbH, Saint-Gobain Weber GmbH, Variotec GmbH & Co. KG, Porextherm Dämmstoffe GmbH, minusdrei GmbH, Zwönitzer Bauelemente GmbH, Jürgen Nestle Fensterbau, Fa. Roland Paul, inVenter GmbH.

| | |
|---|-----------|
| DANKSAGUNG | 6 |
| 1 KURZFASSUNG..... | 9 |
| 2 ABSTRACT..... | 10 |
| 3 MOTIVATION UND RATIONALE..... | 10 |
| 4 AUFGABENSTELLUNG | 11 |
| 5 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND..... | 12 |
| 5.1 WÄRMESCHUTZ UND ENERGIEEINSPARUNG..... | 12 |
| 5.2 AKUSTIK UND SCHALLSCHUTZ | 12 |
| 6 PLANUNG UND ABLAUF | 15 |
| 6.1 WÄRMESCHUTZ..... | 15 |
| 6.2 AKUSTIK UND SCHALLSCHUTZ | 15 |
| 7 ERGEBNISSE..... | 17 |
| 7.1 WÄRMESCHUTZ UND ENERGIEEINSPARUNG..... | 17 |
| 7.1.1 Überblick..... | 17 |
| 7.1.2 Festlegung der zu betrachtenden Gebäudetypen | 17 |
| 7.1.3 Wärmeschutzqualität von Passivhäusern..... | 30 |
| 7.1.4 Berechnungen mit dem Passivhaus Projektierungs Paket (PHPP) | 33 |
| 7.1.5 Ergebnisse der PHPP Berechnungen | 37 |
| 7.1.6 Gebäude aus der Vorkriegszeit | 43 |
| 7.1.7 Gebäude aus der frühen Nachkriegszeit (Anfang der 50-er Jahre) | 47 |
| 7.1.8 Gebäude aus den 60-er Jahren (Baujahr 1958)..... | 48 |
| 7.1.9 Gebäude aus den 60-er Jahren im innerstädtischen Bereich | 49 |
| 7.1.10 Gebäude aus den 70er-Jahren aus vorgefertigten Stahlbetonteilen..... | 50 |
| 7.1.11 Plattenbauten aus den 70-er Jahren | 51 |
| 7.1.12 Wärmetechnische Beurteilung der Gebäudehülle bezüglich der Sanierungsmöglichkeiten bis zum Passivhausstandard | 52 |
| 7.1.13 Festlegung von Standardaufbauten von Außenwänden für den Passivhausstandard | 56 |
| 7.1.14 Wärmetechnische Anforderungen an Fenster | 70 |
| 7.1.15 Wärmetechnische Sanierung von Rollladenkästen | 70 |
| 7.1.16 Wärmetechnische Anforderungen an Lüftungseinrichtungen | 73 |
| 7.1.17 Detaillierte Wärmebrückenanalyse und Optimierung | 74 |
| 7.2 AKUSTIK UND SCHALLSCHUTZ | 75 |
| 7.2.1 Überblick | 75 |
| 7.2.2 Verkehrsgeräusche..... | 75 |
| 7.2.3 Wände mit Wärmedämmung | 77 |
| 7.2.4 Fenster und Verglasungen | 85 |
| 7.2.5 Rollladenkästen | 87 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 7.2.6 | Lüftungen..... | 89 |
| 7.2.7 | Vor-Ort-Messungen | 93 |
| 7.2.8 | Fassade mit WDVS und Fenster im Wandprüfstand..... | 95 |
| 7.2.9 | Berechnungen | 96 |
| 7.2.10 | Tiefe Frequenzen..... | 98 |
| 7.2.11 | Gesamtbewertung | 98 |
| 7.3 | ZUSAMMENFASSUNG | 102 |
| 8 | BEITRAG DER ERGEBNISSE ZU DEN ZIELEN DES FÖRDERPROGRAMMS | 103 |
| 9 | LITERATUR | 105 |
| 10 | VORTRÄGE UND VERÖFFENTLICHUNGEN..... | 106 |
| 11 | ANHANG W1 | 108 |
| 11.1 | FREISTEHENDE GEBÄUDE AUS DER FRÜHEN NACHKRIEGSZEIT..... | 108 |
| 11.2 | FREISTEHENDE GEBÄUDE AUS DER NACHKRIEGSZEIT..... | 114 |
| 11.3 | GEBÄUDE AUS DER NACHKRIEGSZEIT IN BLOCKBEBAUUNG | 120 |
| 11.4 | GEBÄUDE AUS DEN 70ER-JAHREN AUS VORGEFERTIGTEN BAUTEILEN | 122 |
| 11.5 | PLATTENBAUTEN AUS DEN 70-ER JAHREN | 124 |
| 12 | ANHANG W2 WÄRMEBRÜCKEN | 129 |
| 13 | ANHANG A AKUSTIK UND SCHALLSCHUTZ..... | 136 |

1 Kurzfassung

Es wurde versucht die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden mit einer akustischen Optimierung zu verbinden. Bei Sanierungsmaßnahmen steht bisher eindeutig die Energieeffizienz im Vordergrund und nur diese wird finanziell entsprechend gefördert. Die Notwendigkeit zur Verbesserung des Schallschutzes wird nachrangig behandelt. Die vorliegende Arbeit soll dazu beitragen dies zu ändern. Als Ziel für die energetische Sanierung wird der anspruchsvolle Passivhausstandard angestrebt. Die notwendigen wärmetechnischen Maßnahmen diesen zu erreichen sind sehr stark vom gegebenen Bestandsgebäude abhängig. Bei geringer Geschosshöhe und hohem A/V-Verhältnis und Wärmebrücken zum Keller oder auskragenden Balkonplatten kann der Passivhausstandard nur schwer erreicht werden. In diesen Fällen ist eine Sanierung mit Passivhauskomponenten mit einem weniger ambitionierten Energiestandard anzustreben. Im Zuge des Projektes wurden sog. charakteristische Kurven für unterschiedliche Gebäudetypen ermittelt. Diese zeigen die Möglichkeit ob mit vertretbarem Aufwand Passivhausstandard realisiert werden kann oder nicht. Zentrale Einflussgrößen sind dabei Kompaktheit, Fensterflächenanteil und Verschattung von Glasflächen. Verallgemeinert kann gesagt werden, dass bei Geschosswohnungsbauten ab vier Geschossen und bei kompakter Bauweise Passivhausstandard erreicht werden kann. Die dafür notwendigen Maßnahmen werden dargestellt. Eine Ausnahme bilden Gebäude unter Denkmalschutz, bei denen keine Außendämmung möglich ist. Hier müssen Innendämmungen verwendet werden und durch die unvermeidbaren Wärmebrücken kann dabei Passivhausstandard nicht mit vertretbarem Aufwand realisiert werden.

Beim Schallschutz ist das Spektrum des Verkehrsgeräusches unbedingt in die Planungen mit einzu beziehen. Die bei der energetischen Sanierung verwendeten Wärmedämmsysteme für opake Bauteile sind zwischen 10 cm und 35 cm dick und verhalten sich in der Regel wie Masse-Feder-Masse Systeme mit einer Verschlechterung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen. Die Wand mit Dämmsystem ist jedoch selten entscheidend, denn es gilt auch für eine energetisch sanierte Fassade, dass die Fenster und Verglasungen in der Regel den akustischen Schwachpunkt darstellen. Ihrer Auswahl kommt damit eine große Bedeutung zu. Um Platz und Kosten zu sparen werden bei Sanierungen gerne dezentrale Lüftungssysteme gewählt, die die Anforderungen an den Passivhausstandard durchaus erfüllen können. Dazu müssen in jedem belüfteten Raum Außenwanddurchbrüche ausgeführt werden, die den Schallschutz allerdings gravierend verschlechtern können. Insgesamt ist die Bedeutung der tiefen Frequenzen zu betonen, da sie als besonders störend empfunden werden und fast alle Bauteile einer Fassade bei tiefen Frequenzen die geringste Schalldämmung aufweisen. Um einen ausreichenden Schallschutz zu gewährleisten sind also die tiefen Frequenzen besonders zu berücksichtigen. Für Planungen wird deshalb empfohlen zunächst die gewünschten Innenraumschalldruckpegel für einen ausreichenden Schallschutz festzulegen und daraus und aus dem vorhandenen Verkehrsgeräusch die Schalldämmung der Fassade inklusive Spektrum-Anpassungswerten für Verkehrsgeräusche zu bestimmen.

Ein interaktiver Leitfaden zur energetischen und akustischen Sanierung von Altbauten ist im Internet erreichbar über:

<http://www.hft-stuttgart.de/Forschung/Kompetenzen/zafh/Projekte/Projekt9/de>

2 Abstract

The energetic refurbishment of old residential buildings offers significant energy saving potentials. Since refurbished residential buildings remain for decades in the same energetic state, for a sustainable development, the refurbishment measures applied to these buildings should have the highest possible standard. Considering these facts, an ambitious standard of energy saving buildings is reasonable. For this work this means a heating energy consumption of the refurbished buildings of less than 15 kWh/m²a – which is the so called passive house standard. Therefore, the first part of the work will give an overview of different typical residential buildings, especially multi storey houses, in Germany and which insulation measures are necessary and possible to fulfill the requirements for passive house standard. Also the limits of insulation measures are discussed.

However, a considerable large number of old residential buildings are located in the centre of the cities with the exterior walls exposed to high traffic noise levels. Therefore, it seems necessary that simultaneously with the energetic refurbishment the sound insulation is improved. In reality, while planning the energetic refurbishment of buildings, the sound insulation is totally disregarded. As a consequence one of the main aims of this research project is the analysis of optimization potentials for the noise protection of refurbished buildings with insulation measures according to the passive house standard. This includes all materials and constructions involved in the noise transmission process like walls, windows, roller shutter casings and ventilation systems. It is well known that if thermal insulation materials are attached to the solid walls, resulting resonance effects of the insulation system can reduce the noise insulation of the walls significantly especially in the low frequency range. Windows and ventilation systems are further weak points considering the noise protection of exterior walls. The second part of the work will give an overview of the sound insulation of the mentioned materials and building elements and the acoustical interaction of them in composite facades.

Overall it is intended that the work can be used as a guideline for the integral planning of the refurbishment of old residential buildings including energetic refurbishment and the improvement of sound insulation.

3 Motivation und Rationale

Die Europäische Union will in Belangen des Klimaschutzes eine Vorreiterrolle übernehmen und ihre Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2020 um mindestens 20 % gegenüber dem Vergleichsjahr 1990 senken. Darüber hinaus erklärten sich die Mitgliedstaaten im Frühjahr 2007 bereit, für diesen Zeitraum eine Verminderung um 30 % zu vereinbaren, sofern andere Industrieländer sich zu vergleichbaren Zielen verpflichten und auch Schwellenländer einen angemessenen Beitrag leisten. (DIW Wochenbericht 18/2007, S.304). Nach einem Beschluss des Deutschen Bundestags soll der Ausstoß von Treibhausgasen in Deutschland bis zum Jahr 2020 um 40 % und entsprechend der Zielformulierung der Industriestaaten bis 2050 um mindestens 80 % gegenüber dem Vergleichsjahr 1990 verringert werden. Auf den Gebäudebereich entfallen rund 40 % des bundesdeutschen Endenergieverbrauchs und etwa ein Drittel der CO₂-Emissionen. Gleichzeitig sind die Potentiale zur Energie- und CO₂-Einsparung gewaltig. Drei Viertel des Altbaubestandes wurde noch vor der 1. Wärmeschutzver-

ordnung 1979 errichtet. Diese Gebäude sind oft gar nicht oder kaum energetisch saniert. Die überwiegende Mehrheit der Heizungssysteme entspricht nicht dem Stand der Technik. Die Szenarien belegen, dass die energetische Sanierung des Gebäudebestands einer der zentralen Schlüssel zur Modernisierung der Energieversorgung und zum Erreichen der Klimaschutzziele ist. Im September 2010 formulierte die Bundesregierung als zentrales Ziel, den Wärmebedarf des Gebäudebestandes zu senken, um bis 2050 nahezu einen klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen. Dafür ist die Verdoppelung der energetischen Sanierungsrate von jährlich etwa 1 % auf 2 % erforderlich. Da sanierte Gebäude in der Regel für Jahrzehnte im gleichen energetischen Sanierungszustand verbleiben, ist es im Hinblick auf diese Ziele von großer Bedeutung, dass die Gebäude bereits heute mit einem möglichst hohen Dämmstandard saniert werden, der idealer Weise dem Passivhausstandard entsprechen sollte. Die Anzahl der Wohnungen mit Bedarf an Instandsetzung und Modernisierung liegt in Deutschland bei ca. 37 Millionen. Weiterhin gibt es ca. 800.000 denkmalgeschützte Gebäude, die sanierungsbedürftig sind, deren Außenwände oftmals nur mit Innendämmungen wärmetechnisch zu verbessern sind. Um hier zumindest annähernd den Passivhausstandard zu erreichen, kommen als Dämmstoffe praktisch nur Vakuumdämmpaneele in Betracht, die schon bei geringer Dicke einen sehr hohen Wärmeschutz aufweisen.

Bei der Planung und Ausführung energetischer Sanierungen von Altbauten werden die akustischen Belange gar nicht oder nur unzureichend berücksichtigt. Aus der Baupraxis sind zahlreiche Fälle bekannt, in denen zum Beispiel nachträglich angebrachte Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) oder Innendämmungen eine massive Verschlechterung der schalltechnischen Qualität eines Gebäudes zur Folge hatten, insbesondere dann, wenn tieffrequenter Verkehrslärm die maßgebliche Lärmquelle darstellt. Die Annahme, eine energetische Sanierung eines Gebäudes bedeute gleichzeitig und automatisch auch eine Verbesserung des Schallschutzes gegen Außenlärm, ist falsch. Bei einer ganzheitlichen Sanierung von Gebäuden wird von Bauherren und Nutzer_innen allerdings erwartet, dass neben der Energieeinsparung auch eine Verbesserung des Wohnkomforts erreicht wird. Dies beinhaltet den thermischen Komfort, den akustischen Komfort und den Schutz vor Schadstoffen. In der Baupraxis steht die Energieeinsparung als gesamtgesellschaftliche Aufgabe an erster Stelle, Schallschutz und ökologische Baustoffe werden nachrangig bis gar nicht betrachtet. Das Forschungsvorhaben will Wege und Möglichkeiten aufzeigen, wie bei einer energetischen Sanierung auch gleichzeitig der Schallschutz gegen Außen, insbesondere gegen Verkehrslärm beachtet und auch verbessert werden kann.

4 Aufgabenstellung

Wesentliches Ziel des gesamten Vorhabens ist die Erstellung eines Leitfadens zur energetischen und akustischen Sanierung von Altbauten, der von Planenden (Architekt_innen, Ingenieur_innen) genutzt werden kann (siehe auch <http://www.hft-stuttgart.de/Forschung/Kompetenzen/zafh/Projekte/Projekt9/de>). Dieser soll alle derzeit relevanten Bauteilvarianten für Fassadensysteme, Fenster, Rollladenkästen und Lüftungsöffnungen enthalten und eine Prognose und Bewertung der Schallübertragung bei unterschiedlichen Außenlärm-Spektren durch ein vereinfachtes Bewertungsverfahren ermöglichen. Im Zuge des Projektes wurde anstatt eines Leitfadens eine interaktive Webseite gleichen Inhaltes als Zielvorstellung formuliert. Diese soll eine breitere Nutzung der Ergebnisse und eine komfortablere

Bewertung ermöglichen. Ziel des Projektes ist es weiterhin, Optimierungspotentiale für das schalltechnische Verhalten von Wohngebäuden im Zuge einer energetischen Sanierung hin zum Passivhausstandard zu untersuchen und für die Planung und Ausführung durch die Bauwirtschaft zu erschließen. Dabei werden alle thermisch und akustisch wirksamen Komponenten von Fassaden betrachtet.

5 Wissenschaftlicher und technischer Stand

5.1 Wärmeschutz und Energieeinsparung

Die Umsetzung des Passivhausstandards in Bestandsgebäuden stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar. Wesentliche Probleme ergeben sich hier insbesondere durch vorhandene Wärmebrücken, erforderliche Innendämmungen, große Dämmstoffdicken, bei der Lösung von komplexen Anschlussdetails und bei der nachträglichen Integration von Lüftungssystemen mit effizienter Wärmerückgewinnung. Erste Erfahrungen bei der Umsetzung des Passivhausstandards in Bestandsgebäuden wurden bereits in Forschungsvorhaben im Rahmen des EnSan Programms des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie bzw. Wirtschaft und Arbeit gesammelt [1]. Um den heutigen Wärmeschutzstandard für Passivhäuser mit herkömmlichen Dämmstoffen zu realisieren, sind sehr hohe Dämmstoffdicken von 20 bis 30 cm notwendig. Insbesondere in Altbauten und in denkmalgeschützten Gebäuden, die häufig nur auf der Raumseite wärmegeklämt werden können, sind solche Dämmstoffdicken auf Grund des hohen Platzbedarfs praktisch nicht unterzubringen. Außerdem wird die aus ästhetischen Gründen von Seiten der Architekten gewünschte schlanke Bauweise kaum noch möglich. Hier bietet sich der Einsatz von hocheffizienten Vakuumisulationspaneelen (VIP) an, welche bei gleicher Dicke eine um den Faktor 5 bis 8 niedrigere Wärmeleitfähigkeit ($VIP = 0,005 \text{ W/(mK)}$) gegenüber herkömmlichen Dämmstoffen aufweisen [2] und daher deutlich geringere Dämmstoffdicken ermöglichen. Allerdings ist es für die Ermittlung des tatsächlich erreichten Wärmeschutzes von VIP-Systemen auf Grund der geringen Dämmstoffdicken erforderlich die Wärmebrücken in der Fläche (Rastersystem) und die Wärmebrücken durch Anschlussdetails bei der Ermittlung der resultierenden Wärmedurchgangskoeffizienten detailliert zu untersuchen und zu berücksichtigen. In den letzten Jahren wurde intensiv an Vakuumisulationspaneelen geforscht ([3]; [4]) und zahlreiche Demonstrationsobjekte umgesetzt. Standardisierte Lösungen, vor allem bei der Wanddämmung im Sanierungsfall, sind bisher kaum vorhanden oder konnten sich am Markt nicht behaupten.

5.2 Akustik und Schallschutz

Aus der Baupraxis sind zahlreiche Fälle bekannt, in denen vor allem nachträglich angebrachte Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) eine massive Verschlechterung der schalltechnischen Qualität eines Gebäudes zur Folge hatten [5], insbesondere dann, wenn tieffrequenter Verkehrslärm die maßgebliche Lärmquelle darstellt. Hierfür gibt es mehrere Ursachen. Zum einen sind die schalltechnischen Eigenschaften einer Fassade mit WDVS aufgrund fehlender Planungsgrundlagen nicht immer berechenbar, zum anderen ist die derzeitige Beurteilung gemäß den Anforderungen nach DIN 4109 – Schallschutz im Hochbau [6] in vielen Fällen nicht geeignet, um schalltechnische Probleme zu ver-

meiden. In [7] wurde ein einfaches, auf empirischen Untersuchungen basierendes Berechnungsverfahren abgeleitet, das eine Prognose des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w sowie von $R_w + C_{tr,100-5000}$ für WDVS aus Polystyrol und Mineralfaser ermöglicht. Die wichtigste Ausgangsgröße ist hierbei die Resonanzfrequenz des WDVS, die sich aus der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht und der Flächenmasse des Außenputzes ergibt. Aufgrund fehlender Daten ist das Modell derzeit auf den Frequenzbereich oberhalb 100 Hz beschränkt und nur für konventionelle WDVS anwendbar. Für innovative Dämmsysteme zum Beispiel mit Vakuum-Isolationspaneelen (VIP) oder Mineralschaumplatten besteht Handlungsbedarf bezüglich der schalltechnischen Charakterisierung, die bislang nur im Rahmen von Pilotstudien erfolgt ist.

Zum Verständnis des akustischen Verhaltens von WDVS wird ein einfaches, physikalisches Modell benutzt [7]. Das WDVS an der Trägerwand wird als Masse-Feder-Masse System betrachtet, mit der Dämmschicht als Feder und der Putzschicht und der Trägerwand als Massen. Entscheidend für das Verhalten des Systems ist, wie oben erwähnt, die Resonanzfrequenz f_R . Das Verhalten einer Wand mit WDVS kann in vier Abschnitte unterteilt werden:

- Unterhalb der Resonanzfrequenz $f < f_R$ verhalten sich WDVS mit Putzschicht und Trägerwand wie eine träge Masse. Das WDVS mit Putzschicht wirkt als Beschwerung der Wand.
- Im Bereich der Resonanzfrequenz $f = f_R$ schwingen Putzschicht und Wand gegenphasig mit hoher Amplitude, so dass in diesem Bereich eine Verschlechterung der Schalldämmung im Vergleich zur Trägerwand ohne WDVS eintritt.
- Oberhalb der Resonanzfrequenz $f > f_R$ tritt eine deutliche Verbesserung der Schalldämmung auf. Putzschicht und Wand werden voneinander entkoppelt.
- Bei hohen Frequenzen $f > f_E$ wird die Verbesserung geringer, da sich möglicherweise innerhalb der Dämmschicht Dickenschwingungen ausbreiten. Dieser Effekt soll bei einer sogenannten Eckfrequenz f_E (oder Knickfrequenz [8]) einsetzen, ist aber bisher nicht komplett verstanden und vermutlich je nach eingesetztem Material und Konstruktion zu differenzieren.

Die Anforderungen nach DIN 4109 werden derzeit nur an das bewertete Schalldämm-Maß R_w (Einzahlwert) gestellt, bei dessen Ermittlung nach [9] nur der Frequenzbereich von 100 – 3150 Hz berücksichtigt wird. Der Frequenzbereich unter 100 Hz wird nicht berücksichtigt, ist aber im betrachteten Fall häufig maßgeblich für die Schallübertragung und die subjektive Wahrnehmung durch die Bewohner_innen. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass vor allem Straßenverkehrslärm bei tiefen Frequenzen weitaus stärkere Geräuschanteile enthält als bei hohen. Zum anderen ist die Schalldämmung von Bauteilen generell tieffrequent gering und nimmt zu hohen Frequenzen hin zu. Physikalisch gesehen durchlaufen in Wohnräume übertragene Verkehrsgeräusche auf ihrem Weg mehrere Tiefpassfilter. Das WDVS stellt einen davon dar. WDVS werden in Anbetracht der Anforderungen bewusst so dimensioniert, dass die Resonanzfrequenz des aus Vorsatzschale und Putzschicht gebildeten Resonanzsystems möglichst deutlich unter 100 Hz liegt, also außerhalb des Frequenzbereichs zur Ermittlung des Einzahlwertes. Im Bereich der Resonanzfrequenz ergibt sich in der Folge eine erhebliche Verschlechterung der Schalldämmung gegenüber der Wand ohne WDVS (Resonanzeinbruch in der

Schalldämm-Kurve), insgesamt jedoch ein höheres bewertetes Schalldämm-Maß R_w (siehe auch Beispiele in [10]). Um dieser Problematik Rechnung zu tragen und den subjektiven Eindruck stärker zu berücksichtigen, können seit etwa 10 Jahren die Spektrum-Anpassungswerte bei der Ermittlung der Einzahlangabe berücksichtigt werden. Durch Addition der Spektrum-Anpassungswerte zum bewerteten Schalldämm-Maß R_w ergibt sich eine Einzahlangabe, die eine realistischere Einschätzung der Schalldämmung ermöglicht [11]. Bei üblichem Verkehrslärm (PKW, LKW, Stadtbahn, Zug) kann dabei der Frequenzbereich zu tiefen Frequenzen hin erweitert werden und die Spektrum-Anpassungswerte $C_{tr,50-5000}$ oder $C_{tr,50-3150}$ können angewendet werden. Die verbindliche Anwendung von Spektrum-Anpassungswerten ist in der Schweiz und in Österreich inzwischen in der aktuellen Normung berücksichtigt. In [10] wird tieffrequenter Lärm in Wohnräumen bezüglich der Wirkungen und Konsequenzen genauer betrachtet und die Notwendigkeit von Gegenmaßnahmen ausdrücklich betont.

Der Schallschutz von Fenstern und Verglasungen betrifft bei Sanierungen auf Passivhausstandard Dreifachverglasungen, Vakuumglas und Zweifachverglasungen mit Folien. Detaillierte Untersuchungen zum Schallschutz liegen lediglich zu Dreifachverglasungen vor [12]. Hierbei sind die Schallschutzeigenschaften vergleichbar mit Zweifachverglasungen, die Doppelscheibenresonanz der beiden äußeren Scheiben verschiebt sich allerdings zu tiefen Frequenzen durch die insgesamt größere Dicke der Gesamtkonstruktion. Zu den Schalldämmeigenschaften von Rollladenkästen und Lüftungsöffnungen liegen kaum aktuelle, detaillierte Veröffentlichungen vor. Grundlagen zu akustischen und strömungstechnischen Eigenschaften von Außenluftdurchlässen werden in [13] dargestellt. Es wird gezeigt, dass durch die allseitige Auskleidung von Lüftungsöffnungen mit absorbierendem Material die Schalldämmung deutlich verbessert werden kann. Diese Betrachtungen werden durch [14] ergänzt, indem durch den Einbezug der klassischen Formel nach Piening eine Berechnungsmöglichkeit für die Einfügungsdämmung von Überströmelementen zur Verfügung gestellt wird. Ergänzend werden in [15] tabellierte Vorschläge für die notwendige, bewertete Norm-Schallpegeldifferenz von Lüftungsöffnungen gemacht, jeweils in Abhängigkeit vom Außenlärmpegel. Somit stehen praktische Planungshilfen und Berechnungsmöglichkeiten zur Dimensionierung von Lüftungseinrichtungen hinsichtlich der Schalldämmung zur Verfügung. Zur Schalldämmung von Rollladenkästen wurden erste Arbeiten 1969 durchgeführt [16] und 1977 ergänzt [17,18]. Als Planungshilfe wurde vorgeschlagen von der bewerteten Norm-Schallpegeldifferenz 8 dB abzuziehen, um einen direkten Vergleich mit den Schalldämm-Maßen von Fenstern zu ermöglichen und die Schalldämmung der Fenster durch entsprechende Dimensionierung der Rollladenkästen nicht zu verschlechtern. Ferner wurde der Einfluss des herabgelassenen Rollladens auf die Schalldämmung der Fenster untersucht. In [15] werden gemessene Werte von Rollladenkästen tabelliert aufgeführt und nach Abzug von 7 dB mit Schalldämmungen von Fenstern verglichen. Die aufgeführten Veröffentlichungen zeigen, dass üblicherweise, bei richtiger und dichter Montage die Schalldämmung von Rollladenkästen die Fensterdämmung nicht verschlechtert. Eine neuere Arbeit aus Spanien [19] zeigt zusätzlich den Einfluss unterschiedlicher Dämmmaterialien im Kasten. Dieser ist jedoch gering.

6 Planung und Ablauf

6.1 Wärmeschutz

Da die notwendigen wärmetechnischen Maßnahmen sehr stark von der gegebenen Bausubstanz und Kubatur der Bestandsgebäude abhängen, erfolgt zunächst eine Einteilung nach Gebäudetypologie und Bauzeit. Die Klassifizierung der Gebäude erfolgt dabei anhand der vom Institut Wohnen und Umwelt (IWU) festgelegten Baualtersklassen. Auf Grund der großen Vielzahl unterschiedlicher Gebäudetypen werden die Untersuchungen auf Mehrfamiliengebäude begrenzt, da diese für die betrachtete Verkehrslärmproblematik die relevantesten Gebäude darstellen. Für ausgewählte typische Referenzgebäude der betrachteten Gebäudetypen und Baualtersklassen werden dann die notwendigen Wärmedämmmaßnahmen und Bauteilqualitäten ermittelt. Aus den resultierenden Anforderungen werden die notwendigen Konstruktionsaufbauten insbesondere der Außenwände für unterschiedliche am Markt verfügbare Dämmmaterialien und Systeme als Basis für die schalltechnischen Untersuchungen festgelegt. Abschließend werden die wärmetechnischen Anforderungen an die einzelnen Bauteile nochmals getrennt betrachtet und diskutiert. Insbesondere die für Passivhauskonstruktionen bedeutenden Wärmebrückendetails sollen aufgezeigt werden und durch Konstruktionsvarianten Lösungen vorgestellt werden.

6.2 Akustik und Schallschutz

Zunächst erfolgt anhand von beispielhaften Aufnahmen in Wohngebieten in und um Stuttgart (Zug, Bus, Stadtbahn, PKW, LKW) eine Bestandsaufnahme von typischen Verkehrsgeräuschen. Geklärt werden soll unter anderem, in welchen Frequenzbereichen diese Geräusche ihre Maxima aufweisen um baukonstruktive Gegenmaßnahmen zu ermöglichen und ob die gemessenen Geräusche durch die Nutzung der Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} tatsächlich erfasst werden. Ausgehend von diesen Geräuschen werden für unterschiedliche Außenwandkonstruktionen die spezifische Lautheit und die Perzentillautheit N_5 in einem Referenzraum bestimmt. Das Verfahren hierzu wird vorgestellt und überprüft. Die Ergebnisse werden später den Schalldämmwerten einschließlich unterschiedlicher Spektrum-Anpassungswerte gegenübergestellt, um damit eine oder mehrere geeignete Kenngrößen zur Beschreibung der Schalldämmung bei unterschiedlichen Außengeräuschen zu bestimmen. Diese Größe/n sollen das subjektive Empfinden weitestgehend berücksichtigen.

Es folgen die Bauteiluntersuchungen. Hier soll zunächst durch Prüfstandsuntersuchungen und Modalanalysen ein grundlegendes Verständnis des akustischen Übertragungssystems bestehend aus Trägerwand und Wärmedämmsystemen erfolgen. Einen wichtigen Beitrag zum Verständnis des Systems wird die Analyse des Schwingungs- und Abstrahlverhaltens anhand der experimentellen Modalanalyse sein. Anhand dieses Messverfahrens sollen unter anderem die Eigenschwingungen der Elemente visualisiert, die Resonanzfrequenzen bestimmt und somit auf den Einfluss der beteiligten Komponenten geschlossen werden. Aufgrund bisheriger Erfahrungen ist zu erwarten, dass diese Untersuchungen aussagekräftig und ausreichend für die Charakterisierung sind. Für eine Validierung der Aussagen werden begleitend Untersuchungen an einem gesamten Wandaufbau im Wandprüfstand erfolgen.

Als nächsten Schritt werden vorhandene schalltechnische Daten von hochwärmedämmenden Außenwänden und Verglasungen, Rollladenkästen und Lüftungseinrichtungen von unterschiedlichen Prüfinstituten und Herstellern gesammelt, systematisiert und verfügbar gemacht. Zusätzlich sollen im Rahmen des Forschungsprojektes die Schalldämmungen der zur Einhaltung des Passivhausstandards erforderlichen opaken Außenwandkonstruktionen und eventuell weiterer Verglasungen bzw. Fensterkonstruktionen und auch Rollladenkästen und Lüftungsgeräten in den Prüfeinrichtungen der HFT Stuttgart messtechnisch ermittelt werden. Für die akustischen Untersuchungen werden ausschließlich Bauteile verwendet, die Außengeräusche direkt in Wohnräume übertragen können, bei Lüftungseinrichtungen also Außenluftdurchlässe oder Einzelraumlüftungsanlagen. In Bezug auf die Lüftungsöffnungen und Lüftungsanlagen ist es das Ziel, einen Überblick über verfügbare Gerätetypen für den Einsatz passivhaustauglicher Lüftungstechnik unter akustischen Gesichtspunkten zu schaffen. Gefragt wird letztlich, welchen Einfluss haben einzelne Lüftungselemente auf die Gesamtschalldämmung einer Fassade und welche Anforderungen sind an ihre schalltechnischen Eigenschaften unter Berücksichtigung der Einbausituationen zu stellen.

Die so gesammelten und ermittelten, frequenzabhängigen Daten (Verkehrsgerausche, Schalldämmmaße der unterschiedlichen Bauteile) bilden die Basis für die Berechnungen der zu erwartenden Innenraumpegel. Die Berechnungen erfolgen mit den Algorithmen der Berechnungsverfahren der DIN EN ISO 12354-3. Neben den üblichen Pegelgrößen soll bei den Berechnungen auch die psychoakustische Kenngröße Lautheit mit berücksichtigt werden. Es soll überprüft werden, inwieweit durch eine Berücksichtigung der Spektrums-Anpassungswerte bei Berechnungen mit Einzahlangaben eine bessere Übereinstimmung zwischen Rechenwerten und subjektivem Schallschutz erreicht werden kann. Die Nutzung des Raumes wird bei der Festlegung der Anforderungen berücksichtigt.

Natürlich soll im Rahmen der Untersuchungen ein möglichst effektiver Schallschutz für Passivhausgebäude erreicht werden. Dabei ist die Schalldämmung von Wand und Fenster und evtl. vorhandenen Rollladenkästen und Lüftungsöffnungen so aufeinander abzustimmen, dass bei einem vorhandenen, bekannten Verkehrsgerausche ein möglichst guter und ökonomischer Schallschutz erreicht wird.

Als ergänzende Untersuchung ist vorgesehen im Wandprüfstand einen Versuchsaufbau einer zusammengesetzten Fassade mit Wand mit WDVS und Fenster zu realisieren und die Gesamtschalldämmung bei unterschiedlicher Positionierung des Fensters in der Dämmebene zu bestimmen. Falls möglich sollen Messungen an real sanierten Gebäuden die akustischen Prüfungen abrunden und die im Labor durchgeführten Messungen ergänzen.

Abschließend erfolgt das Zusammentragen der Ergebnisse und deren Verarbeitung und Veröffentlichung in Abschlussbericht und Leitfaden beziehungsweise einer über das Internet zugänglichen Webseite.

7 Ergebnisse

7.1 Wärmeschutz und Energieeinsparung

7.1.1 Überblick

Die Zielsetzung des Bereichs Wärmeschutz und Energieeinsparung ist die Ermittlung der Konstruktionen und Dämmmaßnahmen, mit denen im Rahmen einer wärmetechnischen Sanierung von Bestandsgebäuden der Passivhausstandard erreicht werden kann. Die hieraus resultierenden Bauteilkonstruktionen bilden auch die Grundlage für die schalltechnischen Untersuchungen zur Schallschutzqualität der Konstruktionen. Das Vorgehen wurde bereits im Kapitel Planung und Ablauf dargestellt und kurz erläutert.

7.1.2 Festlegung der zu betrachtenden Gebäudetypen

Nach Erhebungen des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) lässt sich der Baustandard in neun Baualtersklassen kategorisieren, die sich fünf unterschiedlichen Bauzeiten zuordnen lassen (Abbildung W1).

| | | Baualtersklasse | EFH | RH | MFH | GMH | HH |
|----------------|---|----------------------|-------|------|-------|-------|------|
| Vorkriegszeit | A | vor 1918 Fachwerk | EFH_A | | MFH_A | | |
| | B | vor 1918 | EFH_B | RH_B | MFH_B | GMH_B | |
| Kriegszeit | C | 1919-1948 | EFH_C | RH_C | MFH_C | GMH_C | |
| Nachkriegszeit | D | 1949-1957 | EFH_D | RH_D | MFH_D | GMH_D | |
| | E | 1958-1968 | EFH_E | RH_E | MFH_E | GMH_E | HH_E |
| 70-er Jahre | F | 1969-1978 | EFH_F | RH_F | MFH_F | GMH_F | HH_F |
| | G | 1979-1983 | EFH_G | RH_G | MFH_G | | |
| Ab 1984 | H | 1984-1994 | EFH_H | RH_H | MFH_H | | |
| | I | 1995-2001 | EFH_I | RH_I | MFH_I | | |

Abbildung W1: Gebäudetypologie Deutschland [20] / Heizwärmebedarf des Gebäudebestands [21]

Weitere Untersuchungen (Abbildung W2) zeigen, dass die meisten Wohnungen (ca. 48% der gesamten Wohnungen Deutschlands) in der Nachkriegszeit von 1949 bis 1968 errichtet wurden. Gerade diese Gebäude weisen auf Grund des schlechten Wärmeschutzstandards den höchsten Heizwärmebedarf pro Nutzfläche von über 250 kWh/(m²a) auf und bieten somit insgesamt das höchste Energieeinsparpotential im Gebäudebestand. Die Gebäude aus der Kriegszeit (1919-1949) sind in ihren geometrischen Eigenschaften und Konstruktionen den Wohngebäuden aus der Nachkriegszeit sehr ähnlich. Daher können diese beiden Gebäudegruppen hinsichtlich der erforderlichen Maßnahmen zur Sanierung bis zum Passivhausstandard gemeinsam betrachtet werden. Ein erheblicher Anteil der

Gebäude aus der Vorkriegszeit (bis 1918) steht unter Denkmalschutz oder kann aus gestalterischen Gründen nur unter eingeschränkten Randbedingungen saniert werden. Diese Bausubstanz stellt daher besondere Herausforderungen an eine anspruchsvolle energetische Sanierung.

In den 60-er und 70-er Jahren sind durch neue Bauweisen (vorgefertigte Bauelemente, Betonbauten) und Wohnideologien neue Gebäudetypen mit eigenen gestalterischen Merkmalen entstanden, die zwar oftmals eine kompakte Bauform aber gleichzeitig auch einen schlechten Wärmedämmstandard aufweisen.

Insgesamt wurden rd. 90% der gesamten Bausubstanz in Deutschland vor der ersten Wärmeschutzverordnung errichtet. Der Heizwärmebedarf dieser Gebäude liegt durchgehend bei deutlich über 150 kWh/(m²a) und in den meisten Fällen sogar über 250 kWh/m²a.

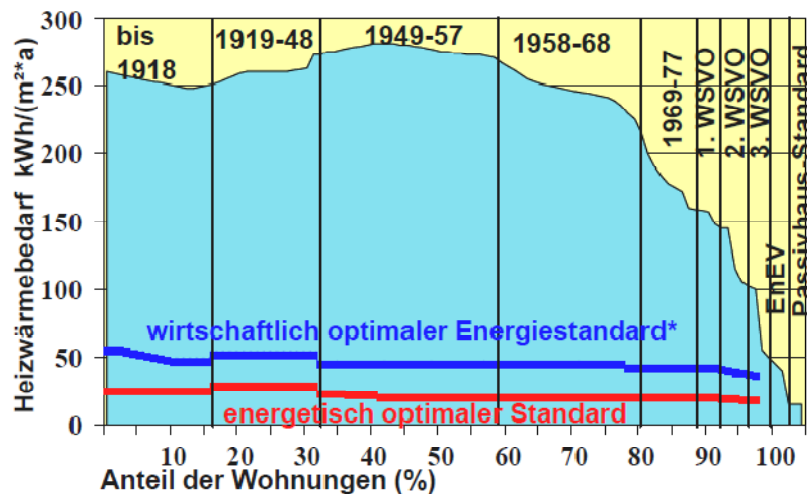


Abbildung W2: Heizwärmebedarf des Gebäudebestands [21]

Die Anforderung an den Heizwärmebedarf liegt beim Passivhausstandard bei 15 kWh/(m²a). Bei Umsetzung dieses Standards kann der Heizwärmebedarf von Bestandsgebäude somit theoretisch um einen Faktor von bis zu 16 reduziert werden. Dieser Faktor wird als Energieersparungen jedoch oft nicht erreicht, da die real gemessenen Verbrauchswerte insbesondere von Bestandsgebäuden mit geringem Dämmstandard häufig deutlich unter den berechneten Bedarfswerten liegen. Dies liegt zum Teil an der unzureichenden Berücksichtigung der realen Auswirkung von Nachtabenkungen und räumlicher Teilbeheizung bei unterschiedlichen Dämmstandards [22]. Doch selbst wenn diese Einflüsse durch Korrekturfaktoren berücksichtigt werden, sind die berechneten Heizwärmebedarfe für unsanierte Altbauten meist noch deutlich höher als die real gemessenen Verbrauchswerte [20]. Die Ursache hierfür kann in gewissem Umfang der fehlenden Berücksichtigung der Dämmeigenschaften von Einrichtungsgegenständen (Schränke, Regale etc.), Boden- und Wandverkleidungen, sowie einer Überbewertung von Wärmebrücken durch den Ansatz von Außenmaßen zugeordnet werden. Ein wesentlicher Grund für den geringeren Verbrauch im Vergleich zum berechneten Bedarf kann jedoch dem Nutzerverhalten zugeordnet werden, da sich Bewohner von unsanierten Altbauten auf Grund der hohen Nebenkosten häufig sparsamer verhalten als Bewohner von Gebäuden mit hohem Dämmstandard [20]. Eine detaillierte Untersuchung zur exakten Quantifizierung der genannten Effekte steht al-

lerdings noch aus. Diese Effekte bleiben hier daher unberücksichtigt. In den folgenden Abschnitten werden die Hauptmerkmale der einzelnen Baualtersklassen zusammengestellt.

Gebäude aus der Vorkriegszeit (zwischen 1890 und 1918)

In den innerstädtischen Bereichen wurden in der Zeit der Jahrhundertwende (zwischen 1890 und 1918) eine Vielzahl von Mehrfamilienhäusern gebaut. Obwohl die Fassadengestaltung mit Ornamenten, Erkern und Stuckarbeiten bei den einzelnen Gebäuden sehr unterschiedlich sein kann, weisen die Bauteile dieselben Konstruktionsmerkmale auf. Die vier- bis sechsgeschossigen Gebäude sind in Blockbebauung gebaut. Das Dachgeschoss ist oft ausgebaut und mit Gaubenfenstern gestaltet. Im Untergeschoss sind in der Regel die Kellerräume (oft Gewölbekeller) vorhanden. Im Erdgeschoss waren ursprünglich Handelsflächen untergebracht, die im Laufe der Zeit oft in Wohnungen umgebaut wurden. Im Erdgeschoss ist die Geschosshöhe dementsprechend größer, als in den oberen Etagen.

Die Straßenfront ist typischerweise reich verziert, die Hofseite dagegen sehr einfach gestaltet. Eine Dämmung der Außenwand von der Außenseite ist daher oft nur an der Hoffassade möglich. Die Straßenfront kann meist nur innenseitig gedämmt werden. Die Verwendung von Innendämmungen ist mit vielen bauphysikalischen Problemen verbunden und die Dämmstoffdicken sind auf Grund des Platzbedarfs der Dämmung sehr beschränkt. Eines der größten Probleme bei einer energetischen Sanierung dieser Gebäude mit innenseitiger Dämmung stellen aus bauphysikalischer Sicht die Bereiche der Holzbalkendeckeneinbindung in die Außenwände dar. Die Holzbalkenköpfe sind in den Außenwänden eingemauert und liegen damit außerhalb der Dämmebene, d. h. im kalten Bereich. Die vom Innenraum in die Balken eindringende Feuchtigkeit (Luftfeuchte) erreicht daher ihren Taupunkt im Inneren der Balken. Dies kann zum Faulen des Holzes und zur starken Beschädigung der Balken führen. Ein vorsorglicher Umgang mit diesem Thema bei einer Sanierung ist daher unabdingbar.

Neben der Wärmedämmung der Außenwände ist auch der Austausch der Fensterkonstruktionen mit großen Schwierigkeiten verbunden. Aus denkmalschutztechnischen Gründen muss das äußere Erscheinungsbild der Fenster erhalten bleiben. Mit Sprossen und schlanken Rahmen ist es nach heutigem Stand der Technik fast unmöglich, die hohen wärmetechnischen Anforderungen an Passivhausfenster zu erfüllen. Die typische Kastenfensterkonstruktion soll oft ebenfalls erhalten bleiben.



Abbildung W3: Typische Mehrfamilienhäuser aus der Vorkriegszeit im innerstädtischen Bereich
[Quelle: Internet]

Auf Grund der Wärmebrückenproblematik und des mangelnden Platzangebots für die Wärmedämmung in den Innenräumen ist der Passivhausstandard für diese Gebäude daher oft nur sehr schwer oder nicht zu erreichen. Die untenstehende Tabelle W1 fasst die wichtigsten Merkmale und die typischen Baukonstruktionen der Altbauten aus der Zeit der Jahrhundertwende zusammen.

Tabelle W1: Typische Merkmale und Konstruktionen von Gebäuden mit Bauzeit 1890-1918

| Typische Gebäudemerkmale | | |
|-----------------------------------|---|-------------------------------|
| Geschosszahl: | 4 bis 6 sowie ein Untergeschoss | |
| Geschosshöhe: | 2,7 bis 4,0 m | |
| Gebäudebreite: | In der Regel 11-13 m | |
| Anordnung der Gebäude: | Blockbebauung mit geschlossenem Hinterhof | |
| Dachgestaltung: | Steildach, oft ausgebaut | |
| Fasadengestaltung: | Einfache Gebäudekubatur mit wenigen Balkonen und Erkern | |
| Typische Baukonstruktionen | | |
| Bauteil | Beschreibung | U-Wert (W/(m ² K)) |
| Außenwand | 51 cm oder 38 cm oder 21 cm Vollziegelmauerwerk (Wandstärke geschossabhängig) beidseitig verputzt, Straßenfront mit Ornamentik und Stuckarbeiten; Sockelgeschoss teilweise mit Sandsteinplatten verkleidet | 1,2 bis 2,0 |
| Kellerdecke | Kappendecke aus Beton oder Vollziegel, mit Sandschüttung, oberseitig Dielung auf Lagerhölzern | 1,0 |
| Oberste Geschoßdecke | Holzbalkendecke mit Einschub und Füllung aus Sand oder Schlacke, Dielung von oben und von unten verputzt auf Draht- oder Rohrrabitzträger. | 0,8 - 1,2 |
| Dachschräge | Satteldach ohne Dämmung, Sparschalung mit Putz auf Rohrrabitzträger. | 2,2 |
| Fenster (Oft mit Rollladenkasten) | Kastenfenster mit Einfachverglasung | 2,8 |
| | <u>Im sanierten Zustand:</u> Kastenfenster mit Isolierverglasung | 2,0-1,4 |

Gebäude aus der Nachkriegszeit (zwischen 1949 und 1968)

Ein erheblicher Anteil, rd. 48% der gesamten Wohnungen Deutschlands, stammt aus diesem Zeitraum. Da in der Nachkriegszeit auf Grund der großen Wohnungsnot der schnellen Errichtung einer Großzahl von Wohnungen ein deutlicher Vorrang gegenüber Diversität und individueller architektonischer Gestaltung eingeräumt wurde, lässt sich die Gebäudesubstanz der Nachkriegszeit relativ leicht typisieren. Dies betrifft nicht nur das äußere Erscheinungsbild, sondern insbesondere auch die Konstruktionen und verwendeten Materialien.

A) Mehrfamilienhäuser der Nachkriegszeit (zwischen 1949 und 1968)



Abbildung W4: Typische Mehrfamilienhäuser aus den 50-er und 60-er Jahren [eigene Bilder]

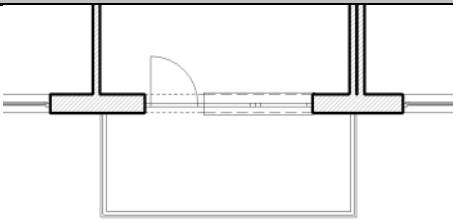
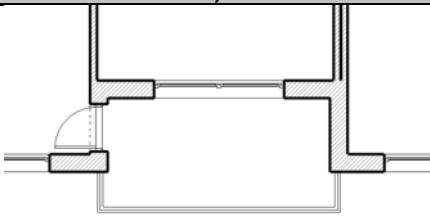
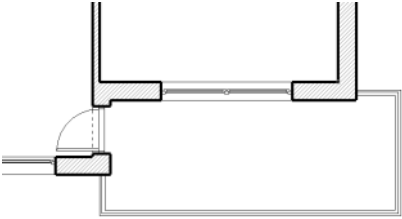
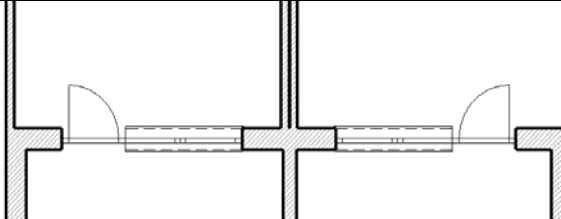
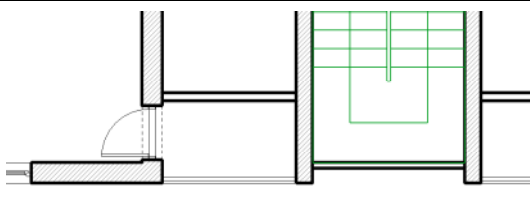
Die typischen Mehrfamilienhäuser aus den 50-er und 60-er Jahren wurden meistens in Wohnsiedlungen in Zeilenbebauung errichtet. Ein Gebäude besteht normalerweise aus mehreren Treppenhäusern wobei den einzelnen Treppenhäusern meist zwei, selten drei Wohnungen pro Etage zugeordnet sind. Die Anzahl der Treppenhäuser pro Gebäude bewegt sich im Normalfall zwischen zwei und sechs. Die Gebäudezeilen sind meistens identisch und parallel zu einander. Der Abstand zwischen den Gebäudezeilen liegt dabei zwischen 20 und 25 m, während die Breite der einzelnen Gebäude 11 bis 13 m beträgt. Die Gebäude aus dieser Zeitperiode verfügen über drei bis sechs Wohngeschosse, wobei Mehrfamilienhäuser mit 3 oder 4 Etagen am häufigsten vorkommen. Fast überall wurde auch ein Untergeschoss mit gemeinsamer Waschküche und mit Kellerräumen errichtet. Die nachstehende Abbildung zeigt eine typische Anordnung der Gebäudezeilen aus den 60-er Jahren.



Abbildung W5: Typische Anordnung der Gebäudezeilen aus den 50-er und 60-er Jahren
[Quelle: www.maps.google.de]

Der Dachraum wurde im Originalzustand eher nicht ausgebaut. Sanierungen aus den 80-er oder 90-er Jahren wurden jedoch nicht selten mit einer Aufstockung oder einem Dachausbau verbunden.

Eine der wichtigsten Merkmale dieser Gebäude sind die Balkone. Im Normalfall verfügen alle Wohnungen über einen Balkon oder eine Loggia. Die in der Fassade unterschiedlich angeordneten Balkone sind bevorzugte architektonische Gestaltungselemente dieser Zeitperiode.

| Balkontypen: | |
|---|--|
| Auskragende Balkonplatten | Mitteltief auskragende Balkonplatten (mitten in der Fassade) |
|  |  |
| Mitteltief auskragende Balkonplatten (im Eckbereich) | |
|  | |
| Loggien | |
|  |  |

Die nachstehende Tabelle fasst die wichtigsten Merkmale und die typischen Baukonstruktionen der Mehrfamilienhäuser und Geschosswohnbauten aus der Nachkriegszeit zusammen:

Tabelle W2: Typische Merkmale und Konstruktionen von Gebäuden aus der Bauzeit 1949-68

| Typische Gebäudemerkmale | |
|--------------------------|--|
| Geschosszahl: | 2 bis 6 zusätzlich Untergeschoss |
| Geschosshöhe: | 2,5 bis 2,7 m |
| Gebäudebreite: | In der Regel 11-13 m |
| Anordnung der Gebäude: | Überwiegend Zeilenbebauung |
| Dachgestaltung: | Steildach, eher nicht ausgebaut |
| Fassadengestaltung: | Einfache Gebäudekubatur mit Balkonen und Loggien |

| Typische Baukonstruktionen | | |
|-------------------------------------|--|-------------------------------|
| Bauteil | Beschreibung | U-Wert (W/(m²K)) |
| Außenwand | 24 cm oder 30 cm oder 38 cm Hohlblockmauerwerk aus Bimsbeton oder Schlackenbeton, oder Hochlochziegel, beidseitig verputzt | 0,8 bis 1,4 |
| Kellerdecke | 18 cm Stahlbetondecke oberseitig Estrich teilweise ohne Dämmung teilweise als schwimmender Estrich auf 2 cm Dämmung | 2,6 |
| | | 1,3 |
| Oberste Geschoßdecke | 15 cm Stahlbetondecke mit schwimmendem Estrich auf 2 cm Dämmung | 1,1 |
| | Holzbalkendecke mit Schlackefüllung, unterseitig verputzt auf Schilfrohrträger | 1,2 |
| Fenster (meist mit Rollladenkästen) | Holzrahmen mit Einfachverglasung | 5,2 (i.d.R. bereits erneuert) |
| | Holzrahmen mit Isolierverglasung | 2,3 |
| | <u>Im sanierten Zustand:</u> Kunststoffrahmen mit Isolierverglasung | 2,0-1,4 |

B) Mehrfamilienhäuser der 60-er Jahre im innerstädtischen Bereich (zwischen 1958 und 1968)

Wohngebäude im innerstädtischen Bereich sind am häufigsten hohem Verkehrslärm ausgesetzt und müssen diesem durch einen erhöhten Schallschutz der Außenfassade entgegen wirken. Diese Mehrfamilienhäuser sind typischerweise eng nebeneinander gebaut und verfügen über vier bis sechs Wohngeschosse. Im Erdgeschoss befinden sich oft Gewerbeflächen mit etwas größerer Geschosshöhe und im Untergeschoss sind Kellerräume untergebracht. Balkone und Loggien sind normalerweise an der Fassade zum Hof zu finden. Die Hauptfassaden zur Straße sind normalerweise geschlossen oder mit zurückgezogenen, kleinen Balkonen gestaltet.



Abbildung W6: Typische Mehrfamilienhäuser aus den 60-er Jahren im innerstädtischen Bereich [eigene Bilder]

In den innerstädtischen Bereichen sind die Gebäude meist auf Feldern zwischen den Straßen in Gebäudegruppen angeordnet. In der Mitte der Baufelder bilden sich innenliegende Höfe in verschiedener Größe aus, die durch die Nachbargebäude oft stark verschattet sind (siehe Abbildung W7). Die Straßenfassaden sind durch die gegenüber liegenden Hauszeilen oft zu großen Teilen verschattet.

Die Gebäude aus den 60-er Jahre sind im innerstädtischen Bereich entweder mit Steildach oder mit Flachdach ausgestattet. Die Dachräume der Steildächer sind normalerweise nicht ausgebaut. Im Rahmen einer Sanierung erfolgt häufig eine Aufstockung oder ein Dachausbau, wobei die neuen Etagen meistens von der Fassadenebene zurückgesetzt sind.



Abbildung W7: Typische Anordnung der Mehrfamilienhäuser im innerstädtischen Bereich, Blockbebauung mit geschlossenem Hinterhof [Quelle: www.maps.google.de]

Die nachstehende Tabelle fasst die wichtigsten Merkmale und die typischen Baukonstruktionen der Mehrfamilienhäuser in innerstädtischen Bereichen aus der Nachkriegszeit zusammen:

Tabelle W3: Typische Merkmale und Konstruktionen von Gebäuden mit Bauzeit 1948-68

| Typische Gebäudemerkmale | | |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| Geschosszahl: | 5 bis 6 zusätzlich Untergeschoss | |
| Geschosshöhe: | 2,5 bis 2,7 m | |
| Gebäudebreite: | In der Regel 11-13 m | |
| Anordnung der Gebäude: | Blockbebauung mit geschlossenem Hinterhof | |
| Dachgestaltung: | Steildach, eher nicht ausgebaut oder Flachdach | |
| Fassadengestaltung: | Einfache Gebäudekubatur mit zurückgezogenen Balkonen und Loggien | |
| Typische Baukonstruktionen | | |
| Bauteil | Beschreibung | U-Wert (W/(m ² K)) |
| Außenwand | 24 cm oder 30 cm oder 38 cm Hohlblockmauerwerk aus Bimsbeton oder Schlackenbeton, oder Hochlochziegel, beidseitig verputzt | 0,8 bis 1,4 |
| | Beton-Sandwich-Platten: 30 cm Beton, 5 cm Dämmplatten, 8 cm Beton- Wetterschale | 0,8 |
| Kellerdecke | 18 cm Stahlbetondecke mit schwimmendem Estrich auf 2 cm Dämmung | 1,3 |

| | | |
|-----------------------|--|-------------------------------|
| Oberste Geschossdecke | 15 cm Stahlbetondecke mit schwimmendem Estrich auf 2 cm Dämmung | 1,1 |
| | Holzbalkendecke mit Schlackefüllung, unterseitig verputzt auf Schilfrohrträger | 1,2 |
| Flachdach | 15 cm Stahlbetondecke mit 4 bis 6 cm Wärmedämmung aus PUR oder EPS, bituminöse Abdichtungsbahn | 0,5-0,8 |
| Fenster | Holzrahmen mit Einfachverglasung | 5,2 (i.d.R. bereits erneuert) |
| | Holzrahmen mit Isolierverglasung | 2,3 |
| | <u>Im sanierten Zustand:</u> Kunststoffrahmen mit Isolierverglasung mit Rollladenkasten | 2,0-1,4 |

C) Hochhäuser der 60-er Jahre (zwischen 1958 und 1968)

Ab Ende der 50-er Jahre wurden immer mehr Hochhäuser mit Wohnfunktion gebaut. Nach der Form dieser freistehenden Gebäude wird zwischen Punkthochhäusern mit eher quadratischer Grundfläche und Scheibenhochhäusern mit rechteckiger Grundfläche unterschieden. In Deutschland definieren die Landesbauordnungen ein Gebäude überwiegend dann als Hochhaus, wenn der Fußboden mindestens eines Aufenthaltsraumes mehr als 22 Meter über der Geländeoberfläche liegt. Dementsprechend verfügen die Hochhäuser über mehr als sieben Etagen.



Abbildung W8: Hochhäuser aus den 60-er Jahren [Quelle: Internet]

Oft sind im Erdgeschoss Handelsflächen oder gemeinsame Räume (wie Lagerraum für Fahrrad und Kinderwagen) untergebracht. Die Fassadengestaltung weist dementsprechend im Erdgeschoss einen höheren Verglasungsanteil auf. Im Untergeschoss sind die Kellerräume und Technikräume zu finden. Die Gebäude wurden fast ausschließlich mit Flachdächern ausgeführt. Zu den wesentlichen Gestaltungselementen der Fassade gehören die Balkone und Loggien. Durch den relativ großen Abstand zwischen den meist frei stehenden Gebäuden spielt die gegenseitige Verschattung von Fassaden

eine eher untergeordnete Rolle. Tabelle W4 fasst die wichtigsten Merkmale und die typischen Baukonstruktionen der Hochhäuser aus der Nachkriegszeit zusammen.

Tabelle W4: Typische Merkmale und Konstruktionen von Gebäuden mit Bauzeit 1958-68

| Typische Gebäudemerkmale | |
|--------------------------|--|
| Geschosszahl: | 7 bis 20 zusätzlich Untergeschoss |
| Geschosshöhe: | 2,5 bis 2,7 m |
| Gebäudebreite: | In der Regel 11-13 m |
| Anordnung der Gebäude: | Freistehend |
| Dachgestaltung: | Flachdach |
| Fasadengestaltung: | Einfache Gebäudekubatur mit Balkonen und Loggien |

| Typische Baukonstruktionen | | |
|-------------------------------|--|-------------------------------|
| Bauteil | Beschreibung | U-Wert (W/(m²K)) |
| Außenwand | Mantelbauweis aus Schwerbeton, Wandstärke 20,5 cm, 18 cm oder 15,5 cm | 1,5 |
| | Beton-Sandwich-Platten: 17,5 cm Beton, 4 cm Dämmplatten, 8 cm Beton- Wetterschale | 0,9 |
| | Mauerwerk aus Beton in Schalungssteinen (Durisol Bauweise) | 1,3 |
| Kellerdecke | 18 cm Stahlbetondecke mit schwimmendem Estrich auf 2 cm Dämmung | 1,3 |
| Flachdach | 15 cm Stahlbetondecke mit 4 bis 6 cm Wärmedämmung aus PUR oder EPS, bituminöse Abdichtungsbahn | 0,5-0,8 |
| Fenster (mit Rollladenkasten) | Holzrahmen mit Einfachverglasung | 5,2 (i.d.R. bereits erneuert) |
| | Holzrahmen mit Isolierverglasung | 2,3 |
| | <u>Im sanierten Zustand:</u> Kunststoffrahmen mit Isolierverglasung | 2,0-1,4 |

D) Gebäude aus den 70-er Jahren (zwischen 1968 und 1980)

Die 70-er Jahre sind geprägt durch die zunehmende Industrialisierung des Bauens. Durch die Vorfertigung von Bausystemen in Fabriken, fernab der Baustelle und der Produktion hoher Stückzahlen sollten Produktivität und Effizienz gesteigert und die Baukosten gesenkt werden. Am Rande der Städte entstehen in den 70er Jahren vermehrt Großsiedlungen in Fertigteilsbausystemen, die sog. „Plattenbauten“, die in kurzer Bauzeit errichtet wurden. Die Gestaltung dieser Bauten ist geprägt durch das Produktionsraster der Fertigteile, die strikte Einhaltung von Funktionsschemata und die weitgehende Reduktion auf den Baustoff Beton.

Die Bausysteme in Beton-Großtafelbauweise sind zunächst ungedämmt. Steigende Rohstoffkosten (erste Ölpreiskrise) führen allerdings dazu, dass erstmals zunehmend gedämmte und mehrschalige Bausysteme eingesetzt werden. Entsprechend ist die Energieeffizienz dieser Gebäude vergleichsweise gut, jedoch aus heutiger Sicht nicht ausreichend. Der schlechte Ruf, der diesen Gebäuden noch immer anhaftet, gründet sich auf ihrem äußeren Erscheinungsbild, der Uniformität und Massivität, der nahezu fehlenden Gestaltung und den zahlreichen Verarbeitungsfehlern.



Abbildung W9: Plattenbauten aus den 70-er Jahren [eigene Bilder und Bilder aus dem Internet]

Die industriell vorgefertigte Bauweise führt zu einer Vereinheitlichung der Konstruktionen und Detaillösungen. Daher kann auch die Sanierung dieser Gebäude einheitlich geplant und durchgeführt werden. Ein wesentliches Problem bei einer Sanierung (besonders bei höheren energetischen Standards) stellt die unzureichende Luftdichtheit der Gebäude dar, da auf Grund der undichten Plattenfugen eine entsprechende Luftdichtheit der Gebäudehülle nur sehr schwer zu gewährleisten ist. Weitere Schwierigkeiten verursachen die auskragenden Stahlbetonbauteile, sowie die Balkonplatten und hohe Attiken.



Neben Blockbebauungen wurden in Deutschland auch zahlreiche Hochhäuser in Plattenbauweise errichtet. Diese weisen prinzipiell die gleichen Konstruktionen auf wie die kleineren Mehrfamilienhäuser, verfügen jedoch über einen vergleichsweise kompakten Baukörper.

Eine energetische Sanierung dieser Gebäude ist oft mit einer Neugestaltung der Fassade und der Änderung der Grundrisse verbunden, um die optische und nutzungstechnische Qualität und somit die Akzeptanz dieser Gebäude unter den Bewohnern zu erhöhen.

Die nachstehende Tabelle fasst die wichtigsten Merkmale und die typischen Baukonstruktionen der Plattenbauten aus den 70-er Jahren zusammen:

Tabelle W5 : Typische Merkmale und Konstruktionen von Gebäuden mit Bauzeit 1969-1978

| Typische Gebäudemerkmale | |
|--------------------------|--|
| Geschosszahl: | 4 bis 14 zusätzlich Untergeschoss |
| Geschosshöhe: | 2,5 bis 2,7 m |
| Gebäudebreite: | In der Regel 11-13 m |
| Anordnung der Gebäude: | Freistehend oder Zeilenbau |
| Dachgestaltung: | Flachdach |
| Fassadengestaltung: | Einfache Gebäudekubatur mit Balkonen und Loggien |

| Typische Baukonstruktionen | | |
|----------------------------|--|---|
| Bauteil | Beschreibung | U-Wert (W/(m²K)) |
| Außenwand | Industriell vorgefertigte Stahlbetonbauteile Beton-Sandwich-Platten: 17,5 cm Beton, 4 cm Dämmplatten, 8 cm Beton- Wetterschale | 0,9 |
| Kellerdecke | 18 cm Stahlbetondecke mit schwimmendem Estrich auf 2 cm Dämmung | 1,3 |
| Flachdach | 15 cm Stahlbetondecke mit 4 bis 6 cm Wärmedämmung aus PUR oder EPS, bituminöse Abdichtungsbahn | 0,5-0,8 |
| Fenster | Holzrahmen mit Einfachverglasung Holzrahmen mit Isolierverglasung <u>Im sanierten Zustand:</u> Kunststoffrahmen mit Isolierverglasung | 5,2 (i.d.R. bereits erneuert) 2,3 2,0-1,4 |

Ausgewählte Typgebäude

Zur weiteren Bearbeitung und Analyse der erforderlichen Wärmedämmmaßnahmen zur Einhaltung des Passivhausstandards wurden folgende Typgebäude als Repräsentanten der in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Baualtersklassen ausgewählt.

| IWU | Gebäudealtersklasse | Untersuchte Gebäude | Merkmale |
|-------------------------|--|---|---|
| MFH_B | Vorkriegszeit Jahrhundertwende |  | <ul style="list-style-type: none"> - Denkmalgeschützte Frontfassade - Geschosszahl: 4-6 - Außenwände aus Ziegelmauerwerk - Holzbalkendecken |
| MFH_H MFH_I MFH_F | Nachkriegszeit Anfang der 50-er Jahre |  | <ul style="list-style-type: none"> - Fensterflächenanteil < 20% - Geschosszahl: 3-4 - Außenwände aus Hohlblockmauerwerk (aus Bimsstein) oder Hochlochziegel - Zwischendecken aus Stahlbeton, oberste Geschossdecke oft Holzbalkendecke - keine auskragenden Balkone |

| IWU | Gebäudealtersklasse | Untersuchte Gebäude | Merkmale |
|-------------------------|---|--|--|
| MFH_H MFH_I MFH_F | Nachkriegszeit 50-er 60-er Jahre |   | <ul style="list-style-type: none"> - Fensterflächenanteil ca. 25% - Geschosszahl: 3-6 - Außenwände aus Hohlblockmauerwerk (aus Bimsstein) oder Hochlochziegel - Zwischendecken aus Stahlbeton - Auskragende oder vorgesetzte Balkone, Loggien |
| MFH_H MFH_I MFH_F | Nachkriegszeit 50-er 60-er Jahre und 70-er Jahre |  | <ul style="list-style-type: none"> - Fensterflächenanteil ca. 40% - Geschosszahl: 3-6 - Außenwände mit vorgehängten Beton-Platten oder Sandwichelementen - Zwischendecken aus Stahlbeton - zurückgesetzte oder vorgesetzte Balkone |
| HH_F | Punkthaus 70-er 80-er Jahre |  | <ul style="list-style-type: none"> - Fensterflächenanteil ca. 25%-40% - Geschosszahl: 7-11 - Außenwände aus Schwerkton - Zwischendecken aus Stahlbeton - auskragende Balkone |

| | | | |
|-------|---------------------------------|---|---|
| MFH_E | Innenstadt 60-er 80-er Jahre |  | <ul style="list-style-type: none">- Mehrfamilienhäuser im innerstädtischen Bereich- Fensterflächenanteil ca. 40%- Geschosshöhe: 3-7- Außenwände aus Ziegelmauerwerk (Gitterziegel)- Zwischendecken aus Stahlbeton- zurückgesetzte Balkone (zur Hofseite) |
|-------|---------------------------------|---|---|

Um eine möglichst breite Abdeckung der vorhandenen Bestandsgebäude zu erreichen wurden im Zuge der durgeführten Berechnungen einige typische geometrische Merkmale, wie die Geschosshöhe oder Gebäudelänge (Anzahl der Treppenhäuser) der ausgewählten Gebäudetypen variiert. Daneben wurde der Einfluss von unterschiedlichen Arten der Balkonsanierung (Einpacken, Absägen oder Verglasung) auf die erforderlichen Maßnahmen zur Einhaltung des Passivhausstandards untersucht.

7.1.3 Wärmeschutzqualität von Passivhäusern

Ein Passivhaus ist laut Definition des Passivhaus-Instituts Darmstadt (PHI) ein Gebäude, in dem fast ohne Heizverteilsystem im Winter und ohne Klimaanlage im Sommer eine hohe Behaglichkeit erreicht werden kann. Das Haus heizt und kühlt sich „passiv“. Auf ein konventionelles Heizsystem kann bei Wohngebäuden meist sogar vollständig verzichtet werden, weil die Wärmeverluste des Bauwerks durch eine optimierte Gebäudehülle um bis zu 80 - 90% minimiert werden.

Die winddichte, annähernd wärmebrückenfreie und extrem wärmegeämmte Gebäudehülle des Passivhauses sorgt dafür, dass die inneren Wärmegewinne im Gebäude gehalten und die kalte Außenluft vom beheizten Raumvolumen abgehalten wird. Zusätzlich tragen die sog. Passivhausfenster mit ihren niedrigen Wärmedurchgangskoeffizienten zu niedrigen Wärmeverlusten bei, haben aber durch ihren relativ hohen Energiedurchlassgrad die Eigenschaft, kurzwellige Solarstrahlung zu transmittieren die dann als Wärmeenergie an die Raumumschließungsflächen und die Raumluft übertragen wird. Auch im Winter liefern diese Fenster noch nutzbare solare Gewinne und können somit als „Wärmequelle“ in die Heizwärmeberechnung einbezogen werden. Weitere innere Wärmequellen sind die Wärmeabgabe durch Personen und elektrischen Anlagen in den Innenräumen. Die Wärmeverluste der Lüftung werden über Lüftungsanlagen mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung minimiert.

Grenzwerte für den Passivhausstandard bei Neubauten

In Zahlen ausgedrückt versteht man unter einem Passivhaus ein Gebäude

- dessen Jahresheizwärmebedarf $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ [entspricht etwa 1,5 Liter Heizöl pro m^2 und Jahr] und
- dessen Primärenergiekennzahl für Restheizung, Warmwasserbereitung, Lüftung und Haushaltsstrom $120 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ nicht überschreitet und
- dessen Infiltrationsluftwechsel bei 50 Pa kleiner $0,6 \text{ 1/h}$ ist.

Die Einhaltung der Grenzwerte ist mit der vom PHI entwickelten Software, dem sogenannten ‚Passivhaus Projektierungs Paket‘ (PHPP), rechnerisch nachzuweisen.

Passivhaus Kriterien

Die oben genannten Anforderungen nach dem Passivhausstandard lassen sich bei einem Neubau in der Regel durch folgende Maßnahmen erreichen.

- Hochgedämmte Gebäudehülle, $U < 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Vermeidung von Wärmebrücken
- Kompakter Baukörper
- Passive Solarenergienutzung durch Südorientierung und Verschattungsfreiheit
- Passivhausfenster $U_w < 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$; g-Wert um 50%
- Luftdichtheit $n_{50} < 0,6 \text{ 1/h}$
- Wärmerückgewinnung aus der Abluft, Wärmebereitstellungsgrad $>75\%$
- Hocheffiziente Stromspargeräte für den Haushalt
- Trinkwassererwärmung durch z.B. Solarkollektoren oder Wärmepumpe
- Passive Luftvorerwärmung durch z.B. Erdwärmetauscher

"EnerPHit" - Neues PHI-Zertifikat für die Altbaumodernisierung

Die oben beschriebenen Passivhaus-Anforderungen und Grenzwerte wurden ursprünglich für Neubauten entwickelt. In letzter Zeit wird dieser hohe energetische Standard vermehrt auch in der Gebäudesanierung umgesetzt. Der Passivhausstandard ist für Altbauten allerdings nicht immer ein realistisches Ziel, da die geometrischen Eigenschaften dieser Gebäude oft nicht mehr zu ändern sind (Orientierung, Fensterflächenanteil, Wärmebrücken im Sockelbereich usw.). Für solche Gebäude hat das PHI die Zertifizierung "EnerPHit - Qualitätsgeprüfte Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten" entwickelt. Gefordert ist entweder ein Heizwärmebedarf von maximal $25 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ oder alternativ die durchgängige Verwendung von Passivhaus-Komponenten nach den Anforderungen der PHI-Bauteilzertifizierung. Der mit dem PHPP berechnete Heizwärmebedarf, sowie die Wärmeschutzqualität der Einzelbauteile werden im Zertifikat dokumentiert. Für modernisierte Altbauten, die die Passivhaus-Kriterien einhalten, ändert sich dagegen nichts. Sie werden weiterhin nach dem gleichen Verfahren wie Passivhaus-Neubauten zertifiziert.

Grenzwerte für den Passivhausstandard nach „EnerPHit“ bei Altbauten

Heizwärmebedarf: $Q_H \leq 25 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$

Alternativ kann eine Zertifizierung bei Einhaltung der Anforderungen gemäß Tabelle W6 erfolgen. In diesem Fall entfällt die Anforderung an den Heizwärmebedarf.

Primärenergiebedarf: $Q_P \leq 120 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a} + ((Q_H - 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})) * 1,2)$

Tabelle W6: „EnerPHit“ Anforderungen an Einzelbauteile als Passivhauskomponenten

| Bauteil | Anforderung | Bemerkung |
|---|--|---|
| Außenwand und Geschossdecke nach unten an Außenluft | Außendämmung: $U \leq 0,150 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ Innendämmung: $U \leq 0,300 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ | Die Außenwanddämmung muss auf mindestens 75 % der Fläche außenliegend ausgeführt werden. Eine innenliegende Dämmung auf bis zu 25 % der Fläche ist nur gestattet, wenn eine Außendämmung baupraktisch nicht möglich, nicht erlaubt oder eindeutig unwirtschaftlich ist. |

| Bauteil | Anforderung | Bemerkung |
|---------------------------------|--|---|
| Außenwand an Erdreich | $f \cdot U \leq 0,150 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ | mit f: „Reduktionsfaktor Grund“ aus PHPP Blatt „Erdreich“ |
| Dach oder Oberste Geschossdecke | $U \leq 0,120 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ | -- |
| Dachterrasse | $U \leq 0,150 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ | -- |
| Decke zum unbeheizten Keller | $f \cdot U \leq 0,150 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ | mit f: „Reduktionsfaktor Grund“ aus PHPP Blatt „Erdreich“ ¹⁾ |
| Kellerabgang | | Ein durchgängiger Luftraum zwischen dem beheiztem Bereich und dem unbeheizten Keller ist nicht zulässig. ²⁾ |
| Bodenplatte auf Erdreich | $f \cdot U \leq 0,150 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ | mit f: „Reduktionsfaktor Grund“ aus PHPP Blatt „Erdreich“ ³⁾ |
| Fenster | $U_{w,\text{eingebaut}} \leq 0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ $g \cdot 1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \geq U_g$ | Ist $U_{w,\text{eingebaut}}$ für einzelne Fenster in Aufenthaltsräumen größer als $0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, so ist für diese ein Nachweis der Komfortbedingungen nach DIN EN ISO 7730 vorzulegen oder es müssen im Fensterbereich auftretende Untertemperaturen durch Heizflächen ausgeglichen werden. |
| Außentüren | $U_{T,\text{eingebaut}} \leq 0,80 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ | |
| Wärmebrücken | Die thermische Gebäudehülle darf keine linearen Wärmebrücken mit $\Psi > +0,01 \text{ W}/(\text{mK})$ bzw. punktförmigen Wärmebrücken mit $\chi > +0,04 \text{ W}/\text{K}$ aufweisen. | Dieser Grenzwert gilt nicht für Wärmebrücken, die Teil der Regelkonstruktion eines Bauteils sind (z.B. statisch relevante Dübelung eines Wärmedämm-Verbundsystems). Diese werden im Regel-Wärmedurchgangskoeffizienten des Bauteils berücksichtigt. Ist eine wärmebrückenfreie Detailausbildung eindeutig unwirtschaftlich oder baupraktisch nicht möglich, so ist die Wärmebrücke in Abstimmung mit dem Zertifizierer mindestens so weit zu entschärfen, wie dies wirtschaftlich und baupraktisch möglich ist. Die Anforderungen an den Feuchteschutz müssen in jedem Fall eingehalten werden. |
| Lüftung | $\eta_{WRG,\text{eff}} \geq 75 \%$ Elektroeffizienz der Lüftungsanlage: $\leq 0,45 \text{ Wh}/\text{m}^3$ | Alle Räume innerhalb des beheizten Gebäudevolumens müssen an eine Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung angeschlossen sein oder Teil einer Überströmzone sein. $\eta_{WRG,\text{eff}}$ muss, über die Kriterien für „Passivhaus geeignete Komponenten“ hinausgehend, für die gesamte Lüftungsanlage eingehalten werden, d.h. enthalten sind auch die Wärmeverluste der warmen Lüftungskanäle im kalten Bereich bzw. der kalten Kanäle im warmen Bereich. |

1) Ausnahmen: Führt die Einhaltung des o.g. Wärmedurchgangskoeffizienten bei der Verwendung von konventionellen Dämmstoffen ($\lambda \geq 0,032 \text{ W}/(\text{mK})$) zu lichten Raumhöhen im Keller von $< 2,00 \text{ m}$ bzw. zu einer Unterschreitung von in der geltenden Bauordnung vorgeschriebenen Raumhöhen im Erdgeschoss, so darf der o.g. Wärmedurchgangskoeffizient auf den betroffenen Teilflächen in Abstimmung mit dem Zertifizierer um das unbedingt notwendige Maß überschritten werden. Bei Wärmedurchgangskoeffizienten $\geq 0,300 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ muss die maximal mögliche Dämmdicke mit Dämmstoffen der Wärmeleitfähigkeit $\lambda \leq 0,025 \text{ W}/(\text{mK})$ ausgeführt werden, sofern für die jeweilige Anwendung geeignete Dämmstoffe auf dem Markt verfügbar sind. Aus Komfortgründen müssen die Innenoberflächentemperaturen des Erdgeschoss-Fußbodens unter Auslegungsbedingungen (PHPP: Blatt „Erdreich“, „Auslegungstemperatur Erdreich für Heizlastblatt“; Raumtemperatur $20 \text{ }^\circ\text{C}$) mindestens $17 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen.

- 2) Es muss entweder eine im Regelfall verschlossene, luftdichte und wärmegeämmte Tür vorhanden sein, oder der Zugang zum Keller muss von außerhalb der thermischen Gebäudehülle erfolgen (z.B. Treppe vom Garten). Für die Umfassungsbauteile des Kellerabgangs gelten die gleichen Anforderungen wie für die Kellerdecke (Absatz 2.5). Die Tür zwischen Wohnraum und unbeheiztem Keller muss $U_D \leq 1,60 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ aufweisen. Ausnahme: Eine Reduktion der Dämmdicke der Umfassungsbauteile des Kellerabgangs ist in Abstimmung mit dem Zertifizierer zulässig, wenn sonst die Benutzbarkeit des Kellerabgangs oder der angrenzenden Räume übermäßig eingeschränkt wird.
- 3) Da die Dämmung auf der Bodenplatte eine Innendämmung ist, muss geprüft werden, ob im Bodenaufbau problematische Feuchteanreicherungen auftreten können. Ist eine Dämmung auf der Bodenplatte mit dem geforderten Wärmedurchgangskoeffizienten unter Verwendung konventioneller Dämmstoffe ($\lambda \geq 0,032 \text{ W/(mK)}$) aus baupraktischen Gründen (z.B. Raumhöhe, Türstürze) nicht möglich, so darf die Dämmstärke auf das noch mögliche Maß verringert werden. Bei Wärmedurchgangskoeffizienten $\geq 0,300 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ muss die maximal mögliche Dämmdicke mit Dämmstoffen der Wärmeleitfähigkeit $\lambda \leq 0,025 \text{ W/(mK)}$ ausgeführt werden, sofern für die jeweilige Anwendung geeignete Dämmstoffe auf dem Markt verfügbar sind. In diesem Fall ist außerdem die zusätzliche Anbringung einer um die Bodenplatte umlaufenden Dämmschürze zu prüfen und gegebenenfalls auszuführen. Aus Komfortgründen müssen die Innenoberflächentemperaturen des Erdgeschoss-Fußbodens unter Auslegungsbedingungen (PHPP: Blatt „Erdreich“, „Auslegungstemperatur Erdreich für Heizlastblatt“; Raumtemperatur $20 \text{ }^\circ\text{C}$) mindestens $17 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen.

7.1.4 Berechnungen mit dem Passivhaus Projektierungs Paket (PHPP)

Im Rahmen der Untersuchungen wurden aus den in Kapitel 7.1.2 beschriebenen Baualtersklassen die tabellarisch dargestellten Typgebäude ausgewählt. Für diese Gebäude wurden detaillierte Berechnungen nach dem Passivhaus Projektierungs Paket durchgeführt.

Ziel der Berechnungen war die Ermittlung der für die Einhaltung des Passivhausstandards erforderlichen Dämmmaßnahmen, die als Grundlage für die schalltechnischen Untersuchungen dienen. Dabei wurden grundsätzlich die Passivhaus-Anforderungen an Neubauten zugrunde gelegt (Heizwärmebedarf $\leq 15 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$, und Luftdichtheit $n_{50} < 0,6/\text{h}$). Da der Primärenergiebedarf sehr stark von der jeweiligen Gebäudetechnik abhängig ist (Heizung, Lüftung, Strombedarf) und daher bei den einzelnen Gebäuden sehr unterschiedlich sein kann, wurden bei den Untersuchungen nur Maßnahmen zur Einhaltung des Grenzwertes für den Heizwärmebedarf betrachtet. Für die Berechnungen wurde das PHPP 2007 Version 1.2 genutzt. Um eine Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse für die verschiedenen Gebäudetypen zu erreichen, wurden einheitliche Randbedingungen festgelegt.

Die für den Passivhausstandard erforderlichen Dämmmaßnahmen werden mit dem sogenannten mittleren U-Wert des Gebäudes beschrieben. In diesen Wert fließen neben den U-Werten der einzelnen Bauteile auch die linearen Wärmebrücken ein. Dieser Wert wird im Zuge der Berechnungen im PHPP ausgegeben. Derselbe mittlere U-Wert kann zwar durch verschiedene Dämmmaßnahmenkombinationen erreicht werden, einzelne Bauteile haben dabei je nach Fläche und U-Wert jedoch einen größeren oder kleineren Einfluss auf das Gesamtergebnis. Fensterflächen bestimmen z.B. den mittleren U-Wert maßgeblich, da auch Passivhausfenster ($U_w \leq 0,85 \text{ W/(m}^2\text{K)}$) einen fünf bis sieben Mal höheren U-Wert aufweisen als die hochgedämmten opaken Bauteile ($U \leq 0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$). Verglasungsflächen liefern jedoch auch solare Energiegewinne in die Innenräume, was wiederum den Heizwärmebedarf deutlich senkt. Die U-Werte der erdberührten Flächen werden in den Berechnungen mit einem Abminderungsfaktor berücksichtigt, da im Winter die Wärmeverluste in Richtung Erdreich wesentlich

niedriger sind als gegen Außenluft. Je schmaler und höher ein Gebäude ist, desto kleiner wird der Einfluss der erdberührten Bauteile auf das Gesamtergebnis.

Gewählte Randbedingungen im Passivhaus Projektierungs Paket (PHPP)

Standort und Klima: Stuttgart (Klimadaten aus dem PHPP)

Interne Wärmequellen: Der Standardwert des PHPP ist $2,1 \text{ W/m}^2$. Da in den betrachteten Mehrfamilienhäusern die Nutzfläche pro Person kleiner ist, als in einem Neubau eines Einfamilienhauses, führt dieser eher niedrige Wert zu einem unrealistisch hohen Heizwärmebedarf. Die Personenzahl wurde daher in den Berechnungen mit 35 m^2 Wohnfläche/ pro Person festgelegt. (Empfehlung vom PHPP: mindestens 25 m^2 / pro Person, Maximum 50 m^2 / Person). Durch folgendes Beispiel lässt sich nachweisen, dass diese Annahme durchaus realistisch ist. Eines der ausgewählten Typgebäude aus der Nachkriegszeit verfügt über 20 Wohneinheiten auf einer Energiebezugsfläche von rd. 1420 m^2 . Anhand der festgelegten Belegungsdichte mit einer Person je 35 m^2 , ergibt sich für das Gebäude eine Gesamtbelegung mit 40 Personen. Bei einer durchschnittlichen Wohnungsgröße von rd. 70 m^2 der 20 Wohneinheiten entspricht dies einer Belegung von 2 Personen pro Wohneinheit. Bei den sonstigen internen Wärmequellen, wie Wärmeabgabe der haustechnischen Anlagen, wurde mit den Standardwerten des PHPP gerechnet. Somit liegen die internen Wärmequellen insgesamt bei $3,0 \text{ W/m}^2$.

Nachweis: Jahresverfahren

Blowerdoortestergebnis: $\leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ (Grenzwert für die Passivhausanforderung)

Flächen: Die Flächen der Bauteile und der Energiebezugsfläche wurden nach den geometrischen Eigenschaften der ausgewählten Typgebäude anhand der Regeln des PHPP berechnet. Dabei wurden die Kellerräume und Waschküchen im Untergeschoss als unbeheizter Kellerraum definiert. Die Treppenhäuser wurden überall in die beheizte Gebäudehülle einbezogen und als beheizte Räume betrachtet.

Wärmebrücken: Die längenbezogenen Wärmebrückenverlustkoeffizienten Ψ wurden für alle typischen Wärmebrücken der betrachteten Gebäudetypen durch zweidimensionale bzw. dreidimensionale Wärmebrückenberechnungen ermittelt und im PHPP mit den jeweiligen Längen berücksichtigt. Die Ergebnisse der Wärmebrückenberechnungen sind als Katalog für die betrachteten Typgebäude im Anhang W2 dargestellt.

Baukonstruktionen und U-Werte: Die Baukonstruktionen (Grundkonstruktionen) und die U-Werte wurden anhand der Baualtersklasse, als gebäudetypische Konstruktionen angesetzt.

Eigenschaften des Erdreichs: Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs: $2,0 \text{ W/(mK)}$. Wärmekapazität des Erdreichs: $2,0 \text{ MJ/(m}^3\text{K)}$

Grundwasser-Korrektur: Tiefe Grundwasserspiegel: 3 m. Fließgeschwindigkeit: $0,05 \text{ m/d}$

Kellerraum: Luftwechsel im unbeheizten Keller: $0,2 \text{ h}^{-1}$

Im Untergeschoss wurden nur die Treppenhäuser als beheizte Räume berücksichtigt. Alle weiteren Räume wurden als unbeheizte Kellerräume definiert.

Lüftungsdaten: Frischluft pro Person: $30 \text{ m}^3/(P \cdot h)$

Ablufträume: Küche, Bad, WC. Mittlerer Luftwechsel: $0,4 \text{ h}^{-1}$ (Der mittlere Luftwechsel muss aus hygienischen Gründen mindestens $0,3 \text{ h}^{-1}$ betragen).

Windschutz-Koeffizienten nach EN 13790: $e = 0,07$ (mäßige Abschirmung), $f = 15$ (mehrere Einwirkungsseiten). Infiltrationsluftwechsel: $0,042$ 1/h (Vorgabewert vom PHPP).

Effektiver Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung: 85%

Einschränkung der Dämmstoffdicken durch bauliche und konstruktive Randbedingungen

Geometrische Beschränkungen:

Die mögliche Dicke von Dämmmaßnahmen ist bei Bestandgebäuden konstruktiv in einigen Bereichen auf Grund der geometrischen Gegebenheiten beschränkt. Solche einschränkende Situationen sind in Tabelle W7 zusammengestellt und in Abbildung W10 grafisch an einem typischen Gebäudeschnitt dargestellt:

Tabelle W7: Einschränkung von nachträglichen Dämmmaßnahmen durch geometrische Randbedingungen der Bestandsgebäude

| Gebäudemerkmal | Einschränkung der Dämmmaßnahmen | Annahme bei den Berechnungen |
|---|--|---|
| Raumhöhe in den Kellerräumen, Kellerfenster ohne Sturz | begrenzt die Dämmung an der Kellerdeckenunterseite | Max. 10 cm Platz für Wärmedämmung |
| Wanddicke bei den Balkonen oder neben der Balkontür | begrenzt die Dämmung an den Außenwänden | Max. 10 cm Platz für Wärmedämmung |
| Grundstücksgrenze oder Fußgängerzone neben der Fassade | begrenzt die Dämmung an den Außenwänden | Bei Grundstücksgrenze keine Außendämmung, Neben Fußgängerzonen in der Innenstadt max. 10 cm Wärmedämmung |
| Fußboden gegen Erdreich (in Treppenhäusern) oder gegen Kellerraum | Dämmung begrenzt durch Treppe und Raumhöhe | Dämmung im Treppenhaus max. 2 cm (unter neuer Estrichschicht) |
| Decken gegen Außenluft z. B. über Eingangsbereichen | Dämmung begrenzt durch Höhe der Eingangstür | Max. 10 cm Platz für Wärmedämmung |
| Nachbargebäude bei Blockbebauung | Die ungedämmten Außenwände angrenzender Nachbargebäude stellen Wärmebrücken dar | Außenwand der Nachbargebäude wird nicht gedämmt |
| Ausbildung Traufe oder Attika | Dämmung begrenzt durch Gebäudehöhe, äußeres Erscheinungsbild oder Dachkonstruktion (Sparren, Holzbalken) | Traufe wird (außer Denkmalschutz) geändert, der Sparrenanschluss wird erhöht und gedämmt, die Attikawand wird gedämmt |
| Dachgauben | | Neue Gauben, mit einer maximalen Wanddicke von 12 cm |

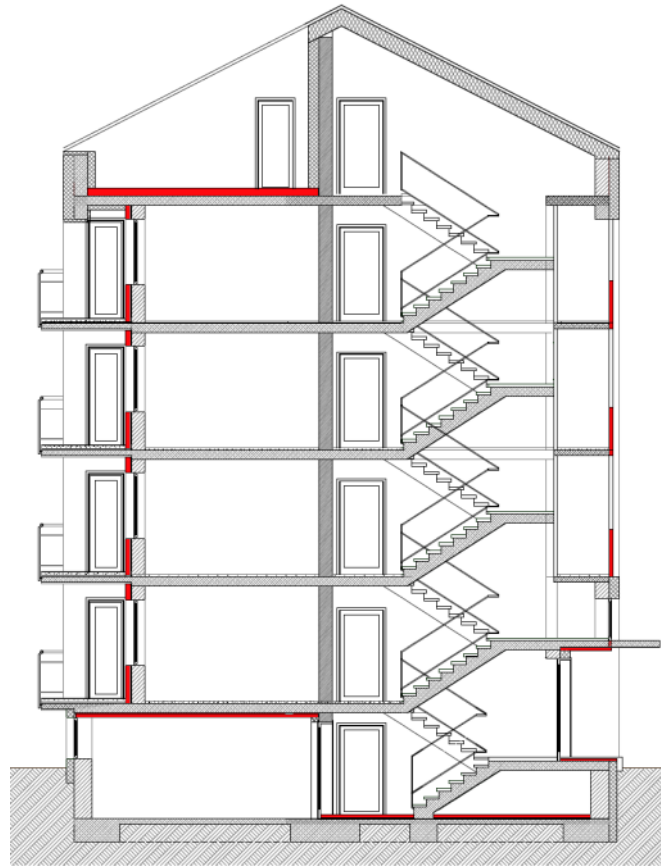


Abbildung W10: Typische Problemstellen von Bestandsgebäuden mit eingeschränkten Möglichkeiten zur nachträglichen Wärmedämmung

Grenzen der Wirtschaftlichkeit:

Im Rahmen der Untersuchung wurde keine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt. Die Dämmmaßnahmen wurden entsprechend der oben genannten geometrischen Gegebenheiten und der technischen Realisierbarkeit ausgewählt. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit wurden jedoch innovative Dämmsysteme, wie Vakuum-Dämmplatten nur sehr beschränkt berücksichtigt (nur bei extrem geringem Platzangebot für die Wärmedämmung). Daneben wurde die maximale Dicke der Wärmedämmung der Außenwände auf 300 mm und bei den Dachflächen auf 400 mm begrenzt.

Sanierungsmöglichkeiten der Balkone:

- Dämmung der Balkonplatte (Reduzierung Wärmebrücke)
- Auskragende Bestandsplatte absägen und neue, selbsttragende Balkonkonstruktion einfügen
- Verglasung der Balkone, Balkonfläche als beheizte Wohnfläche

7.1.5 Ergebnisse der PHPP Berechnungen

Analyse konstruktiver Einflüsse auf den Heizwärmebedarf am Beispiel eines typischen Gebäudes aus der Nachkriegszeit (Baujahr 1948-1968)

An einem repräsentativen Beispielgebäude wurde der Einfluss der Geschosshöhe (A/V-Verhältnis), von unterschiedlichen konstruktiven Lösungen in der Sanierung (Rollladenkästen, Balkone etc.) und von Verschattungen durch Nachbargebäude auf den Heizwärmebedarf detailliert untersucht. Hierzu wurde ein typisches Referenzgebäude ausgewählt, für das zunächst in einer Grundvariante die notwendigen Maßnahmen (Bauteilaufbauten und Dämmstoffdicken) zur Einhaltung des Passivhausstandards ermittelt wurden. Anschließend wurde für die gleichen Sanierungsmaßnahmen die Anzahl der Geschosse variiert und unterschiedliche konstruktive Lösungen für die Sanierung der Balkone und Rollladenkästen im Hinblick auf deren Auswirkung auf den Heizwärmebedarf untersucht. Die Randbedingungen der Berechnungen sowie die Berechnungsergebnisse sind in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

Ausgewähltes Gebäude

Für die weiteren Betrachtungen zur Festlegung der erforderlichen Bauteilkonstruktionen wurde das nachstehende Referenzgebäude mit Baujahr 1958 mit Mauerwerkswänden, vielen Balkonen und einem Fensterflächenanteil von 25-27% ausgewählt. Dieses Gebäude weist nahezu alle im vorigen Abschnitt genannten Merkmale und Schwachstellen auf.

Randbedingungen und untersuchte Varianten

Für dieses Referenzgebäude wurden detaillierte Berechnungen des Heizwärmebedarfs nach dem Passivhaus Projektierungs Paket (PHPP) 2007 durchgeführt. Im Rahmen der Berechnungen wurden folgende Parameter variiert:

- Anzahl der Geschosse (Veränderung des A/V-Verhältnisses)
- Art der Rollladenkastensanierung (nachträglich gedämmt oder entfernt)
- Art der Gestaltung und Sanierung der Balkone (mit Dämmung eingepackt, erneuert mit thermischer Trennung oder vollflächig verglast und beheizt)

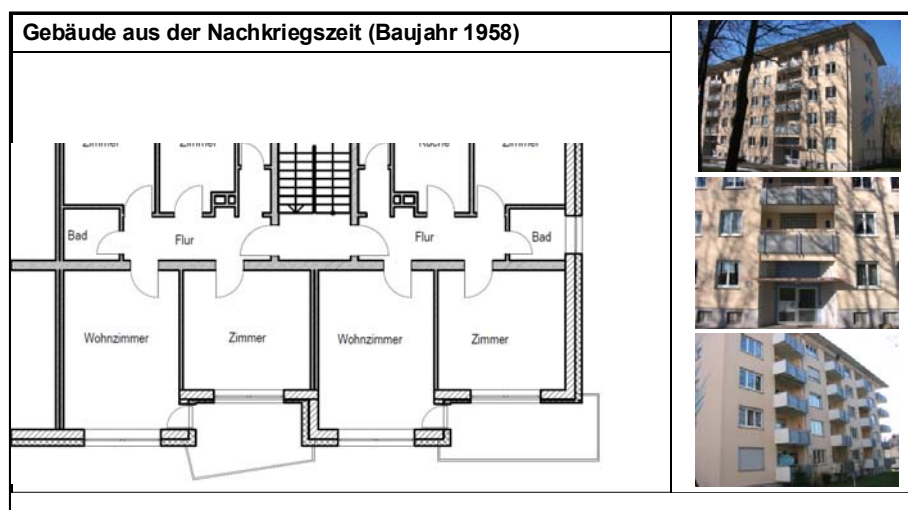


Abbildung W11: Ausgewähltes Referenzgebäude für Detailanalysen

Außerdem wurden Einflüsse von Verschattungen durch benachbarte Gebäude berücksichtigt. Insgesamt wurden folgende Varianten untersucht:

Tabelle W8: Untersuchte Sanierungsvarianten

| Variante | Anzahl Geschosse | Ausführung Rolllädenkasten | | Art der Balkonsanierung | | | Verschattung durch Nachbargebäude |
|----------|------------------|----------------------------|----------|-------------------------|----------|----------|-----------------------------------|
| | | Gedämmt | entfernt | gedämmt | getrennt | verglast | |
| V1 | 5 | X | | X | | | Nein |
| V2 | 5 | | X | X | | | Nein |
| V3 | 5 | X | | | X | | Nein |
| V4 | 5 | X | | | | X | Nein |
| V5 | 5 | X | | X | | | Ja |
| V6 | 4 | X | | X | | | Nein |
| V7 | 3 | X | | X | | | nein |

Allen untersuchten Varianten wurden jeweils die gleichen Dämmmaßnahmen und Bauteilqualitäten (U-Wert der Bauteile) zugrundegelegt. Diese sind in Tabelle W9 zusammenfassend dargestellt. Die Bauteilqualitäten und Dämmmaßnahmen wurden so gewählt, dass der Passivhausstandard für die Basisvariante (V1) gerade eingehalten wird. Konstruktive Einschränkungen hinsichtlich möglicher Dämmstoffdicken wurden dabei berücksichtigt und durch eine entsprechend gute Wärmedämmung ausgeglichen. Daher wurden hier für einzelne Bauteile auch Vakuum-Dämmplatten berücksichtigt.

Tabelle W9: Berücksichtigte Dämmmaßnahmen und Bauteilqualitäten

| Opake Bauteile | Wärmedämmung | U-Wert |
|--|--|----------------------|
| | (mm) | W/(m ² K) |
| Außenwand aus Bimsstein $\lambda = 0,42 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | 240 mm (EPS); $\lambda = 0,033 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | 0,12 |
| Außenwand neben Balkon aus Bimsstein $\lambda = 0,42 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | 40 mm (VIP); $\lambda = 0,008 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ + 60 mm (PUR); $\lambda = 0,022 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | 0,12 |
| Treppenhauswand gegen Erdreich aus Beton | 240 mm (XPS); $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | 0,14 |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 80 mm (MW); $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | 0,37 |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 20 mm (VIP); $\lambda = 0,008 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | 0,35 |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) aus Stahlbeton und keine Dämmung im Fußbodenaufbau | 20 mm (VIP); $\lambda = 0,008 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ + 80 mm (PUR); $\lambda = 0,022 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | 0,15 |
| Fußboden gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 20 mm (VIP); $\lambda = 0,008 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ + 80 mm (PUR); $\lambda = 0,022 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | 0,14 |
| Decke gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 20 mm (VIP); $\lambda = 0,008 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | 0,33 |
| Decke gegen unbeheiztem Dachraum aus Stahlbeton | 320 mm (MW); $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | 0,11 |
| Türe zwischen Treppenhaus und Keller | -- | 1,4 |

EPS: Extrudierter Polystyrol Hartschaum; VIP: Vakuum Isolationspaneel; MW: Mineralwolle; PUR: Polyurethan Hartschaum

| Fensterrahmen | U_f -Wert | Rahmenbreite | Wärmebrücken-Koeffizient | Wärmebrücken-Koeffizient |
|--|----------------------|--------------|--------------------------|--------------------------|
| | Rahmen | Breite | Ψ_{Glasrand} | Ψ_{Einbau} |
| | W/(m ² K) | m | W/(mK) | W/(mK) |
| Passivhausfenster mittlere thermische Qualität | 0,75 | 0,130 | 0,040 | 0,010 |
| Eingangstür (Gebäude) | 0,90 | 0,140 | 0,040 | 0,040 |

| Verglasungen | U_g -Wert | g-Wert |
|------------------------------------|---------------------------|--------|
| Dreischeiben Wärmeschutzverglasung | 0,6 W/(m ² *K) | 0,6 |

- Balkonplatten wurden in der Basisvariante von oben und von unten mit 20 mm PUR-Dämmung gedämmt (Wärmebrückenkoeffizient $\Psi=0,26$ W/(mK)) angenommen.
- Bei den Wärmebrückenberechnungen wurden die massiven Kellerwände mit 10 cm Wärmedämmung auf beiden Seiten der Wand, bis zu 50 cm ab der UK Kellerdecke berücksichtigt (Siehe Abbildung W12, Wärmebrückenkoeffizient $\Psi=0,23$ W/(mK)).
- Für den Sockelbereich wurde von einer eher ungünstigen Variante ausgegangen. Hier wurde die außenseitige Dämmung der Außenwände bis zu 70 cm ab der UK Kellerdecke heruntergezogen und eine innenseitige Dämmung in einer Breite von 50 cm unter der Kellerdecke berücksichtigt (Siehe Abbildung W12, Wärmebrückenkoeffizient $\Psi=0,13$ W/(mK)).
- Bei der Verglasung der Balkone wird davon ausgegangen, dass die Brüstungswand aus Dämmpanelen ausgeführt wird und oberhalb der Brüstungshöhe Verglasungsflächen eingebaut sind.

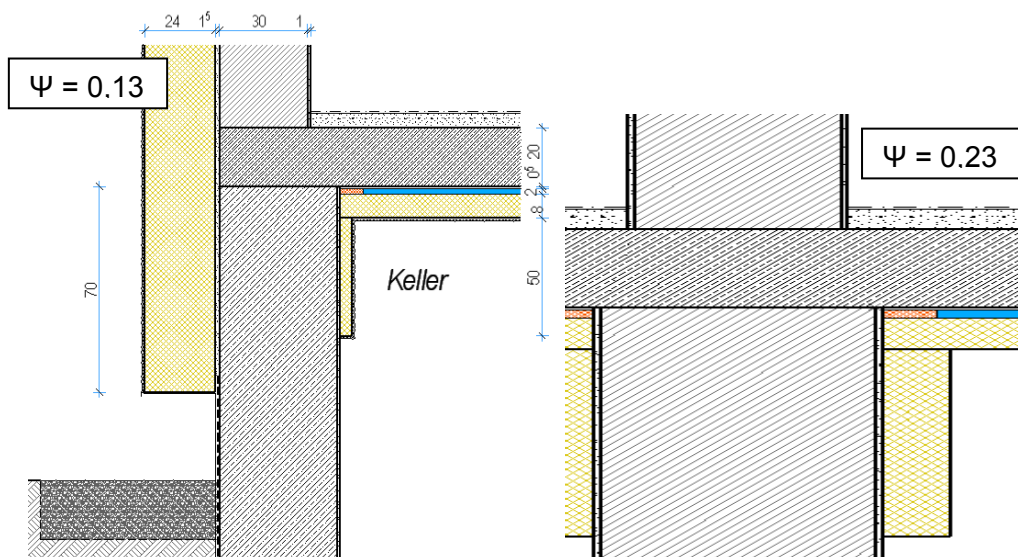


Abbildung W12: In der Basisvariante berücksichtigte Sanierungsvariante für den Sockelbereich und für die massiven Kellerwände

- Für die Rollladenkästen wurde in der Basisvariante von einer nachträglichen Dämmung mit einer Ausführung entsprechend Abbildung W13 ausgegangen.

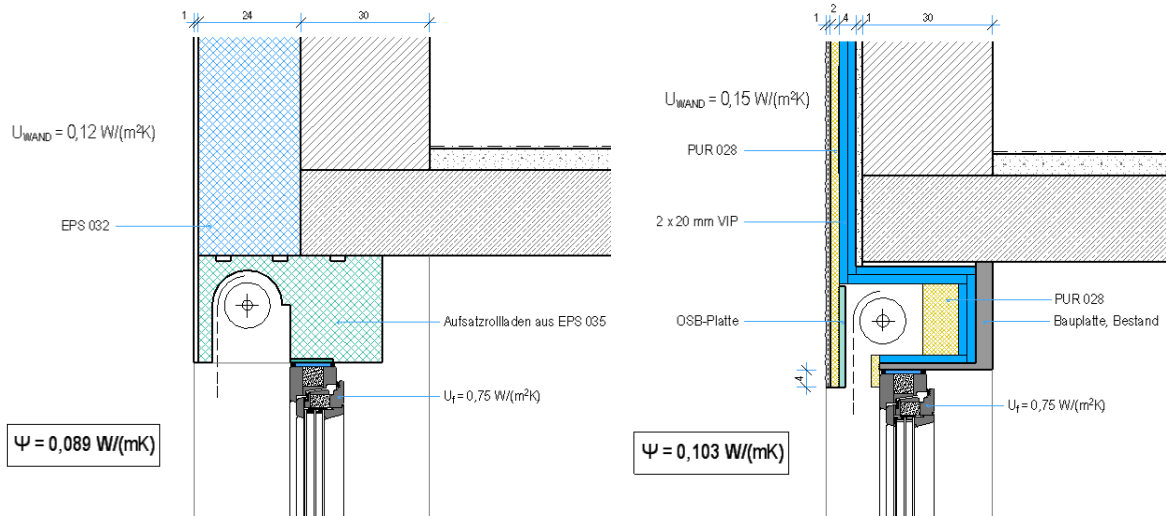


Abbildung W13: In der Basisvariante berücksichtigte Sanierungsvarianten für Rollladenkästen ($\Psi=0,10 \text{ W/(mK)}$)

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle W10 zusammenfassend dargestellt. Demnach wird mit den im vorigen Abschnitt genannten Konstruktionen und Bauteilaufbauten der Passivhausstandard mit einem spezifischen Heizenergiebedarf von $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ für das betrachtete Gebäude grundsätzlich auch dann eingehalten, wenn die Balkone als maßgebliche Wärmebrücken nachträglich mit Wärmedämmung eingepackt und die Rollladenkästen wie beschrieben wärmegeklärt werden. Die komplette Entfernung der bestehenden Rollladenkästen bei gleichzeitiger Vergrößerung der Fensterflächen reduziert den spezifischen Heizenergiebedarf um rund 3% (V2). Durch eine Entfernung und thermischen Trennung der Balkone (z.B. Leichtbau oder ISO-Korb) lässt sich der spezifische Heizenergiebedarf bei sonst gleichen Randbedingungen sogar um knapp 9% (V3) verringern. Werden die Balkone verglast und der beheizten Wohnfläche zugeschlagen wird nicht nur die Wärmebrücke vermieden, sondern gleichzeitig werden die Kompaktheit des Gebäudes und die solaren Gewinne erhöht. Daher ergibt sich für diese Variante rechnerisch die höchste Reduktion des spezifischen Heizenergiebedarfs um rund 13% (V4).

Tabelle W10: Ergebnisse der PHPP-Berechnungen für die untersuchten Varianten

| PHPP Ergebnisse | | | | Nachweis der Anforderungen |
|--|--------------------------------------|-----------------|----------------------|---|
| Variante | Energiebezugsfläche (m^2) | A/V- Verhältnis | Fensterflächenanteil | Energiekennwert Heizwärme nach Jahresverfahren ($\text{kWh/m}^2\text{a}$) |
| V1: Gebäude mit 5 Geschossen | 1418,8 | 0,43 | 0,24 | 15,20 (Basisvariante) |
| V2: Gebäude mit 5 Geschossen, mit abgeschnittenen Rollladenkästen (= vergrößerte Fenster) | 1418,8 | 0,43 | 0,28 | 14,80 (Unterschied zur Basisvariante: -2,6 %) |

| PHPP Ergebnisse | | | | Nachweis der Anforderungen |
|--|---------------------------------------|----------------|----------------------|---|
| Variante | Energiebezugsfläche (m ²) | A/V-Verhältnis | Fensterflächenanteil | Energiekennwert Heizwärme nach Jahresverfahren (kWh/m ² a) |
| V3: Gebäude mit 5 Geschossen, mit abgeschnittenen und neugebauten Balkonen | 1418,8 | 0,43 | 0,24 | 13,90 (Unterschied zur Basisvariante: -8,6 %) |
| V4: Gebäude mit 5 Geschossen, mit verglasten Balkonen (Balkone in der beheizten Gebäuhülle) | 1591,5 | 0,41 | 0,42 | 13,30 (Unterschied zur Basisvariante: -12,5%) |
| V5: Gebäude mit 5 Geschossen, Nachbargebäude in 30 m Abstand | 1418,8 | 0,43 | 0,24 | 17,00 (Unterschied zur Basisvariante: +12%) |
| V6: Gebäude mit 4 Geschossen | 1134,5 | 0,46 | 0,24 | 15,70 (Unterschied zur Basisvariante: +3%) |
| V7: Gebäude mit 3 Geschossen | 850,2 | 0,52 | 0,24 | 18,40 (Unterschied zur Basisvariante: +21%) |

Verschattungen durch Nachbargebäude reduzieren die solaren Wärmegewinne der Fenster und erhöhen daher den spezifischen Heizenergiebedarf bzw. den Aufwand zur Einhaltung des Passivhausstandards mitunter deutlich (+12% vgl. V5). Die Anzahl der Geschosse des betrachteten Gebäudetyps spielt hinsichtlich der Einhaltung des Passivhausstandards eine erhebliche Rolle, da mit sinkender Geschosshöhe nicht nur das A/V-Verhältnis steigt (geringere Kompaktheit), sondern sich gleichzeitig auch der Einfluss der unvermeidbaren Wärmebrücken zum Keller deutlich erhöht. Wird die Geschosshöhe bei sonst gleichen Randbedingungen für das betrachtete Typgebäude von fünf auf vier Geschosse reduziert, steigt der spezifische Heizenergiebedarf noch relativ moderat um 3%. Bei drei Geschossen steigt der spezifische Heizenergiebedarf allerdings im Vergleich zum fünfgeschossigen Gebäude deutlich um 21%.

Ermittlung der erforderlichen Maßnahmen und mittleren U-Werte zur Einhaltung des Passivhausstandards bei unterschiedlichen konstruktiven Randbedingungen

Die Ergebnisse in Kapitel 7.1.5 zeigen einen deutlichen Einfluss von konstruktiven Randbedingungen und der Art der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen auf den Heizenergiebedarf des Gebäudes. Um für jeden Fall die Passivhausanforderungen einzuhalten ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an den Wärmeschutz der Außenbauteile und die resultierenden mittleren U-Werte. Um diese Auswirkungen quantifizieren zu können, wurden für alle oben aufgeführten Typgebäude Parametervariationen zur Anzahl der Geschosse, zur Verschattung und zur Art der Sanierung der Balkone durchgeführt. Die hierbei zu Grunde gelegten Randbedingungen sind in Tabelle W11 dargestellt. Die Er-

gebnisse sind in den nachfolgenden Abschnitten für jedes Typgebäude separat dargestellt. Detaillierte Berechnungsergebnisse finden sich im Anhang W1.

Tabelle W11: Grundlegende Randbedingungen der durchgeführten Berechnungen

| ALLGEMEINE EINSTELLUNGEN: | |
|---|---|
| Software: | Passivhaus Projektierungs Paket 2007, Version 1.2 |
| Klima: | Stuttgart |
| Gebäudeart: | Wohngebäude |
| Nachweis: | Monatsverfahren |
| Interne Wärmequellen: | 3,0 W/m ² Bemerkung zu internen Wärmequellen: Der Standardwert für Wohngebäude ist im PHPP mit 2,1 W/m ² vorgegeben. Wenn man die Personenzahl anhand der Nutzfläche errechnet (50 m ² pro Person), ergibt sich normalerweise ein höherer Wert von ca. 3,0 W/m ² der daher hier in Ansatz gebracht wurde. |
| ORIENTIERUNG: | |
| Hauptfassaden: | Ost und West, Eingangsbereich auf der Ostseite Keine Verschattung durch Nachbarbebauung |
| ERDREICH: | |
| Wärmeleitfähigkeit: | $\lambda = 2,0 \text{ W/(mK)}$ |
| Wärmekapazität: | $\rho c = 2,0 \text{ MJ/(m}^3\text{K)}$ |
| Tiefe Grundwasserspiegel: | $z_w = 3,0 \text{ m}$ |
| Fließgeschwindigkeit: | $q_w = 0,05 \text{ m/d}$ |
| Luftwechsel in unbeheiztem Keller: | $n = 0,2 \text{ 1/h}$ |
| FENSTER: | |
| Verglasung: | $U_g = 0,6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, g-Wert= 0,6 Bemerkung: Nach heutigem Stand der Technik ist der durchschnittliche U_g -Wert neuer Dreifachverglasungen bereits unter 0,6 W/(m ² K) |
| Rahmen: | Passivhausrahmen, mittlere thermische Qualität; $U_f = 0,75 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ Rahmenbreite: 140 mm, Wärmebrückenkoeffizient $\Psi_{\text{Glasrand}} = 0,04 \text{ W/(mK)}$, $\Psi_{\text{Einbau}} = 0,04 \text{ W/(mK)}$ Bemerkung: Nach heutigem Stand der Technik gibt es viele Produkte am Markt die wesentlich bessere Werte aufweisen als hier angegeben. Neben der Rahmenbreite sollen die Wärmebrückenkoeffizienten möglichst niedrig sein. Der Wärmebrückenkoeffizient der Einbauart ist normalerweise unabhängig vom Produkt und kann durch eine sorgfältige Planung günstig beeinflusst werden |
| ROLLADENKASTEN: | |
| Wärmebrückenkoeffizient: | Die Rollladenkästen sind mit einem Wärmebrückenkoeffizient von $\Psi_{\text{Rollladen}} = 0,10 \text{ W/(mK)}$ berücksichtigt. |
| SOCKEL: | |
| Wärmebrückenkoeffizient: | Sockelbereich und Wände zum unbeheizten Keller werden mit einem Wärmebrückenkoeffizient von $\Psi_{\text{Sockel}} = 0,13 \text{ W/(mK)}$ in Ansatz gebracht. |
| BEHEIZTE GEBÄUDEHÜLLE: | |
| Treppenhäuser: | Die Treppenhäuser wurden der beheizten Gebäudehülle zugeschlagen und bis zum UG als beheizt angenommen. Daher werden auch die Treppenhauswände zum Keller, die erdberührten Wände und Böden und die Türen zum Keller wärmegeklämt. |

| LÜFTUNG: | |
|--|--|
| Luftwechsel bei Drucktest: | $n_{50} = 0,6$ 1/h Bemerkung: 0,6 1/h ist der Grenzwert für Passivhäuser. |
| Mittlerer Luftwechsel: | Der mittlere Luftwechsel wurde so gewählt, dass die Luft nicht zu trocken wird (max. 0,5 1/h) und das Gebäude noch über die Zuluft beheizbar bleibt. Maximale Zulufttemperatur 52°C. |
| Netto Luftvolumen für Drucktest V_{n50}: | Das Luftvolumen für den Drucktest wurde so ausgewählt, dass der Infiltrationsluftwechsel $n_{L,Rest} = 0,042$ 1/h wird. |
| Art der Lüftungsanlage: | Balancierte Passivhauslüftung, Gerät innerhalb der thermischen Hülle, kein Erdreichwärmeüberträger |
| Effektiver Wärmebereitstellungsgrad: | $n_{WRG, eff} = 85\%$ |

Die Ergebnisse der durchgeführten Parameterstudien sind für die betrachteten Gebäudetypen in den nachfolgenden Abschnitten in Tabellen und Grafiken zusammenfassend dargestellt. In den Tabellen sind zum einen das A/V-Verhältnis und zum anderen der zur Einhaltung des Passivhausstandard erforderliche mittlere U-Wert dargestellt. Da für die Untersuchung der Schallschutzqualitäten insbesondere der Aufbau der Außenwände von Interesse ist, sind die sich verändernden Anforderungen an den Wärmeschutz und die Dämmstoffdicke der Außenwände hier ebenfalls dargestellt. Neben den Außenwänden verändern sich allerdings auch die Anforderungen an die übrigen opaken Bauteile und an die erforderliche Behandlung der Wärmebrücken (insbesondere der Balkone). Diese können den Tabellen im Anhang entnommen werden, wo alle Berechnungsergebnisse nochmals detailliert dargestellt sind.

7.1.6 Gebäude aus der Vorkriegszeit

Viele Gebäude aus der Vorkriegszeit stehen unter Denkmalschutz oder können oft auch aus rein geometrischen Gegebenheiten nicht mit dicken Dämmschichten versehen werden. Dadurch ist der Passivhausstandard bei diesen Gebäuden normalerweise mit vertretbarem Aufwand nicht zu erreichen. Anhand eines typischen Gebäudes dieser Zeitperiode wurde daher untersucht, welcher energetische Standard bei Verwendung von Passivhauskomponenten erreicht werden kann. In den Berechnungen wurde angenommen, dass die Straßenfassade nur von innen gedämmt und die Hoffassade von außen gedämmt werden kann. Der Dachraum wird als ausgebaut angenommen, wobei im Zuge der Sanierung von einer Aufsparrendämmung ausgegangen wird. Zur Berücksichtigung von Verschattungen wurden Nachbargebäude in einem Abstand von 17 m und 14,5 m angenommen (realer Abstand). Die Höhe der Nachbargebäude ist mit der Höhe des Referenzgebäudes identisch. Da es bei diesen Gebäuden viele Wärmebrücken gibt, die bei anderen Gebäuden jedoch sehr unterschiedlich ausfallen sind diese nicht wirklich typisierbar. Daher wurde hier für die Berechnungen ein Wärmebrückenzuschlag nach der Empfehlung des PHI verwendet. Nach dem Passivhaus Institut ist bei einem Gebäude aus der Vorkriegszeit, mit Holzbalkendecken und mit Innendämmung von einem Wärmebrückenzuschlag von 0,1 W/(m²K) auf die Außenwandflächen auszugehen. Dies bedeutet, dass bei diesen Gebäuden die Wärmebrücken einen erheblichen Anteil der Wärmeverluste verursachen. Die maßgebenden Wärmebrücken wurden im Rahmen des Forschungsprojektes detailliert berechnet. Diese sind

insbesondere die Anschlüsse von Trennwänden und Trenndecken an Außenwände mit Innendämmung.

Ausgewählter Gebäudetyp aus der Vorkriegszeit

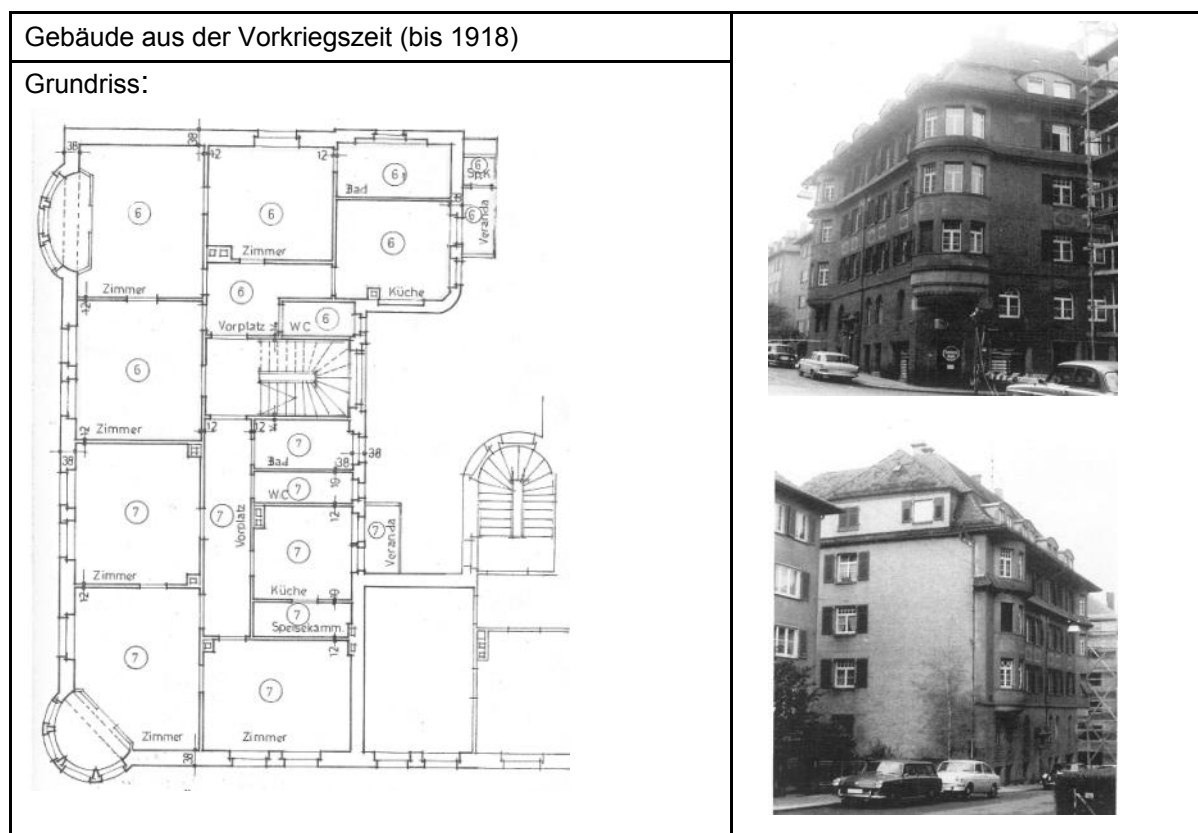


Abbildung W14: Ausgewähltes Referenzgebäude für Detailanalysen

Bei den Berechnungen wurde die Dicke der Innendämmung auf 80-100 mm begrenzt, um die Reduktion der Wohnfläche möglichst gering zu halten. Der Wert der Wohnungen bezieht sich normalerweise auf Quadratmeterpreise der Nutzfläche. Ein Verlust von 10 cm in der gesamten Länge der Hauptfassade (ca. 10 m pro Wohnung) ergibt 1 m² Reduzierung der Wohnfläche. In enger Bebauung können sehr oft auch die Hoffassaden nicht unbegrenzt gedämmt werden da hier Parkplätze, Müllstellplätze oder Spielplätze angeordnet sind. Daher wurde hier die Dämmstoffdicke auf maximal 120 mm begrenzt.

Bei denkmalgeschützten Gebäuden stellt sich oft die Frage, wie die Dachkonstruktion gedämmt werden soll. Eine nachträgliche Dämmung zwischen den Sparren bringt viele bauphysikalische Problemen mit sich. Vor allem die Luftdichtheit der Gebäudehülle ist bei einer Ausführung mit Zwischensparrendämmung schwer zu gewährleisten. Eine Aufsparrendämmung ist aus bauphysikalischer Sicht deutlich günstiger, erhöht jedoch die Gebäudehöhe wodurch sich auch die Traufhöhe verändert. Bereits ausgeführte Beispiele zeigen jedoch, dass diese Änderungen kaum auffallen und das Gesamterscheinungsbild des Gebäudes nicht negativ beeinflussen. Diese Bauteile liegen normalerweise so hoch, dass Dickenänderungen in der Größenordnung von 10-20 cm von der Straßenebene gar nicht bemerkbar sind. Das äußere Erscheinungsbild der Fenster muss ebenfalls erhalten bleiben. Dies führt

dazu, dass Dreischeiben-Isolierverglasungen auf Grund ihres hohen Gewichtes nicht in Frage kommen. In den Berechnungen wurde daher Zweischeiben-Isolierverglasungen, jedoch mit einem sehr schlanken Passivhausrahmen, berücksichtigt (der Rahmenanteil soll möglichst niedrig bleiben).

Die Berechnung wurde in zwei Varianten durchgeführt. In Variante 1 wurden überwiegend herkömmlichen Dämmmaterialien zu Grunde gelegt. Vakuum-Dämmpaneele wurden hier nur für die Dämmung der Decke gegen Außenluft im Bereich der Erker berücksichtigt. In Variante 2 wurde untersucht, wie sich der Heizwärmebedarf durch den Einsatz von innovativen Dämmsystemen weiter reduzieren lässt. In diesem Fall wurden Vakuum-Dämmpaneele auch für die Dämmung der Außenwände und der Kellerdecken berücksichtigt. Der Wärmebrückenzuschlag an den Außenwandflächen wurde dabei entsprechend der durchgeführten Wärmebrückenberechnungen in Ansatz gebracht (siehe Anhang). Diese Berechnungen zeigten, dass sich die Wärmebrückensituation durch die sehr geringe Wärmeleitfähigkeit und die geringe Dämmstoffdicke der Vakuum-Dämmplatten im Bereich der ungedämmten Trennwandanschlüssen und Zwischendecken deutlich verschärft. Der zu berücksichtigende Wärmebrückenzuschlag fällt für die Außenwandflächen in diesem Fall mit $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ deutlich höher aus. In der nachstehenden Tabelle sind die berücksichtigten Dämm- /Sanierungsmaßnahmen dargestellt:

Tabelle W12: Berücksichtigte Dämm- /Sanierungsmaßnahmen

| Opake Bauteile | Wärmedämmung | U-Wert |
|---|---|--|
| | (mm) | $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ |
| Variante 1: Überwiegend herkömmliche Dämmmaterialien | | |
| Straßenfront Außenwand aus Vollziegel $\lambda = 0,79 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ D = 51 cm D = 38 cm | 80 mm $\lambda = 0,031 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (PUR) | $0,29^{\text{*)}$ $0,31^{\text{*)}$ |
| Hoffassade Außenwand aus Vollziegel $\lambda = 0,79 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ D = 51 cm D = 38 cm | 120 mm $\lambda = 0,022 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (PUR) | $0,25^{\text{*)}$ |
| Dach Aufsparrendämmung (neu) | 100 mm $\lambda = 0,024 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ | 0,23 |
| Außenwände und Dach der Dachgauben | 100 mm $\lambda = 0,024 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ | 0,23 |
| Decke gegen unbeheizten Dachraum, Holzbalkendecke | 280 mm $\lambda = 0,032 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ | 0,11 |
| Treppenhauswand gegen Erdreich Außenwand aus Vollziegel $\lambda = 0,79 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ D = 64 cm | 140 mm $\lambda = 0,04 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (XPS) + 60 mm $\lambda = 0,04 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (XPS) | 0,17 |
| Kellerdecke als Kappendecke und keine Dämmung im Fußbodenaufbau | 140 mm $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (MW) | 0,24 |
| Fußboden gegen Außenluft (Erker) | 30 mm $\lambda = 0,008 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (VIP) | 0,25 |
| Türe zwischen beheizten und unbeheizten Räumen und Eingangstür | -- | 1,0 |

| Opake Bauteile | Wärmedämmung | U-Wert |
|--|--|---------------------------------|
| | (mm) | $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ |
| Variante 2: Dämmung der Außenwände mit innovativen Dämmsystemen | | |
| Straßenfront Außenwand aus Vollziegel $\lambda = 0,79 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ D = 51 cm D = 38 cm | 40 mm $\lambda = 0,008 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (VIP) + 60 mm $\lambda = 0,06 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Kalziumsilikat) | $0,30^{\text{**})}$ |

| | | |
|--|---|--------------------|
| Hoffassade Außenwand aus Vollziegel $\lambda = 0,79 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ D = 51 cm D = 38 cm | 40 mm $\lambda = 0,008 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (VIP) + 80 mm $\lambda = 0,022 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | 0,20 ^{*)} |
| Dach Aufsparrendämmung (neu) | 100 mm $\lambda = 0,024 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | 0,23 |
| Außenwände und Dach der Dachgauben | 100 mm $\lambda = 0,024 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | 0,23 |
| Decke gegen unbeheizten Dachraum, Holzbalkendecke | 280 mm $\lambda = 0,032 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | 0,11 |
| Treppenhauswand gegen Erdreich Außenwand aus Vollziegel $\lambda = 0,79 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ D = 64 cm | 140 mm $\lambda = 0,04 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (XPS) + 60 mm $\lambda = 0,04 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (XPS) | 0,17 |
| Kellerdecke als Kappendecke und mit Dämmung im Fußbodenaufbau | 20 mm $\lambda = 0,008 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (VIP) + 140 mm $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (MW) | 0,15 |
| Fußboden gegen Außenluft (Erker) | 30 mm $\lambda = 0,008 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (VIP) | 0,25 |
| Türe zwischen beheizten und unbeheizten Räume und Eingangstür | -- | 1,0 |

^{*)} U-Wert beinhaltet einen Wärmebrückenzuschlag von $0,1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

^{**)} U-Wert beinhaltet einen Wärmebrückenzuschlag von $0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

| Fensterrahmen | U _F -Wert | Rahmenbreite | Wärmebrücken-koeffizient | Wärmebrücken-koeffizient |
|--|---|--------------|--------------------------|--------------------------|
| | Rahmen | Breite | □ Glasrand | □ Einbau |
| | W/(m ² K) | m | W/(mK) | W/(mK) |
| Passivhausfenster gute thermische Qualität | 0,72 | 0,09 | 0,035 | 0,04 |
| Verglasung | U _g -Wert W/(m ² K) | | g-Wert | |
| Zweifach-Verglasung (geringes Gewicht) | 1,0 | | 0,6 | |

Ergebnisse der Berechnung mit PHPP

Die Ergebnisse der anhand der oben beschriebenen Dämmmaßnahmen durchgeführten Berechnungen mit dem PHPP sind in Tabelle W13 zusammengefasst.

Tabelle W13: Ergebnisse der PHPP Berechnungen

| PHPP Ergebnisse | | |
|---|-------------------------------------|---------------------------|
| Variante | Wärmebrückenzuschlag der Außenwände | Energiekennwert Heizwärme |
| | | Jahresverfahren |
| | (W/(m ² K)) | (kWh/(m ² a)) |
| Wärmedämmung der Außenwände mit herkömmlichen Dämmmaterialien | 0,1 | 41,9 |
| Wärmedämmung der Außenwände mit Vakuum-Dämmplatten | 0,15 | 36,3 |

Durch den Einsatz von Vakuum-Dämmplatten als Innendämmung lässt sich der Heizwärmebedarf nur um rund 13% von $41,9 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ auf $36,3 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ reduziert. Die Reduktion von rd. $5,6 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ ergibt sich im Wesentlichen aus der erhöhten Dämmung der Hoffassade, wo die VIP als Außendämmung angesetzt wurden und sich die Wärmebrückensituation nicht verschärft hat. Die Verbesserung

der Wärmedämmung der Kellerdecke (mit 20 mm VIP im Fußboden) trägt ebenfalls zu einer gewissen Reduktion des Heizwärmebedarfs bei, mit ca. $0,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ist diese jedoch nicht maßgebend. Diese vergleichsweise geringe Verbesserung liegt hier an den erhöhten Wärmeverlusten durch die Wärmebrücken über die flankierenden massiven Trennwände.

Insgesamt lässt sich aus den durchgeführten Untersuchungen als Schlussfolgerung ableiten, dass bei Gebäuden aus der Jahrhundertwende die Anforderungen des Passivhausstandards auf Grund der unvermeidbaren Wärmebrücken mit vertretbarem Aufwand nicht erfüllt werden können. Die Verwendung von leistungsfähigen Dämmsystemen, wie Vakuum-Dämmplatten als Innendämmung verschärft die Wärmebrücken in einem Maße, dass die erhöhten Wärmeverluste über die Wärmebrücken die erreichte Energieeinsparung in der Fläche fast ausgleichen. Durch die entstehenden Wärmebrücken ist daher die Verwendung der innovativen Dämmsysteme als Innendämmung eher unwirtschaftlich, wenn diese nicht ohnehin aus geometrischen Zwängen (z.B. Aufbauhöhen, Anschlüsse etc.) erforderlich werden.

7.1.7 Gebäude aus der frühen Nachkriegszeit (Anfang der 50-er Jahre)

Während der Kriegszeit und Anfang der Nachkriegszeit wurden Gebäude mit einfachem Baukörper, ohne oder ausschließlich mit auskragenden Balkonen gebaut. Diese Gebäude weisen einen relativ niedrigen Fensterflächenanteil von ca. 18-22% auf. Auf Grund der mit dem einfachen Baukörper verbundenen niedrigen Anzahl der Wärmebrücken ist der PH-Standard bei diesen Gebäuden einfacher zu erreichen als bei denen aus späteren Baujahren, die mit vielen zurückgesetzten Balkonen und auskragenden Bauteilen ausgeführt wurden. Bei diesen Gebäuden hat eine Vergrößerung der nicht verschatteten und günstig orientierten Verglasungsflächen sehr positive Auswirkungen auf die Energiebilanz was eine Reduktion der Dämmstoffdicken erlaubt.

Die für die Einhaltung des Passivhausstandards erforderlichen mittleren U-Werte der Gebäudehülle und die Anforderungen an den Wärmeschutz der Außenwände sind für die betrachteten Varianten in Tabelle W14 dargestellt. Die Anforderungen an die übrigen Bauteile und an Wärmebrücken können den Tabellen im Anhang entnommen werden.

Tabelle W14: Erforderliche Wärmeschutzqualität zur Erreichung des Passivhausstandard für unterschiedliche geometrische und konstruktive Randbedingungen




| Geschosszahl | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 |
|---|--|--|--|--|---|
| | Einfache Gebäudehülle keine Balkone | Einfache Gebäudehülle keine Balkone | Einfache Gebäudehülle keine Balkone | Verschattung durch auskragende Balkonplatten | Einfache Gebäudehülle, erhöhter Fensteranteil |
| Fensterflächenanteil | 22% | 22% | 27% | 27% | 40% |
| A/ V- Verhältnis | 0,49 | 0,43 | 0,49 | 0,43 | 0,49 |
| 1. Anforderungen an den mittleren U-Wert der gesamten Umschließungsfläche | | | | | |
| Mittlerer U-Wert (W/m ² K) | 0,24 | 0,30 | 0,26 | 0,25 | 0,29 |
| 2. Anforderungen an die Außenwandkonstruktion der Hauptfassaden | | | | | |
| Dämmstoffdicke [mm] | 260 | 180 | 200 | 260 | 240 |
| λ (W/mK) | 0,032 | 0,032 | 0,022 | 0,032 | 0,022 |
| Dämmmaterial | EPS-032 | EPS-032 | Resol-HS | EPS-032 | Resol-HS |
| U-Wert (W/m ² K) | 0,12 | 0,16 | 0,10 | 0,12 | 0,09 |

7.1.8 Gebäude aus den 60-er Jahren (Baujahr 1958)

In den späten 50-er und frühen 60-er Jahren wurden vermehrt Balkone und Loggien in die Gebäudefassaden integriert. Dadurch sind diese Gebäude weniger kompakt und weisen auf Grund der Balkone erhöhte Schwachstellen durch Wärmebrücken auf. Zur Einhaltung des Passivhausstandards sind diese Schwachstellen aufwändig zu sanieren, d.h. mit Wärmedämmung einzupacken, zu entfernen und gegen thermisch getrennte Systeme zu ersetzen oder zu verglasen.

Die für die Einhaltung des Passivhausstandards erforderlichen mittleren U-Werte der Gebäudehülle und die Anforderungen an den Wärmeschutz der Außenwände sind für die betrachteten Varianten in Tabelle W15 dargestellt. Die Anforderungen an die übrigen Bauteile und an Wärmebrücken können den Tabellen im Anhang entnommen werden.

Tabelle W15: Erforderliche Wärmeschutzqualität zur Erreichung des Passivhausstandard für unterschiedliche geometrische und konstruktive Randbedingungen

| | | | | |
|--|--|------------------------|------------------------|-------------------|
| Mehrfamilienhaus Baujahr 1958 |  | | | |
| | | | | |
| Geschosszahl | 3 | 4 | 5 | 5 |
| Balkonsanierung | Gedämmte Balkonplatten | Gedämmte Balkonplatten | Gedämmte Balkonplatten | Verglaste Balkone |
| Fensterflächenanteil | 25% | 25% | 25% | 40% |
| A/ V- Verhältnis | 0,52 | 0,46 | 0,43 | 0,44 |



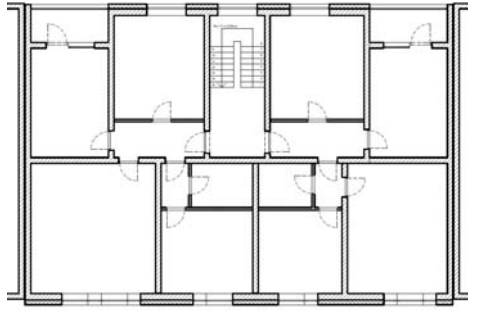
| | | | | |
|---|---------|---------|---------|-------|
| 1. Anforderungen an den mittleren U-Wert der gesamten Umschließungsfläche | | | | |
| Mittlerer U-Wert (W/m ² K) | 0,22 | 0,25 | 0,28 | 0,34 |
| 2. Anforderungen an die Außenwandkonstruktion der Hauptfassaden | | | | |
| Dämmstoffdicke [mm] | 280 | 260 | 240 | 240 |
| Wärmeleitfähigkeit (W/mK) | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,023 |
| Dämmmaterial | EPS-032 | EPS-032 | EPS-032 | Resol |
| U-Wert (W/m ² K) | 0,10 | 0,12 | 0,12 | 0,09 |

7.1.9 Gebäude aus den 60-er Jahren im innerstädtischen Bereich

In den innerstädtischen Bereichen stehen die Gebäude in Blockbebauung eng nebeneinander. Obwohl das A/V-Verhältnis dadurch relativ günstig wird, hat die innerstädtische Lage viele Nachteile, was die Energiebilanz der Gebäude betrifft. Vor allem die Verschattung durch die Nachbargebäude erschwert die Erfüllung der Passivhausanforderungen.

Das ausgewählte Gebäude verfügt über halb eingerückte Balkone, die zur Hofseite orientiert sind. Bei den Berechnungen wurde angenommen, dass diese Balkone verglast und als beheizte Wohnräume genutzt werden. Bei der Berechnung der Verschattung wurden beidseitig Nachbargebäude in einem Abstand von 20 m angenommen. Die Höhe der Nachbargebäude wurde der Höhe des Referenzgebäudes gleich gesetzt. Die für die Einhaltung des Passivhausstandards erforderlichen mittleren U-Werte der Gebäudehülle und die Anforderungen an den Wärmeschutz der Außenwände sind für die betrachteten Varianten in Tabelle W16 dargestellt. Die Anforderungen an die übrigen Bauteile und an Wärmebrücken können den Tabellen im Anhang entnommen werden.

Tabelle W16: Erforderliche Wärmeschutzqualität zur Erreichung des Passivhausstandard für unterschiedliche geometrische und konstruktive Randbedingungen

| | | | | |
|---|---|------|--|--------|
|  Mehrfamilienhaus Nachkriegszeit Blockbebauung |  | |  | |
| | Geschosszahl | 6 | 6 | 5 |
| Gebäudelänge | 19,5 m | 15 m | 19,5 m | 19,5 m |
| Fensterflächenanteil | 27% | 27% | 27% | 27% |
| A/ V- Verhältnis | 0,29 | 0,30 | 0,32 | 0,35 |
| 1. Anforderungen an den mittleren U-Wert der gesamten Umschließungsfläche | | | | |
| Mittlerer U-Wert (W/m ² K) | 0,34 | 0,33 | 0,32 | 0,27 |


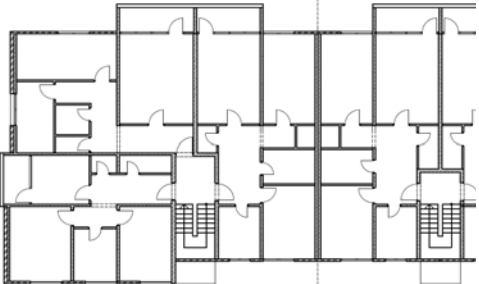
| 2. Anforderungen an die Außenwandkonstruktion der Hauptfassaden | | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|
| Dämmstoffdicke [mm] | 180 | 220 | 220 | 240 |
| Wärmeleitfähigkeit (W/mK) | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,032 |
| Dämmmaterial | EPS-035 | EPS-035 | EPS-035 | EPS-032 |
| U-Wert (W/m ² K) | 0,17 | 0,14 | 0,14 | 0,12 |

7.1.10 Gebäude aus den 70er-Jahren aus vorgefertigten Stahlbetonteilen

Bei diesen Gebäuden weisen die Fassadenflächen manchmal auf Grund der architektonischen Gestaltung der Platten Unebenheiten auf, die die Ausführung der Dämmmaßnahmen erschweren oder einschränken können. Diese Einschränkungen bleiben in den Berechnungen zunächst unberücksichtigt. Bei diesen Gebäuden wurden häufig neben den Balkonplatten auch die Balkonwände und die Geländer als durchlaufende Stahlbetonkonstruktionen ausgeführt. Daher kommt der Reduktion der Wärmebrücken bei diesem Gebäudetyp eine besonders große Bedeutung zu. Die Außenwände zwischen Wohnraum und Balkon wurden hier häufig aus Holzkonstruktionen errichtet, die leicht demontierbar sind. Daher können die Balkonflächen relativ einfach in die beheizte Gebäudehülle einbezogen werden. Neue Balkonflächen können als selbsttragende Konstruktion neben dem Baukörper errichtet werden.

Die für die Einhaltung des Passivhausstandards erforderlichen mittleren U-Werte der Gebäudehülle und die Anforderungen an den Wärmeschutz der Außenwände sind für die betrachteten Varianten in Tabelle W17 dargestellt. Die Anforderungen an die übrigen Bauteile und an die Wärmebrücken können den Tabellen im Anhang entnommen werden.

Tabelle W17: Erforderliche Wärmeschutzqualität zur Erreichung des Passivhausstandard für unterschiedliche geometrische und konstruktive Randbedingungen



| | | |
|--|---|--|
| Mehrfamilienhaus aus den 70-er Jahren (1968-80) Aus vorgefertigten Bauteilen |  |  |
| | | |
| Geschosszahl | 4 | 4 |
| Umgang mit den Balkonen | Verglaste Balkone (Wohnzimmer mit Balkonfläche vergrößert) | Bestehende Balkone abgesägt und entfernt (ehem. Trennwand vollverglast) |
| Fensterflächenanteil | 26% | 40% |
| A/ V- Verhältnis | 0,37 | 0,38 |
| 1. Anforderungen an den mittleren U-Wert der gesamten Umschließungsfläche | | |
| Mittlerer U-Wert (W/m ² K) | 0,38 | 0,41 |

| 2. Anforderungen an die Außenwandkonstruktion der Hauptfassaden | | |
|---|---------|---------|
| Dämmstoffdicke [mm] | 160 | 180 |
| Wärmeleitfähigkeit (W/mK) | 0,035 | 0,035 |
| Dämmmaterial | EPS-035 | EPS-035 |
| U-Wert (W/m ² K) | 0,20 | 0,19 |

7.1.11 Plattenbauten aus den 70-er Jahren

Da in Kapitel 7.1.10 bereits ein typisches viergeschossiges Zeilengebäude aus vorgefertigten Betonbauteilen betrachtet wurde, konzentrieren sich die Berechnungen für die Festlegung der erforderlichen Bauteilkonstruktionen hier auf ein typisches Punkthaus aus den 70-er Jahren. Die Plattenbauten wurden nach typisierten Plänen und mit Fertigteilsystemen geplant und gebaut. Der Baukörper ist sehr kompakt, wobei der wesentliche Unterschied zwischen diesen Gebäuden in der Art der Ausführung der Balkone liegt. Auf Grund des Konstruktionsaufbaus kommen halb zurückgesetzte Balkone praktisch nicht vor. Die Balkone sind entweder ganz zurückgezogene Loggien oder auskragende Konstruktionen. Es gibt aber auch Hochhäuser aus dieser Bauzeit, die ohne Balkone ausgeführt wurden. Die Loggien können durch eine Verglasung ohne große Probleme dem beheizten Wohnraum zugeschlagen werden. Die auskragenden Balkonplatten sind hinsichtlich der wärmetechnischen Sanierung allerdings deutlich schwieriger. In einem vier bis fünfgeschossigen Gebäude ist es noch relativ einfach die Balkonplatten abzusägen und durch neue selbsttragende Balkonkonstruktionen zu ersetzen, im Falle von Gebäuden mit neun und mehr Geschossen ist dies deutlich schwieriger. Trotz der genannten Probleme hinsichtlich der Beseitigung der Wärmebrücken ist der Passivhausstandard hier mit wesentlich geringeren Dämmmaßnahmen erreichbar als bei einem kleineren Gebäude. Dies liegt im Wesentlichen an dem sehr kompakten Baukörper, der ein sehr günstiges A/V-Verhältnis aufweist und somit zu deutlich geringeren Transmissionswärmeverlusten je Nutzflächeneinheit führt.

Tabelle W18: Erforderliche Wärmeschutzqualität zur Erreichung des Passivhausstandard für unterschiedliche geometrische und konstruktive Randbedingungen

| | | | | | |
|-----------------------------------|---|--|----------------------------|--|----------------------------|
| Plattenbau 70-er Jahre |  |  | | | |
| | Grundriss, Quelle: IEMB Plattenbautypen, Plattenbau 6,3 t der Typenserie WBS 70/E Punkthaus 11-geschossig | | | | |
| Geschosszahl | 11 | 11 | 11 | 5 | 5 |
| Umgang mit den Balkonen | Bestehende Balkone erhalten, nur Wärmebrücke reduziert | Keine auskragenden Balkone | Keine auskragenden Balkone | Bestehende Balkone erhalten, nur Wärmebrücke reduziert | Keine auskragenden Balkone |

| | | | | | |
|---|---------|------|------|---------|---------|
| Fensterflächenanteil | 25% | 25% | 40% | 25% | 25% |
| A/V- Verhältnis | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,31 | 0,31 |
| 1. Anforderungen an den mittleren U-Wert der gesamten Umschließungsfläche | | | | | |
| Mittlerer U-Wert (W/m ² K) | 0,55 | 0,60 | 0,67 | 0,43 | 0,49 |
| 2. Anforderungen an die Außenwandkonstruktion der Hauptfassaden | | | | | |
| Dämmstoffdicke [mm] | 120 | 100 | 140 | 180 | 100 |
| Wärmeleitfähigkeit (W/mK) | 0,035 | 0,04 | 0,04 | 0,035 | 0,035 |
| Dämmmaterial | EPS-035 | EPS | EPS | EPS-035 | EPS-035 |
| U-Wert (W/m ² K) | 0,27 | 0,37 | 0,27 | 0,19 | 0,32 |

Die für die Einhaltung des Passivhausstandards erforderlichen mittleren U-Werte der Gebäudehülle und die Anforderungen an den Wärmeschutz der Außenwände sind für die betrachteten Varianten in Tabelle W18 dargestellt. Die Anforderungen an die übrigen Bauteile und an Wärmebrücken können den Tabellen im Anhang entnommen werden. Bei den Berechnungen wurde vom ungünstigsten Fall ausgegangen, dass die Gebäudehülle aus einer reinen Stahlbetonkonstruktion (ohne Sandwichpaneelen mit Kerndämmung) besteht.

7.1.12 Wärmetechnische Beurteilung der Gebäudehülle bezüglich der Sanierungsmöglichkeiten bis zum Passivhausstandard

Die Kapitel über die mit dem PHPP durchgeführten Berechnungen zeigen, dass die für den Passivhausstandard notwendigen wärmetechnischen Maßnahmen sehr stark von der gegebenen Bausubstanz und der Kubatur der Bestandsgebäude abhängen. Bei gewissen geometrischen Verhältnissen (geringe Geschosszahl mit hohem A/V-Verhältnis) und unter bestimmten Randbedingungen (Wärmebrücken zum Keller, von Balkonplatten etc.) kann der Passivhausstandard ohne extremen Eingriff in die Gebäudesubstanz nicht erreicht werden. Bei diesen Gebäuden sollte eine Sanierung mit Passivhauskomponenten mit einem weniger ambitionierten Energiestandard angestrebt werden, wobei auf konventionelle Heizungsarten voraussichtlich nicht verzichtet werden kann. Bei Einhaltung des Passivhausstandards mit einem Heizwärmebedarf von 15 kWh/m²a kann der Wärmebedarf in der Regel über die Lüftungsanlage mit dem Frischluftbedarf gedeckt werden. Im Rahmen der wärmetechnischen Untersuchungen für verschiedene Gebäudetypen konnte ein klarer Zusammenhang zwischen bestimmten Gebäudemerkmalen und den für den Passivhausstandard erforderlichen Dämmmaßnahmen festgestellt werden. Hierfür sind die charakteristischen Gebäudemerkmale:

- Das A/V-Verhältnis (Kompaktheit des Gebäudes)
- Der Fensterflächenanteil
- Der Anteil der verschatteten Verglasungsflächen (z.B. durch auskragende Balkone oder durch Nachbargebäude in innerstädtischer Lage etc.).

Die wärmetechnische Qualität der gesamten Gebäudehülle lässt sich bekanntlich über den sog. mittleren U-Wert beschreiben. Der Zusammenhang zwischen den genannten charakteristischen Gebäude-merkmalen und dem zur Einhaltung des Passivhausstandards benötigten mittleren U-Wert lässt sich als Trendlinie in einer Grafik für jeden Gebäudetyp in Abhängigkeit vom A/V-Verhältnis darstellen. Für jeden Gebäudetyp wurde zusätzlich ein Grenzwert für den minimal erreichbaren mittleren U-Wert ermittelt (grüne Linie im Diagramm). Mittlere U-Werte unter dieser Grenze lassen sich mit herkömmlichen Dämmmaterialien (EPS Hartschaum, $\lambda = 0.032 \text{ W/mK}$) aus konstruktiven Gesichtspunkten (Geschosshöhe im Keller, Balkontüren und Fenster neben Balkonwänden etc.) nicht mehr realisieren. Die maximal mögliche Dämmstoffdicke wurde hierbei auf 30 cm begrenzt. Mit innovativen Dämmsystemen wie z.B. Vakuum-Dämmplatten (VIP) kann der Grenzwert noch etwas weiter nach unten verschoben werden (rote Linie). Die Lage der Grenzwerte wird maßgeblich vom Fensterflächenanteil des Gebäudetyps bestimmt. Für die Fenster wurde von handelsüblichen Passivhausfenstern mit Dreifachverglasung und gedämmtem Rahmen ausgegangen. Die ermittelten charakteristischen Kurven ermöglichen eine schnelle erste Einschätzung, ob und mit welchem Aufwand ein Gebäude zum Passivhausstandard saniert werden kann. Im Rahmen der bisherigen Untersuchungen wurden die Beurteilungsgrundlagen für die Gebäudetypen aus der Zeitperiode zwischen 1918 und 1983 erstellt. Bei den Berechnungen wurden die für den Vergleich der Gebäudetypen nicht relevanten weiteren Randbedingungen wie Luftdichtigkeit der Gebäudehülle, Luftwechselzahl, Effizienz der Wärmerückgewinnung jeweils mit den gleichen Werten berücksichtigt. Die Abbildung W15 bis W19 zeigen die charakteristischen Kurven für Gebäude aus der Zeitperiode zwischen 1958 und 1978 mit verschiedenen Baumerkmale.

Gebäudetyp:
 Baujahr: 1958-1978
 Freistehend
 Fensterflächenanteil ca. 25-27%
 mit auskragenden Balkonen

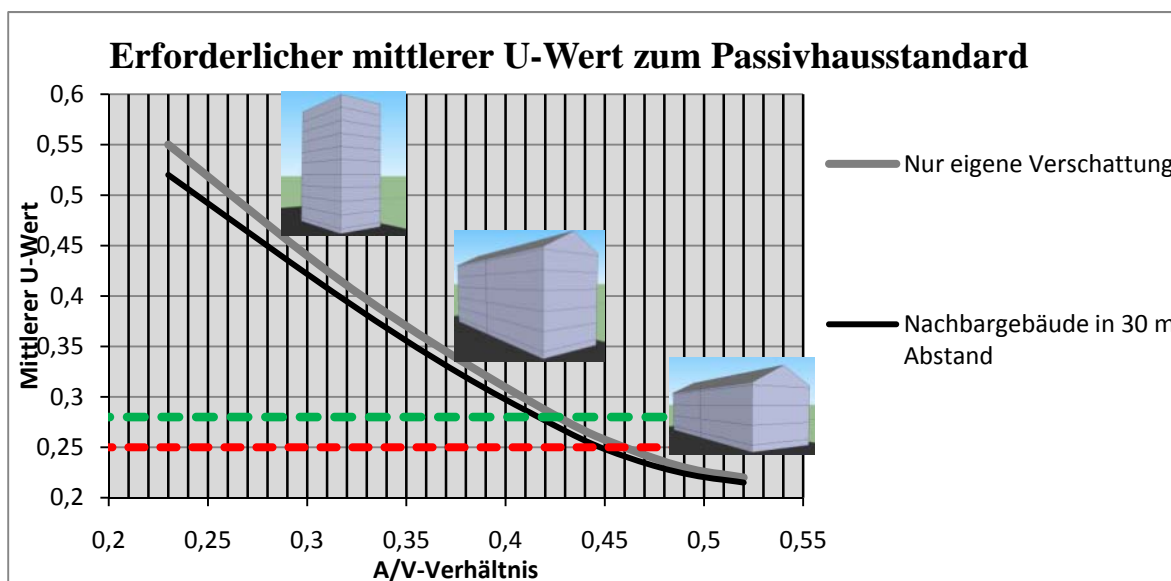


Abbildung W15: Erforderlicher mittlerer U-Wert in Abhängigkeit vom A/V-Verhältnis, Gebäudetyp: Freistehend mit ca. 25% Fensterflächenanteil und Verschattung durch Balkone

Gebäudetyp:
 Baujahr: 1958-1978
 Freistehend
 Fensterflächenanteil ca. 22%
 Ohne Balkone

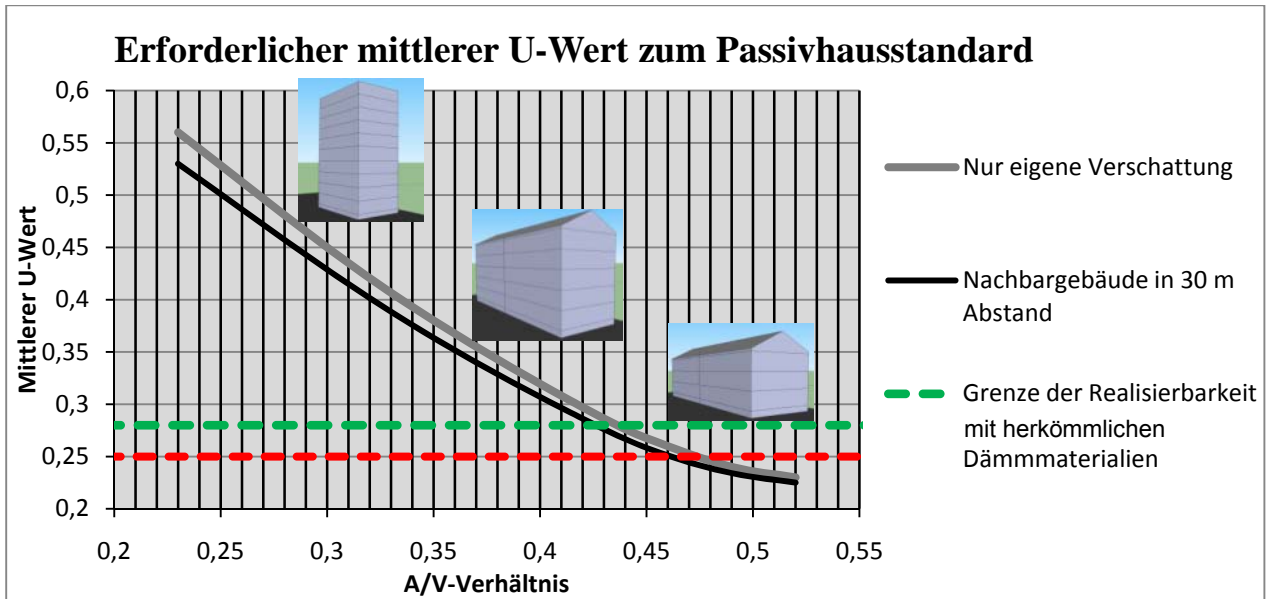


Abbildung 2: Erforderlicher mittlerer U-Wert in Abhängigkeit vom A/V-Verhältnis des Gebäudes, Gebäudetyp: Freistehend mit ca. 22% Fensterflächenanteil und keine Balkone

Gebäudetyp:
 Baujahr: 1958-1978
 Freistehend
 Fensterflächenanteil ca. 25-27%
 Ohne Verschattung durch Balkone (Verglaste Balkone)

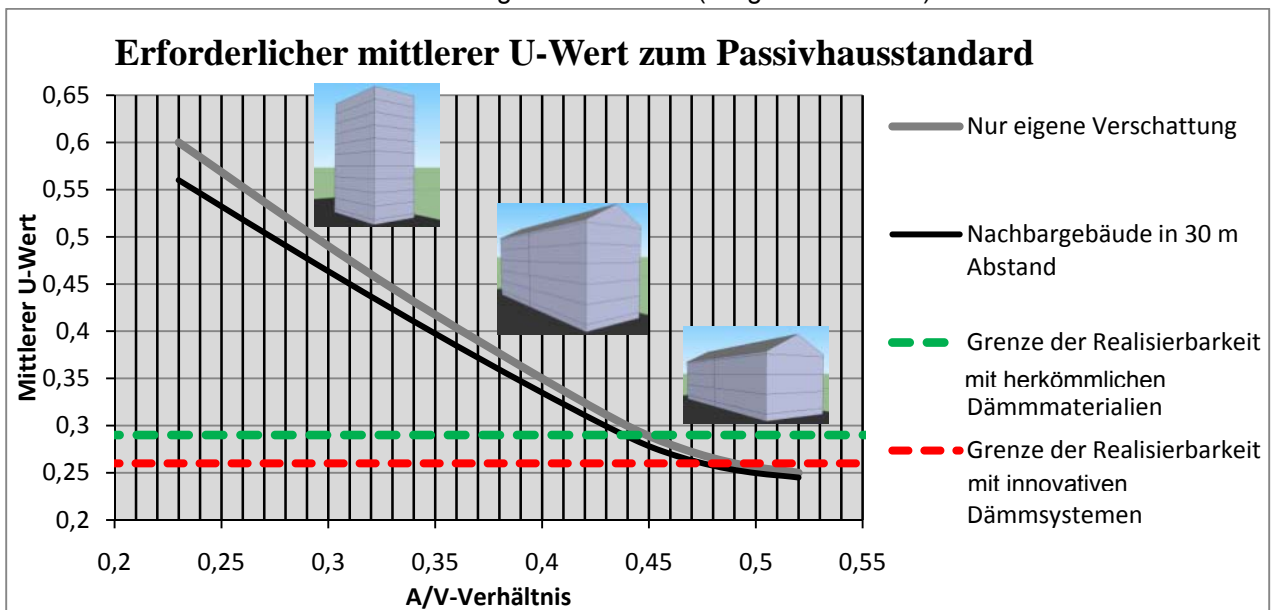


Abbildung W17: Erforderlicher mittlerer U-Wert in Abhängigkeit vom A/V-Verhältnis des Gebäudes, Gebäudetyp: Freistehend mit ca. 25-27% Fensterflächenanteil und keine Balkone

Gebäudetyp:
 Baujahr: 1958-1978
 Freistehend
 Fensterflächenanteil ca. 40%
 Ohne Verschattung durch Balkone (Verglaste Balkone)

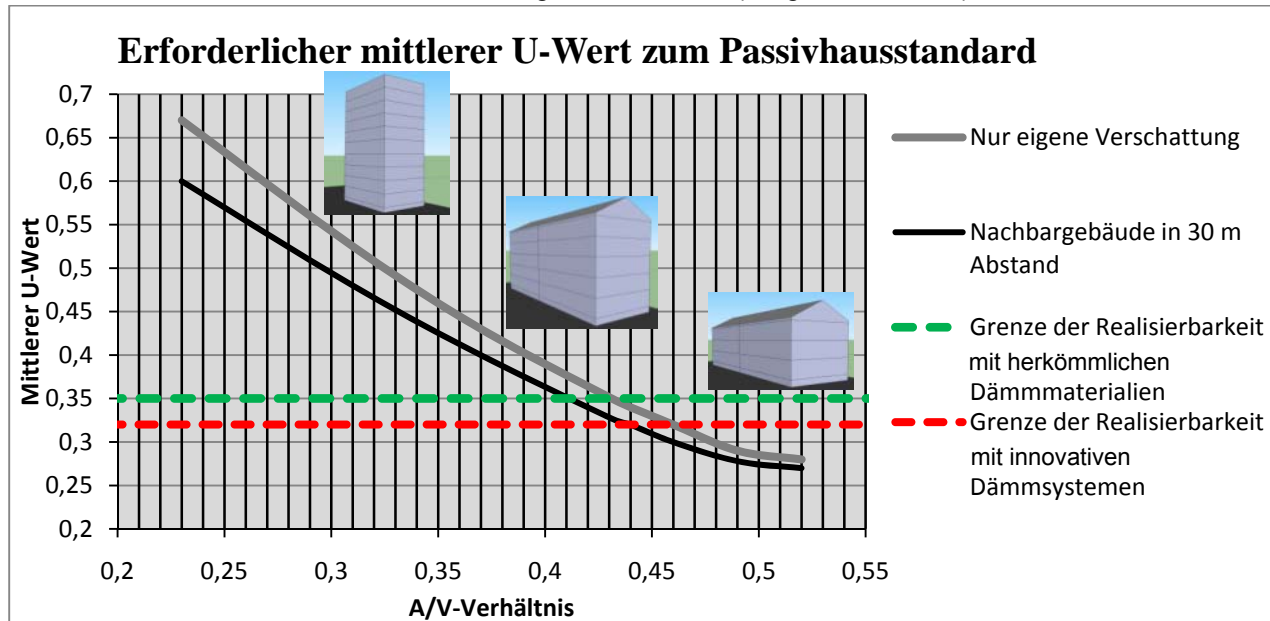


Abbildung W18: Erforderlicher mittlerer U-Wert in Abhängigkeit vom A/V-Verhältnis des Gebäudes, Gebäudetyp: Freistehend mit ca. 40 % Fensterflächenanteil und keine Balkone

Gebäudetyp:
 Baujahr: 1958-1978
 Blockbebauung
 Fensterflächenanteil ca. 25-27%

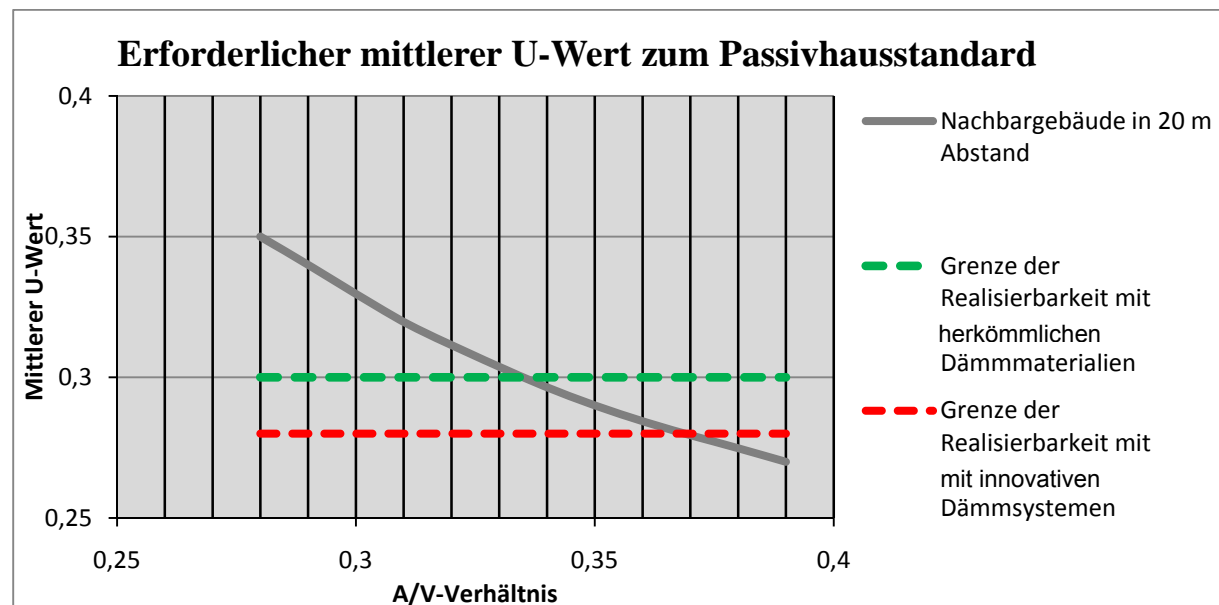


Abbildung W19: Erforderlicher mittlerer U-Wert in Abhängigkeit vom A/V-Verhältnis des Gebäudes, Gebäudetyp: Freistehend mit ca. 40 % Fensterflächenanteil und keine Balkone

7.1.13 Festlegung von Standardaufbauten von Außenwänden für den Passivhausstandard

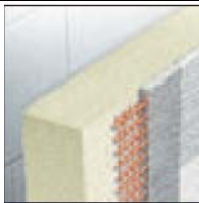

Die Festlegung der erforderlichen Dämmstoffdicken bei außenseitigen Dämmungen orientiert sich an dem für Passivhäuser typischen U-Wert der Außenwände von $U_{AW} = 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$. Neben der Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials hat auch die Art der Befestigung der Wärmedämmung und der Fassadenbekleidung einen deutlichen Einfluss auf den resultierenden U-Wert der Außenwandkonstruktion. Außerdem sind weitere Wärmebrücken, wie z. B. im Bereich der Brandriegel der Fassade zu berücksichtigen. Besonders wichtig ist die Betrachtung dieser Wärmebrücken bei der Verwendung der Vakuum-Dämmplatten, da sie auf Grund der geringen Dämmstoffdicke und der sehr geringen Wärmeleitfähigkeit hier deutlich stärker ins Gewicht fallen. Des Weiteren sind die Einflüsse der Stoßfugenausbildung zwischen den Dämmplatten zu beachten und zu berücksichtigen. Diese Stoßfugen sind bei einigen Vakuumdämmpaneelen auch mit anderen, herkömmlichen Dämmmaterialien gelöst.



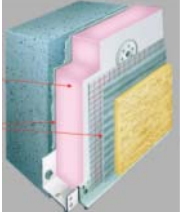

Bei Dämmmaßnahmen auf der Innenseite der Außenwandflächen wurde die Dicke der Innendämmung auf 80-100 mm begrenzt, um die Reduktion der Wohnfläche möglichst gering zu halten. Neben dem U-Wert gibt es hier weitere Aspekte, die bei der Auswahl des Dämmsystems berücksichtigt werden müssen. Diese sind die wasserdampftechnischen Eigenschaften der Konstruktion und der Schutz der Dämmung vor mechanischer Beanspruchung. Vakuum-Dämmplatten haben zum Beispiel bei innenseitiger Verwendung den großen Nachteil, dass sie vor Beschädigungen weitestgehend geschützt werden müssen. Durch eine einzige Durchdringung (z. B. Befestigung eines Bildes) verlieren Vakuum-Dämmplatten ihre extrem guten Dämmeigenschaften fast vollständig. Die dampftechnischen Eigenschaften des Dämmmaterials bestimmen den Schichtaufbau der Innendämmung.

Wandaufbauten mit herkömmlichen Dämmmaterialien

Da der resultierende U-Wert der Wandkonstruktion von vielen Faktoren abhängig ist (wie z.B. Wandtyp, Anzahl der Dübel, Wärmebrücken), wurde bei der Ermittlung der erforderlichen Dämmdicke von einer ungestörten Wandfläche ausgegangen, die mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) gedämmt wird. Die Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks liegt dabei bei $\lambda=0,42 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Bimsstein). In der Praxis werden Sanierungsmaßnahmen bis zum Passivhausstandard nur sehr selten mit hinterlüfteter Fassadenbekleidung durchgeführt. Diese Konstruktionen wurden daher in den Untersuchungen vernachlässigt. Für die ersten akustischen Untersuchungen wurden folgende charakteristischen Grundaufbauten für die Außenwandkonstruktionen mit markt gängigen Wärmedämmverbundsystemen festgelegt:

Tabelle W19: Ausgewählte Außenwandaufbauten mit gängigen Wärmedämmverbundsystemen

| | | | | | |
|---------------|---|---|--------------------------|---|---|
| PUR-Dämmstoff | Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,028 \text{ W/m}^2\text{K}$ |  | Mineralwolle Dämmplatten | Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,036 \text{ W/m}^2\text{K}$ |  |
| | Erforderliche Dämmstoffdicke $d = 220 \text{ mm}$ | | | Erforderliche Dämmstoffdicke $d = 280 \text{ mm}$ | |

| | | | | | |
|--|---|---|-----------------------------------|---|---|
| Elastifizierter EPS-Hartschaum (z. B. NEOWALL) | Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,032 \text{ W/m}^2\text{K}$ |  | Mineralwolle-Lamellen-dämmplatten | Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,041 \text{ W/m}^2\text{K}$ |  |
| | Erforderliche Dämmstoffdicke $d = 240 \text{ mm}$ | | | Erforderliche Dämmstoffdicke $d = 320 \text{ mm}$ | |
| Resol-Hartschaum Weber.Therm Plus Ultra | Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,022 \text{ W/m}^2\text{K}$ |  | Holzfaser-dämmplatten | Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,045 \text{ W/m}^2\text{K}$ |  |
| | Erforderliche Dämmstoffdicke $d = 180 \text{ mm}$ | | | Erforderliche Dämmstoffdicke $d = 340 \text{ mm}$ | |

Dämmschichtdicke

Die Dämmplatten stehen nicht in unbegrenzter Dicke zur Verfügung. Obwohl die Dämmplatten oft auch mehrlagig gelegt werden können, gibt es Zulassungen für die verschiedenen Wärmedämmverbundsysteme nur bis zu festgelegten Dämmschichtdicken. Die maximalen Dämmschichtdicken sind hersteller- und produktabhängig. Da die Nachfrage für große Dämmschichtdicken immer größer wird, entwickeln sich die Wärmedämmverbundsysteme dementsprechend schnell. Es gibt mittlerweile immer mehr Systeme, die Zulassungen für eine Dämmschichtdicke über 300 mm aufweisen. Eine Dicke über 200 mm gilt jedoch normalerweise immer noch als Sonderdicke, die gesondert bestellt werden muss und daher auch mit Zusatzkosten verbunden ist. Neben den Grenzen der Herstellung beschränken auch die möglichen Dübellängen die machbare Dicke der Dämmschichten. Die mögliche Dämmschichtdicke ist dadurch üblicherweise auf maximal 320-340 mm beschränkt. Die notwendige Befestigungsart der Dämmplatten ist im Wesentlichen von der Qualität der Unterkonstruktion abhängig. Bei großen Unebenheiten in der Oberfläche der Bestandswand kommen oft Schienensysteme zum Einsatz. Eine Sonderart der Dämmsysteme sind die sogenannten Zellulose-Dämmungen. Diese sind nicht in feste Dämmplatten gepresst, sondern werden lose in Spalten zwischen Schalungen geschützt. Bei besonders unebenen Wandkonstruktionen mit geringer Gebäudehöhe bieten diese Systeme eine vorteilhafte Variante. In diesem Fall muss jedoch eine Tragkonstruktion (meistens aus Holz) vor der Fassade errichtet werden. Hier muss wieder mit einem Wärmebrückenzuschlag auf Grund der durchlaufenden Träger, die zu der Wand befestigt sind, gerechnet werden.

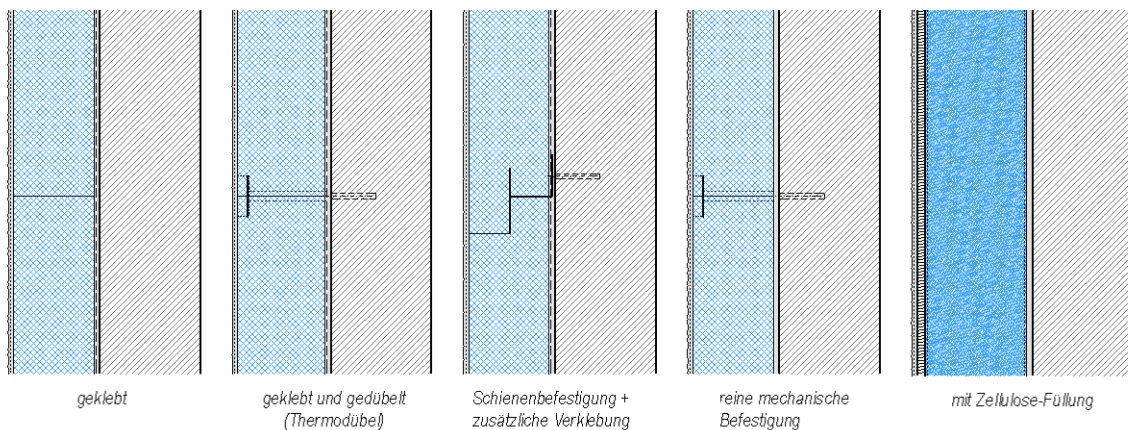


Abbildung W20: Befestigungsmöglichkeiten der WDVS-Systeme

Einfluss der Dübelung

Die Wärmedämmplatten werden mit der Tragwand zusätzlich zur Klebung durch eine Dübelung mechanisch befestigt. Für die Dübelung gibt es prinzipiell zwei Varianten: die konstruktive Dübelung und die statisch relevante Dübelung. Bei der konstruktiven Dübelung dient der Dübel nur als zusätzliche Befestigung, die Verklebung allein muss die entstehende Zugkräfte aufnehmen können. Bei der statisch relevanten Dübelung nehmen die Dübel die Zugkräfte auf. Für Dämmplatten aus Mineralwolle ist z.B. eine statisch relevante Dübelung immer erforderlich. Die Dübel stellen punktuelle Wärmebrücken in der Dämmebene dar. Obwohl bereits sogenannte Thermodübel mit deutlich reduzierter Wärmeleitfähigkeit entwickelt wurden, kann der Einfluss der Befestigungspunkte nicht ganz vernachlässigt werden. Für die Berechnungen des Wärmebrückenzuschlags für die Dübelung wird die benötigte Anzahl der Befestigungspunkte ermittelt. Diese ist von der Windlast und vom Material der Wärmedämmung abhängig.

Seit dem 01.01.2007 ist in Deutschland die notwendige Dübelzahl nach DIN 1055-4 zu ermitteln. Rechnerisch werden die Dübel nur zur Übertragung der Windsogkräfte angesetzt. Die anderen auftretenden Lastfälle (Eigengewicht, Temperatur, usw.) sind von der Verklebung der Dämmplatten aufzunehmen. In DIN 1055-4 ist Deutschland in vier verschiedene Windzonen unterteilt. Im Land Baden-Württemberg sind z.B. die zwei mäßigen Windzonen (Windzone 1 und 2) vorherrschend. Nach DIN 1055-4 kann die Anzahl der Dübel grundsätzlich nach drei verschiedenen Verfahren ermittelt werden. Die üblichen Lastarten für WDVS-Systeme liegen bei 0,15-0,17 kN (EPS-Mineralwolle). Diese ergeben bei einer Gebäudehöhe zwischen 10 m und 18 m eine notwendige Dübelzahl von ca. 8 Stück und über 18 m ca. 10 Stück pro m² Wandfläche. Der punktförmige Wärmeverlustkoeffizient beträgt je nach Dübelklasse $\kappa = 0,008-0,002$ W/K. Der versenkbare Thermodübel der Fa. Hasit (HASIT STR-U 8/60 Schraubdübel, für Dämmdicken zwischen 80 - 260 mm) weist einen Wärmeverlustkoeffizient von $\kappa = 0,0016$ W/K auf. Mit einer Dübelzahl von 8 Stück pro m² Wandfläche ergibt sich damit ein Wärmebrückenzuschlag von 0,013 W/m²K. Dies bedeutet eine Erhöhung des U-Wertes um rd. 10 % bei einer passivhaustauglichen Wandkonstruktion.

Brandriegel an der Fassade

Es gibt auch brandschutztechnische Anforderungen, die die Wärmedämmung der Fassade erfüllen muss. Diese baurechtlichen Anforderungen sind in den Landesbauordnungen und in der Musterhochhausrichtlinie geregelt. Die folgende Tabelle fasst die Anforderungen an die Brandschutzklasse der Fassadendämmung zusammen:

| Geltungsbereich | Gebäudeart und -größe | Anforderung an das Fassadensystem |
|----------------------------------|---|--|
| Gebäude normaler Art und Nutzung | Gebäude geringer Höhe (< 7m) GK 1 bis 3 | normal entflammbar (B2 nach DIN 4102) |
| | Gebäudehöhe > 7m bis 22m GK 4 bis 5 | schwer entflammbar (B1 nach DIN 4102) |
| | Gebäudehöhe > 22m (Hochhäuser) | nicht brennbar (A nach DIN 4102) |

Ein Brandriegel (oder Sturzschutz) ist einzusetzen bei:

- mehr als 2 Geschossen
- WDVS aus Dämmstoff mit Baustoffklasse B1
- Dämmstoffdicken $100 \text{ mm} < d < 300 \text{ mm}$

Der Brandriegel hat Vorteile gegenüber dem Sturzschutz, weil Rollladenkästen und Jalousien dann unbeschränkt eingebaut werden können. Wenn Fensterrahmen ganz oder teilweise im Dämmstoff liegen, dann ist dies ein brandschutztechnisch besonderer Fall. Beim Sturzschutz müssen die vertikalen Fensterlaibungen auch mit nicht brennbarem Material gedämmt werden. Ein umlaufender Brandriegel muss nur per zwei Geschosse ausgeführt werden und nicht in jeder Etage. Die Mindesthöhe des Brandriegels beträgt 20 cm. Er muss nicht direkt auf dem Sturz ausgeführt werden, sondern kann bis zu 50 cm oberhalb der Fenster in der Fassadenfläche liegen. Auf- oder Abtreppen darf mit Versätzen bis zu 1 m Höhe ausgeführt werden. Beim Balkon kann die Balkonplatte die Funktion des Brandriegels übernehmen, wenn sie mindestens 200 mm hoch und nicht überdämmt ist. Vertikale Fensterbänder müssen umlaufend mit nicht brennbaren Streifen eingehaust werden.

Nicht brennbares Dämmmaterial ist z. B. Mineralwolle (Rohdichte: 80 bis 150 kg/m^3 Brandverhalten: A1). Die Mineralwolle-Streifen müssen vollflächig geklebt oder verdübelt werden (mit max. 60 cm Abstand zwischen den Dübeln). Falls ein Brandriegel aus Mineralwolle eine schlechtere Wärmeleitfähigkeit hat, als die Fassadendämmung, dann bedeutet das eine Wärmebrücke in der Fassadenkonstruktion. Ein Brandriegel mit $\lambda = 0,040 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ in einer Dämmung mit $\lambda = 0,032 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ bei der Deckenstirnseite mit einer Dicke von 240 mm ausgeführt bedeutet eine Wärmebrücke von $0,01 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Wandaufbauten mit innovativen Dämmmaterialien

Zu den innovativen Dämmsystemen gehören derzeit die sog. Vakuum-Dämmplatten (VIP). Die Vakuumdämmung funktioniert nach dem Prinzip einer Isolierkanne. Durch das Vakuum wird sehr wenig Wärme transportiert, es findet keine Konvektion im Dämmstoff statt. Der Kern aus pyrogener Kieselsäure hat an sich schon eine sehr niedrige Wärmeleitgruppe von $0,020 \text{ W/m}^2\text{K}$, durch die Umhüllung mit einer Hochbarrierefolie und dem Herstellen des Vakuums wird bei den ungestörten Plattenflächen eine Wärmeleitfähigkeit von $0,003\text{-}0,005 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreicht.

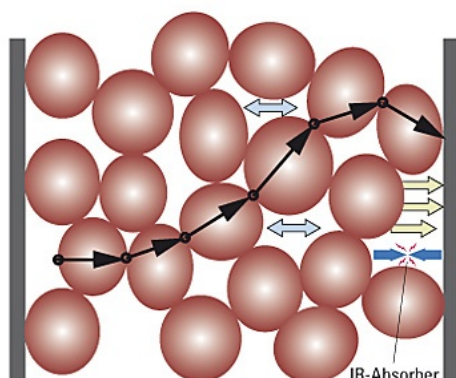


Abbildung W21: Prinzip der Wärmeleitung in den Vakuum-Dämmplatten (links, www.vakuum-isolierung.de) und Standardaufbau einer Dämmplatte: Kern aus pyrogener Kieselsäure und Hochbarrierehüllfolie (rechts, va-q-tec).

Die Hochbarrierefolie muss dauerhaft luft- und dampfdicht bleiben. Diese erhalten daher eine dünne Aluminiumschicht, die die Dampfdichtheit gewährleistet. Da das Aluminium über eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit verfügt, entsteht im Randbereich der Dämmplatten eine nicht zu vernachlässigende Wärmebrücke. Beim Einsatz von Wärmedämmsystemen aus Vakuumdämmpaneelen müssen Wärmebrücken im Bereich der Plattenstöße betrachtet und über Wärmebrückenzuschläge berücksichtigt werden. Zurzeit dürfen daher diese Platten nach der Zulassung nur mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,008 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ berücksichtigt werden. Damit sind sie aber immer noch rund dreimal so leistungsfähig wie die besten Hartschaumplatten (Resol-Hartschaum $\lambda = 0,022 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$).

Die Wärmebrücken im Bereich der Plattenstöße können durch eine zweilagige Verlegung deutlich reduziert werden. Diese verhindert allerdings eine mechanische Befestigung der äußeren Dämmschicht. Neben den guten Dämmeigenschaften weisen die Vakuum-Dämmplatten jedoch auch entscheidende Nachteile auf. Ein großer Unterschied zu den herkömmlichen Dämmstoffen liegt in den Befestigungsmöglichkeiten der Platten. Da diese nicht durchdrungen werden dürfen, ist eine mechanische Befestigung nur durch vorgefertigte Löcher im Randbereich oder durch Schienensysteme möglich. An jedem Befestigungspunkt, sowie bei jeder Befestigungslinie entstehen Wärmebrücken, die bei der Berechnung des U-Wertes berücksichtigt werden müssen. Weitere wesentliche Nachteile sind die erforderliche Vorfertigung von Anschlusselementen und der hohe Preis. Letzterer resultiert aus den hohen Herstellungskosten des Füllmaterials.

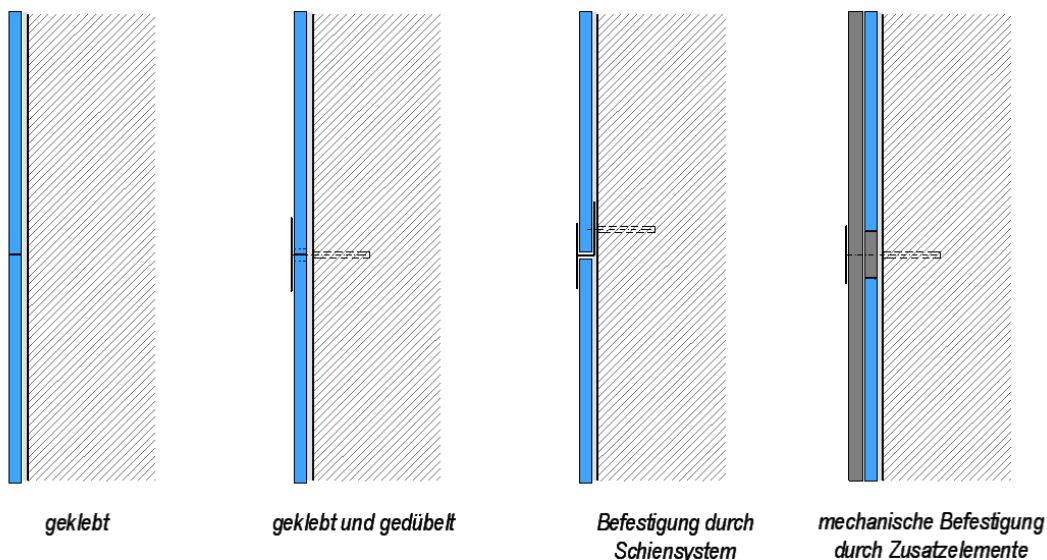


Abbildung W22: Befestigungsmöglichkeiten der Vakuum-Dämmplatten

Vakuum-Dämmplatten mit Füllung aus pyrogener Kieselsäure stehen je nach Hersteller und je nach Produkt in den folgenden Plattendicken zur Verfügung: 10 mm, 15 mm, 20 mm, 30 mm und 40 mm. Es existieren auf dem Markt bereits Vakuum-Platten mit Perlite-Füllung mit einer Plattendicke von 50 mm. Diese sind jedoch in der Entwicklungsphase und verfügen über höhere Wärmeleitfähigkeiten und ein schlechteres Alterungsverhalten als Platten mit pyrogener Kieselsäure. Die verschiedenen Hersteller gehen mit unterschiedlichen Produktstrategien auf den Markt. Daher sind sowohl „nackte“ Dämmplatten sowie kaschierte Dämmplatten und Platten mit unterschiedlichen Dämmkernen auf dem Markt zu finden.

Die Firma Va-Q-tec hat als Produktinnovation sogenannte schwarze Platten entwickelt, die ihre schwarze Farbe durch eine Umhüllung der mit Alu beschichteten Folie mit einem Glasgewebe erhalten. Das Glasvlies verbessert das Brandverhalten der Platte (B2) und bildet gleichzeitig eine verputzbare Schicht was ein direktes Verputzen der Platten ermöglicht. Eine weitere Neuentwicklung sind Vakuum-Dämmplatten mit einem Dämmkern aus geschütteter pyrogener Kieselsäure (Produktname: va-Q-Plus B). Diese Platten weisen eine sehr günstige Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 0,0035 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) und ein gutes Alterungsverhalten auf, haben jedoch keine scharfen Kanten und die Oberflächen der Platten sind meistens uneben. Die Platte va-Q-plus B kann mit Stufenfalz hergestellt werden, so dass Paneele lückenlos überlappend verlegt werden können. Die mechanische Befestigung durch Dübel kann in den Stufenfalz, überdeckt erfolgen. Die maximale Plattendicke beträgt zur Zeit 20 mm.

Neben den nackten Platten gibt es viele kaschierte VIP auf dem Markt. Diese sind mit verschiedenen Dämmmaterialien oder Putzträgerplatten umhüllt. Die Umhüllung bietet Schutz gegen mechanische Beanspruchung während des Transports, der Ausführung sowie während der gesamten Lebensdauer der Platten. Die Umhüllung kann in vielen Formen erfolgen, es gibt vorgefertigte Verbundplatten, bei denen die Kanten der VIP ungeschützt bleiben und es gibt andere bei denen die ganze Platte umhüllt wird und damit die Plattenstöße deutliche Wärmebrücken verursachen. Im U-Wert der Konstruktion werden diese Wärmebrücken rechnerisch berücksichtigt.



Abbildung W23: Vakuum-Dämmplatte va-Q-plus B der Fa. Va-Q-tec, Anwendung bei einer denkmalgeschützten Fassade (rechts) und Verlegung mit Überlappung (links)

Die Vorteile der mit Dämmstoffen kaschierten Platten liegen in der einfacheren Verarbeitung der Platten auf der Baustelle, da herkömmliche Befestigungsmethoden und gewöhnliche Putzarbeiten eingesetzt werden können. Das Dämmsystem lässt sich somit prinzipiell verarbeiten wie ein herkömmliches WDVS. Der mechanische Schutz der Platten führt zu geringeren Schäden während der Ausführung und der gesamten Lebensdauer des WDVS. Mit Wärmedämmstoffen beschichtete Vakuum-Dämmplatten werden z. B. durch die Fa. Variotec angeboten. Im Dämmsystem QASA max sind die VIP mit herkömmlichen EPS-Hartschaum-Platten bedeckt. Die Dämmeigenschaften dieser Systeme können durch die Verwendung von leistungsfähigeren Dämmmaterialien als den elastifizierten EPS-Dämmplatten ($\lambda = 0,032-0,035 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), z. B. durch PUR-Hartschaum ($\lambda = 0,028 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) oder Resol-Hartschaum ($\lambda = 0,022 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), weiter reduziert werden.

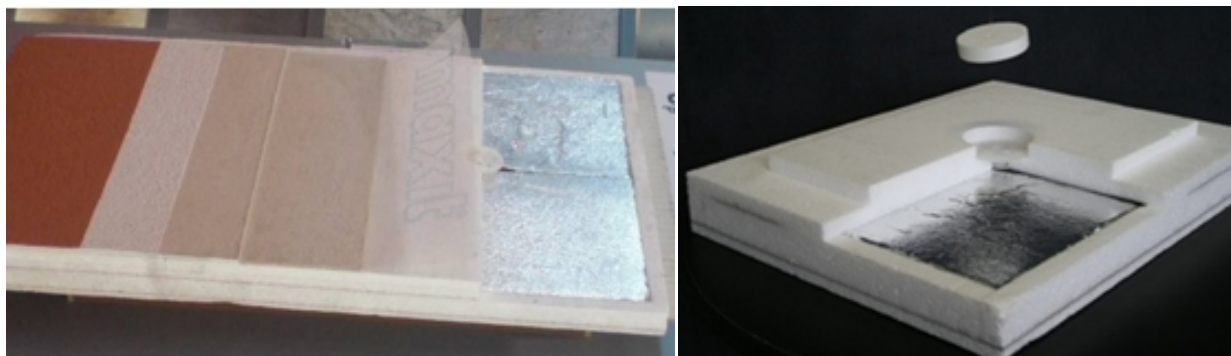


Abbildung W24: Vakuum-Dämmsystem QASA max der Fa. Variotec, Gesamtdicke 75 mm,
 $U_{\text{Planerisch}}=0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Im sogenannten LockPlate-System der Fa. Weber sind die VIP mit EPS-035 Hartschaum umhüllt. Die Plattenstöße werden ebenfalls mit umhüllten VIP abgedeckt (siehe Abbildung). Die Flächen und Stoßfugen, die nicht mit den standardisierten Plattengrößen belegt werden können, werden mit Resol-Hartschaum ausgeführt.



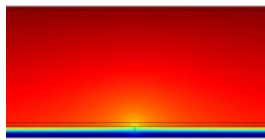
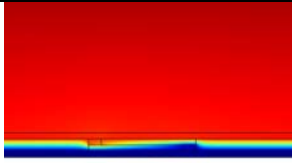
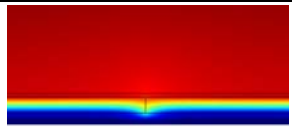
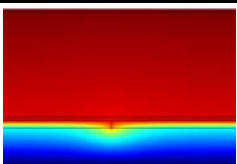
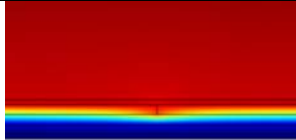
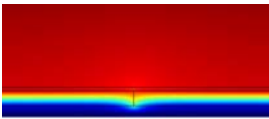
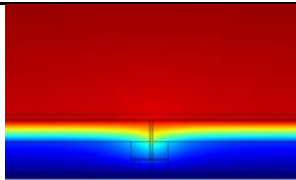
Abbildung W25: Das LockPlate-Dämmsystem der Fa. Weber, Plattendicke 90 mm (VIP 30 mm):
 $U_{\text{Planerisch}}=0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, Plattendicke 110 mm (VIP 40 mm): $U_{\text{Planerisch}}=0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

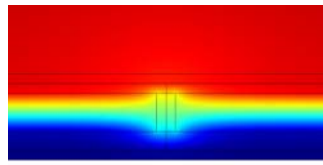
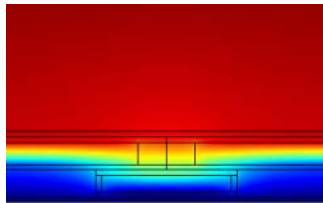
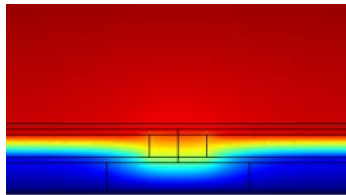
In Tabelle W20 sind die sich ergebenden U-Werte und Verlustfaktoren für typische Aufbauten mit Vakuum-Dämmplatten dargestellt. Die Wandkonstruktion wurde dabei mit einer Dicke von 30 cm und mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda=0,42 \text{ W}/(\text{mK})$ angenommen. Die Wärmeleitfähigkeit der Putzschichten wurde mit $\lambda=0,87 \text{ W}/(\text{mK})$ berücksichtigt. Die Wärmeleitfähigkeit des Dämmkerns aus pyrogener Kieselsäure beträgt $\lambda=0,004 \text{ W}/(\text{mK})$. Die Hüllfolie besteht aus einer Alu-Verbundfolie, die Dicke der Alu-Schicht beträgt $6 \mu\text{m}$. Die angegebenen rechnerischen U-Werte mit Stoß wurden für 1 m Stoßlänge

pro m² Wandfläche berechnet. Die sog. planerischen U-Werte wurden mit der derzeit zugelassenen Wärmeleitfähigkeit der Dämmplatten, d. h. mit $\lambda = 0,008 \text{ W/(mK)}$, ermittelt.

Aus Tabelle W20 ist ersichtlich, dass die VIP in der Kombination mit anderen Dämmmaterialien (wie PUR/ PIR-Schaum oder Resol-Hartschaum) besonders effektiv verwendet werden kann. Die äußeren Dämmschichten reduzieren die an den Stoßfugen entstehenden Wärmebrücken und bieten daneben Schutz gegen mechanische Beanspruchungen und eine verputzbare Oberfläche. Somit können passivhaustaugliche Konstruktionen mit einer Dämmschichtdicke von rund 10 cm umgesetzt werden.

Tabelle W20: Außenwandaufbauten mit innovativen VIP-WDV-Systemen

| Bauteilaufbau | U-Werte | | | Ψ_{AM} | Bild |
|---|-----------------------|----------------------|---------------------|----------------|---|
| | W/m ² K | | | W/mK | |
| | Rechnerisch ohne Stoß | Rechnerisch mit Stoß | Planerisch mit Stoß | Stoß | |
| 2 cm VIP 4 cm VIP | 0,169 0,091 | 0,204 0,108 | 0,293 0,169 | 0,035 0,017 |  |
| 2 cm VIP mit Überlappung an den Stoßfugen (wie va-Q-Plus B) D = 2 cm | 0,169 | 0,177 | 0,293 | 0,008 |  |
| 2 cm VIP+ 2 cm EPS 035 D = 4 cm | 0,156 | 0,174 | 0,251 | 0,017 |  |
| 2 cm VIP+ 10 cm PUR 028 D = 12 cm | 0,105 | 0,116 | 0,143 | 0,011 |  |
| 2*2 cm VIP+ 2 cm PUR 028 D = 6 cm | 0,093 | 0,096 | 0,151 | 0,0034 |  |
| 4 cm VIP+ 2 cm PUR 028 D = 6 cm | 0,086 | 0,115 | 0,151 | 0,0287 |  |
| 4 cm VIP+ 6 cm PUR 028 D = 10 cm | 0,076 | 0,085 | 0,124 | 0,0084 |  |

| Bauteilaufbau | U-Werte | | | Ψ_{AM} | Bild |
|--|--------------------|-------|-------|-------------|---|
| | W/m ² K | | | | |
| Variotec QASAmox vorgefertigtes Sandwichelement 4 cm VIP+ 3,5 cm EPS 040 D = 7,5 cm | 0,086 | 0,123 | 0,160 | 0,0368 |  |
| LockPlate vorgefertigtes Sandwichelement 4 cm VIP+ 7 cm EPS 035 mit 3 cm VIP im Bereich der Überlappung D = 11 cm | 0,077 | 0,087 | 0,11 | 0,009 |  |
| LockPlate vorgefertigtes Sandwichelement 4 cm VIP+ 7 cm EPS 035 mit 5 cm Resol im Bereich der Überlappung D = 11 cm | 0,077 | 0,091 | 0,11 | 0,014 |  |

Insgesamt erlauben Wärmedämmverbundsysteme auf Basis von VIP sehr dünne Aufbauten, allerdings sind die Systeme noch im Entwicklungsstadium. Insbesondere die Ausführung von komplexen Anschlusssituationen und Eckbereichen ist noch nicht abschließend gelöst.

Innendämmungen

Im Rahmen einer energetischen Sanierung kommt die Innendämmung hauptsächlich aus denkmal-schutztechnischen Gründen oder bei speziellen geometrischen Randbedingungen zum Einsatz. Abgesehen vom hohen Platzbedarf der Wärmedämmung in den Innenräumen, ist eine innenseitige Dämmung immer mit hohen Wärmeverlusten im Bereich der flankierenden Bauteile verbunden. Auf Grund der unvermeidbaren Wärmebrückenproblematik sind die von innen gedämmten Konstruktionen nicht passivhaustauglich. Mit diesen Konstruktionen kann der Passivhausstandard (Heizwärmebedarf $\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{K})$) nicht erreicht werden.

Neben den Anschlussdetails bei den flankierenden Bauteilen muss auch der Feuchtetransport der Dämmsysteme beachtet werden. Es muss unbedingt verhindert werden, dass feuchtwarme Luft aus dem Innenraum in die Wandkonstruktion eindringen kann und ihre Taupunkttemperatur in der Konstruktion erreicht. Bei Dämmmaterialien, die nicht durch Kapillarität die Feuchte aufnehmen, lagern und wieder abgeben können, muss eine dampfdichte Schicht raumseitig vor der Wärmedämmung eingebaut werden. Diese Dampfbremse oder Dampfsperre muss umlaufend an jedem Anschluss luftdicht ausgeführt werden. Außerdem ist sie vor mechanischer Beanspruchung zu schützen. Da die Herstellung der luftdichten Ebene sehr aufwändig und oft mit Fehlern behaftet ist, verbreitet sich neuerdings die Verwendung der sog. kapillaraktiven Dämmmaterialien. Diese sind Dämmplatten aus Kal-

zium-Silikat und aus Mineralschaum (Porenbeton). Die Kalzium-Silikat-Platten weisen zwar eine größere Kapillarität auf als die Porenbeton-Platten, haben jedoch gleichzeitig auch eine höhere Wärmeleitfähigkeit mit $\lambda = 0,055 \text{ W/(mK)}$. Die Mineralschaumplatten sind preisgünstiger und weisen eine geringere Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,045 \text{ W/(mK)}$ auf.

Zwischenzeitlich sind weitere Dämmsysteme aus unterschiedlichen Materialien auf dem Markt, die den Feuchtetransport regulieren können und ohne Dampfsperre eingebaut werden dürfen. Diese sind z.B. die IQ-Therm-Platte der Fa. Remmers aus Polyurethan-Schaum mit $\lambda = 0,031 \text{ W/(mK)}$ und die Aerorock ID Dämmplatte aus Aerowolle mit einer sehr günstigen Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,019 \text{ W/(mK)}$. Die maximale Dämmschichtdicke ist bei diesen Systemen bisher begrenzt. Die IQ-Therm Platte steht in einer Dicke von max. 80 mm zur Verfügung, während die Aerorock ID Dämmplatte nur 50 mm (davon lediglich 40 mm Dämmschicht) aufweist.

Die Vakuum-Dämmplatten sind auf Grund ihrer Hüllfolie dampfdicht. Im Bereich der Plattenstöße und der Anschlüsse besteht jedoch die Gefahr, dass die Innenluft hinter die Dämmebene kommen kann. Die dadurch entstehende Feuchtigkeit hinter den Dämmplatten beschädigt nicht nur die Baukonstruktionen, sie kann auch zu einem Druckverlust in den VIP führen. Die Hochbarrierefolien sind feuchtigkeitsempfindlich und bei hohen Luftfeuchten (über 70-80%) lassen sie mehr Luftmoleküle in das Paneel eindringen. Bei einer innenseitigen Anwendung müssen daher die Stoßfugen und alle Anschlüsse luft- und dampfdicht ausgeführt werden. Auf Grund der Empfindlichkeit der Platten gegen mechanische Beanspruchung soll eine Schutzschicht vor der Dämmschicht aus VIP eingebaut werden. Diese kann z.B. aus einer Gipskarton-Ständerwand, oder gemauerten Vorsatzschalen bestehen. Bauplatten aus Porenbeton sind hier ebenfalls geeignet. Eine mögliche Kombination der VIP mit Dämmplatten aus Kalzium-Silikat oder Porenbeton vermindert gleichzeitig die Gefahr der Tauwasserbildung in der Wandkonstruktion.

Falls aus Platzgründen die Dicke der Dämmschicht auf 80 mm begrenzt bleiben muss, können mit den auf dem Markt existierenden Dämmmaterialien die folgenden U-Werte erreicht werden. Die U-Werte wurden für eine typische 38 cm dicke Außenwand aus Vollziegelmauerwerk ($\lambda = 0,79 \text{ W/(mK)}$) berechnet.

Tabelle W22: U-Werte verschiedener Außenwandaufbauten mit Innendämmungen

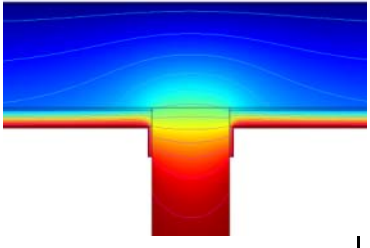
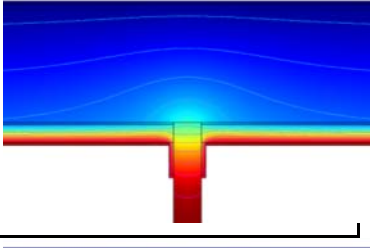
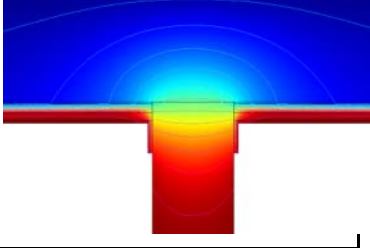
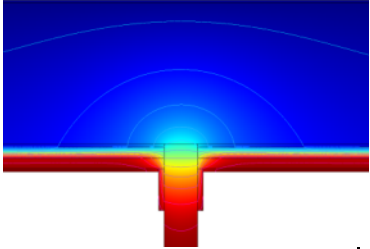
| Dämmsystem | Dicke (mm) | λ W/(mK) | U-Wert W/(m ² K) |
|------------------------------|------------|------------------|-----------------------------|
| Kalzium-Silikat-Platte | 80 mm | 0,055 | 0,44 |
| Mineralschaumplatte | 80 mm | 0,045 | 0,38 |
| IQ-Therm | 80 mm | 0,031 | 0,29 |
| Aerorock ID | 40 mm | 0,019 | 0,34 |
| VIP | 40 mm | 0,008 | 0,18 |
| VIP + Kalzium-Silikat-Platte | 80 mm | 0,008; 0,055 | 0,15 |

Wärmeverluste durch flankierende Trennwände bei Innendämmungen

Bei der Verwendung von innenseitigen Wärmedämmungen entstehen bei den flankierenden Bauteilen, wie Trennwänden oder Trenndecken unvermeidbare, geometrische Wärmebrücken. Diese lassen sich in der Regel etwas reduzieren, wenn die flankierenden Bauteile ebenfalls mit einer dünnen

Dämmschicht in einer Breite von 12-30 cm im Anschlussbereich versehen werden. Einige Hersteller haben bereits für diese Anwendung spezielle Eckelemente für die Dämmsysteme entwickelt. Diese Eckelemente sind keilförmig ausgebildet, womit die Dämmung unauffällig in der Ecke aufgebracht werden kann. Die nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse der Wärmebrückenberechnungen für Trennwände mit einer Dicke von 38 cm (Wohnungstrennwand) und 12 cm (Wohnungsinterne Trennwand) zusammen. Die Wärmebrückenkoeffizienten wurden mit der IQ-Therm Dämmplatte aus PUR ($\lambda = 0,031 \text{ W/mK}$) und mit einer Dämmkombination von 4 cm Vakuumdämmplatte und 4 cm Kalzium-Silikat-Dämmplatte ermittelt.

Tabelle W23: Wärmebrückenkoeffizienten der Trennwandanschlüsse

| Bauteilaufbau | U-Werte | | | Ψ_{AM} | Bild |
|--|-----------------------------------|--|----------------------------|-------------|---|
| | W/m ² K | | | W/mK | |
| 51 cm Außenwand aus Vollziegelmauerwerk ($\lambda=0,79 \text{ W/mK}$) | Rechenwert ungestörter Wandfläche | Rechenwert mit Anschluss (1 Anschluss je 4,5m ² AW) | Planungswert mit Anschluss | Anschluss | |
| 8 cm IQ-Therm ($\lambda=0,031 \text{ W/mK}$) mit 38 cm Trennwand | 0,289 | 0,352 | 0,352 | 0,285 |  |
| 8 cm IQ-Therm ($\lambda=0,031 \text{ W/mK}$) mit 12 cm Trennwand | 0,289 | 0,322 | 0,322 | 0,147 |  |
| 4 cm VIP + 4 cm Kalzium-Silikat ($\lambda=0,055 \text{ W/mK}$) mit 38 cm Trennwand | 0,087 (Planungswert: 0,152) | 0,189 | 0,287 ^{*)} | 0,463 |  |
| 4 cm VIP + 4 cm Kalzium-Silikat ($\lambda=0,055 \text{ W/mK}$) mit 12 cm Trennwand | 0,087 (Planungswert: 0,152) | 0,143 | 0,235 ^{*)} | 0,255 |  |

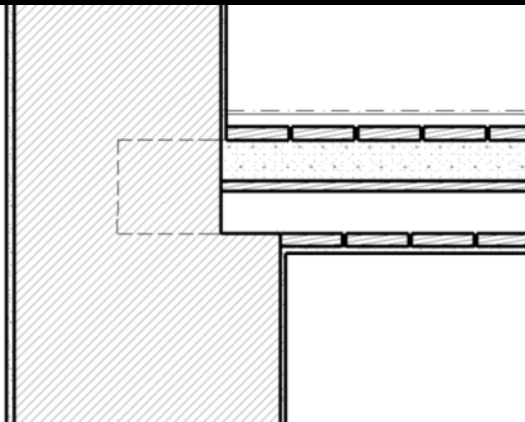
^{*)} In dem planerischen Wert der Vakuum-Dämmplatten sind die Wärmebrücken bei den Stoßfugen und Anschlüssen berücksichtigt und in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung des Produktes angegeben. Zurzeit liegt dieser Wert bei $\lambda=0,008 \text{ W/mK}$.

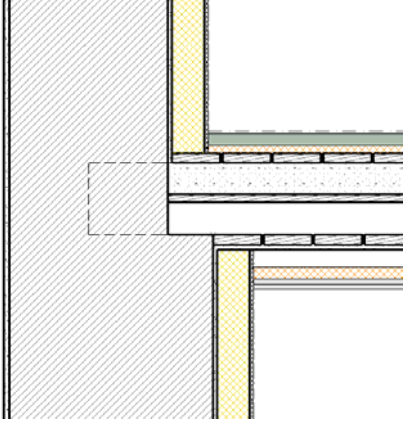
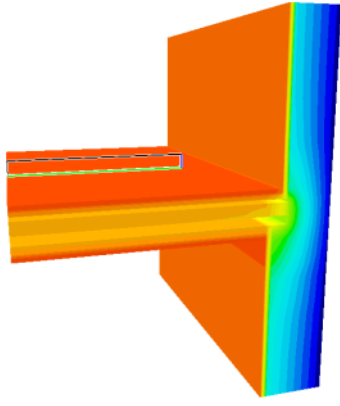
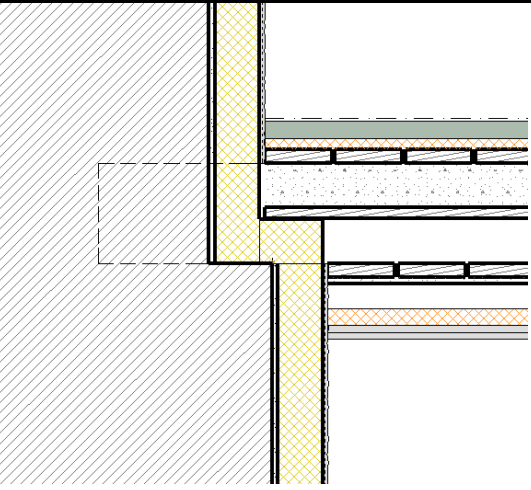
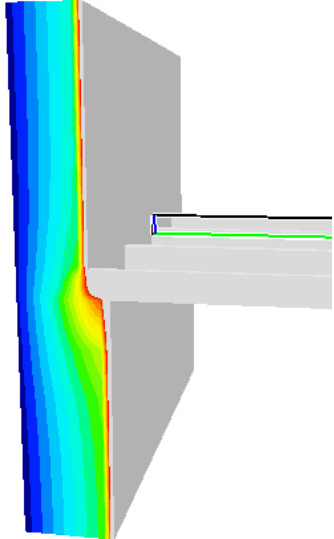
Die mit den Wärmeverlusten bei den Trennwandanschlüssen gewichteten U-Werte (in der oben aufgeführten Tabelle) zeigen, dass die Vakuum-Paneele für ungestörte Wandflächen deutlich günstigere Wärmedämmeigenschaften aufweisen, als die herkömmlichen Dämmmaterialien. Durch die hohen Wärmeverluste über die Wärmebrücken im Bereich der Anschlussdetails wird dieser Vorteil jedoch verringert. Während im ungestörten Wandbereich die Wärmeverluste der mit VIP gedämmten Wand um rd. 50% geringer ausfallen als bei den herkömmlichen Dämmsystemen, verringert sich dieser Unterschied unter Berücksichtigung der Wärmebrückeneffekte auf rd. 20%. Daher ist die Wirtschaftlichkeit von VIP-Systemen bei innenseitiger Anwendung eher kritisch zu bewerten.

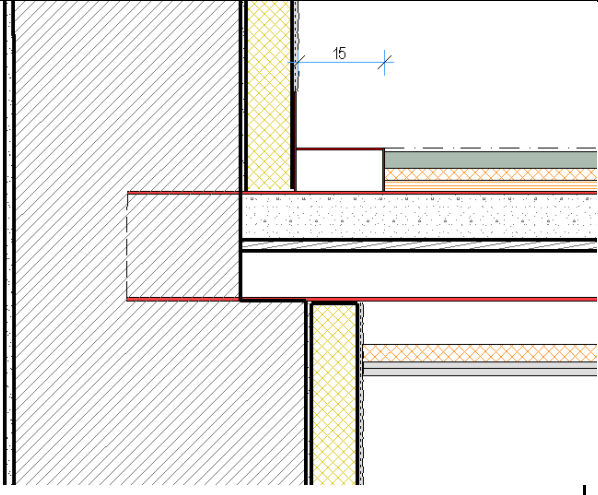
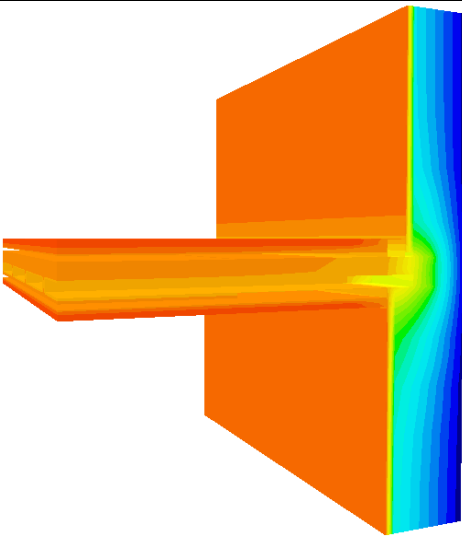
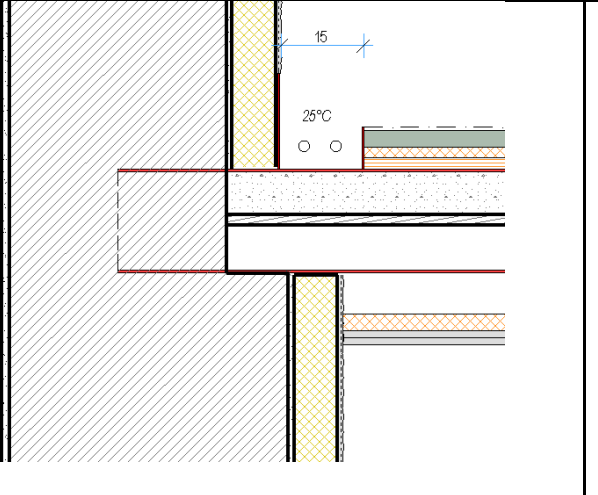
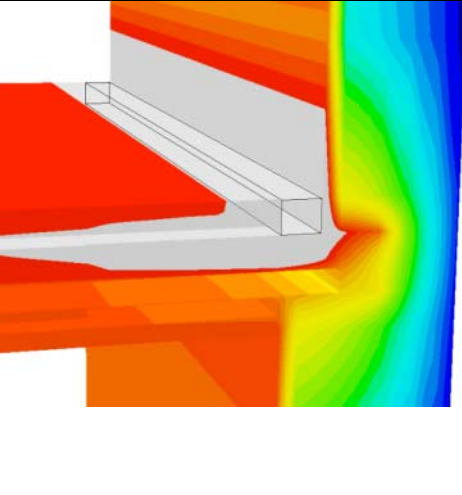
Wärmeverluste durch die Trenndecke bei Innendämmungen

Bei energetischen Sanierungen von Gebäuden aus der Vorkriegszeit stellen die Holzbalkendecken für die Planer meistens die größte Herausforderung dar. Die Außenwände dieser Gebäude werden überwiegend von innen gedämmt. Auf Grund der Innendämmung ziehen sich die Isothermenlinien in der Wand Richtung Innenraum. Damit liegen die Holzbalkenköpfe im Tauwasser gefährdeten Bereich der Außenwand. Wenn die Holzbalkenköpfe nicht dampfdicht vom Innenraum abgeschlossen sind, kann dies zum Faulen der Balkenköpfe und dadurch zu gefährlichen statischen Problemen führen. Ein dampfdichter Abschluss der Balken in der Ebene der Innendämmung lässt sich nicht einfach ausführen, da das Holzmaterial selber Feuchte aus dem Innenraum aufnimmt und diese Feuchte kann die Balkenköpfe auch durch einfachen Transport im Holz erreichen. Um diese Probleme der Dampfdichtigkeit zu vermeiden versuchen Planer neuerdings diese Details mit zusätzlicher Heizung zu versehen, wodurch die Balkenköpfe im warmen Bereich, d. h. ohne Frostgefahr liegen können. Diese Zusatzleistung führt natürlich zu erhöhten Wärmeverlusten. Eine weitere Möglichkeit die Balkenköpfe über dem Taupunkt zu halten ist die Erhöhung der Wärmezufuhr im Bereich der Trenndecke durch den Einbau künstlicher Wärmebrücken aus Wärmeleitelementen, wie Stahl- oder Aluplatten. Die in Tabelle W24 gezeigten Wärmebrückenberechnungen stellen die unterschiedlichen Sanierungsmöglichkeiten im Bereich der Holzbalkendecke dar. Die Berechnungen wurden anhand dreidimensionaler Wärmebrückenberechnungen mit der Software TRISCO der Fa. Physibel durchgeführt.

Tabelle W24: Wärmebrückenkoeffizienten verschiedener Sanierungsvarianten von Holzbalkendecken

| Beschreibung Basisvariante: | Abbildung |
|--|--|
| <p>Bestand: <u>Wand:</u> 38 cm und 51 cm Mauerwerk aus Ziegelvollsteinen $\lambda=0,79 \text{ W/(mK)}$ <u>Trenndecke:</u> 18 cm Holzbalken mit 2 x 2,5 cm Holzschalung, Schlackefüllung Sanierter Zustand: <u>Wand:</u> 6 cm EPS 035 $U= 0,39 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ <u>Fußbodenaufbau:</u> 2 cm Trittschalldämmung und 3 cm Trockenestrich <u>Unterdecke:</u> 3 cm Schallschluckmaterial und 2,5 cm Gipskarton (Schallschutz) $U_{\text{Mittel}}= 1,23 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (1 Laufmeter Deckenanschluss je 3,2 m² Wandfläche)</p> |  |

| | | |
|-------------------------|--|--|
| Sanierungs- variante |  |  |
| | $\Psi_{AM} = 0,30 \text{ W/mK}$, $U_{Mittel} = 0,50 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | Temperaturfaktor = 0,6 |
| | Sanierung ohne Zusatzmaßnahmen im Bereich der Holzbalkendecke | Die Oberflächentemperaturen zwischen den Balken liegen deutlich unter der Taupunkttemperatur (12,5°C) (Dargestellter Temperaturbereich: ab -5°C bis 20°C) |
| Sanierungsvariante |  |  |
| | $\Psi_{AM} = 0,17 \text{ W/mK}$, $U_{Mittel} = 0,46 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | Temperaturfaktor > 0,8 |
| | Dämmung Zwischen den Balken | Die Oberflächentemperaturen zwischen den Balken liegen deutlich über der Taupunkttemperatur (12,5°C), die Balkenköpfe liegen dagegen im frostgefährdeten Bereich (hier blaue Farbe) (Dargestellter Temperaturbereich: ab -5°C bis 12,5°C) |

| | | |
|---------------------------|---|--|
| Sanierungsvariante |  |  |
| | $\Psi_{AM} = 0,68 \text{ W/mK}$, $U_{Mittel} = 0,62 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | Temperaturfaktor = 0,65 |
| | Keine Wärmedämmung zwischen den Balken, mit wärmeleitendem Alu-Blech (3 mm) unter und über den Holzbalken in einer Breite von 1 m, mit Alu-Kanal im Randbereich | Die Oberflächentemperaturen zwischen den Balken liegen unter der Taupunkttemperatur (12,5°C), die Balkenköpfe liegen dagegen nicht mehr im frostgefährdeten Bereich (hier grüne Farbe) (Dargestellter Temperaturbereich: ab -5°C bis 20°C) |
| Sanierungsvariante |  |  |
| | $\Psi_{AM} = 0,95 \text{ W/mK}$, $U_{Mittel} = 0,70 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | Temperaturfaktor > 0,8 |
| | Keine Wärmedämmung zwischen den Balken, mit wärmeleitendem Alu-Blech (3 mm) unter und über den Holzbalken in einer Breite von 1 m, mit Alu-Kanal im Randbereich, Heizung (Luft oder Konvektor) mit 25°C | Die Oberflächentemperaturen zwischen den Balken liegen deutlich über der Taupunkttemperatur (12,5°C), die Balkenköpfe liegen nicht mehr im frostgefährdeten Bereich (Dargestellter Temperaturbereich: ab -5°C bis 21°C) |

Aus den Wärmebrückenberechnungen ist ersichtlich, dass die erhöhte Wärmezufuhr zu den Balkenköpfen zu einer Verdopplung bis Verdreifachung der Wärmeverluste führt, wie bei der Sanierungsvariante ohne Dämmmaßnahmen zwischen den Balken oder bei den 38 cm starken Trennwänden. Mit den oben dargestellten künstlichen Wärmebrücken können die Transmissionswärmeverluste der Außenwand im Vergleich zum Bestand lediglich etwa halbiert werden.

7.1.14 Wärmetechnische Anforderungen an Fenster

Nach den Anforderungen des Passivhaus-Institutes, darf der U_W -Wert der Fensterkonstruktionen $0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nicht überschreiten. Der gesamte U_W -Wert ist von den geometrischen Eigenschaften des Fensters abhängig (Größe, Rahmenanteil, Einbau). Dieser Wert ist mit den folgenden wärmetechnischen Eigenschaften normalerweise eingehalten:

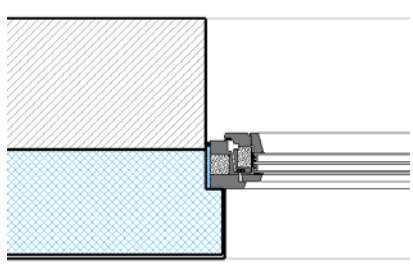
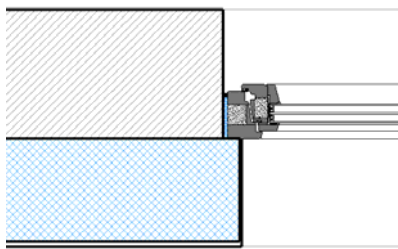
| Eigenschaft | | Bemerkung |
|-------------------------------------|--|---|
| U_f -Wert des Rahmens | $0,75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ | entspricht der mittleren thermischen Qualität eines Passivhausfensters, Rahmenbreite: 14 cm |
| U_g -Wert der Verglasung | $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ | Dreifachverglasung mit zweimal low-e Schicht, Argon-Füllung |
| Thermisch verbesserten Randverbund: | $\psi_{\text{Randverbund}} = 0,038 \text{ W}/\text{m}$ | |
| Wärmebrücke der Einbausituation: | $\psi_{\text{Einbau}} = 0,015 \text{ W}/\text{m}$ | (Fenster mit der Wandebene bündig und Rahmen von außen gedämmt). |

Aus den geometrischen Eigenschaften haben die folgenden Maßnahmen erheblichen positiven Einfluss auf die gesamte Energiebilanz des Gebäudes:

- Reduzierung des Rahmenanteils (Fensterrahmen mit geringer Breite)
- Erhöhung der Verglasungsflächen, die nicht verschattet oder nordorientiert sind.
- Einbau des Fensters in der Dämmebene, mit Überdämmung des Rahmens.

Ein ganz entscheidender Faktor in der Energiebilanz des Gebäudes ist der g-Wert der Verglasung. Dieser soll nach Möglichkeit über $0,55$ liegen.

Tabelle W25: Wärmebrückenkoeffizienten verschiedener Sanierungsvarianten von Fenstern

| Sanierungs- variante |  |  |
|-------------------------|---|--|
| ψ_{AM} W/mK | 0,00 (Quelle: PHI Handbuch zum PHPP) | 0,01 (Quelle: PHI Handbuch zum PHPP) |
| | Fenster in der Dämmebene mit 4 cm Überdämmung des Fensterrahmens | Fenster in der Wandebene (mit Außenfläche der Wand bündig) mit 4 cm Überdämmung des Fensterrahmens |

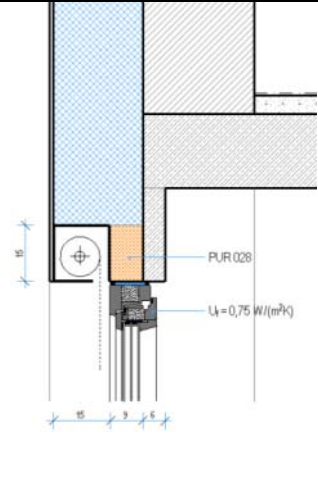
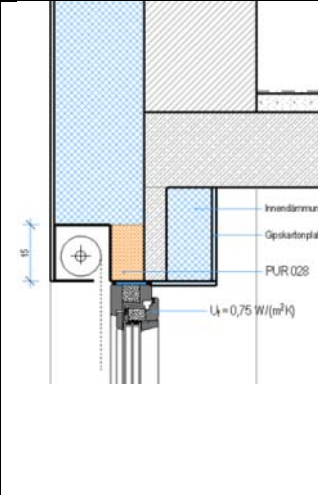
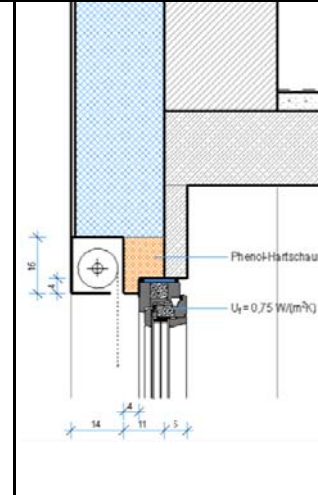
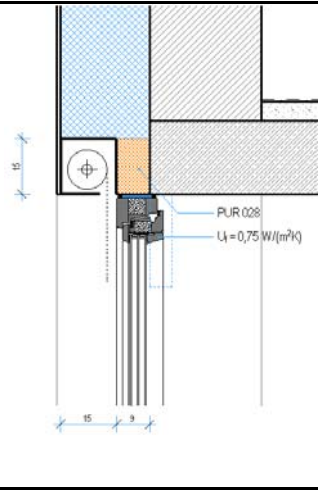
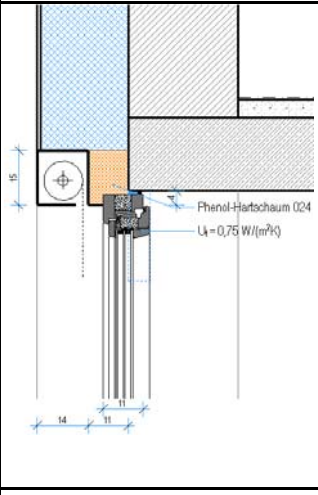
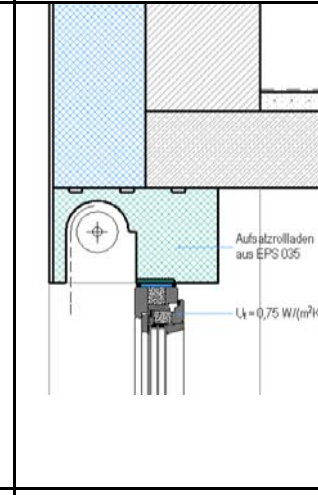
7.1.15 Wärmetechnische Sanierung von Rollladenkästen

Rollladenkästen sind ein Bestandteil der Gebäude aus der Nachkriegszeit. Sie sind normalerweise ungedämmte und undichte Holzkonstruktionen hinter einer Betonschürze.

Im Rahmen einer Sanierung sollten die bestehenden Rollladenkästen generell entfernt werden. Die vorhandene Stahlbeton „Schürze“ kann entweder abgeschnitten werden oder erhalten bleiben. Da auf die Sonnenschutzmaßnahmen nach der Sanierung ebenfalls nicht verzichtet werden kann, werden neue Rollläden oder andere außenliegende Sonnenschutzsysteme, wie Jalousiekästen eingebaut. Während der Sanierung werden die neuen Fenster möglicherweise in der Dämmebene angeordnet. Dies führt dazu, dass die neuen Rollladenkästen nicht mehr hinter der Schürze ausgeführt werden können. Das Problem kann durch Vorsatzrollläden oder neue Aufsatzrollläden gelöst werden, die vor der ehemaligen Schürzenebene eingebaut werden. Je nach Sanierungsart ist mit folgenden längenbezogenen Wärmeverlustfaktoren zu rechnen.

Tabelle W26: Sanierungsvarianten für Rollladenkästen

| Beschreibung Basisvariante: | | Abbildung | | |
|--|---|---|--|--|
| Bestand: <u>Wand:</u> 30 cm Mauerwerk aus Bimsstein $\lambda=0,42 \text{ W/(mK)}$ <u>Trenndecke:</u> 20 cm Stahlbetondecke mit 5 cm Zementestrich Sanierter Zustand: <u>Wand:</u> 24 cm EPS 032 $U=0,12 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ <u>Passivhausfenster:</u> $U_w=0,85 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | | | | |
| Sanierungsvariante | | | | |
| | $U_f=0,75 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | $U_f=0,75 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | $U_f=0,75 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | $U_f=0,75 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ |
| | Ψ_{AM} W/mK | 0,008 | 0,053 | 0,005 |
| | Ohne Rollladenkasten, Schürze bleibt erhalten, Fenster in der Dämmebene | Ohne Rollladenkasten, Schürze bleibt erhalten, Fenster in der Wandebene | Ohne Rollladenkasten, Schürze entfernt, Fenster in der Dämmebene | Ohne Rollladenkasten, Schürze entfernt, Fenster in der Dämmebene |

| | | | | |
|---------------------------|--|--|--|--|
| Sanierungsvariante |  |  |  | |
| | Ψ_{AM} W/mK | 0,037 | 0,026 | 0,030 |
| | | Mit Minirollladenkasten, Schürze bleibt erhalten, Fenster in der Dämmebene | Mit Minirollladenkasten, Schürze bleibt erhalten, Fenster in der Dämmebene, Innendämmung | Mit Minirollladenkasten, Schürze bleibt erhalten, Fenster in der Wandebene |
| Sanierungsvariante |  |  |  | |
| | Ψ_{AM} W/mK | 0,018 | 0,014 | 0,089 |
| | | Mit Minirollladenkasten, Schürze entfernt, Fenster in der Dämmebene | Mit Minirollladenkasten, Schürze entfernt, Fenster in der Dämmebene und gedämmt | Neuer passivhaustauglicher Aufsatzrollladen |

| | | | |
|---------------------------|---------------------|---|---|
| Sanierungsvariante | | | |
| | ψ_{AM} W/mK | 0,035 | 0,103 |
| | | Ohne Rolladenkasten, Schürze bleibt erhalten, Wand mit Vakkum-Dämmung | Bestehender Rolladenkasten bleibt erhalten aber wird mit Vakuum-Dämmplatten gedämmt. Die Außenwand ist ebenfalls mit VIP gedämmt. Fensterebene bleibt erhalten. |

Zusammenfassend können aus energetischer Sicht folgende Sanierungsmaßnahmen für Rolladenkästen empfohlen werden:

- Abschnitt der Beton-Schürze
- Vergrößerung der (nicht verschatteten oder nord-orientierten) Verglasungsflächen.
- Fenster in die Dämmebene einbauen.
- Fensteranschluss mit der Wärmedämmung der Fassade von außen überlappen.
- Einbau von neuen, passivhaustauglichen Rolladen- oder Jalousiekästen.

7.1.16 Wärmetechnische Anforderungen an Lüftungseinrichtungen

Auf den Heizwärmebedarf des Gebäudes haben die Lüftungswärmeverluste einen erheblichen Einfluss. Da die Transmissionsverluste durch die hohe Wärmedämmung der Gebäudehülle stark reduziert sind, kommt den Lüftungsverlusten bei Passivhäusern eine hohe Bedeutung zu. Die Wärmeverluste können hier durch eine hocheffiziente Wärmerückgewinnung (> 75%) und durch einen optimierten Luftwechsel deutlich reduziert werden.

Der hygienische Mindestluftwechsel in einem Passivhaus beträgt nach dem Passivhausinstitut (PHI) $n = 0,3$ pro Person und Stunde. Dieser Luftwechsel ist durch eine entsprechend ausgelegte Passivhauslüftung zu gewährleisten. Die Lüftungswärmeverluste werden neben dem Wärmerückgewinnungsgrad der Lüftungsanlage und der gewählten Luftwechselrate auch maßgeblich durch die Luftdichtigkeit der Gebäudehülle beeinflusst. Den Luftwechsel durch die Undichtheiten der Gebäudehülle ist bei einem Passivhaus bei 50 Pa Druckdifferenz auf $n = 0,6$ 1/h zu begrenzen. Diese Anforderung an die Luftdichtheit ist eine Mindestanforderung für die Passivhauszertifizierung.

Auf die Effizienz eines Lüftungsgerätes haben die Längen der Lüftungskanäle und die Art der Luftführung einen erheblichen Einfluss. Daher sollten Kanallängen möglichst reduziert werden und die Lüftungsgeräte in der Nähe der Außenluftansaugung platziert werden.

Bei Mehrfamilienhäusern wird grundsätzlich zwischen dezentralen und zentralen Lüftungsanlagen unterschieden. Bei zentralen Lüftungsgeräten ist das Gerät in einem zentralen Technikraum untergebracht und versorgt das gesamte Gebäude mit Frischluft. Hier sind die Wärmeverluste durch die Zu- und Fortluftkanäle auf die gesamte Energiebezugsfläche des Gebäudes aufgeteilt und haben dadurch einen relativ geringen Einfluss auf die Gesamtenergiebilanz. Bei Sanierungen lassen sich zentrale Lüftungsanlagen nur in seltenen Fällen realisieren, wenn vertikale Schächte mit ausreichenden Querschnitten zur Verfügung stehen, oder die bestehenden Schächte entsprechend erweitert werden können. Daher kommen bei Sanierungen von Mehrfamilienhäusern häufig dezentrale Lüftungsgeräte zum Einsatz. Diese werden in den Wohnungen installiert. Die Kanalführung erfolgt hier meist in einer abgehängten Decke im Flur oder in flachen Kanälen im Fußbodenaufbau. Da die Raumhöhe in den bestehenden Wohnungen im Regelfall bereits gering ist, sind die Möglichkeiten für die Kanalführung allerdings oft sehr begrenzt. Falls diese dezentralen Lüftungsgeräte nicht direkt neben der Außenwand aufgestellt werden können, wird der effektive Wärmerückgewinnungsgrad des Gerätes durch Wärmeverluste über die Lüftungskanäle oft negativ beeinflusst. Da die Geräte im Wohnraum aufgestellt werden ergeben sich oft auch schalltechnische Probleme durch die Schallabstrahlung der Geräte selbst und durch die schalltechnische Schwachstelle die durch die Öffnungen in der Außenwand entstehen. Diese schalltechnischen Effekte werden in Kapitel 7.2.6 detailliert untersucht.

7.1.17 Detaillierte Wärmebrückenanalyse und Optimierung

Für das beschriebene Referenzgebäude wurden detaillierte Wärmebrückenberechnungen für alle vorhandenen Wärmebrückensituationen durchgeführt. Die Wärmebrückenberechnungen wurden mit der Software TRISCO der Fa. Physibel durchgeführt. Die folgenden Anschlussdetails wurden detaillierter untersucht und optimiert. Die Ergebnisse sind im Anhang W2 dargestellt.

- Anschluss Kellerwand und Außenwand im Sockelbereich
- Auskragende Balkonplatte
- Traufe
- Rollladenkasten (siehe Abschnitt 7.1.15)
- Außenwandecke, Außendämmung mit VIP
- Holzbalkendecke mit Innendämmung

7.2 Akustik und Schallschutz

7.2.1 Überblick

In den Kapiteln Akustik und Schallschutz wird das Übertragungssystem Außenlärm – Fassade-Innenraum betrachtet. Dieses berücksichtigt die Übertragungskette von der Quelle (Verkehrsgläusche), über die übertragenden Bauteile und deren Abstrahlung, bis zum Schalldruckpegel im Innenraum und zu dessen subjektiver Wahrnehmung. Die geplante Vorgehensweise wurde bereits im Kapitel 6.2 dargestellt. Ziel ist es neben dem Grundverständnis für das Übertragungssystem dessen Schwachpunkte zu erkennen und Optimierungspotentiale aufzuzeigen. Um sinnvolle Auswahlkriterien für die Planung festzulegen, werden am Ende Kenngrößen und Anforderungen diskutiert, die der subjektiven Wahrnehmung und ruhebedürftigen Nutzer_innen Rechnung tragen.

7.2.2 Verkehrsgeräusche

Von typischen Verkehrsgeräuschen in Innenstädten liegen natürlich ausreichend Messbeispiele und Erkenntnisse vor. Dennoch wurden Messungen an ausgesuchten Orten in Stuttgart geplant und durchgeführt, um eine eigene Datenbasis aufzubauen und auch geeignete Daten für eine psychoakustische Beurteilung zur Verfügung zu haben. Ausgewählt wurden die Verkehrsmittel Stadtbahn, Straßenverkehr mit hohem LKW Anteil und Zugverkehr. Gemessen wurde in Anlehnung an DIN 45642:2004-6 an Straßen in etwa 7,5 m Entfernung von der Straßenmitte und in 1,2 m Höhe. Dies galt auch bei den Messungen der Stadtbahn, die oberirdisch, zwischen den Fahrspuren auf einem eigenen Gleisbett fuhr. Die Aufnahmen der Züge erfolgten in etwa 25 m Entfernung von den Gleisen und in etwa 3,5 m Höhe. Die einzelnen Messorte sind im Anhang dargestellt als Kartenausschnitte des Satellitendienstes Google Maps (Abbildungen AA1). Ergänzend aufgeführt sind die Lärmpegelbereiche der Lärmkarte Stuttgart für die jeweiligen Orte. Die Messzeit orientierte sich an der Vorbeifahrt der Schienenfahrzeuge oder des Straßenverkehrs in einer Ampelphase. Tabelle A1 zeigt für diese Vorbeifahrten und die unterschiedlichen Verkehrslärmarten typische Mittelungspegel und Maximalpegel, ebenfalls aufgeführt sind die Perzentillautheiten N_5 als psychoakustische Kenngröße. Abbildung AA2 zeigt die unterschiedlichen Frequenzspektren der mittleren Schalldruckpegel typischer Verkehrsgeräusche. In der Abbildung daneben wurden die Spektren auf ihre Maximalwerte normalisiert, um die unterschiedliche Lage der jeweiligen Maxima zu verdeutlichen. Straßenverkehrsgeräusche weisen typischerweise Maxima bei tiefen Frequenzen auf. Diese sind abhängig vom LKW-Anteil, da LKW die tieffrequenten Maxima bestimmen. Schienenfahrzeuge weisen Maxima bei mittleren und hohen Frequenzen auf, diese sind jedoch abhängig von Fahrgeschwindigkeit und Zugtyp, ebenso vom Zustand der Gleisanlagen. Bei Güterzügen werden, auch bei langsamer Vorbeifahrt, wesentlich höhere Pegel erreicht. Verkehrslärm wird im Allgemeinen durch das standardisierte Verkehrslärmspektrum der DIN EN 1793-3:1997-11 repräsentiert und bei der Berechnung von Schalldämmungen durch die Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} der DIN EN ISO 717-1:2006-11. In Abbildung AA3 sind diese standardisierten Größen dargestellt und werden in der Abbildung daneben mit den auf einen Summenpegel von 0 dB normalisierten, gemessenen Verkehrsgeräuschen verglichen. Das standardisierte Verkehrslärmspektrum entspricht dabei in etwa dem Schalldruckpegelspektrum zur Berechnung des Spektrum-

Anpassungswertes C_{tr} . Durch diese beiden Kenngrößen werden die tiefen Frequenzen der unterschiedlichen Verkehrslärmarten sehr gut abgebildet. Bei den Maxima der Schienenverkehrsgeräusche im mittleren Frequenzbereich übersteigen die gemessenen Werte jedoch öfters das standardisierte Spektrum und die Pegelwerte zur Ermittlung der Spektrum-Anpassungswerte.

Was die subjektive Beurteilung von Verkehrsgeräuschen angeht ist bekannt, dass die übliche A-Bewertung nur eine Annäherung an die tatsächliche Hörwahrnehmung darstellt. Es wurde daher die psychoakustische Kenngröße Lautheit mit verwendet. Um eine subjektive Bewertung mit zu berücksichtigen wird ein vereinfachtes Verfahren angewandt, um aus den als Zeitsignalen vorliegenden Aufnahmen der Verkehrsgeräusche durch geeignete Filterung Innenraumpegel und auch spezifische Lautheiten im Innenraum zu berechnen. Zur Validierung wird vorab das Verfahren mit der Berechnungsmethode von Innenraumpegeln nach DIN EN 12354-3:2000-9 verglichen.

Tabelle A1: Akustische Kenngrößen unterschiedlicher Verkehrslärmarten.

| Verkehrslärmart | $L_{F,eq}$ [dB] | $L_{AF,eq}$ [dB] | $L_{AF,max}$ [dB] | N_5 [sone] |
|------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| Stadtbahn | 75,4 | 71,8 | 77,2 | 36,2 |
| Zug (InterRegio) | 79,4 | 78,9 | 85 | 50,2 |
| Straßenverkehr | 82,3 | 74,1 | 79,8 | 46 |

Berechnungsbeispiele

Als Grundlage für eine spätere subjektive Beurteilung werden aus drei Verkehrsgeräuschen (Straße, Stadtbahn, Zug) Innenpegel in einem Wohnraum berechnet. Zunächst aus den mittleren Schalldruckpegeln des Verkehrsgeräusches und der berechneten Schalldämmung einer zusammengesetzten Fassade mit der Gleichung [1] aus DIN EN 12354-3:2000-9:

$$L_{2,n} = L_{1,2m} - D_{2m,nT} \text{ [dB]} \quad [1].$$

mit:

- $L_{2,n}$ = der mittlere Schalldruckpegel im Raum, bezogen auf eine äquivalente Absorptionsfläche von 10 m² [dB]
- $L_{1,2m}$ = der Außenschalldruckpegel 2 m vor der Fassade nach EN ISO 140-5 [dB]
- $D_{2m,nT}$ = die Standard-Schallpegeldifferenz [dB]

Die bewertete Standard-Schallpegeldifferenz der Fassade (Wand + WDVS, zwei Fenster, zwei Rolllädenkästen, eine Lüftungsöffnung, $S=18 \text{ m}^2$, $V=72 \text{ m}^3$) betrug:

$$D_{2m,nT,w}(C, C_{tr}) = 48 (-1, -6) \text{ [dB]} \quad [2].$$

Danach, zum Vergleich, aus den Zeitsignalen der Verkehrsgeräusche, die in Form von wav-Dateien vorliegen und einem der Standard-Schallpegeldifferenz der Fassade nachgebildeten Filter. Das gefilterte Zeitsignal bildet den Zeitverlauf des Innenraumpegels, aus dem wiederum Zeitverlauf und Spektren der Lautheit berechnet werden können. Die Berechnungen erfolgten mit der Software BASTIAN (Version v2.3) und der Software VIPER (Version V3.13) für die Zeitverläufe. Gegenübergestellt werden die Spektren und Einzahlwerte der der A-bewerteten Schalldruckpegel im Innenraum aus stati-

scher und dynamischer Berechnung. Die Ergebnisse zeigen die Abbildungen AA4 im Anhang. Die Ergebnisse der beiden unterschiedlichen Berechnungsmethoden stimmen recht gut überein, so dass die dynamische Berechnung zur Abschätzung der psychoakustischen Kenngrößen geeignet scheint.

7.2.3 Wände mit Wärmedämmung

Nach den Festlegungen gemäß notwendigem Wärmeschutz für Passivhausstandard war zunächst geplant sechs WDVS inklusive Vakuumdämmung zur akustischen Prüfung vorzusehen. In Zuge des Projektes kamen weitere Konstruktionen hinzu, da Hersteller den Wunsch äußerten unterschiedliche Materialien zu testen und auch neue Materialkombinationen auf den Markt kamen. Schließlich wurden insgesamt neun verschiedene Außenwandaufbauten geprüft. Die Prüfungen erfolgten im Türenprüfstand und Wandprüfstand der HFT Stuttgart, im Zentrum für Bauphysik in Stuttgart-Vaihingen Pfaffenwaldring 10a. Der Türenprüfstand wurde gewählt, um bei reduzierter Prüffläche mit vertretbarem Zeit- und Geldaufwand die Untersuchungen durchführen zu können. Die Messungen erfolgen in Anlehnung an DIN EN ISO 140-16 [23]. Es wurden jeweils die Luftschalldämmungen mit und ohne WDVS gemessen und durch das Verfahren der oben genannten Norm die Verbesserung ΔR bestimmt. Gemessen wurde an einer Bezugswand mit geringer Koinzidenzfrequenz. Eingebaut war eine Kalksandsteinwand der Dicke 175 mm mit einer Rohdichte $\leq 1800 \text{ kg/m}^3$, einseitig mit 15 mm Kalkgipsputz verputzt. Die flächenbezogene Masse betrug etwa 330 kg/m^2 , die Trennfläche $2000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ (H x B). Die Messungen im Türenprüfstand erfolgten abweichend von den Normen DIN EN ISO 140-3 und DIN EN ISO 140-16, die eine Trennfläche von etwa 10 m^2 fordern. Die Messergebnisse dienen dem Vergleich der Konstruktionen untereinander und stellen lediglich eine Annäherung an Normmessungen dar.

Die Messungen an der Kalksandsteinwand im Türenprüfstand dauerten ein Jahr und einen Monat. In dieser Zeit veränderte sich das bewertete Schalldämm-Maß der Wand um lediglich 1 dB. Die Unterschiede wurden vermutlich durch die mechanischen Einwirkungen bei Einbau und Abriss der WDVS verursacht. Abbildung AA5 im Anhang zeigt die gemessenen Schalldämmungen in dieser Zeit. In Abbildung AA6 sind neben der Grenzdämmung des Prüfstandes auch die höchsten, im Zuge des Projektes im Türenprüfstand gemessenen Schalldämm-Maße dargestellt. Bei Frequenzen über 1 kHz zeigt sich, dass die Schalldämm-Maße der untersuchten Konstruktionen im Bereich der Grenzdämmung des Prüfstandes liegen. Für die Ermittlung der bewerteten Einzahlangabe ist dieser Frequenzbereich jedoch von untergeordneter Bedeutung.

Genauigkeit der Messungen

Um die oben angesprochene Annäherung an Normmessungen abzuschätzen wurden zwei identische Konstruktionen in den Türenprüfstand und den Wandprüfstand der HFT Stuttgart eingebaut. Die Prüfstände entsprechen den Anforderungen der DIN EN ISO 140-1, gemessen wurde gemäß DIN EN ISO 140-16; 11-2006. Abbildung AA7 im Anhang zeigt zunächst die Ergebnisse der Messung der Schalldämmung der im Türenprüfstand eingebauten Kalksandsteinwand, verglichen mit den Terzbandwerten der Bezugskurve für die Bezugswand mit geringer Koinzidenzfrequenz in DIN EN ISO 140-16. In Abbildung AA8 werden die Ergebnisse ergänzt um die Messung der Schalldämmung der eingebauten

Kalksandsteinwand im Wandprüfstand. Die Abbildungen illustrieren die gute Übereinstimmung mit der Bezugskurve, die in beiden Prüfständen erreicht wurde. Die Abbildung AA9 zeigt die Ergebnisse der Messungen der Schalldämmungen jeweils mit 280 mm MineralwollWDVS an den Kalksandsteinwänden. Allerdings mit dem Unterschied, dass bei der Konstruktion im Türenprüfstand acht Dübel zur Befestigung des WDVS verbaut waren, die Konstruktion im Wandprüfstand war unverdübelt. Die Messergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung ab 200 Hz und deutliche Abweichungen bei tiefen Frequenzen. Ebenso ergeben sich Abweichungen bei den sehr hohen Frequenzen über 2000 Hz. Die Abweichungen werden nicht auf den Einfluss der Dübel zurückgeführt. Durch die Dübel sollten sich tieffrequent kaum Abweichungen ergeben, während bei höheren Frequenzen durch die Körperschallbrücken eine Verschlechterung erwartet wird, beides ist jedoch nicht erkennbar. In Abbildung AA10 werden die gleichen Schalldämmungen dargestellt, diesmal jedoch berechnet nach dem Verfahren der DIN EN ISO 140-16; 11-2006. Hierbei werden die gemessenen Schalldämm-Maße R_{with} und R_{without} voneinander subtrahiert und ΔR berechnet. Die Terzbandwerte ΔR werden dann zu den Werten der Bezugswand $R_{\text{ref,without}}$ addiert zu $R_{\text{ref,with}}$. Dargestellt werden also die Werte $R_{\text{ref,with}}$. Daraus können auch die Einzahlwerte und Spektrum-Anpassungswerte bestimmt werden. Tabelle A2 zeigt die Ergebnisse.

Tabelle A2: Akustische Kenngrößen für identische Konstruktion in Türen- und Wandprüfstand-.

| Kenngroße | Türenprüfstand [dB] | Wandprüfstand [dB] |
|-------------------------------|------------------------|-----------------------|
| $R_w (C, C_{tr})$ | 54 (-1, -4) | 53 (-1, -5) |
| $R_{w,ref, with} (C, C_{tr})$ | 59 (-3, -10) | 62 (-3, -7) |
| $\Delta R_w (C, C_{tr})$ | 6 (4, 1) | 9 (7, 7) |

Da bei den tiefen Frequenzen von modalen Schallfeldern auf den Platten (Wänden) und in den Messräumen ausgegangen werden muss, sind Unterschiede in diesem Frequenzbereich zu erwarten. Sie sind auch verantwortlich für die Differenzen bei den Einzahlwerten. Bei hohen Frequenzen ist die Ursache der Abweichungen unklar. Abbildung AA11 zeigt die gemessenen Abstrahlgrade auf beiden Seiten des Aufbaus im Wandprüfstand. Die KSV-Wand erreicht einen Abstrahlgrad von 1 bei etwa 200 Hz, sichtbar auch in dem Einbruch der Schalldämmung in diesem Frequenzbereich. In diesem Bereich liegt offensichtlich die Koinzidenzfrequenz der Wand. Die Außenputzplatte auf der Mineralwolle-dämmung zeigt einen Abstrahlgrad von 1 bei etwa 3150 Hz, ebenfalls gut sichtbar durch den Einbruch der Schalldämmung in diesem Frequenzbereich. Rechnerisch, mit einer Abschätzformel ermittelt, liegt die Koinzidenzfrequenz bei etwa 2700 Hz.

Die Ergebnisse zeigen, dass zwar ein qualitativer Vergleich mit unter Normbedingungen erzielten Ergebnissen möglich ist, durch die deutlichen Unterschiede bei tiefen Frequenzen jedoch die ermittelten Einzahlwerte insbesondere unter Berücksichtigung der Spektrum-Anpassungswerte lediglich als Annäherungen an Normwerte betrachtet werden können. Durch die Versuchsanordnung ist daher nur ein Vergleich der Konstruktionen untereinander möglich und damit eine Rangfolge der Konstruktionen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Schalldämmung.

Grundlagen, dynamische Steifigkeit, Bestimmung der Resonanzfrequenzen und weitere Berechnungen

Zum Verständnis des akustischen Verhaltens von WDVS wird ein einfaches, physikalisches Modell benutzt, wie in Kapitel 5.2 bereits dargestellt. Entscheidend für das Verhalten des Systems ist die Resonanzfrequenz f_R . Diese Resonanzfrequenz kann durch nachstehende Gleichung einfach abgeschätzt werden.

$$f_R \cong 160 \sqrt{\frac{s'}{m''_{\text{Putz}}}} \text{ [Hz]} \quad [3]$$

mit

| | | |
|---------------------|---|---|
| s' | = | Dynamische Steifigkeit der Dämmschicht [MN/m ³] |
| m''_{Putz} | = | Gesamtmasse je Flächeneinheit des Putzes [kg/m ²] |
| f_R | = | Resonanzfrequenz [Hz] |

Ebenfalls von Bedeutung ist die sogenannte Eckfrequenz f_E (oder Knickfrequenz [8]). Sie kann wie folgt berechnet werden:

$$f_E = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{s'}{d\rho}} \text{ [Hz]} \quad [4]$$

mit

| | | |
|--------|---|--|
| d | = | Dicke der Dämmschicht [m] |
| ρ | = | Rohdichte der Dämmschicht [kg/m ³] |
| f_E | = | Eckfrequenz [Hz] |

Zusätzlich wichtig für die Beurteilung der Messergebnisse sind die Koinzidenzgrenzfrequenzen der Trägerwand und der Putzplatte auf dem WDVS. Sie werden nach Gleichung 5 abgeschätzt.

$$f_g \cong \frac{c_0^2}{1,8 \cdot c_L \cdot d} \text{ [Hz]} \quad [5]$$

mit

| | | |
|-------|---|---|
| c_0 | = | Schallgeschwindigkeit in Luft [m/s] |
| c_L | = | Longitudinalwellengeschwindigkeit [m/s] |
| f_g | = | Koinzidenzgrenzfrequenz [Hz] |

Alle diese Größen wurden bestimmt um das Übertragungssystem zu verstehen und die Messergebnisse interpretieren zu können. Im Folgenden wird die messtechnische Bestimmung der dynamischen Steifigkeiten erläutert. Die Ergebnisse der Messungen und Berechnungen sind in den Tabellen A3 und A4 dargestellt.

Die Bestimmung der dynamischen Steifigkeit s' erfolgt entsprechend DIN EN 29052 vom August 1992 [24]. Die dynamische Steifigkeit wird bestimmt, indem die Resonanzfrequenz f_R der vertikalen Grundschwingung eines Systems, bestehend aus dem Probekörper und einer auf dem Probekörper auflie-

genden Stahlplatte, mit einer Masse von 8 kg, bestimmt wird. Als unterer starrer Abschluss wurde bei der Prüfung ein elastisch gelagerter Betonquader verwendet. Die Resonanzfrequenz wurde mittels Impulsanregung aus der Übertragungsfunktion der durch einen Impulshammer eingeleiteten Kraft und der daraus auf der Stahlplatte resultierenden Beschleunigung ermittelt. Bei der Messung wurde zwischen Probekörper und Unterlage sowie zwischen Probekörper und aufliegender Stahlplatte eine dünne Gipsschicht eingebracht, so dass ein vollflächiger Kontakt zwischen den vorgefertigten Probekörpern und der Unterlage bzw. der Stahlplatte hergestellt wurde. Die dynamische Steifigkeit s' ergibt sich aus dieser Resonanzfrequenz wie folgt:

$$s' = 4\pi^2 \cdot m'_i \cdot f_R^2 \quad [\text{N/m}^3] \quad [6]$$

Dabei bedeuten:

m'_i = Gesamtmasse je Flächeneinheit auf dem Prüfling [kg/m^2]

Tabelle A3: Dynamische Steifigkeiten und daraus berechnete Resonanz- und Eckfrequenzen der WDVS.

| Material | Dicke [m] | Dynamische Steifigkeit* [MN/m^3] | Resonanzfrequenz f_R^{**} [Hz] | Eckfrequenz f_E [Hz] |
|----------------------------------|-----------|---|----------------------------------|------------------------|
| Vakuumpaneele zwischen EPS 1 III | 0,07 | 15 | 124 | ~ 650 |
| Vakuumpaneele | 0,04 | 22 | 150 | ~ ? |
| Resol- Hartschaum | 0,18 | 38 | 197 | ~ 1200 |
| Polystyrol EPS (Neopor) | 0,24 | 5 | 72 | ~ 585 |
| Mineralwolle | 0,28 | 3 | 55 | ~ 150 |
| Mineralwolle Lamelle | 0,32 | 30 | 175 | ~ 860 |
| VIP + PS + Resol | 0,09 | 21 | 147 | ~ ? |
| Holzfaser | 0,32 | 5 | 72 | ~ 160 |
| Mineralschaum | 0,32 | 125 | 358 | ~ 950 |

*Messergebnisse **berechnet

Tabelle A4: Berechnete Koinzidenzgrenzfrequenzen

| Material | Dicke [m] | Koinzidenzgrenzfrequenz f_g [Hz] |
|---------------------------|-----------|------------------------------------|
| Trägerwand Kalksandstein | 0,175 | 120 – 140 |
| Putzplatte Kalkzementputz | 0,015 | ~ 2700 |

In den Abbildungen AA 16 und AA 17 sind in den Verlauf der Verbesserungen der Schalldämm-Maße ΔR der gemessenen Aufbauten die berechneten Resonanz- und Eckfrequenzen eingezeichnet. Die Genauigkeit der Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung wird im letzten Abschnitt dieses Kapitels diskutiert.

Modalanalysen

Die Experimentelle Modalanalyse dient der Schwingungsanalyse und Visualisierung der Eigenschwingungen. Anhand dieser Methode kann unter anderem überprüft werden, wie gut die Grundannahme des Masse-Feder-Masse-Modells zutrifft. Hierzu wurde an einzelnen Aufbauten im Türenprüfstand an insgesamt 163 Positionen jeweils eine Kraft mit einem Impulshammer eingeleitet und die Systemantwort an einem Referenzpunkt bestimmt. Die Anregungspunkte befanden sich auf einem vorher festge-

legten Raster auf beiden Seiten des Aufbaus. Die dargestellten Visualisierungen der Eigenschwingungsformen zeigen dieses Raster jeweils auf der Trägerwand und auf der Putzschicht. Dazwischen befindet sich das Dämmmaterial. Abbildung A1 zeigt beispielhaft die Schwingungsform der Trägerwand mit 240 mm EPS bei 56 Hz. Dargestellt sind vier Bilder aus unterschiedlichen Perspektiven, von oben, von hinten, seitlich und schräg (gegen den Uhrzeigersinn). Die kleinere Platte ist die Putzplatte. Beide Platten sind unten fest eingespannt, seitlich und oben jedoch annähernd frei. Erkennbar ist eine Grundschiwingung, bei der beide Platten in Phase schwingen. Nach der Theorie also unterhalb der Resonanzfrequenz, die bei diesem Aufbau rein rechnerisch und auch gemäß Messung zwischen 70 und 100 Hz liegt.

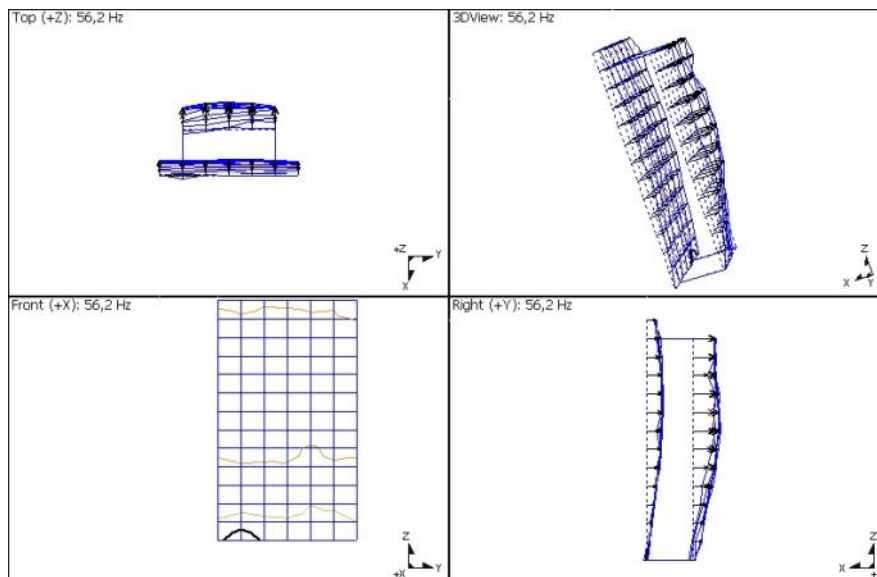


Abbildung A1: Schwingungsform der 175 mm KS-Trägerwandwand mit 240 mm Neopor und 15 mm Außenputz bei 56 Hz.

Abbildung A2 zeigt nun die Eigenschwingungsform der beiden Platten bei 90 Hz, bei der diese gegenphasig schwingen.

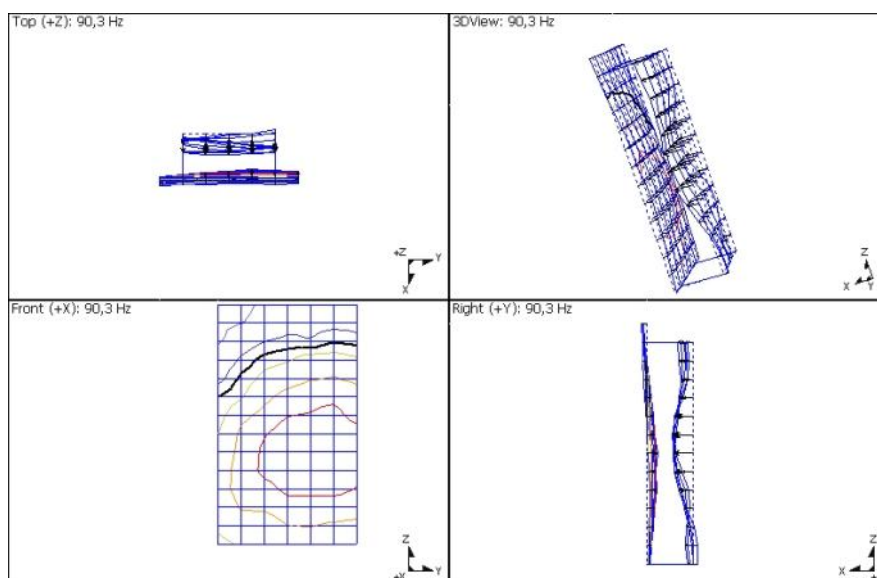


Abbildung A2: Schwingungsform der 175 mm KS-Trägerwandwand mit 240 mm Neopor und 15 mm Außenputz bei 90 Hz.

Entsprechend der Theorie liegt in diesem Bereich die Resonanz. Gut erkennbar ist, dass die beiden Platten nicht als Massen schwingen, sondern Biegeschwingen ausführen. Den dritten Bereich oberhalb der Resonanzfrequenz zeigt Abbildung A3 bei der Frequenz von 400 Hz. Die Trägerwand führt ausgeprägte Plattenschwingungen durch, während die Putzplatte fast in Ruhe scheint, also entkoppelt ist.

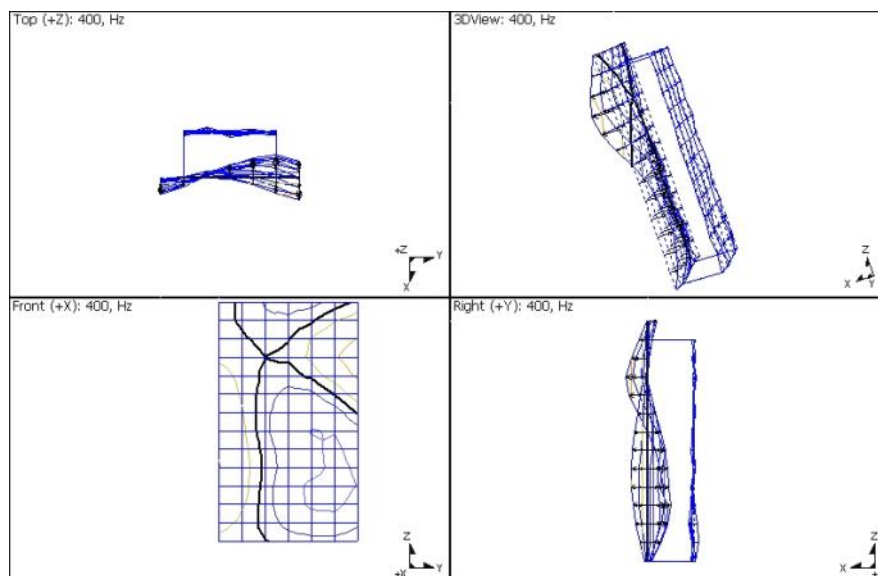


Abbildung A3: Schwingungsform der 175 mm KS-Trägerwandwand mit 240 mm Neopor und 15 mm Außenputz bei 400 Hz.

Die Abbildungen AA12 bis AA15 im Anhang zeigen weitere Beispiele für Schwingungsformen der beiden Platten in Phase, gegenphasig und entkoppelt. Die ausgeprägten Biegeschwingungen machen eine eindeutige Zuordnung nicht immer möglich. Die Schwingungsformen der unterschiedlichen Aufbauten sind trotz gleicher Geometrie sehr verschieden. Die unterschiedlichen Materialien, die verschiedenen Elementgrößen der Dämmungen und verschiedene Klebeverfahren haben also einen Einfluss auf das Verhalten der Konstruktion. Insgesamt zeigt die Schwingungsanalyse, dass die Betrachtungsweise als Masse-Feder-Masse System zwar eine starke Vereinfachung darstellt, aber die einzelnen Frequenzbereiche mit ihren wesentlichen Phänomenen (z.B.: $f < f_R$, $f = f_R$ und $f > f_R$) durchaus richtig charakterisiert werden.

Messungen im Türenprüfstand

Tabelle A5 listet die im Türenprüfstand gemessenen neun Konstruktionen und die erzielten Ergebnisse für die Einzahlwerte $R_{w, ref, with}$ (C , C_{tr}) aus.

Tabelle A5: Bewertete Schalldämm-Maße der neun gemessenen Konstruktionen mit Spektrumanpassungswerten C , C_{tr} und $C_{tr, 50-3150}$ ($R_{w, ref, with} + C_{tr, 50-3150}$)

| Material | Dicke [m] | $R_{w, ref, with}$ (C , C_{tr}) [dB] | $R_{w, ref, with} + C_{tr}$ [dB] | $C_{tr, 50-3150}$ [dB] |
|---------------------|--------------|--|----------------------------------|------------------------|
| Bezugswand | 0,175 + Putz | 53 (-1, -5) | 48 | -5 (48) |
| VIP* | +0,04 | 59 (-2, -8) | 51 | -10 (49) |
| VIP + PS** | +0,07 | 56 (-4, -9) | 47 | -9 (47) |
| VIP + PS + Resol*** | +0,09 | 50 (-2, -7) | 43 | -7 (43) |

| | | | | |
|----------------------------|-------|---------------------|-----------|-------------------|
| Resol-Hartschaum | +0,18 | 53 (-4, -8) | 45 | -9 (44) |
| Neopor | +0,24 | 65 (-4,-12) | 53 | -13 (52) |
| Mineralwolle (MW) | +0,28 | 59 (-3, -10) | 49 | -12 (47) |
| Mineralwolle Lamelle (MWL) | +0,32 | 53 (-4, -8) | 45 | -9 (44) |
| Holzfaser | +0,32 | 59 (-1, -7) | 52 | -10 (49) |
| Mineralschaum | +0,32 | 51 (-2, -4) | 47 | -4 (47) |

* Vakuumisolationspaneele ** Vakuumisolationspaneele + Polystyrol

*** Vakuumisolationspaneele + Polystyrol + Resol-Hartschaum

Die Ergebnisse wurden entsprechend den Rechenvorschriften der DIN EN ISO 140-16; 11-2006 ermittelt. Tabelle A6 zeigt die Verbesserungen der bewerteten Schalldämm-Maße.

Tabelle A6: Verbesserung der bewerteten Schalldämm-Maße ΔR_w der neun gemessenen Konstruktionen mit Spektrum- Anpassungswerten C , C_{tr} und $C_{tr, 50-3150}$

| Material | ΔR_w [dB] | $\Delta R_w + C$ [dB] | $\Delta R_w + C_{tr}$ [dB] | $\Delta R_w + C_{tr,50-3150}$ [dB] |
|----------------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------------|
| VIP* | 6 | 5 | 3 | 1 |
| VIP + PS** | 3 | 0 | -1 | -1 |
| VIP + PS + Resol*** | -3 | -4 | -5 | -5 |
| Resol-Hartschaum | 0 | -3 | -3 | -4 |
| Neopor | 12 | 9 | 5 | 4 |
| Mineralwolle (MW) | 6 | 4 | 1 | -1 |
| Mineralwolle Lamelle (MWL) | 0 | -3 | -3 | -4 |
| Holzfaser | 6 | 6 | 4 | 1 |
| Mineralschaum | -2 | -3 | -1 | -1 |

Die Abbildung A4 (links) zeigt zunächst die Schalldämm-Maße $R_{ref,with}$ der vier besten Konstruktionen im Vergleich mit der Wand ohne Dämmsystem (Bezugswand) ausgehend von dem Einzahlwert $R_{w,ref,with}$ und dem Spektrum-Anpassungswert C_{tr} für Verkehrslärm, also $R_{w,ref,with} + C_{tr}$ (siehe auch Tabelle A5, Spalte 3 fett gedruckt). In den Frequenzspektren zeigt sich der bekannte Effekt, dass bei tiefen Frequenzen eine Verschlechterung der Schalldämmung gegenüber der Wand ohne Dämmsystem eintritt. Oberhalb 200 Hz verbessert sich die Schalldämmung durch das Dämmsystem erheblich. Von den gemessenen neun Konstruktionen verbessert sich allerdings nur in vier Fällen die Schalldämmung unter Berücksichtigung von Verkehrslärm (C_{tr}) durch das aufgebrauchte WDVS, in fünf Fällen tritt eine Verschlechterung ein. Wird im Vergleich hierzu die Schalldämmung ohne C_{tr} betrachtet (Tabelle A5, Spalte 2), so verschlechtert sich nur in zwei Fällen die Schalldämmung durch das aufgebrauchte WDVS, in sieben Fällen tritt eine Verbesserung ein oder die Schalldämmung bleibt gleich. Bei Betrachtung von $R_{w,ref,with} + C_{tr,50-3150}$ (Tabelle A5, Spalte 4) tritt nur in drei Fällen eine Verbesserung ein. Je stärker also die tiefen Frequenzen berücksichtigt werden, umso schlechter schneiden die betrachteten Systeme ab. Die frequenzabhängigen Schalldämm-Maße R der fünf ungünstigeren Konstruktionen zeigt Abbildung A4 (rechts) wiederum im Vergleich mit der Wand ohne Dämmsystem (Bezugswand). Bei diesen Konstruktionen treten die Verschlechterungen zwischen 150 Hz und etwa 500 Hz auf, darüber verbessert sich die Schalldämmung durch das WDVS. Einzige Ausnahme ist der Mineralschaum, der tieffrequent eine Verbesserung bewirkt und ab etwa 500 Hz die Schalldämmung

verschlechtert. Bei stärkerer Berücksichtigung der tiefen Frequenzen schneidet dieses System, im Vergleich mit den anderen, besser ab. Einen guten Gesamtüberblick gibt die Tabelle A6 in der die Verbesserungen der bewerteten Schalldämm-Maße gegenüber der Bezugswand ohne WDVS aufgelistet sind. Je stärker die tiefen Frequenzen gewichtet werden, umso geringer wird die Verbesserung durch das jeweilige WDVS. Bei Berücksichtigung von $C_{tr,50-3150}$ erreichen von den neun gemessenen Konstruktionen lediglich drei eine auch nur geringfügige Verbesserung.

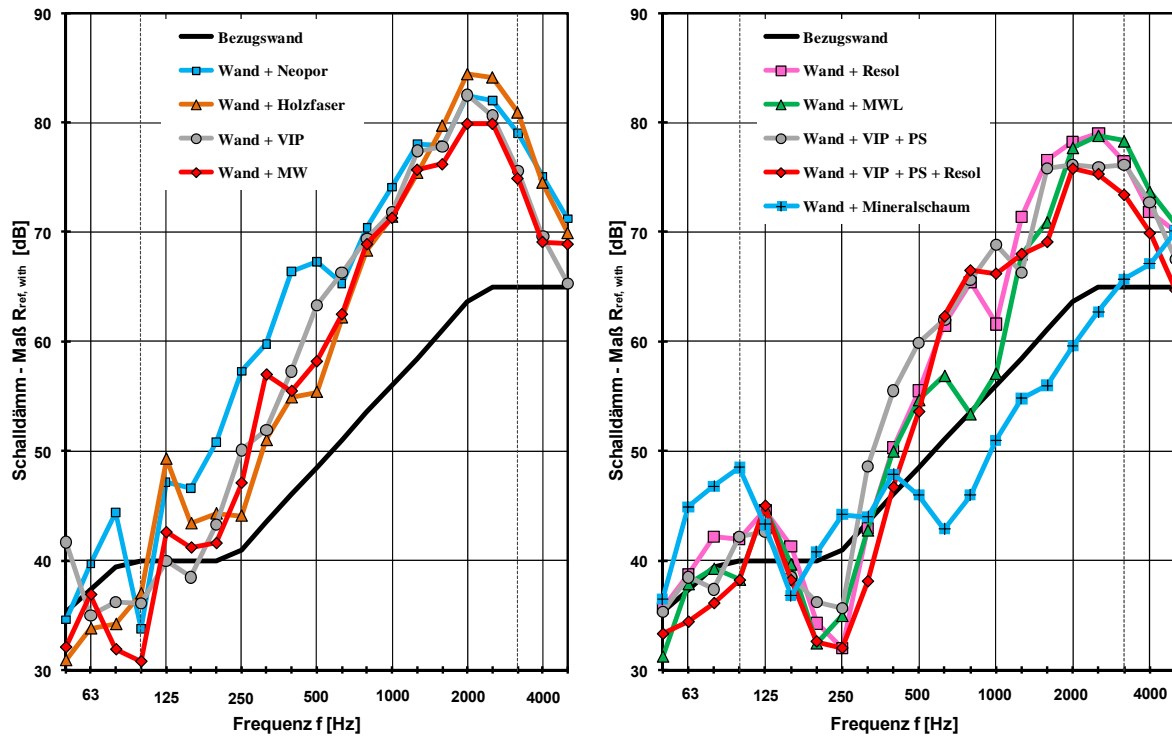


Abbildung A4: Schalldämm-Maße $R_{ref,with}$ der neun im Türenprüfstand gemessenen Konstruktionen

Bewertung

Die vereinfachte Grundannahme eines Masse-Feder-Masse-Systems zum Verständnis des akustischen Verhaltens von Trägerwänden mit WDVS wird durch die Untersuchungen bestätigt. Einzige Ausnahme bildet das System mit Mineralschaum als Dämmung, das auf Grund der hohen Steifigkeit des Mineralschaums kein Federverhalten zeigt. Die Abbildungen AA16 und AA17 zeigen, dass die Berechnungen der charakterisierenden Frequenzen (Resonanz-, Eck-/Knick- und Koizidenzfrequenz) meist im theoretisch ermittelten Bereich liegen, aber die Besonderheiten der Aufbauten wie Elementgrößen, Verklebung, Verhalten der Trägerwand etc. vermutlich eine Rolle spielen und die Genauigkeit begrenzen. Die durch Eck-/Knickfrequenzen beschriebenen Phänomene sind noch nicht wirklich verstanden, so dass nur detailliertere Untersuchungen Aufschluss über die Ursachen der Schalldämmeinbrüche bei mittleren Frequenzen bringen können.

Offensichtlich geworden ist, dass bei Berücksichtigung der tiefen Frequenzen bis 50 Hz WDVS in der Regel die Schalldämmung verschlechtern. Bei den drei Systemen, die auch hier eine Verbesserung bringen, liegt bei zweien die Resonanz unter 100 Hz und bei allen drei ist der Einbruch nicht besonders ausgeprägt. Die Gründe hierfür sind unklar. Insbesondere das gute akustische Verhalten der 40

mm dicken Vakuumpaneele mit direkt aufgebrachtem Putz und einer berechneten und nicht sonderlich ausgeprägten Resonanz bei etwa 150 Hz überrascht.

7.2.4 Fenster und Verglasungen

Überblick

Bei einer Sanierung auf Passivhausniveau werden üblicherweise zertifizierte Dreifachverglasungen verbaut. Bezüglich der Anforderungen des Wärmeschutzes sind auch Zweifachverglasungen mit innen liegender Folie möglich oder Vakuumgläser. Vakuumgläser sind derzeit nur als Prototypen verfügbar. Schalltechnische Untersuchungen im Fensterprüfstand der HFT Stuttgart waren daher nicht möglich. Standard Dreifachverglasungen sind seit einigen Jahren verfügbar und inzwischen bei allen energetischen Sanierungen einsatzbereit. Sie erreichten Ende 2010 einen Marktanteil von etwa 40%. Die schalltechnischen Eigenschaften sind erforscht und bekannt. Saß [12] vom ift Rosenheim hat in seinem Beitrag die wesentlichen akustischen Merkmale zusammengefasst. „Die Schalldämmung von Dreifach-Isolierglas ist im Frequenzverlauf mit der Schalldämmung von Zweifach-Isolierglas vergleichbar; Koinzidenzgrenzfrequenzen und Doppelscheibenresonanzen zeichnen sich in gleicher Weise ab. Eine Ausnahme bildet die Glasscheibe in der Mitte, die praktisch keinen Einfluss auf die Schalldämmung der Gesamtkonstruktion hat. Wichtig für die Schalldämmung sind die außen und innen liegenden Scheiben. Der Bereich von bewerteten Schalldämm-Maßen, der mit Zweifach-Isolierglas erreicht werden kann (R_w bis etwa 50 dB) lässt sich auch mit Dreifach-Isolierglas erreichen, jedoch bauartbedingt mit größerer Enddicke und höherem Gewicht“. Diese Angaben werden durch die Messergebnisse bestätigt. Im Zuge des Projektes wurden zunächst vorhandene Messungen des ift Rosenheim betrachtet und ausgewertet. Ergänzt wurden diese durch eigene Messungen im Fensterprüfstand der HFT Stuttgart.

Vorhandene Messergebnisse

Zur Verfügung standen 175 Messungen von Dreifachverglasungen aus den Jahren 1999 bis 2009, durchgeführt in den Prüfständen des ift Rosenheim. Ferner 50 Messungen von kompletten Fenstern mit Dreifachverglasungen aus den Jahren 1996 bis 2009 ebenfalls ermittelt in den Prüfständen des ift Rosenheim. Einen Überblick über den Verlauf der Schalldämm-Maße R gibt die Abbildung AA18. Die Einzahlwerte reichen von $R_w = 28$ bis 50 dB und $R_w + C_{tr} = 22$ bis 44 dB. Zusätzlich wurden Prüfzeugnisse von Herstellern ausgewertet, insgesamt 30 verschiedene Dreifachverglasungen, geprüft von unterschiedlichen Prüfinstituten in den Jahren 2003 bis 2009. Einzahlwerte reichen von $R_w = 36$ bis 50 dB und $R_w + C_{tr} = 27$ bis 45 dB. Die jeweils besten und schlechtesten Fenster und Verglasungen der beiden Gruppen von vorhandenen Messergebnissen zeigt Abbildung AA19.

Eigene Messungen im Fensterprüfstand

Die eigenen Messungen wurden entsprechend DIN EN ISO 140-3:2005-03 durchgeführt und umfassten lediglich fünf verschiedenen Fenstertypen und eine Verglasung. Auf Grund der Fülle der vorhandenen Messergebnisse wurde es als unnötig erachtet zusätzliche Messungen in größerer Zahl durchzuführen. Hervorzuheben sind die Messungen an einer Zweifachverglasung mit innenliegender Folie

anstatt einer dritten Glasscheibe. Diese Zweifachverglasung mit sogenannter HeatMirror-Folie im Scheibenzwischenraum erreicht U-Werte von $\leq 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ und ist damit für Passivhäuser geeignet. Durch das Fehlen der dritten Scheibe ist die Gesamtkonstruktion leichter, eine geringere Dicke wird nicht erreicht, da die Zwischenräume zwischen Scheiben und Folie gleich sind wie bei Dreifachverglasungen. Entsprechend den oben dargestellten schalltechnischen Eigenschaften und der geringen akustischen Bedeutung der mittleren Glasscheibe ist auch kein Unterschied in der Schalldämmung zu herkömmlicher Dreifachverglasung zu erwarten. Die Messergebnisse bestätigen dies. Abbildung AA20 zeigt den Verlauf der Schalldämm-Maße. Zum Vergleich ist eine Standard-Dreifachverglasung mit gleichen Abmessungen mit eingefügt. Die Messergebnisse der weiteren Fenstertypen zeigen die Anhänge AA21 und AA22.

Bewertung

Die Schalldämmung von Verglasungen und Fenstern ist zumeist entscheidend für die Gesamtschalldämmung einer Fassade, da die Verglasungen oft die geringste Schalldämmung aller Bauteile einer Fassade aufweisen und weil der Verglasungsanteil an der Fassadenfläche bei Passivhäusern, je nach Orientierung, hoch ist oder erhöht wird um über die Verglasungen solare Gewinne zu realisieren. Die bisher vorgestellten Messergebnisse zeigen dies. Außenwände mit WDVS zeigen Einzahlwerte von $R_w + C_{tr} = 43$ bis 55 dB während Fenster und Verglasungen Einzahlwerte von $R_w + C_{tr} = 22$ bis 45 dB aufweisen (siehe auch Abbildung A5).

Der Frequenzverlauf der Schalldämmungen von Dreifachverglasungen ist geprägt durch die Doppelscheiben-Resonanz bei tiefen Frequenzen und den Koinzidenzeinbruch bei hohen Frequenzen. Es sollte daher bei der Planung vermieden werden, dass in diesen Bereichen die Maxima der Schalldruckpegel des maßgeblichen Außenlärms liegen.

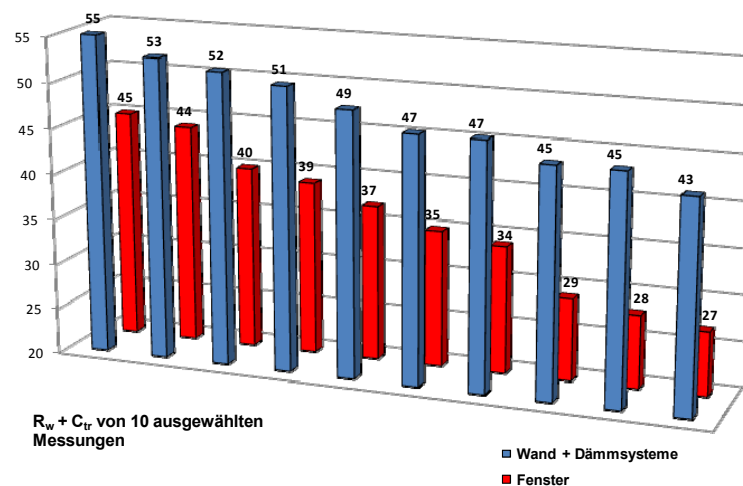


Abbildung A5: Vergleich der Schalldämm-Maße $R_w + C_{tr}$ von jeweils 10 ausgewählten Konstruktionen der vorhandenen Messungen von Wand + WDVS und Fenstern.

7.2.5 Rollladenkästen

Überblick

Die Schalldämmung von Rollladenkästen wurde bereits 1976 von Lutz und Lakatos [17] vom Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) untersucht. Bei 25 untersuchten, üblichen Rollladenkästen wurden Einzahlwerte der bewerteten Norm-Schallpegeldifferenz $D_{n,w}$ von 47 bis 55 dB gemessen. Dies würde bedeuten, dass bei Fenstern mit einem bewerteten Schalldämm-Maß R_w bis etwa 46 dB die Übertragung über einen darüber angeordneten, dicht montierten Rollladenkasten nur eine untergeordnete Rolle spielt. Die Spektrum-Anpassungswerte gab es damals noch nicht. Neuere Untersuchungen, aktuelle Prüfzeugnisse und eigene Messungen bestätigen die recht guten schalltechnischen Eigenschaften bei sorgfältig montierten Rollladenkästen. Bei der Betrachtung der Schalldämmung von Rollladenkästen alleine oder Fenstern mit Rollladenkästen wird unterschieden zwischen dem Zustand mit herabgelassenem Rollpanzer und Rollpanzer im Kasten. Lutz und Lakatos [18] haben bereits 1977 darauf hingewiesen, dass durch den herabgelassenen Rollladen die Schalldämmung von Fenster mit Rollladenkasten verbessert werden kann, wenn der Rollpanzer genügend schwer ist, der Luftabstand zwischen Rollpanzer und Fenster groß (60-80 mm) und eine Randbedämpfung eingebaut wird. Wird dies nicht beachtet, führt der herabgelassene Rollpanzer nur zu einer geringfügigen Verbesserung bei hohen Frequenzen und zu einer Verschlechterung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen (siehe auch [19]). Für den Einbau in Passivhäusern kommen Rollladenkästen mit einem linearen Wärmedurchgangskoeffizienten $\Psi \leq 0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ in Frage. Alle im Zuge des Projektes recherchierten und selbst gemessenen Einzahlwerte für Passivhaus geeignete Rollladenkästen lagen bei $D_{n,e,w} \geq 50 \text{ dB}$. Allerdings weisen die betrachteten Rollladenkästen C_{tr} -Werte zwischen -3 und -7 dB auf. Die Schwachpunkte liegen also bei den tiefen Frequenzen.

Vorhandene Messergebnisse

Durch entsprechende Recherche standen 16 Messungen von Passivhaus geeigneten Rollladenkästen zur Verfügung. Gemäß diesem Datenbestand wurden bewertete Norm-Schallpegeldifferenzen von $45 \text{ dB} \leq D_{n,e,w} + C_{tr} \leq 58 \text{ dB}$ erreicht.

Eigene Messungen im Fensterprüfstand

Die Messungen wurden entsprechend DIN EN 20 140, Teil 10, Ausgabe 1992-09 [25] in einem Fensterprüfstand der HFT ohne Flankenübertragung nach DIN EN ISO 140 Teil 1, Ausgabe 2005-03 durchgeführt und umfassten bei den Rollladenkästen lediglich eine Messung.

Es waren damit zwar weniger Messergebnisse von Herstellern und eigene Messungen vorhanden als bei den Fenstern, dennoch wurde es als unnötig erachtet zusätzliche Messungen in größerer Zahl durchzuführen. Die Tendenz der vorhandenen Messergebnisse war deutlich. Die Ergebnisse der durchgeführten Messung zeigt Abbildung AA23. Abbildung A6 zeigt die Norm-Schallpegeldifferenzen der vorhandenen Messungen von Rollladenkästen und in rot den Mittelwert aus allen Messungen.

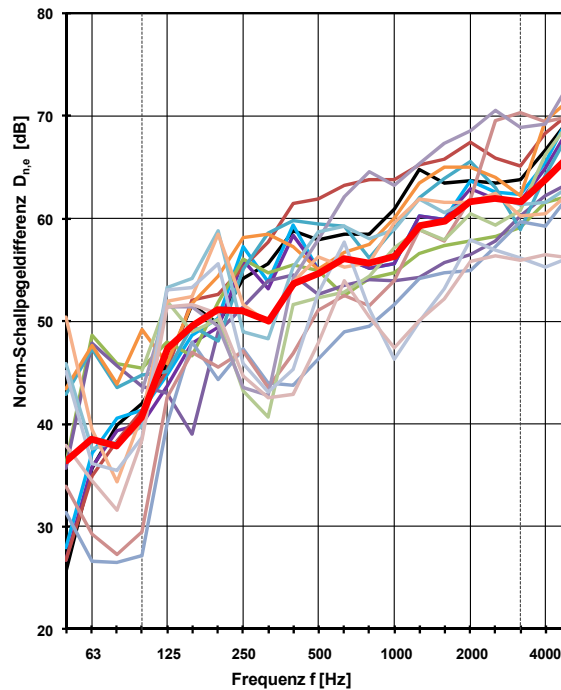


Abbildung A6: Norm-Schallpegeldifferenzen von Rollladenkästen (n=16), in rot der Mittelwert aus allen Messungen

Bewertung

Alle im Zuge des Projektes recherchierten und selbst gemessenen Einzahlwerte für Passivhaus geeignete Rollladenkästen lagen bei $D_{n,e,w} \geq 50$ dB. Allerdings weisen die betrachteten Rollladenkästen C_{tr} Werte zwischen -3 und -7 dB auf, während die C Werte zwischen 0 und -3 liegen. Die akustischen Schwachpunkte liegen also bei den tiefen Frequenzen. Abbildung A6 verdeutlicht dies, insbesondere bei zwei Rollladenkästen, die tieffrequent Norm-Schallpegeldifferenzen unter 30 dB aufweisen. Bei der Planung ist daher vor allem bei hohem Straßenverkehrslärm darauf zu achten, dass nicht der Rollladenkasten das akustisch schwächste Bauteil bei tiefen Frequenzen wird. Zum direkten Vergleich mit bewerteten Schalldämm-Maßen von Fenstern kann eine vereinfachte Abschätzformel genutzt werden. Ausgangspunkt sind üblich große Fenster und ein Rollladenkasten der direkt darüber sitzt. In diesem Fall werden vom Einzahlwert $D_{n,e,w}$ einfach 8 dB abgezogen. Wird dies bei den vorliegenden Messwerten $D_{n,e,w} + C_{tr}$ getan, so werden Werte zwischen 37 und 50 dB erreicht, so dass geeignete Rollladenkästen vorhanden sind um die Schalldämmung der gewählten Fenster nicht zu verschlechtern. Abbildung A7 verdeutlicht dies.

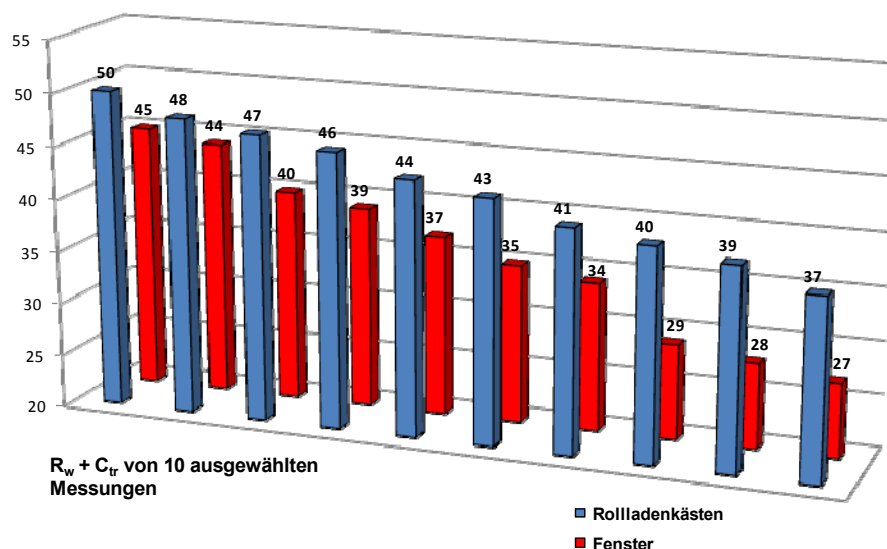


Abbildung A7: Vergleich der abgeschätzten Schalldämm-Maße $R_w + C_{tr}$ von jeweils 10 ausgewählten Konstruktionen der vorhandenen Messungen von Fenstern und Rollladenkästen.

7.2.6 Lüftungen

Überblick

Bei der Sanierung auf Passivhausniveau sind Lüftungsanlagen obligatorisch. An diese werden zunächst bestimmte thermische und akustische Anforderungen gestellt (Zulufttemperatur $> 16,5^\circ\text{C}$, WRG $> 75\%$, Ventilatoren max. $0,45 \text{ Wh/m}^3$, Schallemission max. 25 dB(A) im Wohnbereich). Empfohlen werden dezentrale oder zentrale Zu- und Abluftanlagen mit WRG und Lüftungskanälen zu den einzelnen Räumen. Die Schallübertragung von außen erfolgt dabei über die Außen- und Fortluftöffnungen, auf die im Raum ein Kanal folgt und dann das Zentralgerät. Kanäle und Zentralgerät sind meist eingehaust und in Bad, Küche oder Flur angeordnet. Somit ist bei diesen Anlagen in der Regel ein guter Schallschutz gegen Außenlärm gewährleistet. Üblicherweise ist das Eigengeräusch der Lüftungsanlage lauter, als das eindringende Außengeräusch. Wirtschaftliche Gründe und Platzmangel führen aber oft dazu, dass alternative Lüftungskonzepte angewandt werden. So zum Beispiel reine Abluftanlagen mit Außenluftdurchlässen in den Wohn- und Schlafräumen, die streng genommen bei Passivhäusern nicht angewendet werden dürfen oder dezentrale Einzelraumlüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung. Bei der dezentralen raumweisen Anbringung von Wärmerückgewinnungsgeräten können im Vergleich zur zentralen Wärmerückgewinnung Lüftungskanäle und Telefoneschalldämpfer eingespart werden. Allerdings erhöht sich die Zahl der Außenwanddurchbrüche (je ein oder zwei pro Gerät). Der Schallschutz stellt sich beim Einsatz von Einzelraumgeräten in vielen Fällen problematisch dar. Zum einen sind die auf der Innenseite gemessenen Schalleistungspegel für Wohn- und Schlafräume oft zu hoch. Andererseits können durch den Einbau der Geräte die Luftschalldämmeigenschaften einer typischen Außenwand wesentlich verschlechtert werden. In dieser Arbeit werden deshalb

dezentrale Einzelraumlüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung und Außenluftdurchlässe (ALD) betrachtet, da diese Lüftungskonzepte am problematischsten hinsichtlich der Schalldämmung sind.

Mit den akustischen Eigenschaften von ALD beschäftigten sich Scholze [13] und Schnelle und Kurz [14] wie bereits in Kapitel 5.2 dargestellt. Aus den Arbeiten ergibt sich, dass eine näherungsweise Berechnung der Norm-Schallpegeldifferenzen von ALD möglich ist, bei Kenntnis der Geometrie und der verwendeten Schalldämpfer. Ebenso ist eine rechnerische Optimierung denkbar. Im Zuge des Projektes wurden vorhandene Prüfzeugnisse von ALD, Einzelraumgeräten und Einrohr-Lüftungsgeräten zusammengetragen und durch eigene Messungen in den Prüfständen der HFT Stuttgart ergänzt.

Vorhandene Messergebnisse

Durch die Recherche wurden 11 Messergebnisse der Schalldämmungen von Außenluftdurchlässen (ALD) zusammengetragen. Hinzu kamen zwei Prüfzeugnisse von dezentralen Lüftungsgeräten. Abbildung A8 gibt einen Überblick über die Norm-Schallpegeldifferenzen von ALD.

Eigene Messungen im Fensterprüfstand

Die Messungen wurden erneut entsprechend DIN EN 20 140, Teil 10, Ausgabe 1992-09 [25] in einem Fensterprüfstand der HFT Stuttgart ohne Flankenübertragung nach DIN EN ISO 140 Teil 1, Ausgabe 2005-03 durchgeführt. Die Berechnung der Norm-Schallpegeldifferenz $D_{n,e}$ und die Ermittlung der Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} erfolgte nach DIN EN ISO 717 Teil 1, Ausgabe 2006-11. Das Volumen des Senderraumes und des Empfangsraumes beträgt 68.0 m^3 bzw. 66.5 m^3 . Der Einbau und die Prüfung erfolgte gemäß Vorgaben der DIN EN 13141-1, Ausgabe 2004-05. Dort wird für den Einbau des Luftdurchlasses eine Trennwandtafel der Dicke 300 mm gefordert.

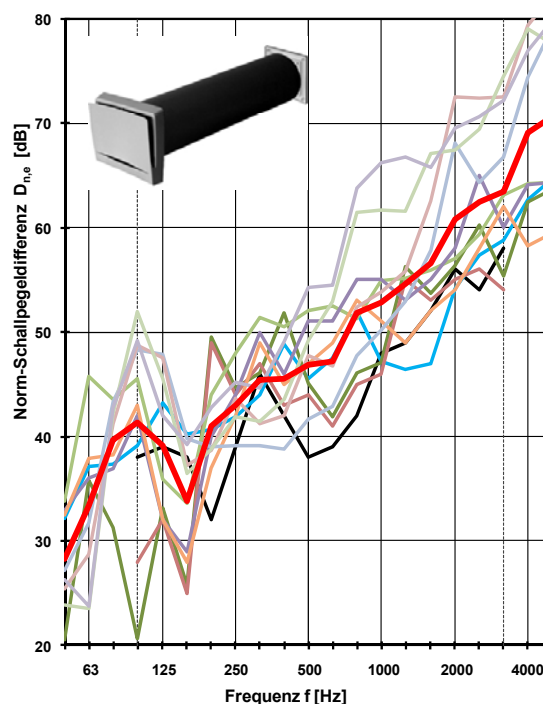


Abbildung A8: Gemessene Norm-Schallpegeldifferenzen $D_{n,e}$ von ALD ($n=11$).

Die Bestimmung der Norm-Schallpegeldifferenz wurde bei maximaler Öffnungsweite des Luftdurchlasses durchgeführt. Die Öffnung im Fensterprüfstand H x B (1.5 m x 1.25 m) wurde durch eine zweischalige Konstruktion mit folgendem Aufbau verschlossen:

2 x 12.5 mm Fermacellplatte

250 mm Hohlraum mit schallabsorbierender Einlage (Mineralwolle)

2 x 12.5 mm Fermacellplatte

Die bewertete Norm-Schallpegeldifferenz zwischen den Prüfräumen mit der zweischaligen Konstruktion in der Fensteröffnung betrug:

$$D_{n,e,w,F} (C;C_{tr}) = 71 (-3;-9) \text{ dB}$$

Die Lüftungsgeräte wurden dann gemäß Abschnitt 6.4 der Prüfnorm eingebaut. Gemessen wurden Einrohr-Lüftungssysteme (Anzahl = 8) und Einzelraumlüftungsgeräte (Anzahl = 21). Bei den Lüftungsgeräten schneiden die Einrohr-Lüftungssysteme mit WRG und Kernbohrungen mit Durchmessern bis zu 200 mm deutlich schlechter ab als klassische Einzelraumlüftungsgeräte mit zwei Wanddurchbrüchen mit Durchmessern bis zu 125 mm. Es werden bei Einrohr-Lüftungssystemen Einzelwerte zwischen $D_{n,e,w} + C_{tr} \geq 31$ und ≤ 38 dB erreicht. Die C_{tr} Werte liegen zwischen -2 und -4 dB. Bei Einzelraumlüftungsgeräten werden Einzelwerte zwischen $D_{n,e,w} + C_{tr} \geq 43$ und ≤ 53 dB erreicht, mit C_{tr} Werte zwischen -3 und -7 dB. Einen Überblick über die gemessenen Systeme geben die Abbildungen AA24/25.

Bewertung

Die recherchierten und selbst gemessenen Einzelwerte für ALD lagen bei $D_{n,e,w} + C_{tr} \geq 40$ bis 51 dB. Allerdings weisen die betrachteten ALD wiederum C_{tr} Werte zwischen -3 und -7 dB auf, während die C- Werte zwischen -1 und -3 liegen. Die gemessenen Werte der Einrohr-Lüftungssysteme mit WRG und der klassischen Einzelraumlüftungsgeräte wurden bereits oben dargestellt. Wegen der deutlich schlechteren Schalldämmung ist bei einem hohen Außenlärm vom Einbau von Einrohr-Lüftungssystemen dringend abzuraten. Diese können die Schalldämmung der gesamten Fassade negativ beeinflussen.

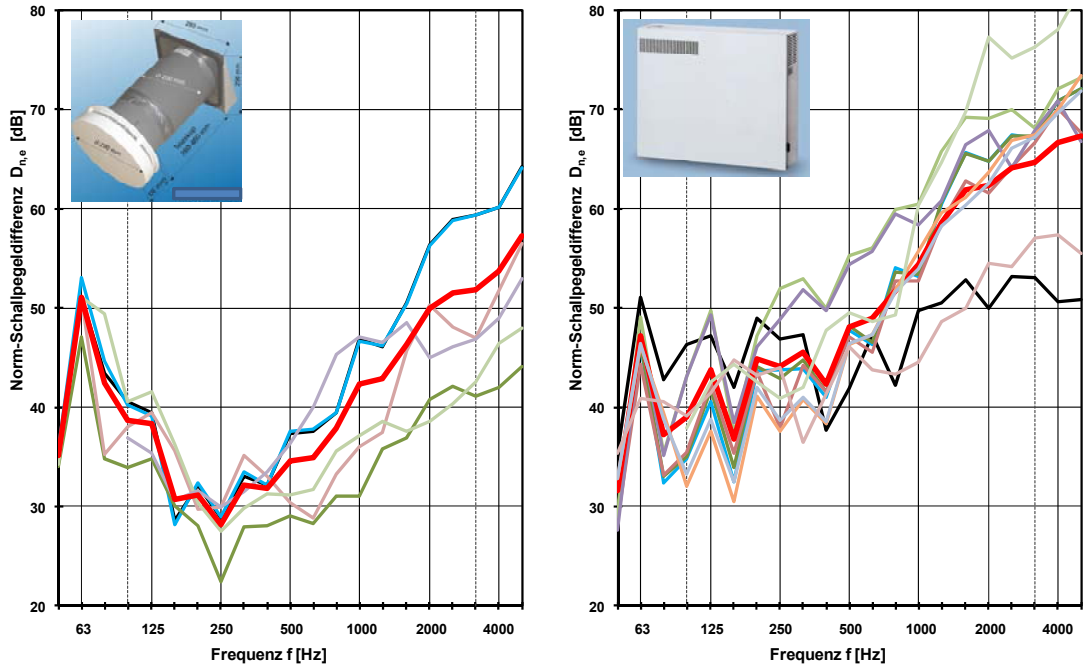


Abbildung A9: Vergleich der gemessenen Norm-Schallpegeldifferenzen $D_{n,e}$ von Einrohr-Lüftungssystemen ($n=8$) und Einzelraumlüftungsgeräten ($n=21$).

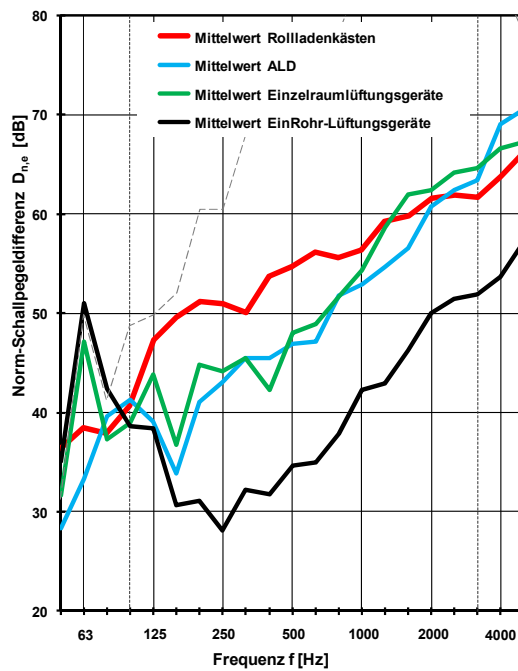


Abbildung A10: Vergleich der Mittelwerte der gemessenen Norm-Schallpegeldifferenzen $D_{n,e}$ von ALD ($n=11$), Einrohr-Lüftungssystemen ($n=8$), Einzelraumlüftungsgeräten ($n=21$) und Rolladenkästen ($n=16$).

Den Vergleich zwischen Norm-Schallpegeldifferenzen von Rolladenkästen und Lüftungsgeräten zeigt Abbildung A10.

7.2.7 Vor-Ort-Messungen

Begleitend zum Projekt wurde nach Sanierungsvorhaben gesucht, bei denen im Prüfstand untersuchte Konstruktionen oder Bauteile zur Anwendung kommen, um die Prüfstandsmessungen durch Messungen auf der Baustelle zu ergänzen. Dies erwies sich als äußerst schwierig, so dass lediglich drei Bauvorhaben gefunden wurden, bei denen überhaupt Messungen durchgeführt werden konnten. Ein Passivhausprojekt in Mannheim, bei dem ein Wohnhaus zu einem Wohngebäude mit Büroeinheit auf Passivhausniveau umgebaut wurde. Ein Einfamilienhaus in Weingarten bei dem Vakuumisulationspaneel bei der energetischen Sanierung eingesetzt wurden und das Modellcharakter hatte. Ein größeres Sanierungsprojekt in München, bei dem Mehrfamilienhäuser energetisch saniert wurden und sowohl VIP wie auch Resol-Hartschaumplatten als WDVS zum Einsatz kamen. Die Messungen werden im Folgenden dokumentiert und bewertet.

Die Messungen wurden entsprechend DIN EN ISO 140, Teil 5, Ausgabe 1998-12 „Messung der Luftschalldämmung von Fassadenelementen und Fassaden in Gebäuden“ durchgeführt. Die Berechnung des bewerteten Bau-Schalldämm-Maßes $R'_{45^\circ,w}$ und die Ermittlung der Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} erfolgte nach DIN EN ISO 717 Teil 1, Ausgabe 2006-11. Gemessen wurde nach dem Bauteil- und dem Gesamt - Lautsprecherverfahren.



Abbildung A11: Einbausituation Fenstertüre vor Dämmung der Gebäudehülle.



Abbildung A12: Einbausituation Fenstertüre nach Dämmung der Gebäudehülle

In dem Passivhausprojekt in Mannheim wurde beim ersten Besuch eine weitgehend ungedämmte Gebäudehülle vorgefunden und für eine Raumsituation die Schalldämmung einer Wand mit Fenstertüre bestimmt. Die Situation zeigt Abbildung A11. Die Messung wurde einen Monat später wiederholt, nachdem die Dämmung montiert und der Putz angebracht war. Zweite Situation siehe Abbildung 12. Die Ergebnisse der Messungen zeigt Abbildung AA27 im Anhang. Das bewertete Bau-Schalldämm-Maß $R'_{45^\circ, w}$ (C, C_{tr}) veränderte sich von 33 (-1, -3) auf 34 (-2, -6). Erkennbar sind die Verbesserungen der Schalldämm-Maße zwischen 800 Hz und 2500 Hz, welche auf geringere Undichtigkeiten zurückzuführen sind. Der Vergleich mit einem Referenzfenster gleichen Aufbaus zeigt jedoch, dass offensichtlich weiterhin Schwachstellen bestehen. Allerdings entspricht der Einzahlwert des Referenzfensters von R_w (C, C_{tr}) = 34 (-2, -6) den Werten der gemessenen Konstruktion.

Bei dem zweiten Messobjekt, einem Einfamilienhaus in Weingarten, wurde für die gesamte Gebäudehülle ein Dämmsystem mit Vakuumdämmplatten eingesetzt. Der Aufbau entsprach allerdings nicht den im Prüfstand gemessenen Konstruktionen mit Vakuumdämmung. Verwendet wurden 40 mm dicke Vakuumdämmpaneele, auf denen über ein Schienensystem Fassadenplatten zum Schutz aufgebracht waren. In direkter Vergleich mit Messungen im Prüfstand war damit nicht möglich. Allerdings konnte überprüft werden ob der bestehende Schallschutz nach der Sanierung wieder erreicht wird. Abbildung A13 zeigt das Gebäude vor der Sanierung. Die Messergebnisse vor und nach der Sanierung zeigt Abbildung AA28 im Anhang. Das bewertete Bau-Schalldämm-Maß $R'_{45^\circ, w}$ (C, C_{tr}) veränderte sich von 32 (-1, -1) auf 38 (-2, -4) in der Küche und von 40 (-1, -4) auf 38 (-1, -4) im Wohnzimmer. Der Grund für die deutliche Verbesserung der Schalldämmung zur Küche lag in der Sanierung der Öffnung der Abzugshaube, die zuvor den akustischen Schwachpunkt bildete. Sie wurde mit einem Schalldämpfer versehen. Die Verschlechterung der Schalldämmung zum Wohnzimmer resultiert aus deutlicheren Schalldämmeinbrüchen bei tiefen Frequenzen. Hierfür kann natürlich die Resonanz des neuen Dämmsystems verantwortlich sein. Eine Verbesserung bei hohen Frequenzen ist nicht feststellbar. Allerdings bestimmt hier die Schalldämmung der Fenster wesentlich die Gesamtschalldämmung.



Abbildung A13: Das Gebäude in Weingarten vor der Sanierung (links) und das Aufmaß für die VIP-Paneele (rechts).

7.2.8 Fassade mit WDVS und Fenster im Wandprüfstand

Als weitere Untersuchung bot sich zum Ende des Projektes die Möglichkeit eine Kalksandsteinwand mit WDVS und Fenstereinbau im Wandprüfstand zu realisieren. Untersucht werden sollte die Auswirkung des unterschiedlichen Fenstereinbaus in und außerhalb der Dämmebene auf die Schalldämmung. Bei Passivhauskonstruktionen wird empfohlen, Fenster und Verglasungen in die Dämmebene zu setzen um die Wärmebrückenwirkung der Fensterlaibung zu vermindern (siehe Kapitel 7.1.14). Damit sitzt das Fenster vor der Massivwand und eine Schallübertragung über das Dämmsystem, sozusagen am Fenster vorbei, erscheint möglich.

Die Messungen wurden entsprechend DIN EN ISO 140, Teil 3, Ausgabe 2005-03 „Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen in Prüfständen“ in einem Wandprüfstand ohne Flankenübertragung nach DIN EN ISO 140 Teil 1, Ausgabe 2005-03 durchgeführt. Die Berechnung des bewerteten Schalldämmmaßes R_w und die Ermittlung der Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} erfolgte nach DIN EN ISO 717 Teil 1, Ausgabe 2006-11. Das Volumen des Senderraumes und des Empfangsraumes betrug $55,7 \text{ m}^3$ bzw. $72,8 \text{ m}^3$.

Die folgenden Abbildungen A14 zeigen Empfehlungen des Passiv Haus Instituts (PHI) für den Einbau von Fenstern bei der Altbausanierung. Entweder wird das Fenster mit der Innenkante bündig vor die Massivwand gesetzt oder mittels Abstandshaltern in der Dämmebene befestigt.

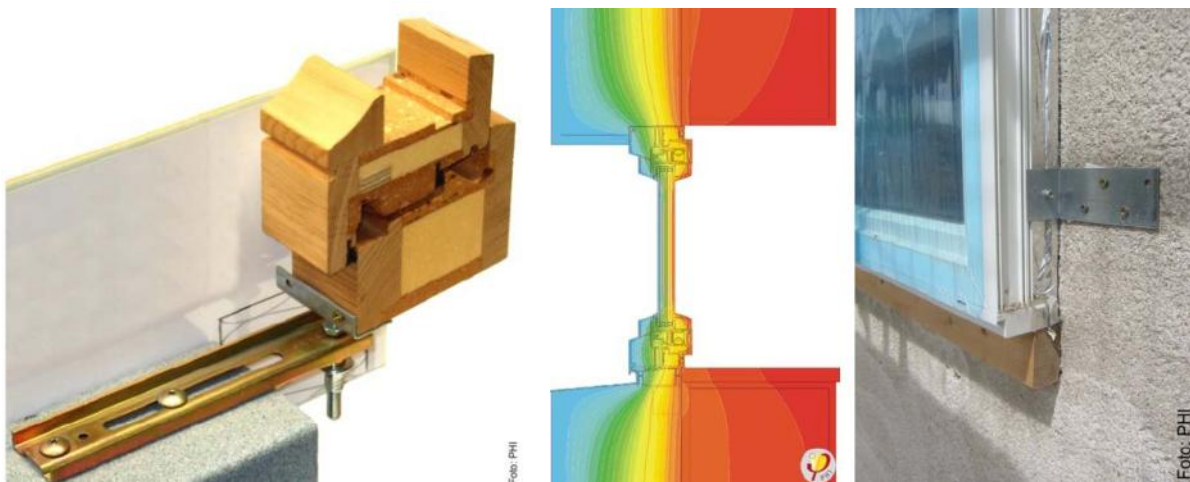


Abbildung A14: Einbauvorschläge für Fenster bei der Altbausanierung auf Passivhaus Niveau.



Abbildung A15: Einbausituation im Wandprüfstand der HFT Stuttgart. Massivwand aus Kalksandstein 175 mm mit MineralwollWDVS 280 mm und Außenputz 15 mm.

Um die Auswirkungen dieser Einbauweisen auf die Schalldämmung zu untersuchen wurde ein entsprechender Aufbau im Wandprüfstand der HFT Stuttgart realisiert. Die Abbildungen A15 zeigen den Prüfaufbau. Auf eine Kalksandsteinwand der Dicke 175 mm (Rohdichte $KS \leq 1800\text{kg/m}^3$) wurde ein WDVS aus Mineralwolle der Dicke 280 mm aufgebracht. Der 15 mm dicke Außenputz bekleidete auch die Fensterlaibung. Das Fenster wurde in fünf verschiedenen Situationen eingebaut und jeweils die Schalldämmung gemessen. Tabelle A7 zeigt die unterschiedlichen Einbausituationen und die gemessenen Einzahlwerte.

Tabelle A7: Einbausituationen und Ergebnisse der Messungen im Wandprüfstand der HFT Stuttgart. Massivwand aus Kalksandstein 175 mm mit MineralwollWDVS 280 mm und Außenputz 15 mm.

| Einbausituation | $R_w (C, C_{tr})$ [dB] | $R_w + C_{tr,50-3150}$ [dB] |
|---|------------------------|-----------------------------|
| Fenster vollständig in der Mauer | 50 (-1, -3) | 38 (-12) |
| Fensterrahmen zu 1/3 i der Mauer, zu 2/3 im WDVS | 50 (-1, -4) | 38 (-12) |
| Fenster 50 mm im WDVS | 50 (-1, -4) | 38 (-12) |
| Fenster 100 mm im WDVS | 49 (-1, -4) | 38 (-11) |
| Fenster 200 mm im WDVS | 49 (-1, -4) | 38 (-11) |

Den Verlauf der Schalldämm-Maße zeigen die Abbildungen AA26 im Anhang. Es ist erkennbar, dass die Unterschiede lediglich bei hohen Frequenzen über 2500 Hz auszumachen sind. Der Grund dafür ist vermutlich die Koinzidenz der Putzplatte bei etwa 2700 Hz und damit verbunden der Abstrahlgrad ≥ 1 . Erst ab diesem Frequenzbereich strahlt die zusätzlich Putzfläche verstärkt auf der Innenseite Schall in den Raum ab. Diese Fläche wird beim Einrücken des Fensters immer kleiner, so dass ab 50 mm kaum ein Unterschied mehr feststellbar ist. Akustisch ist damit das Herausrücken des Fensters in die Dämmebene unkritisch, wenn alle Anschlüsse und Fugen dicht sind und sorgfältig ausgeführt werden.

7.2.9 Berechnungen

Im Folgenden werden die einzelnen Bauteile wieder zu einer gesamten Fassade zusammengesetzt und die Fassade als akustisches Gesamtsystem betrachtet. An Hand der Berechnungsbeispiele soll gezeigt werden, welches die potentiellen akustischen Schwachpunkte einer Fassade sind und wie die Fassade für den Schallschutz optimiert werden kann. Die Berechnungen erfolgen mit der Software BASTIAN (Version 2.3.91). Die Software rechnet nach den Teilen 1 bis 3 der DIN EN 12354. In den Abschnitten zu den einzelnen Bauteilen wurde bereits darauf hingewiesen, dass zumeist die Fenster/Verglasungen akustische Schwachpunkte darstellen und Rollladenkästen oder Lüftungsöffnungen den Schallschutz bei ungünstiger Produktwahl zusätzlich schwächen können. Es soll daher gezeigt werden, welcher Schallschutz bei günstiger Bauteilwahl erreichbar ist und wie dieser durch einzelne Bauteile im ungünstigen Fällen geschwächt wird.

Die Abbildungen AA 29 bis AA35 zeigen insgesamt sechs Berechnungsbeispiele (Wand +WDVS, zwei Fenster (je $1,88 \text{ m}^2$), zwei Rollladenkästen (über den Fenstern), eine Lüftungsöffnung, $S_{ges}=18 \text{ m}^2$, $V=72 \text{ m}^3$). Zunächst wurden jeweils die akustisch besten Bauteile zu einer Fassade zusammengesetzt, danach die Schlechtesten, so dass die Bandbreite deutlich wird. Es folgen Variationen bei de-

nen bei der akustisch besten Fassade nacheinander jeweils ein Bauteil ausgetauscht und ersetzt wird und zwar immer durch das schlechteste Bauteil der Bauteilgruppe. Bei der akustisch ungünstigsten Fassade erfolgte das Verfahren genau andersherum. Untenstehende Tabelle zeigt die Kombinationen.

Tabelle A8: Bauteilkombinationen für Fassaden mit dem besten und dem schlechtesten Schallschutz auf Grundlage der vorhandenen Bauteildaten.

| Bauteile | Aufbau Nr. | $R_{45^\circ, w}^i (C, C_{tr}, C_{tr,50-3150})$ $R_w (C, C_{tr}, C_{tr,50-3150})$ [dB] | $D_{2m,nT,w} (C, C_{tr}, C_{tr,50-3150})$ $D_{n,e,w} (C, C_{tr}, C_{tr,50-3150})$ [dB] |
|------------------------------|---------------|--|--|
| Beste Bauteile | 1 | 53 (-1, -5, -7) | 54 (-2, -6, -8) |
| Wand + 240 mm EPS | | 65 (-4, -12, -13) | |
| 10VSG/35/8VSG/24/10 Argon | | 48 (-1, -3, -6) | |
| Rollladenkasten | | | 61 (-1, -3, -4) |
| Insellüftungsgerät | | | 59 (-2, -6, -10) |
| Schlechteste Bauteile | 2 | 35 (-1, -4, -4) | 36 (-1, -5, -5) |
| Wand + 90 mm VIP/PS/Resol | | 50 (-2, -7, -7) | |
| 4/16/4/16/4 Argon | | 36 (-4, -9, -9) | |
| Rollladenkasten | | | 51 (-1, -6, -9) |
| EinRohr-Lüftungsgerät | | | 33 (0, -2, -2) |

Abbildung AA29, der Aufbau 1 zeigt die Schwachpunkte bei der akustisch höchstwertigen Fassade. Wie oben bereits angesprochen ist die Verglasung das akustisch schwächste Bauteil und für 60% des Schalldurchgangs verantwortlich. Abbildung AA30, der Aufbau 2 zeigt hingegen die möglichen Konsequenzen beim Einsatz einer schalltechnisch ungünstigen Lüftungsanlage. Diese Lüftungsanlage kann auch bei ansonsten hochwertigen Bauteilen den Schallschutz extrem verschlechtern (siehe auch Abbildung AA33). Überhaupt zeigen die Beispiele AA33 bis AA35, dass bei ansonsten akustisch sehr guten Bauteilen ein einzelnes, sehr ungünstiges Bauteil den Schallschutz bestimmen kann. Wird beim ungünstigsten Aufbau 2 die Lüftungsanlage verbessert (siehe Abbildung AA22), werden auch wieder die Fenster zu den akustischen Schwachpunkten. Als erste Planungsrichtlinien kann damit festgehalten werden:

Wichtig ist die Auswahl geeigneter Fenster um wirkungsvollen Schallschutz zu ermöglichen. Das Dämmsystem sollte nicht schlechter sein und diese nicht schwächen, wie beispielsweise in Abbildung AA23. Ebenso dürfen Rollladenkästen und Lüftungsöffnungen den Schallschutz der Fenster nicht schwächen. Als Faustformel hierzu wird empfohlen:

$$D_{n,e,w} + C_{tr} \text{ Rollladenkasten/Lüftung} \geq R_w + C_{tr} \text{ Fenster} + 8 \text{ dB}$$

Für den Aufbau 1 bedeutet dies $D_{n,e,w} + C_{tr} \text{ Rollladenkasten/Lüftung} \geq 53 \text{ dB}$. Dies wird von den Bauteilen eingehalten.

7.2.10 Tiefe Frequenzen

Auf die besondere Problematik der tiefen Frequenzen wird an dieser Stelle nochmals ausdrücklich hingewiesen, allerdings ohne die Gründe aufzuzählen. Der Verweis auf die Arbeit von Jakob und Feldmann 2006 [28] und die dort aufgelisteten Quellen soll genügen. Sie plädieren darin für eine Anhebung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen, soweit möglich, um die Schalldämmung über den gesamten Frequenzbereich ausgeglichener zu gestalten. Die besondere Lästigkeit der tiefen Frequenzen und wahrnehmungspsychologische Erkenntnisse liefern die Gründe.

7.2.11 Gesamtbewertung

In der Gesamtbewertung stellt sich natürlich die Frage nach geeigneten Kriterien. Nachfolgend werden daher die Anforderungen und teilweise deren Grundlagen in den Ländern Deutschland, Österreich und Schweiz zusammengestellt. Berechnungsbeispiele zeigen, wie diese Anforderungen erreicht werden können und welche Innenpegel sich ergeben. Als Arbeitshypothese wird das Vorgehen in der Schweiz aufgegriffen und überprüft, ob bei Einhaltung der Anforderungen sich ein Innenraumpegel von 30 dB(A) einstellt. Zusätzlich werden für einzelne Beispiele auch die psychoakustischen Kenngrößen spezifische Lautheit und Perzentillautheit N_5 berechnet. Die Berechnungsverfahren wurden bereits im Kapitel Verkehrslärm vorgestellt und werden in dieser Form auch hier angewandt.

Anforderungen

In Deutschland gilt nach wie vor die DIN 4109:1989-11 [6]. In ihr werden je nach Lärmpegelbereich Anforderungen an das resultierende, bewertete Schalldämm-Maß der Fassade gestellt. Im Zuge der Novellierung der 4109 werden die Anforderungen vermutlich auf die bewertete Standard-Schallpegeldifferenz umgestellt und in der Höhe übernommen. Die konkreten Anforderungswerte zeigt Tabelle A9.

In Österreich gelten Anforderungen gemäß ÖNORM B 8115-2:2006-12. In ihr werden ebenfalls je nach Lärmpegelbereich Anforderungen an das resultierende, bewertete Schalldämm-Maß der Fassade gestellt. Allerdings gibt es zusätzlich Anforderung an die opake Außenwand und die Fenster und Außentüren. Bei den Fenstern und Außentüren gelten Anforderungen inklusive Spektrum-Anpassungswert C_{tr} . Die konkreten Anforderungswerte sind wiederum in Tabelle A9 aufgeführt.

In der Schweiz regelt die Anforderungen die SIA 181:2006. Die Anforderungen beziehen sich explizit auf Untersuchungen die von Schlafstörungen bei Innenraumpegeln über 30 dB(A) nachts und von Kommunikationsstörungen bei Pegel über 40 dB(A) tags ausgehen. Entsprechend wurden die Anforderungen gefasst. Sie sind nach Lärmempfindlichkeiten differenziert und richten sich nach dem Beurteilungspegel der externen Quelle. Die Anforderungen werden an eine bewertete Standard-Schallpegeldifferenz, plus Spektrum-Anpassungswert C_{tr} , abzüglich einer Volumenkorrektur C_v für große Räume gestellt. Tabelle A9 zeigt die Werte für eine mittlere Lärmempfindlichkeit.

Tabelle A9: Anforderungen an den Schallschutz gegen Außenlärm von D, von AU und der CH, Werte für den Tag und die Nacht (soweit vorhanden).

| Land | Kenngroße | Lärmpegelbereich [dB(A)] | Wert [dB] |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------|
| D (DIN 4109:1989-11) | erf. $R'_{w,res}$ | 71-75 | 45 |
| | | 76-80 | 50 |
| künftig ? berechnet | erf. $D_{nT,w}$ | 71-75 | 46,3 |
| | | 76-80 | 51,3 |
| AU (ÖNORM B 8115-2:2006-12) | erf. $R'_{w,res}$ | 71-75 | 48 |
| Opake Außenwand | R_w | (61-65 Nacht) | 53 |
| Fenster und Außentüren | R_w | | 43 |
| | $R_w + C_{tr}$ | | 38 |
| Außenbauteile gesamt | erf. $R'_{w,res}$ | 76-80 | 53 |
| Opake Außenwand | R_w | (66-70Nacht) | 58 |
| Fenster und Außentüren | R_w | | 48 |
| | $R_w + C_{tr}$ | | 43 |
| CH (SIA 181:2006) | | $L_r > 64$ | $L_r - 33$ (Tag) |
| Beispiel $L_r = 75$ dB(A) | $D_{nT,w} + C_{tr} - C_v$ | 75 | 42 |
| Beispiel $L_r = 80$ dB(A) | | 80 | 47 |
| | | | $L_r - 25$ (Nacht) |

Berechnungen

Die ersten Berechnungen gehen von einem Außenlärm zwischen 71 und 75 dB(A) aus. Es wird eine Fassade zusammengestellt, die die Anforderungen aller Länder erfüllen soll und der Innenraumpegel für unterschiedliche Verkehrslärmarten berechnet.

Tabelle A10: Bauteilkombinationen für Fassaden zur Erfüllung des Schallschutz gegen Außenlärm für unterschiedliche Lärmpegelbereiche.

| Bauteile | Aufbau Nr. | $R'_{45^\circ,w} (C, C_{tr}, C_{tr,50-3150})$ $R_w (C, C_{tr}, C_{tr,50-3150})$ [dB] | $D_{2m,nT,w} (C, C_{tr}, C_{tr,50-3150})$ $D_{n,e,w} (C, C_{tr}, C_{tr,50-3150})$ [dB] |
|------------------------------|------------|--|--|
| Außenlärm 71-75 dB(A) | 1 | 49 (-2, -6, -8) | 49 (-1, -6, -7) |
| Wand + 280 mm MW | | 59 (-3, -10, -12) | |
| VSG8/12/5/12/4 Argon | | 45 (-2, -5, -7) | |
| Rollladenkasten | | | 55 (-1, -3, -4) |
| Lüftungsöffnung | | | 52 (-3, -7, -8) |
| Außenlärm 76-80 dB(A) | 2 | 50 (-2, -6, -8) | 50 (-1, -5, -8) |
| Wand + 280 mm MW | | 59 (-3, -10, -12) | |
| VSG8/12/5/12/4 Argon | | 45 (-2, -5, -7) | |
| Rollladenkasten | | | 55 (-1, -3, -4) |
| Lüftungsöffnung | | | 56 (-1, -5, -12) |

Die Anforderungen der einzelnen Länder werden von Aufbau 1 in einem Lärmpegelbereich von 71 bis 75 dB(A) erfüllt. Der Aufbau 2 für den höheren Lärmpegelbereich erfüllt lediglich die Anforderungen von Deutschland, für die Schweiz und Österreich muss nachgebessert werden. Erst der in der obigen

Tabelle A8 aufgeführte „beste Aufbau“ erfüllt auch die Anforderungen aus Österreich und der Schweiz.

Die Berechnungsergebnisse in Tabelle A11 zeigen, dass die Anforderungen aus allen drei Ländern beim tieffrequenten Straßenverkehrsgeräusch keinen Innenraumpegel ≤ 30 dB(A) garantieren. Die Anforderungen von Deutschland, die keine Spektrum-Anpassungswerte berücksichtigen, erlauben, wie in Abbildung AA36 höhere und damit störendere Innenpegel. Der tieffrequent dominierte Straßenverkehrslärm ist besonders problematisch, da die Maxima oft unter 100 Hz liegen. Dies wird durch bisherige Anforderungen nicht ausreichend berücksichtigt. Spezielle Anforderungen an tieffrequenten Lärm durch Einbeziehen von $C_{tr,50-3150}$ wären deshalb wünschenswert oder besser noch die Kombination aus den Schweizer Anforderungen und zusätzlich die Berücksichtigung von $C_{tr,50-3150}$. Dies würde bedeuten, dass sich die Anforderungen am gewünschten Innenraumpegel und am Außengeräusch orientieren (siehe Schweiz), bei tieffrequentem Straßenverkehrslärm aber $C_{tr,50-3150}$ als Spektrum-Anpassungswert in die Anforderung mit aufgenommen wird. Einen ähnlichen Vorschlag machte Donner 2007 [26] zur Überarbeitung der VDI 2719 [27]. Dort wird die Schalldämmung von Außenbauteilen nach folgender Gleichung berechnet:

$$R'_{w,res} = L_a - L_i + 10 \lg \left(\frac{S_g}{A} \right) + K + W \text{ [dB]} \quad [7].$$

mit:

| | | |
|--------------|---|--|
| $R'_{w,res}$ | = | notwendige resultierende Schalldämm-Maß der Außenfassade [dB] |
| L_a | = | der Außenschalldruckpegel [dB(A)] |
| L_i | = | angestrebter Innenschalldruckpegel im Raum [dB(A)] |
| S_g | = | Größe der Außenfläche [m ²] |
| A | = | äquivalente Schallabsorptionsfläche des Raumes [m ²] |
| K | = | Korrekturwert für das Spektrum des Außengeräusches [dB] |
| W | = | Winkelkorrektur [dB] |

| | | |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------|
| Für K [dB] wird vorgeschlagen: | an innerstädtischen Straßen | $-C_{tr}$ |
| | bei Straßenbahnen | $-C$ |
| | an Schienenwegen | 0 |
| | bei Güterzügen | $-C + 1$ |

Wird diese Gleichung auf die Beispielfassade angewandt und für Außenschalldruckpegel von 75, 77 und 80 dB(A) und einen angestrebten Innenschalldruckpegel von 30 dB(A) berechnet, ergeben sich Anforderungswerte für Straßenlärm von:

| | |
|----------|---------------------------------|
| 75 dB(A) | $R'_{w,res} + C_{tr} = 47,6$ dB |
| 77 dB(A) | $R'_{w,res} + C_{tr} = 49,6$ dB |
| 80 dB(A) | $R'_{w,res} + C_{tr} = 52,6$ dB |

Diese Anforderungen sind anspruchsvoll und wie die Beispiele der Tabelle A 10 (Straßenlärm 77 dB(A)) zeigen, wird mit diesen Werten der angestrebte Innenschalldruckpegel von 30 dB(A) sicher erreicht. Bei diesem Vorschlag erscheint eine Erweiterung auf $C_{tr,50-3150}$ nicht notwendig.

Lautheiten

Um die subjektive Beurteilung verstärkt zu berücksichtigen wurden zusätzlich die Lautheiten der Verkehrsgeräusche und der ermittelten Innenraumgeräusche bestimmt. Untenstehende Tabelle zeigt auch diese Ergebnisse.

Tabelle A11: Gegenüberstellung von ermittelten Lautheiten und A-bewertetem Schalldruckpegeln für Verkehrsgeräusche und die Geräusche im Raum.

| Lärmart Konstruktion | $L_{AF,eq}$ [dB(A)] | Perzentillautheit außen N_5 [sone] | Innenpegel $L_{AF,eq}$ [dB(A)] | Perzentillautheit innen N_5 [sone] | Lautheit innen in [%] vom Außenlärm |
|----------------------------------|------------------------|--|--------------------------------------|--|---|
| Straßenlärm 74 dB(A) | | | | | |
| Aufbau 1 (49 (-1, -6, -7)) | 74,1 | 46,5 | 32,2 | 1,8 | 3,9 |
| Aufbau 2 (50 (-1, -5, -8)) | 74,1 | 46,5 | 31 | 1,6 | 3,4 |
| Beste Bauteile (54 (-2, -6, -8)) | 74,1 | 46,5 | 26,2 | 1 | 2,2 |
| Straßenlärm 77 dB(A) | | | | | |
| Aufbau 1 (49 (-1, -6, -7)) | 77,1 | 56 | 35,3 | 2,4 | 4,3 |
| Aufbau 2 (50 (-1, -5, -8)) | 77,1 | 56 | 33,8 | 2,1 | 3,8 |
| Beste Bauteile (54 (-2, -6, -8)) | 77,1 | 56 | 29,2 | 1,4 | 2,5 |
| Stadtbahn 72 dB(A) | | | | | |
| Aufbau 1 (49 (-1, -6, -7)) | 71,8 | 36,2 | 26,5 | 1 | 2,8 |
| Aufbau 2 (50 (-1, -5, -8)) | 71,8 | 36,2 | 25,3 | 0,9 | 2,5 |
| Beste Bauteile (54 (-2, -6, -8)) | 71,8 | 36,2 | 23,3 | 0,6 | 1,7 |
| Zug 70,4 dB(A) | | | | | |
| Aufbau 1 (49 (-1, -6, -7)) | 70,4 | 33 | 21,5 | 0,6 | 1,8 |
| Aufbau 2 (50 (-1, -5, -8)) | 70,4 | 33 | 21,4 | 0,5 | 1,5 |
| Beste Bauteile (54 (-2, -6, -8)) | 70,4 | 33 | 21 | 0,4 | 1,2 |
| Zug 79 dB(A) | | | | | |
| Aufbau 1 (49 (-1, -6, -7)) | 78,9 | 51 | 28,7 | 1,4 | 2,7 |
| Aufbau 2 (50 (-1, -5, -8)) | 78,9 | 51 | 28,5 | 1,3 | 2,5 |
| Beste Bauteile (54 (-2, -6, -8)) | 78,9 | 51 | 26,5 | 0,9 | 1,8 |

Die Werte der Tabelle verdeutlichen, dass durch die unterschiedlichen Fassaden eine höhere Verbesserung bei Schienenverkehrslärm erzielt wird, als bei Straßenverkehrslärm. Da die Schalldämmung der Fassaden als Tiefpass wirkt, wie sehr deutlich an den Innenraumpegeln in den Abbildungen AA36 bis AA 39 zu sehen ist, ist dies auch zu erwarten. Ferner ist erkennbar, dass die Veränderungen und deren Größenordnung bei den Lautheiten und dem A-bewerteten Schalldruckpegeln in etwa im gleichen Bereich liegen. Das würde bedeuten, dass die A-bewerteten Schalldruckpegel im Raum als Indikator für die subjektive Beurteilung ausreichend sind und ein angestrebter Innenschalldruckpegel von zum Beispiel 30 dB(A) als Zielgröße sinnvoll erscheint.

Der Grund hierfür ist, dass bei Schalldruckpegeln um 30 bis 40 dB(A) die A-Bewertung und der subjektive Eindruck gut korrelieren. Bei höheren Schalldruckpegeln ist das nicht mehr der Fall. So liegt die Lautheit des 78,9 dB(A) lauten Zuggeräusches bei 51 sone, während das 77,1 dB(A) laute Straßengeräusch 56 sone erreicht. In diesem Pegelbereich findet eine Unterbewertung der tiefen Frequenzen durch den A-Pegel statt, der auf die Nichtlinearitäten bei den Kurven gleicher Lautstärke zurückzuführen ist.

7.3 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden mit einer akustischen Optimierung zu verbinden. Die Notwendigkeit von energetischen Sanierungen ist bekannt und einsichtig. Sie ist zentraler Bestandteil einer längerfristigen Strategie zur Reduzierung von CO₂-Emissionen. Die Notwendigkeit zur Verbesserung des Schallschutzes wird üblicherweise nachrangig behandelt. Dies obwohl Lärm in höchstem Maße gesundheitsschädigend ist und das Bedürfnis nach Ruhe und verbessertem Lärmschutz immer lauter wird. Bei einer umfassenden Sanierungsmaßnahme liegt es auf der Hand beides miteinander zu verbinden und somit den Wohnkomfort und die Energieeffizienz deutlich zu erhöhen. Dass und wie dies möglich ist zeigt die Arbeit.

Für die energetische Sanierung wird der anspruchsvolle Passivhausstandard angestrebt. Die notwendigen wärmetechnischen Maßnahmen diesen zu erreichen sind sehr stark von der gegebenen Baubsubstanz und der Kubatur der Bestandsgebäude abhängig. Bei gewissen geometrischen Verhältnissen (geringe Geschosshöhe mit hohem A/V-Verhältnis) und unter bestimmten Randbedingungen (Wärmebrücken zum Keller, von Balkonplatten etc.) kann der Passivhausstandard ohne extremen Eingriff in die Gebäudesubstanz nicht erreicht werden. In diesen Fällen wird empfohlen eine Sanierung mit Passivhauskomponenten mit einem weniger ambitionierten Energiestandard anzustreben. Um eine schnelle erste Einschätzung zu ermöglichen, ob und mit welchem Aufwand ein Bestandsgebäude zum Passivhausstandard saniert werden kann, wurden sog. charakteristische Kurven für unterschiedliche Gebäudetypen ermittelt. Diese zeigen den erforderlichen mittleren U-Wert über dem A/V Verhältnis und damit die Möglichkeit ob mit vertretbarem Aufwand Passivhausstandard realisiert werden kann. Zentrale Einflussgrößen für diese erste Einschätzung sind Kompaktheit, Fensterflächenanteil und Verschattung von Glasflächen. In grober Näherung kann gesagt werden, dass bei Geschosswohnbauten ab vier Geschossen und bei kompakter Bauweise Passivhausstandard erreicht werden kann. Eine Ausnahme bilden Gebäude unter Denkmalschutz, bei denen keine vollflächige Außenabdämmung möglich ist. Hier müssen Innendämmungen verwendet werden, eventuell sogar sog. Hochleistungsdämmstoffe (Vakuumpaneele). Durch die unvermeidbaren Wärmebrücken kann dabei jedoch Passivhausstandard in der Regel nicht mit vertretbarem Aufwand erreicht werden. Die Berücksichtigung aller marktgängigen Materialien zeigt eine Vielfalt von Möglichkeiten mit Aufbaudicken zwischen 10 cm und 35 cm. Durch sinnvolle Materialkombinationen lassen sich so für die meisten Details gangbare und wirtschaftliche Lösungen finden.

Wird der Schallschutz betrachtet gilt die Aufmerksamkeit zunächst dem Verkehrsgeräusch. Nicht nur die Lautstärke, sondern vor allem die Pegelverteilung, das Spektrum, muss in die Planungen unbedingt mit einbezogen werden. Bei der energetischen Sanierung der opaken Bauteile werden Wärmedämmsysteme zwischen 10 cm und 35 cm Dicke verbaut. Sie verhalten sich fast alle wie Masse-Feder-Systeme mit einer Verschlechterung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen. Von neun untersuchten Systemen erreichten lediglich drei Systeme, bei besonderer Berücksichtigung der tiefen Frequenzen, eine Verbesserung gegenüber dem unsanierten Zustand. Verallgemeinert heißt das, dass Dämmsysteme bei größeren Dicken in der Regel die Schalldämmung bei tiefen Frequenzen verschlechtern. Allerdings gilt auch für den energetisch sanierten Zustand einer Fassade, dass meistens die Fenster und Verglasungen den akustischen Schwachpunkt darstellen. Ihre Schalldämmung

liegt üblicherweise deutlich unter der der Wand mit Dämmsystem. Dies findet seine Entsprechung im Wärmeschutz, da die Fenster und Verglasungen auch meist den thermischen Schwachpunkt darstellen. Ihrer Auswahl kommt damit eine große Bedeutung zu und sie sollte mit Bedacht getätigt werden. Aus akustischer Sicht ist noch die Wahl des Lüftungssystems hervorzuheben. Um Platz und Kosten zu sparen werden bei Sanierungen gerne dezentrale Lüftungssysteme gewählt, die die Anforderungen an den Passivhausstandard durchaus erfüllen können. Dazu müssen in jedem belüfteten Raum Außenwanddurchbrüche gebohrt werden, die den Schallschutz gravierend verschlechtern können, wie die Untersuchungen zeigen. Auch hier ist deshalb bei der Auswahl besondere Sorgfalt notwendig. Insgesamt ist im Bereich des Schallschutzes die Bedeutung der tiefen Frequenzen besonders zu betonen. Die als am meisten störend empfundenen Straßenverkehrsgeräusche weisen bei tiefen Frequenzen ihre Maxima auf und fast alle Bauteile der Fassade haben bei tiefen Frequenzen die geringste Schalldämmung. Die Störungen und Belästigungen in diesem Frequenzbereich sind also vorprogrammiert. Um einen ausreichenden Schallschutz zu gewährleisten sind die tiefen Frequenzen besonders zu berücksichtigen. Dies geschieht derzeit durch die Spektrum-Anpassungswerte. Diese sind in Deutschland aber bisher nicht in die Anforderungen einbezogen. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass bei Straßenverkehrslärm nur durch Anforderungen inklusive Spektrum-Anpassungswerten ein verträglicher Innenraumschalldruckpegel und damit ein ausreichender Schallschutz gewährleistet werden kann. Hierzu werden mögliche Anforderungskombinationen vorgestellt.

Ein interaktiver Leitfaden zur energetischen und akustischen Sanierung von Altbauten ist im Internet erreichbar über:

<http://www.hft-stuttgart.de/Forschung/Kompetenzen/zafh/Projekte/Projekt9/de>

8 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms

Das Forschungsprojekt „Energetische und akustische Sanierung von Wohngebäuden – vom Altbau zum akustisch optimierten Passivhaus“ ist Teil des Baden-Württemberg Programms „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ (BWPLUS). Speziell ausgeschrieben wurde in diesem Rahmen das Thema „Lärm in der Umwelt“ mit dem Fachprogramm „Energetische und akustische Sanierung von Gebäuden“. Das Ziel dieses Fachprogramms wurde formuliert als „Entwicklung von ganzheitlichen Sanierungsverfahren, die eine kombinierte akustische und thermische Gebäudesanierung ermöglichen“.

Die vorliegende Arbeit zeigt die Grundlagen und die wesentlichen Kriterien für solche ganzheitlichen Sanierungsverfahren auf. Was die thermische Sanierung betrifft wurde sogar über das gesetzlich vorgeschriebene EnEV-Niveau deutlich hinausgegangen und Machbarkeit beziehungsweise Sanierungsmöglichkeiten auf Passivhausstandard dargestellt. Dieses Anforderungsniveau wird in den nächsten Jahren für Neubauten kommen, für die Sanierung von Bestandsgebäuden ist es zukunftsweisend. Das gewählte Vorgehen und der Einbezug von innovativen Materialien sollten dabei gewährleisten, dass die Ergebnisse nachhaltig nutzbar bleiben. Von den thermisch notwendigen Konstruktionen und Bauteilen wurde dann die akustische Qualität untersucht und die akustischen Schwachpunkte der einzelnen Teile und der gesamten Fassade deutlich gemacht. Durch diesen Gesamtüberblick kann die vorliegende Arbeit als Leitfaden für ganzheitliche Sanierungsmaßnahmen dienen und ermög-

licht durch eine sinnvolle Kombination der untersuchten Baustoffe und Bauteile eine gezielte Optimierung von Fassaden hinsichtlich der Funktionen Wärmeschutz und Schallschutz.

Bezüglich der akustischen Optimierung von Bauteilen und Bauteilkombinationen besteht allerdings noch Luft nach oben. Im Zuge des Projektes wurde dem Überblick über die gängigen Bauteile und Konstruktionen zur Sanierung auf Passivhausstandard der Vorrang gegeben vor der gezielten Optimierung einzelner Bauteile. Hier besteht noch Potential, vor allem bei Lüftungssystemen, Fenstern und auch Dämmsystemen gezielt die akustischen Eigenschaften zu verbessern und den Schallschutz bei sanierten Gebäuden weiter zu optimieren.

9 Literatur

- [1] Eicker, U., Seeberger, P., Fischer, H.: Evaluierung eines im Passivhaus-Standard sanier-ten Bürogebäudes hinsichtlich des energetischen und raumklimatischen Verhaltens, Abschlussbericht ‚EnSan‘ Forschungsprojekt des Bundesministeriums für Wissenschaft und Arbeit, www.ensan.de, 2007.
- [2] Caps, R., Heinemann, U., Ehrmanntraut, M., Fricke, J.: Evacuated insulation panels filled with pyrogenic silica powders: properties and applications. High Temperatures – High Pressures 32, 2000.
- [3] Caps, R., Fricke, J.: Konzepte für den Einsatz von evakuierten Dämmungen bei Passiv-häusern. Proceedings 4. Passivhaus-Tagung Kassel 2000.
- [4] Beck, A., Frank, O., Huber, M., Schürger, U., Seeberger, P., Weigert, L., Binder, M.: Opti-mierung von Vakuumisolationspaneelen bezüglich Funktionsdauer und Einsatzgebieten, Abschlussbericht zum Projekt VIPIN der Landesstiftung BW, Stuttgart, März, 2007.
- [5] Baumgartner, H.; Kurz, R.: Mangelhafter Schallschutz von Gebäuden, Fraunhofer IRB Ver-lag, Stuttgart, 2003.
- [6] DIN 4109: Schallschutz im Hochbau - Anforderungen und Nachweise, November 1989.
- [7] Weber, L.; Brandstetter, D.: Einheitliche schalltechnische Bemessung von Wärmedämm-verbundsystemen, Fraunhofer IRB Verlag 2003.
- [8] Weber, L.; Buchele, A.: Akustische Sanierung von Wohngebäuden mit Vorsatzschalen und Vorsatzkonstruktionen – Planung, Berechnung, Optimierung, IBP-Bericht B-BA 2/2008.
- [9] DIN EN ISO 717-1: Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Luft-schalldämmung, August 2006.
- [10] Feldmann, J.; Jakob, A.: Tieffrequenter Wohnlärm – Ursachen, Auswirkungen und Minde-rungsmöglichkeiten, DAGA 2006, Braunschweig.
- [11] Weber, Lutz; Koch, Siegfried: Anwendung von Spektrum-Anpassungswerten; Sonderdruck aus Bauphysik 21 (1999) und 22 (2000), Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2000.
- [12] Saß, B.: Schalldämmung von Dreifach-Isolierglas, DAGA 2009, Berlin.
- [13] Scholze, J.: Akustische und strömungstechnische Eigenschaften von Außenluftdurchläs-sen; Bauphysik 16 (1994), Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1994.
- [14] Schnelle, F.; Kurz, R.: Schalldämmung von Überstromelementen, DAGA 2003, Aachen.
- [15] Fischer, H.-M.: Schutz gegen Außenlärm, in Lehrbuch der Bauphysik, 6. Auflage Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2008.
- [16] Hubert, M.; Nawrot, W.: Schalldämmung von Rollläden, Berichte aus der Bauforschung, Heft 63, 1969.
- [17] Lutz, P.; Lakatos, B.: Die Schalldämmung von Rollläden und Rollladenkästen, DAGA 1976, Heidelberg.
- [18] Lutz, P.; Lakatos, B.: Einfluss des heruntergelassenen Rollladens auf die Schalldämmung eines Fensters, IBP Mitteilung 26, Stuttgart 1977.

- [19] Diaz, C.; Pedrero, A.: An experimental study on the effect of rolling shutters and shutter boxes on the airborne sound insulation of windows, Applied Acoustics 70, 2009, p 369-377.
- [20] Deutsche Gebäudetypologie – Systematik und Datensätze, Institut Wohnen und Umwelt, IWU Darmstadt, 2003.
- [21] Schulze Darup, B.: Strategien und Beispiele zur Umsetzung energetischer Altbausanierung. – In: AGÖF Tagungsreader 1999, Hrsg. AGÖF 31832 Springe-Eldagsen 1999.
- [22] Loga, T., Born, R., Großklos, M., Bially, M.: Energiebilanz-Toolbox. Arbeitshilfe und Ergänzungen zum Energiepass Heizung / Warmwasser; IWU Darmstadt, Dez. 2001.
- [23] DIN EN ISO 140-16: Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 16: Messung der Verbesserung des Schalldämm-Maßes durch zusätzliche Vorsatzschalen im Prüfstand, November 2006.
- [24] DIN EN 29052: Bestimmung der dynamischen Steifigkeit. Teil 1: Materialien die unter schwimmenden Estrichen in Wohngebäuden verwendet werden, August 1992.
- [25] DIN EN 20 140-10: Messung der Luftschalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen; Messung der Luftschalldämmung kleiner Bauteile in Prüfständen, September 1992.
- [26] Donner, U.: Überarbeitung der VDI 2719 – Neue Methodik zur Bemessung der Schalldämmung von Außenbauteilen; DAGA 2007, Stuttgart.
- [27] VDI 2719: Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen, August 1987.
- [28] Feldmann, J., Jakob, A.: Tieffrequenter Wohnlärm – Ursachen, Auswirkungen und Minderungsmöglichkeiten; DAGA 2006, Braunschweig.

10 Vorträge und Veröffentlichungen

Vorträge

Drechsler, A. et al.: Acoustic performance of energy efficient building products used for modernisation of existing buildings. Euronoise 2009, Edinburgh.

Marin, R. et al.: Investigation of the acoustic influences of passive house windows and ventilation openings by the refurbishment of old buildings on passive house level. Poster Euronoise 2009, Edinburgh.

Drechsler, A. et al.: Vom Altbau zum akustisch optimierten Passivhaus – Schallschutz von hochwärmedämmenden Fassaden. Fortschritte der Akustik, DAGA 2010, Berlin.

Marin, R. et al.: Vom Altbau zum akustisch optimierten Passivhaus – Schallschutz von Rollladenkästen und Lüftungseinrichtungen bei der Altbausanierung. Fortschritte der Akustik, DAGA 2010, Berlin.

Varga, E.; Drechsler, A. et al.: Energetische und akustische Sanierung von Wohngebäuden – vom Altbau zum akustisch optimierten Passivhaus. Passivhaus Tagung 2010, Dresden.

Drechsler, A.: Fortbildung für Energieberater im ZFB der HFT Stuttgart in Zusammenarbeit mit dem Landesfachverband Gebäudeenergieberater Ingenieure Handwerker e.V. Baden-Württemberg GIH, Mai 2010.

Drechsler, A. et al.: Akustische Schwachstellen bei der Sanierung von Wohngebäuden. 3. Energieeffizienztagung Bauen + Modernisieren des e.u.[z] 2010, Hannover.

Drechsler, A. et al.: Akustische Schwachstellen bei der Sanierung von Wohngebäuden. Süddeutsches Energieberaterforum 2011, Feuchtwangen.

Drechsler, A. et al.: Sound insulation of residential buildings in the process of energetic refurbishment. Forum Acusticum 2011, Aalborg.

Artikel

Pietruschka, D. et al.: Energetische und akustische Sanierung von Wohngebäuden – vom Altbau zum akustisch optimierten Passivhaus. Ingenieurblatt für Baden Württemberg 4/2010, Seite 168ff.

Drechsler, A.: Gut gedämmt und doch nicht leise - Akustische Schwachstellen bei der Sanierung von Wohngebäuden. Energie KOMPAKT – 06/2010, Seite 25ff.

Drechsler, A.: Energieeffizient und zugleich leise. B+B Bauen im Bestand – 05/2011, Seite 26ff.

Drechsler, A.: Außenlärm gemeinsam draußen halten. B+B Bauen im Bestand – 06/2011, Seite 37ff.

Internet

<http://www.hft-stuttgart.de/Forschung/Kompetenzen/zafh/Projekte/Projekt9/de>

11 Anhang W1

In den nachfolgenden Tabellen sind mögliche Kombinationen von Konstruktionen aufgelistet, mit denen der Passivhausstandard bei einem Gebäudetyp unter bestimmten geometrischen Eigenschaften (A/V-Verhältnis, Fensterflächenanteil) erreicht werden kann. Die Wärmebrücken sind in den Tabellen als Wärmebrückenzuschlag angegeben. Dieser Wärmebrückenzuschlag ergibt sich aus den durchgeführten Wärmebrückenberechnungen und betrifft nur die Flächen der opaken Bauteile. Die Wärmebrücken der Verglasungsflächen (Glasrand und Einbau) sind in diesem Zuschlag nicht berücksichtigt.

11.1 Freistehende Gebäude aus der frühen Nachkriegszeit



Mit VIP

| Mehrfamilienhäuser mit einfacher Gebäudehülle, ohne Balkone | | |
|---|--------------------------|--|
| Fensterflächenanteil | | 22% |
| Geschosszahl: | | 3 |
| A/V= | | 0,49 |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Mit innovativen Dämmsystemen | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,24 |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand | 0,115 | 260 mm $\lambda = 0,033$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,165 | 200 mm $\lambda = 0,035$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,26 | 120 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,345 | 20 mm $\lambda = 0,008$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,175 | 20 mm $\lambda = 0,008 +$ 80 mm $\lambda = 0,028$ |
| Fußboden gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,175 | 20 mm $\lambda = 0,008 +$ 80 mm $\lambda = 0,028$ |
| Decke gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,335 | 20 mm $\lambda = 0,008$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,115 | 300 mm $\lambda = 0,035$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}} =$ | 0,03 W/(m ² K) |



Ohne VIP

| Mehrfamilienhäuser mit einfacher Gebäudehülle, ohne Balkone | | |
|---|--------------------------|---------------------------|
| | | |
| Fensterflächenanteil | | 22% |
| Geschosszahl: | | 4 |
| A/V= | | 0,43 |
| | | |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| | | |
| Ohne innovative Dämmsysteme | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,3 |
| | | |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| | | |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand | 0,157 | 180 mm $\lambda = 0,033$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,23 | 160 mm $\lambda = 0,04$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,26 | 120 mm $\lambda = 0,035$ |
| | | |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,75 | 20 mm $\lambda = 0,022$ |
| | | |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,255 | 100 mm $\lambda = 0,028$ |
| | | |
| Fußboden gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,257 | 100 mm $\lambda = 0,028$ |
| | | |
| Decke gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,725 | 20 mm $\lambda = 0,022$ |
| | | |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,11 | 320 mm $\lambda = 0,035$ |
| | | |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}} =$ | 0,03 W/(m ² K) |



Mit VIP, Fensterflächenanteil 27%

| Mehrfamilienhäuser mit einfacher Gebäudehülle, ohne Balkone | | |
|---|-------------------------|---|
| | | |
| Fensterflächenanteil | | 27% |
| Geschosszahl: | | 3 |
| A/V= | | 0,49 |
| | | |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| | | |
| Mit innovativen Dämmsystemen | $U_{\text{mittel}}=$ | 0,26 |
| | | |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| | | |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand | 0,1 | 200 mm $\lambda= 0,022$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,165 | 200 mm $\lambda= 0,035$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,26 | 120 mm $\lambda= 0,035$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,345 | 20 mm $\lambda= 0,008$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,147 | 40 mm $\lambda= 0,008+$ 40 mm $\lambda= 0,028$ |
| Fußboden gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,175 | 20 mm $\lambda= 0,008+$ 80 mm $\lambda= 0,028$ |
| Decke gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,335 | 20 mm $\lambda= 0,008$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,115 | 300 mm $\lambda= 0,035$ |
| | | |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}}=$ | 0,03 W/(m ² K) |



Mit VIP, Fensterflächenanteil 40%

| Einfache Gebäudehülle, ohne Balkone, mit erhöhtem Fensterflächenanteil | | |
|--|--------------------------------|---|
| Fensterflächenanteil | | 40% |
| Geschosszahl: | | 3 |
| A/V= | | 0,49 |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Mit innovativen Dämmsystemen | $U_{\text{mittel}}=$ | 0,286 |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| Fenster | | W/(m ² K) |
| Fensterrahmen | $U_f=$ | 0,72 |
| Verglasung | $U_g=$ | 0,51 |
| Konstruktionen | U-Wert W/(m ² K) | Wärmedämmung (z.B.) (mm) |
| Außenwand | 0,085 | 240 mm $\lambda= 0,022$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,165 | 200 mm $\lambda= 0,035$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,26 | 120 mm $\lambda= 0,035$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,345 | 20 mm $\lambda= 0,008$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,133 | 60 mm $\lambda= 0,008+$ 40 mm $\lambda= 0,028$ |
| Fußboden gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,175 | 20 mm $\lambda= 0,008+$ 80 mm $\lambda= 0,028$ |
| Decke gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,335 | 20 mm $\lambda= 0,008$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,115 | 300 mm $\lambda= 0,035$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}}=$ | 0,036 W/(m ² K) |



Mit VIP, Verschattung durch auskragenden Balkonplatten

| Einfache Gebäudehülle mit auskragenden Balkonen | | |
|---|--------------------------|----------------------------|
| Fensterflächenanteil | | 27% |
| Geschlosszahl: | | 4 |
| A/V= | | 0,43 |
| Mit abgesägten Balkonplatten | $\Psi_{\text{Balkon}} =$ | 0 W/(mk) |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Mit innovativen Dämmsystemen | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,25 |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand | 0,12 | 260 mm $\lambda = 0,033$ |
| Außenwand neben Balkon | 0,185 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,14 | 240 mm $\lambda = 0,035$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,26 | 120 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,75 | 20 mm $\lambda = 0,022$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,2 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Fußboden gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,205 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Decke gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,545 | 30 mm $\lambda = 0,022$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,11 | 320 mm $\lambda = 0,035$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}} =$ | 0,025 W/(m ² K) |



Ohne VIP, Verschattung durch auskragende Balkonplatten

| Mehrfamilienhäuser mit auskragenden Balkonen | | |
|---|--------------------------|---------------------------|
| Fensterflächenanteil | | 27% |
| Geschosszahl: | | 5 |
| A/V= | | 0,43 |
| Mit abgesägten Balkonplatten | $\Psi_{\text{Balkon}} =$ | 0 W/(mk) |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Ohne innovative Dämmsysteme | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,28 |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand | 0,12 | 260 mm $\lambda = 0,033$ |
| Außenwand neben Balkon | 0,185 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,14 | 240 mm $\lambda = 0,035$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,26 | 120 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,75 | 20 mm $\lambda = 0,022$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,2 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Fußboden gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,205 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Decke gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,545 | 30 mm $\lambda = 0,022$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,11 | 320 mm $\lambda = 0,035$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}} =$ | 0,02 W/(m ² K) |

11.2 Freistehende Gebäude aus der Nachkriegszeit



Mit VIP und mit gedämmten Balkonplatten

| Mehrfamilienhäuser mit zurückgesetzten Balkonen (Baujahr 1948-1968) | | |
|---|--------------------------|--|
| Fensterflächenanteil | | 25% |
| Geschosszahl: | | 5 |
| A/V= | | 0,43 |
| Mit gedämmten Balkonplatten | $\Psi_{\text{Balkon}} =$ | 0,26 W/(mk) |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Mit innovativen Dämmsystemen | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,28 |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand | 0,12 | 240 mm $\lambda = 0,033$ |
| Außenwand neben Balkon | 0,115 | 40 mm $\lambda = 0,008 +$ 60 mm $\lambda = 0,022$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,14 | 240 mm $\lambda = 0,035$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,26 | 120 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,345 | 20 mm $\lambda = 0,008$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,11 | 40 mm $\lambda = 0,008 +$ 80 mm $\lambda = 0,022$ |
| Fußboden gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,13 | 30 mm $\lambda = 0,008 +$ 80 mm $\lambda = 0,022$ |
| Decke gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,24 | 30 mm $\lambda = 0,008$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,11 | 320 mm $\lambda = 0,035$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}} =$ | 0,06 W/(m ² K) |



Mit VIP und mit abgesägten Balkonplatten

| Mehrfamilienhäuser mit zurückgesetzten Balkonen (Baujahr 1948-1968) | | |
|---|--------------------------|--------------------------------|
| Fensterflächenanteil | | 25% |
| Geschosszahl: | | 4 |
| A/V= | | 0,43 |
| Mit abgesägten Balkonplatten | $\Psi_{\text{Balkon}} =$ | 0 W/(mk) |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Mit innovativen Dämmsystemen | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,25 |
| Lösungsvorschlag | | |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand | 0,12 | 260 mm $\lambda = 0,033$ |
| Außenwand neben Balkon | 0,185 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,14 | 240 mm $\lambda = 0,035$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,26 | 120 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,75 | 20 mm $\lambda = 0,022$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,2 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Fußboden gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,205 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Decke gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,545 | 30 mm $\lambda = 0,022$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,11 | 320 mm $\lambda = 0,035$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}} =$ | 0,03 W/(m²K) |



Mit VIP und mit verglasten Balkonen

| Mehrfamilienhäuser mit zurückgesetzten Balkonen (Baujahr 1948-1968) | | |
|---|--------------------------|--|
| Fensterflächenanteil | | 40% |
| Geschosszahl: | | 5 |
| A/V= | | 0,44 |
| Mit verglasten und beheizten Balkonen | | |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Mit innovativen Dämmsystemen | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,34 |
| Lösungsvorschlag | | |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand + Balkonbrüstung | 0,088 | 240 mm $\lambda = 0,023$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,14 | 240 mm $\lambda = 0,035$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,26 | 120 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,345 | 20 mm $\lambda = 0,008$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,11 | 40 mm $\lambda = 0,008 +$ 80 mm $\lambda = 0,022$ |
| Fußboden gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,13 | 30 mm $\lambda = 0,008 +$ 80 mm $\lambda = 0,022$ |
| Decke gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,24 | 30 mm $\lambda = 0,008$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,11 | 320 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Außenluft, Balkonen | 0,11 | 240 mm $\lambda = 0,028$ |
| Decke gegen Außenluft, Balkon | 0,14 | 240 mm $\lambda = 0,035$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}} =$ | 0,025 W/(m ² K) |



Ohne VIP und mit gedämmten Balkonplatten

| Mehrfamilienhäuser mit zurückgesetzten Balkonen (Baujahr 1948-1968) | | |
|---|--------------------------|---------------------------|
| Fensterflächenanteil | | 27% |
| Geschosszahl: | | 6 |
| A/V= | | 0,41 |
| Mit gedämmten Balkonplatten | $\Psi_{\text{Balkon}} =$ | 0,26 W/(mk) |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Ohne innovative Dämmsysteme | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,305 |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand | 0,12 | 240 mm $\lambda = 0,033$ |
| Außenwand neben Balkon | 0,185 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,14 | 240 mm $\lambda = 0,035$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,26 | 120 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,75 | 20 mm $\lambda = 0,022$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,2 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Fußboden gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,205 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Decke gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,545 | 30 mm $\lambda = 0,022$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,11 | 320 mm $\lambda = 0,035$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}} =$ | 0,06 W/(m ² K) |



Ohne VIP und mit abgesägten Balkonplatten

| Mehrfamilienhäuser mit zurückgesetzten Balkonen (Baujahr 1948-1968) | | |
|---|--------------------------|---------------------------|
| Fensterflächenanteil | | 27% |
| Geschosszahl: | | 5 |
| A/V= | | 0,43 |
| Mit abgesägten Balkonplatten | $\Psi_{\text{Balkon}} =$ | 0 W/(mk) |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Ohne innovative Dämmsysteme | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,28 |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand | 0,12 | 260 mm $\lambda = 0,033$ |
| Außenwand neben Balkon | 0,185 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,14 | 240 mm $\lambda = 0,035$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,26 | 120 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,75 | 20 mm $\lambda = 0,022$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,2 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Fußboden gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,205 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Decke gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,545 | 30 mm $\lambda = 0,022$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,11 | 320 mm $\lambda = 0,035$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}} =$ | 0,03 W/(m ² K) |



Ohne VIP und mit verglasten Balkonen

| Mehrfamilienhäuser mit zurückgesetzten Balkonen (Baujahr 1948-1968) | | |
|---|--------------------------|----------------------------|
| Fensterflächenanteil | | 40% |
| Geschosszahl: | | 5 |
| A/V= | | 0,41 |
| Mit verglasten und beheizten Balkonen | | |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Ohne innovative Dämmsysteme | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,37 |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand + Balkonbrüstung | 0,088 | 240 mm $\lambda = 0,023$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,14 | 240 mm $\lambda = 0,035$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,26 | 120 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,75 | 20 mm $\lambda = 0,022$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,2 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Fußboden gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,205 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Decke gegen Außenluft (z.B. Eingangsbereich) | 0,545 | 30 mm $\lambda = 0,022$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,11 | 320 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Außenluft, Balkonen | 0,11 | 240 mm $\lambda = 0,028$ |
| Decke gegen Außenluft, Balkon | 0,14 | 240 mm $\lambda = 0,035$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}} =$ | 0,025 W/(m ² K) |

11.3 Gebäude aus der Nachkriegszeit in Blockbebauung



Ohne VIP

| Mehrfamilienhaus in der Innenstadt, Blockbebauung | | |
|---|--------------------------------|-----------------------------|
| Fensterflächenanteil | | 27% |
| Geschosszahl: | | 6 |
| A/V= | | 0,29 |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Ohne innovative Dämmsysteme | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,34 |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| Fenster | | W/(m ² K) |
| Fensterrahmen | $U_f =$ | 0,75 |
| Verglasung | $U_g =$ | 0,7 |
| Konstruktionen | U-Wert W/(m ² K) | Wärmedämmung (z.B.) (mm) |
| Außenwand OG | 0,165 | 180 mm $\lambda = 0,035$ |
| Außenwand EG | 0,247 | 100 mm $\lambda = 0,033$ |
| Außenwand Eingang | 0,426 | 40 mm $\lambda = 0,022$ |
| Außenwand Brüstung | 0,173 | 180 mm $\lambda = 0,033$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,23 | 160 mm $\lambda = 0,040$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,37 | 80 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,75 | 20 mm $\lambda = 0,022$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,31 | 100 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Außenluft (Eingang) | 0,205 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,15 | 220 mm $\lambda = 0,035$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}} =$ | 0,015 W/(m ² K) |



Mit VIP

| Mehrfamilienhaus in der Innenstadt, Reihenbebauung | | |
|--|--------------------------|--|
| Fensterflächenanteil | | 27% |
| Geschosszahl: | | 4 |
| A/V= | | 0,35 |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Mit innovativen Dämmsystemen | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,27 |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| Fenster | | W/(m ² K) |
| Fensterrahmen | $U_f =$ | 0,75 |
| Verglasung | $U_g =$ | 0,6 |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand OG | 0,12 | 240 mm $\lambda = 0,033$ |
| Außenwand EG | 0,183 | 100 mm $\lambda = 0,022$ |
| Außenwand Eingang | 0,274 | 60 mm $\lambda = 0,022$ |
| Außenwand Brüstung | 0,156 | 200 mm $\lambda = 0,035$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,19 | 200 mm $\lambda = 0,040$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,37 | 80 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,75 | 20 mm $\lambda = 0,022$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,12 | 40 mm $\lambda = 0,008 +$ 80 mm $\lambda = 0,028$ |
| Fußboden gegen Außenluft (Eingang) | 0,173 | 120 mm $\lambda = 0,022$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,15 | 300 mm $\lambda = 0,035$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}} =$ | 0,015 W/(m ² K) |

11.4 Gebäude aus den 70er-Jahren aus vorgefertigten Bauteilen



Ohne VIP mit verglasten Balkonen

| Mehrfamilienhäuser mit einfacher Gebäudehülle mit verglasten Balkonen | | |
|---|--------------------------|----------------------------|
| Fensterflächenanteil | | 26% |
| Geschosszahl: | | 4 |
| A/V= | | 0,37 |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Ohne innovative Dämmsysteme | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,38 |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand | 0,20 | 160 mm $\lambda = 0,035$ |
| Außenwand Eingang | 0,32 | 100 mm $\lambda = 0,035$ |
| Außenwand Balkonbrüstung | 0,31 | 120 mm $\lambda = 0,04$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,235 | 160 mm $\lambda = 0,04$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,385 | 80 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 1,145 | 20 mm $\lambda = 0,030$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,43 | 80 mm $\lambda = 0,040$ |
| Fußboden gegen Außenluft (z.B. Balkon) | 0,26 | 100 mm $\lambda = 0,028$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,115 | 300 mm $\lambda = 0,035$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}} =$ | 0,025 W/(m ² K) |



Ohne VIP mit abgesägten Balkonen

| Mehrfamilienhäuser mit einfacher Gebäudehülle mit verglasten Balkonen | | |
|---|-----------------------|----------------------------|
| Fensterflächenanteil | | 40% |
| Geschosszahl: | | 4 |
| A/V= | | 0,38 |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Ohne innovative Dämmsysteme | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,41 |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | $W/(m^2K)$ | (mm) |
| Außenwand | 0,186 | 180 mm $\lambda = 0,035$ |
| Außenwand Eingang | 0,315 | 100 mm $\lambda = 0,035$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,235 | 160 mm $\lambda = 0,04$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,385 | 80 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,76 | 20 mm $\lambda = 0,022$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,314 | 100 mm $\lambda = 0,035$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,115 | 300 mm $\lambda = 0,035$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{WB} =$ | 0,025 $W/(m^2K)$ |

11.5 Plattenbauten aus den 70-er Jahren



Elf-Geschossig, ohne Balkone

| Hochhaus ohne Balkone | | |
|---|--------------------------|----------------------------|
| Fensterflächenanteil | | 25% |
| Geschosszahl: | | 11 |
| A/V= | | 0,23 |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Ohne innovative Dämmsysteme | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,60 |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| Fenster | | W/(m ² K) |
| Fensterrahmen | $U_f =$ | 1,4 |
| Verglasung | $U_g =$ | 1,1 |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand | 0,365 | 100 mm $\lambda = 0,040$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,36 | 100 mm $\lambda = 0,040$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,55 | 60 mm $\lambda = 0,040$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,93 | 20 mm $\lambda = 0,030$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,755 | 40 mm $\lambda = 0,040$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,27 | 140 mm $\lambda = 0,040$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}} =$ | 0,015 W/(m ² K) |



Fünf-Geschossig ohne Balkone

| Plattenbau ohne Balkone | | |
|---|---------------------------------------|------------------------------------|
| Fensterflächenanteil | | 25% |
| Geschosszahl: | | 5 |
| A/V= | | 0,31 |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Ohne innovative Dämmsysteme | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,49 |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| Fenster | | W/(m ² K) |
| Fensterrahmen | $U_f =$ | 1,4 |
| Verglasung | $U_g =$ | 1,0 |
| Konstruktionen | U-Wert W/(m ² K) | Wärmedämmung (z.B.) (mm) |
| Außenwand | 0,323 | 100 mm $\lambda = 0,035$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,36 | 100 mm $\lambda = 0,040$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,49 | 60 mm $\lambda = 0,035$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,93 | 20 mm $\lambda = 0,030$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,55 | 60 mm $\lambda = 0,040$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,16 | 240 mm $\lambda = 0,040$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}} =$ | 0,035 W/(m ² K) |



Elf-Geschossig, mit Balkonen

| Hochhaus mit Balkonen | | |
|---|-------------------------|---------------------------|
| | | |
| Fensterflächenanteil | | 25% |
| Geschosszahl: | | 11 |
| A/V= | | 0,23 |
| | | |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| | | |
| Ohne innovative Dämmsysteme | $U_{\text{mittel}}=$ | 0,55 |
| | | |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| | | |
| Fenster | | W/(m ² K) |
| Fensterrahmen | $U_f=$ | 0,75 |
| Verglasung | $U_g=$ | 0,6 |
| | | |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand | 0,273 | 120 mm $\lambda= 0,035$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,31 | 120 mm $\lambda= 0,040$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,49 | 60 mm $\lambda= 0,035$ |
| | | |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,93 | 20 mm $\lambda= 0,030$ |
| | | |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,55 | 60 mm $\lambda= 0,040$ |
| | | |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,237 | 160 mm $\lambda= 0,040$ |
| | | |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}}=$ | 0,26 W/(m ² K) |



Fünf-Geschossig mit Balkonen

| Plattenbau mit Balkonen | | |
|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | | |
| Fensterflächenanteil | | 25% |
| Geschosszahl: | | 5 |
| A/V= | | 0,31 |
| | | |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| | | |
| Ohne innovative Dämmsysteme | $U_{\text{mittel}} =$ | 0,43 |
| | | |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| | | |
| Fenster | | W/(m ² K) |
| Fensterrahmen | $U_f =$ | 0,75 |
| Verglasung | $U_g =$ | 0,6 |
| | | |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand | 0,186 | 180 mm $\lambda = 0,035$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,31 | 120 mm $\lambda = 0,040$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,49 | 60 mm $\lambda = 0,035$ |
| | | |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,93 | 20 mm $\lambda = 0,030$ |
| | | |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,354 | 100 mm $\lambda = 0,040$ |
| | | |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,161 | 240 mm $\lambda = 0,040$ |
| | | |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}} =$ | 0,30 W/(m ² K) |



Elf-Geschossig, mit hohem Fensterflächenanteil

| Hochhaus ohne Balkone mit hohem Fensteranteil | | |
|---|-------------------------|---------------------------|
| Fensterflächenanteil | | 40% |
| Geschosszahl: | | 11 |
| A/V= | | 0,23 |
| Erforderlicher mittlerer U-Wert | | |
| Ohne innovative Dämmsysteme | $U_{\text{mittel}}=$ | 0,67 |
| Möglicher Lösungsvorschlag | | |
| Fenster | | W/(m ² K) |
| Fensterrahmen | $U_f=$ | 1,4 |
| Verglasung | $U_g=$ | 1,1 |
| Konstruktionen | U-Wert | Wärmedämmung (z.B.) |
| | W/(m ² K) | (mm) |
| Außenwand | 0,27 | 140 mm $\lambda= 0,040$ |
| Treppenhauswand gegen Erdreich | 0,36 | 100 mm $\lambda= 0,040$ |
| Treppenhauswand gegen Kellerräume | 0,55 | 60 mm $\lambda= 0,040$ |
| Fußboden gegen Erdreich (Treppenhaus) | 0,93 | 20 mm $\lambda= 0,030$ |
| Kellerdecke (Höhenprobleme) | 0,755 | 40 mm $\lambda= 0,040$ |
| Decke gegen Dachraum/ Flachdach | 0,27 | 140 mm $\lambda= 0,040$ |
| Wärmebrückenzuschlag opaker Bauteile | $\Delta U_{\text{WB}}=$ | 0,02 W/(m ² K) |

12 Anhang W2 Wärmebrücken

| Bauteil | Detail | Beschreibung | U-Werte | | | ψ_{AM} | Zeichnung | Bild |
|-----------------------|---|--|-----------|-------|--|--------------------|-----------|------|
| | | | ohne Ecke | | | | | |
| Außenwand Ecke | Außenwanddecke, Bims mit 24 cm EPS | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS 032 + 1cm Putz | 0,119 | | | Ecke AM -0,0598 | | |
| Außenwand Ecke | Außenwanddecke, Bims mit 4 cm VIP und 24 cm EPS | 30 cm Bimsstein mit 2x2 cm VIP + 1cm Putz, 24 cm EPS-032 | 0,093 | 0,119 | | Ecke AM -0,0241 | | |
| Außenwand Ecke | Außenwanddecke, Bims mit 4 cm VIP | 30 cm Bimsstein mit 2x2 cm VIP + 1cm Putz | 0,093 | | | Ecke AM -0,0231 | | |
| Außenwand Ecke | Bims mit 7 cm Qasa-max und 24 cm EPS | 30 cm Bimsstein mit Qasa-max + 1cm Putz, 24 cm EPS-032 | 0,086 | 0,119 | | Ecke AM -0,0090 | | |
| Außenwand Ecke | Bims mit 7 cm Qasa-max | 30 cm Bimsstein mit Qasa-max + 1cm Putz | 0,086 | | | Ecke AM 0,0078 | | |
| Außenwand Ecke | Außenwanddecke mit in EPS-035 umgehüllten VIP | 30 cm Bims mit 11 cm Lockplate + 8 mm Putz, mit Resol-Hartschaum | 0,077 | 0,077 | | Ecke AM 0,0021 | | |
| Außenwand Ecke | positive Ecke mit 2*2 cm VIP | 30 cm Bimsstein mit 2*2 cm VIP + 2cm PUR + 1 cm Putz | 0,093 | | | Ecke AM -0,0251 | | |
| Außenwand Ecke | positive Ecke mit 2*2 cm VIP + Balkontür | 30 cm Bimsstein mit 2*2 cm VIP + 2cm PUR + 1 cm Putz, 24 cm EPS 0,32 | 0,119 | 0,093 | | Ecke AM 0,1086 | | |
| Außenwand Ecke | positive Ecke mit 2*2 cm VIP + Balkontür | 30 cm Bimsstein mit 2*2 cm VIP + 2cm PUR + 1 cm Putz, 24 cm EPS 0,32 | 0,119 | 0,093 | | Ecke AM 0,1086 | | |
| Außenwand Deckenstirn | Deckenstirn | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS-032 + 1cm Putz | 0,119 | | | AM 0,0036 | | |

| Bauteil | Detail | Beschreibung | U-Werte | | | ψ AM | Zeichnung | Bild |
|-------------------------|--|---|---------|--|--|--------------|-----------|------|
| Außenwand Deckenstim | Deckenstim mit Brandriegel | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS-032 + 1 cm Putz; Brandriegel mit MW 0,04 | 0,119 | | | 0,0094 | | |
| Kellerwand | Trennwand an Kellerdecke, 30 cm aus Bimsstein | 20 cm Stahlbetondecke, mit 2 cm VIP + 8 cm PUR 028 auf der Deckenunterseite | 0,122 | | | 0,5223 | | |
| Kellerwand | Trennwand an Kellerdecke, 30 cm aus Stahlbeton | 20 cm Stahlbetondecke, mit 2 cm VIP + 8 cm PUR 028 auf der Deckenunterseite | 0,000 | | | 1,4347 | | |
| Kellerwand | Trennwand an Kellerdecke, gedämmt | 20 cm Stahlbetondecke, mit 2 cm VIP + 8 cm PUR 028 auf der Deckenunterseite, 4 cm EPS-040 | 0,122 | | | 0,2251 | | |
| Kellerwand | Trennwand an Kellerdecke aus Stahlbeton, gedämmt | 20 cm Stahlbetondecke, mit 2 cm VIP + 8 cm PUR 028 auf der Deckenunterseite, 4 cm EPS-040 | 0,122 | | | 0,6382 | | |
| Balkonplatte | Balkonplatte mit VIP | Balkonplatte mit 2 cm VIP auf beiden Seite | 0,093 | | | 0,2439 | | |
| Balkonplatte | Balkonplatte mit Phenol-Hartschaum | Balkonplatte mit 2 cm PUR-028 auf beiden Seite | 0,093 | | | 0,3857 | | |
| Balkonplatte | Balkonplatte mit 1m VIP +PUR | Balkonplatte mit 2 cm VIP auf beiden Seite bis 1m, danach 2 cm PUR-028 | 0,093 | | | 0,2572 | | |
| Balkonplatte | Balkonplatte mit Echelement 20x10 | 12 cm Balkonplatte mit 20 x 10 cm Dämmelement aus Phenol-Hartschaum 022 und Betonverkleidung, Wand: 2x2 cm VIP+2 cm PUR-028 | 0,093 | | | 0,4265 | | |
| Balkonplatte | Balkonplatte mit Echelement 39 x 9 cm | 12 cm Balkonplatte mit 39 x 9 cm Dämmelement aus 4 cm VIP und Betonverkleidung, Wand: 2x2 cm VIP+2 cm PUR-028 | 0,093 | | | 0,3613 | | |

| Bauteil | Detail | Beschreibung | U-Werte | | | ψ AM | Zeichnung | Bild |
|--------------------------|--|--|-------------|-------------|---------|--------------|-----------|------|
| Balkonplatte | Balkonplatte ohne VIP | Balkonplatte mit 2 cm PUR-028 auf beiden Seiten. Außenwand mit 24 cm EPS-032 | ohne Balkon | | | AM | | |
| Balkonplatte | Balkonplatte ohne VIP und ohne PUR | Außenwand mit 24 cm EPS-032 | ohne Balkon | | | AM | | |
| Balkonplatte über Keller | Balkon über Keller mit 2 cm VIP gesamt und gedämmt | 12 cm Balkonplatte mit 2 cm VIP bis 1 m, Wand: 2x2 cm VIP+2 cm PUR-028, Kellerwand mit 24 cm EPS-32, 10 cm WD 035 innenseitig, Kellerdecke: 2 cm VIP+ 8 cm PUR | Wand | Kellerdecke | | AM | | |
| Balkonplatte über Keller | Balkon über Keller mit 2 cm VIP gesamt und gedämmt++ | 12 cm Balkonplatte mit 2 cm VIP bis 1 m, Wand: 2x2 cm VIP+2 cm PUR-028, Kellerwand mit 24 cm EPS-32, 10 cm WD 035 innenseitig, Kellerdecke: 2 cm VIP+ 8 cm PUR | Wand | Kellerdecke | | AM | | |
| Sockel | Sockel mit 24 cm EPS | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS 032 + 1cm Putz; 20 cm Stahlbetondecke, mit 2 cm VIP + 8 cm PUR 028 auf der Deckenunterseite | Wand | Kellerdecke | | AM | | |
| Sockel | Sockel mit 24 cm EPS mit Fenster | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS 032 + 1cm Putz; 20 cm Stahlbetondecke, mit 2 cm VIP + 8 cm PUR 028 auf der Deckenunterseite | Wand | Kellerdecke | Fenster | AM | | |
| Sockel | Sockel mit 24 cm EPS gedämmt | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS 032 + 1cm Putz; 20 cm Stahlbetondecke, mit 2 cm VIP + 8 cm PUR 028 auf der Deckenunterseite | Wand | Kellerdecke | | AM | | |
| Sockel | Sockel tiefer gedämmt mit IWD | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS 032 + 1cm Putz; 20 cm Stahlbetondecke, mit 2 cm VIP + 8 cm PUR 028 auf der Deckenunterseite | Wand | Kellerdecke | | AM | | |
| Sockel | Sockel tiefer gedämmt mit IWD+ | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS 032 + 1cm Putz | Wand | Kellerdecke | | AM | | |
| Sockel | Sockel mit 4 cm VIP auf der Deckenunterseite | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS 032 + 1cm Putz; 20 cm Stahlbetondecke, mit 2 * 2 cm VIP + 2 cm PUR 028 auf der Deckenunterseite | Wand | Kellerdecke | | AM | | |

| Bauteil | Detail | Beschreibung | U-Werte | | | ψ AM | Zeichnung | Bild |
|-----------|---|--|---------|-------|--|--------------|-----------|------|
| | | | Wand | Decke | | | | |
| Kniestock | Kniestock mit 24 cm EPS mit 10 cm WD | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS 032 + 1cm Putz, Kniestock mit 25 cm MW 035 | 0,119 | 0,136 | | 0,0427 | | |
| Kniestock | Kniestock mit 24 cm EPS mit 10 cm WD ohne Attikax | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS 032 + 1cm Putz, Kniestock mit 25 cm MW 035 | 0,119 | 0,136 | | 0,0136 | | |
| Kniestock | Elemente | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS 032 + 1cm Putz, Kniestock mit 25 cm MW 035 | 0,119 | 0,136 | | -0,0105 | | |
| Kniestock | Kniestock mit 24 cm EPS 16 cm WD und 30 cm MW | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS 032 + 1cm Putz, Kniestock mit 30 cm MW 035 | 0,119 | 0,114 | | -0,0038 | | |
| Kniestock | Dachüberstand über Balkon | 30 cm Bimsstein mit 2x2 cm VIP + 2 cm PUR-028 + 1cm Putz, Kniestock mit 30 cm MW 035 | 0,093 | 0,114 | | 0,2229 | | |
| Ortgang | Ortgang 2 mit 12 cm MW | 30 cm Bimsstein mit 2x2 cm VIP + 2 cm PUR-028 + 1cm Putz, Kniestock mit 30 cm MW 035 | 0,119 | 0,136 | | 0,0317 | | |
| Keller | Kellerwand gegen Erdreich | 40 cm Bimsstein mit 16 cm XPS-035, Kellerboden mit 2 cm VIP | 0,064 | 0,065 | | 0,0274 | | |
| Keller | Innenwand im Keller | 30 cm Bimsstein mit 16 cm MW-035, Kellerboden mit 2 cm VIP | 0,181 | 0,065 | | 0,1518 | | |
| Keller | Kellerwand gegen Treppenhaus | 30 cm Bimsstein mit 16 cm MW-035, Kellerdecke mit 2 cm VIP + 8 cm PUR | 0,181 | 0,122 | | 0,0068 | | |
| Keller | Kellerwandanschluss, horizontal | 30 cm Bimsstein mit 16 cm MW-035; 24 cm Bimsstein | 0,181 | | | 0,0755 | | |

| Detail | Beschreibung | U-Werte | | ψ_{AM} | Zeichnung | Bild |
|---|--|-----------|-----------|-------------|-----------|------|
| | | Außenwand | Innenwand | | | |
| Kellerwandanschluss, horizontal mit Erdreich | 30 cm Bimsstein mit 16 cm XPS-035; 16 cm MW-035 | 0,064 | 0,181 | 0,0159 | | |
| Kellerwand beim Eingang | 30 cm Bimsstein mit 16 cm XPS-035; Eingang mit 2 cm VIP | 0,064 | 0,184 | 0,0349 | | |
| Haustür unten | Eingang mit 2 cm VIP | 0,184 | 0,764 | 0,2662 | | |
| Haustür oben | Eingangsdecke mit 2 cm VIP + 8 cm PUR | 0,195 | 0,764 | -0,0586 | | |
| Decke über Eingang | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS-032; Eingangsdecke mit 2 cm VIP + 8 cm PUR | 0,195 | 0,750 | -0,2659 | | |
| Rollladenkasten Bestand ausgebaut, Fenster in der Dämmebene | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS-032 | 0,119 | 0,750 | 0,0080 | | |
| Rollladenkasten Bestand ausgebaut, Fenster in der Wandebene | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS-032 | 0,119 | 0,750 | 0,0530 | | |
| Rollladenkasten Bestand ausgebaut, Fenster in der Wandebene, Wand mit VIP gedämmt | 30 cm Bimsstein mit 2x2 cm VIP und 2 cm PUR 028 | 0,150 | 0,750 | 0,0350 | | |
| Rollladenkasten Neuer Minirollladenkasten | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS-032, von Innen auch gedämmt | 0,119 | 0,750 | 0,0370 | | |
| Rollladenkasten Neuer Minirollladenkasten, mit zusätzlicher Innendämmung | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS-032, zusätzliche Innendämmung | 0,119 | 0,750 | 0,0260 | | |

| Detail | Beschreibung | U-Werte | | | ψ_{AM} | Zeichnung | Bild |
|---|---|---------|---------|--|-------------|-----------|------|
| Rollladenkasten Neuer Minirollladenkasten, Fensterrahmen gedämmt | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS- 032, Betonteil abgeschnitten | Wand | Fenster | | AM | | |
| Ohne Rollladenkasten Betonstütze abgeschnitten | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS- 032, Betonstütze abgeschnitten | Wand | Fenster | | AM | | |
| Mit Minirollladenkasten Betonstütze abgeschnitten | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS- 032, Betonstütze abgeschnitten | Wand | Fenster | | AM | | |
| Mit Minirollladenkasten Fensterrahmen gedämmt Betonstütze abgeschnitten | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS- 032, Betonstütze abgeschnitten | Wand | Fenster | | AM | | |
| Neuer Rollladenkasten Betonstütze entfernt | 30 cm Bimsstein mit 24 cm EPS- 032, Betonstütze entfernt | Wand | Fenster | | AM | | |
| Bestand Rollladenkasten erhalten und gedämmt | 30 cm Bimsstein mit 2x2 cm VIP und 2 cm PUR 028 | Wand | Fenster | | AM | | |
| Innendämmung mit Vakuum- Dämmplatten, bei 38 cm Trennwand | 51 cm Vollziegelmauer- werk mit 4 cm VIP und 4 cm Kalziumsilikat- Platte | Wand | | | AM | | |
| Innendämmung mit Vakuum- Dämmplatten, bei 12 cm Trennwand | 51 cm Vollziegelmauer- werk mit 4 cm VIP und 4 cm Kalziumsilikat- Platte | Wand | | | AM | | |
| Innendämmung mit Vakuum- Dämmplatten, bei 38 cm Trennwand | 51 cm Vollziegelmauer- werk mit 4 cm VIP und 4 cm Kalziumsilikat- Platte | Wand | | | AM | | |
| Innendämmung mit Vakuum- Dämmplatten, bei 12 cm Trennwand | 51 cm Vollziegelmauer- werk mit 4 cm VIP und 4 cm Kalziumsilikat- Platte | Wand | | | AM | | |

| Detail | Beschreibung | U-Werte | | ψ_{AM} AM | Zeichnung | Bild |
|--|---|---------|-------|-------------------|-----------|------|
| | | Wand | | | | |
| Innendämmung mit IQ-Therm, bei 38 cm Trennwand | 51 cm Vollziegelmauerwerk mit 8 cm IQ-Therm Dämmplatte | 0,289 | | 0,2851 | | |
| Innendämmung mit IQ-Therm, bei 12 cm Trennwand | 51 cm Vollziegelmauerwerk mit 8 cm IQ-Therm Dämmplatte | 0,289 | | 0,1467 | | |
| Plattenbau Trenndecke, mit 16 cm Wärmdämmung | Vorgefertigtes Sandwichelement (8 cm Stahlbeton, 6 cm PS-040, 16 cm Stahlbeton), 16 cm EPS-0,35 | 0,150 | | 0,0500 | | |
| Plattenbau Attika, mit 16 cm Wärmdämmung | Vorgefertigtes Sandwichelement (8 cm Stahlbeton, 6 cm PS-040, 16 cm Stahlbeton), 16 cm EPS-035 Flachdach aus 16 cm Stahlbeton + 30 cm EPS-035 | 0,150 | 0,114 | 0,1970 | | |
| Plattenbau Balkonplatte, mit 16 cm Wärmdämmung | Vorgefertigtes Sandwichelement (8 cm Stahlbeton, 6 cm PS-040, 16 cm Stahlbeton), 16 cm EPS-0,35 Balkonplatte ungedämmt | 0,150 | | 0,7080 | | |
| Plattenbau Balkonplatte, mit 16 cm Wärmdämmung, Balkonplatte gedämmt | Vorgefertigtes Sandwichelement (8 cm Stahlbeton, 6 cm PS-040, 16 cm Stahlbeton), 16 cm EPS-0,35 Balkonplatte mit 2 cm PUR-028 gedämmt | 0,150 | | 0,4600 | | |
| Plattenbau Balkonplatte, mit 16 cm Wärmdämmung, Fenster | Vorgefertigtes Sandwichelement (8 cm Stahlbeton, 6 cm PS-040, 16 cm Stahlbeton), 16 cm EPS-0,35 Fenster mit 2 cm PUR-028 gedämmt | 0,150 | | 0,0660 | | |
| Innenstadt, Attika neben Nachbar, mit 24 cm Wärmdämmung | Attika aus Stahlbeton, Flachdach mit 30 cm EPS-035, Attika mit 20 cm EPS-035 gedämmt | 0,114 | 0,400 | 0,2770 | | |
| Innenstadt, Trennwand neben Nachbar, mit 24 cm Wärmdämmung | Wand aus Mauerwerk (lambda= 0,47 W/(mK) mit 24 cm EPS-035 gedämmt | 0,131 | 1,240 | 0,0630 | | |
| Innenstadt, Trennwand neben Nachbar, mit 24 cm Wärmdämmung, mit Innendämmung | Wand aus Mauerwerk (lambda= 0,47 W/(mK) mit 24 cm EPS-035 gedämmt, mit 6 cm Multipor gedämmt | 0,131 | 1,240 | 0,0030 | | |

13 Anhang A Akustik und Schallschutz



Abbildung AA1: Messort für Zuglärm, Gudrunweg in Stuttgart-Nord. Lärmpegelbereich laut Lärmkarte des Eisenbahnbundesamtes > 75 dB(A) tags, 65 bis 70 dB(A) nachts.

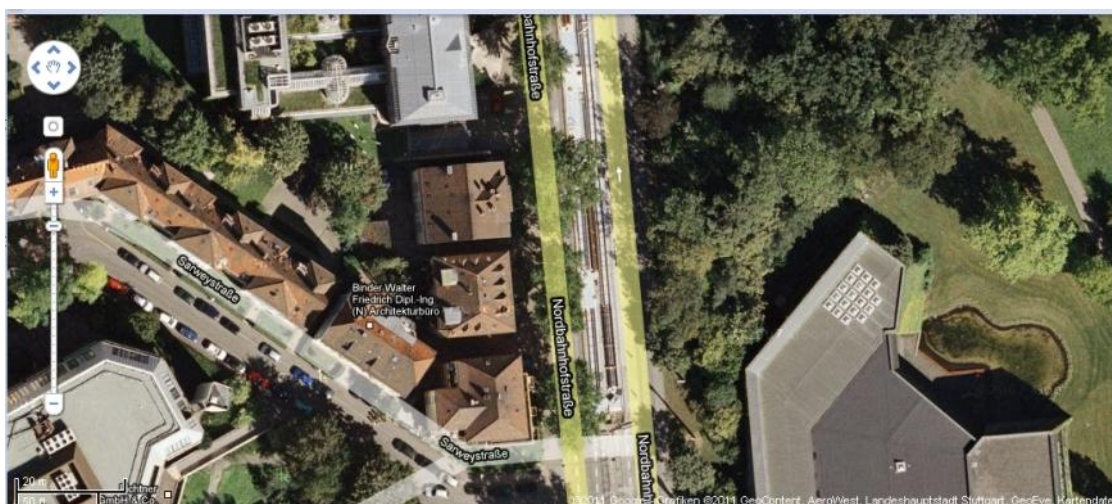


Abbildung AA1: Messort für Stadtbahnen, Nordbahnhofstraße in Stuttgart-Nord. Lärmpegelbereich laut Lärmkarte der Stadt Stuttgart 65 bis 70 dB(A) tags, 55 bis 60 dB(A) nachts.



Abbildung AA1: Messort für Straßenlärm, Pragstraße in Stuttgart-Nord. Lärmpegelbereich laut Lärmkarte der Stadt Stuttgart 75 bis 80 dB(A) tags, 70 bis 75 dB(A) nachts.

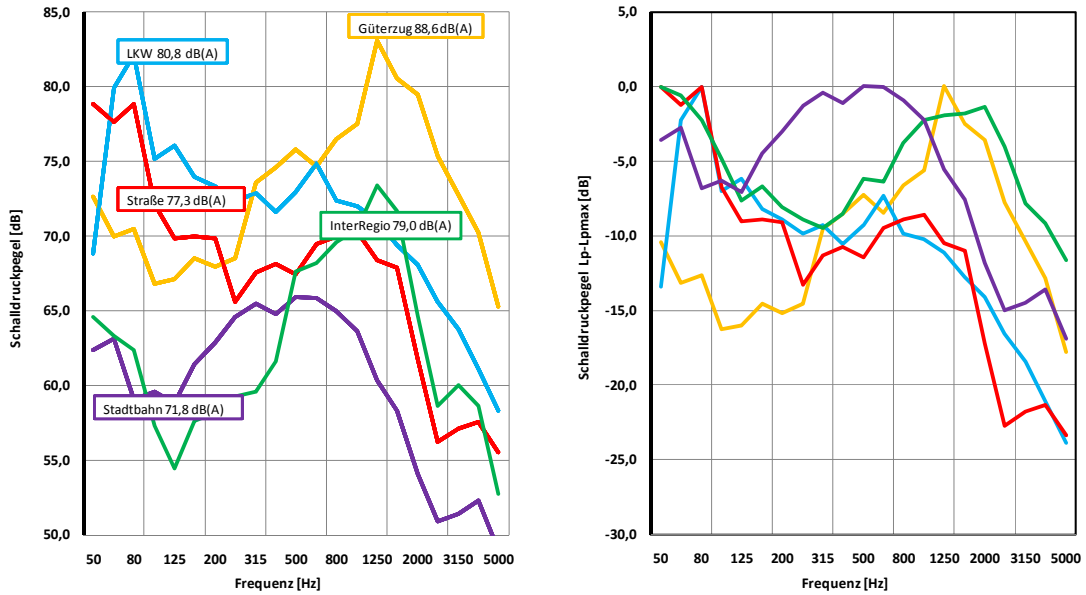


Abbildung AA2: Unterschiedliche Verkehrslärmarten, gemessen in der Innenstadt Stuttgarts. Abbildung links, Schalldruckpegel der Verkehrslärmarten gegenübergestellt. Abbildung rechts, Vergleich der normalisierten Spektren ($L_p - L_{pmax}$).

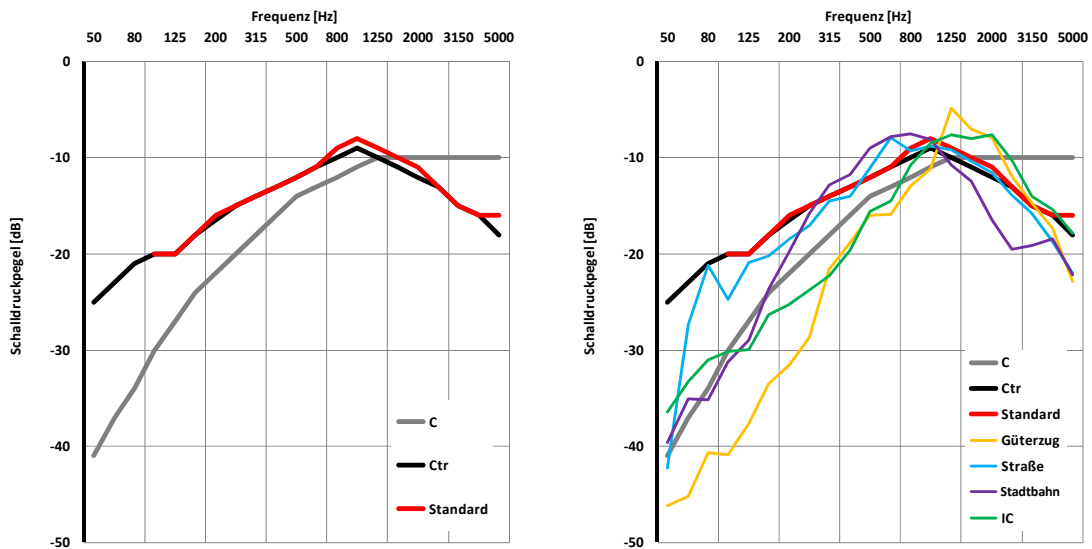


Abbildung AA3: Pegelspektren zur Berechnung der Spektrum –Anpassungswerte C und C_{tr} und standardisiertes Verkehrslärmspektrum. Abbildung rechts, Vergleich der standardisierten Kenngrößen mit den gemessenen Verkehrslärmarten, normalisiert auf einen Summenpegel von 0 dB.

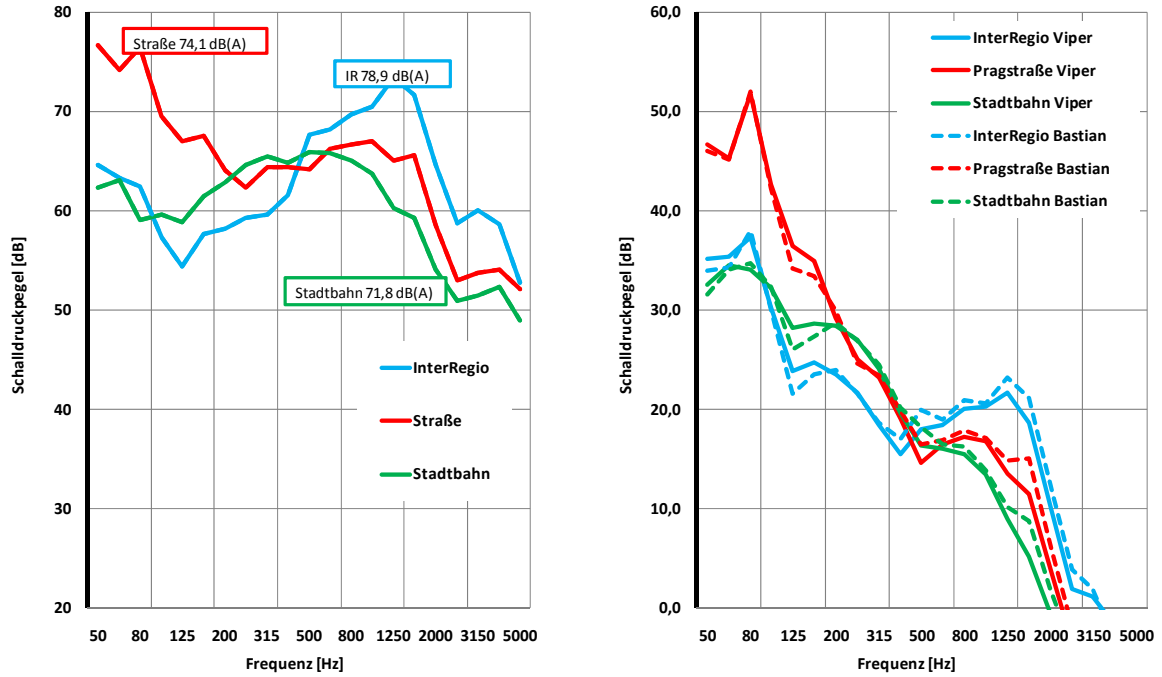


Abbildung AA4: Berechnung der Innenraumpegel unterschiedlicher Verkehrslärmarten. Fassadenfläche $S=18 \text{ m}^2$, Raumvolumen = 72 m^3 , bewertete Standard-Schallpegeldifferenz = 48 dB. Berechnungen mit der Software BASTIAN nach DIN EN 12354 Teile 1 bis 3 und der Software VIPER durch Filterung des Zeitsignals mit einem Filter entsprechend der Standard-Schallpegeldifferenzen. Abbildung links, Spektren der verwendeten Verkehrsgeräusche. Abbildung rechts, berechnete Innenraumpegel.

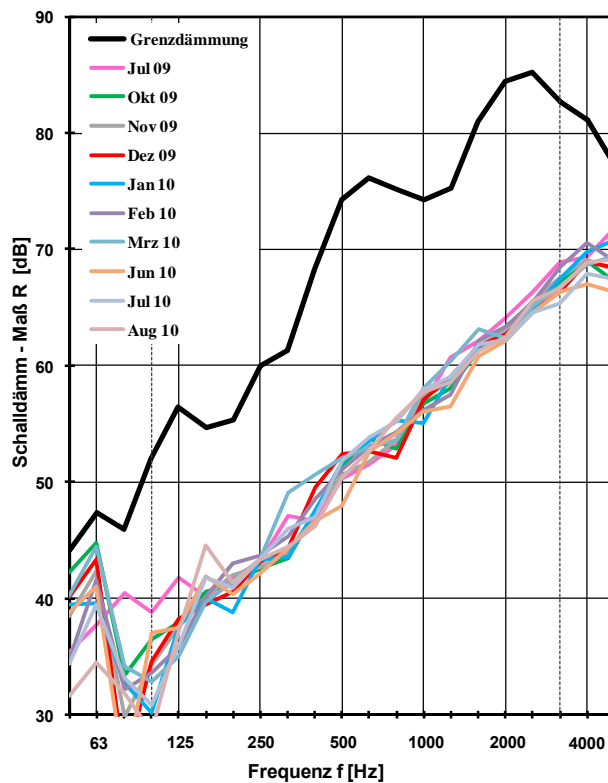


Abbildung AA5: Schalldämm-Maße R der Trägerwand im Türenprüfstand über ein Jahr ($R_w = 53$ bis 54 dB), Grenzdämmung des Türenprüfstands ($R_w = 73 \text{ dB}$)

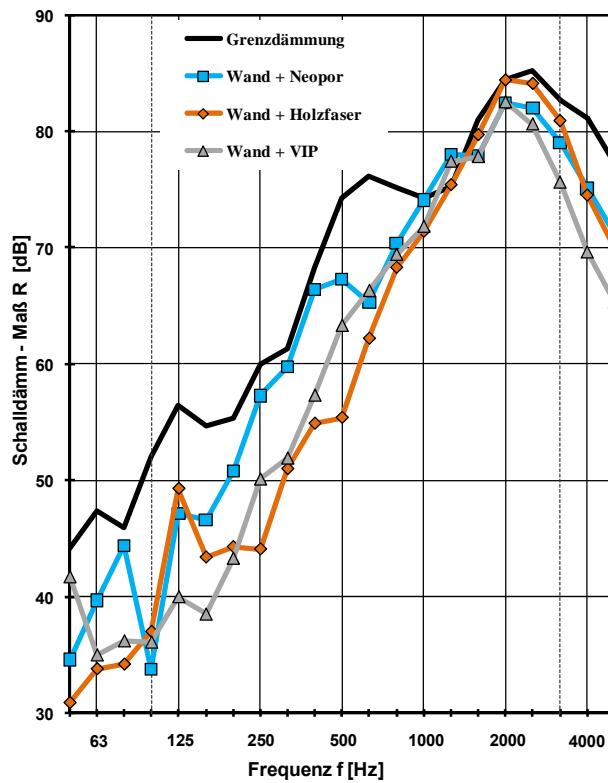


Abbildung AA6: Schalldämm-Maße R der gemessenen Grenzdümmung des Türenprüfstands ($R_w = 73$ dB) und Schalldämm-Maße R der besten gemessenen Konstruktionen

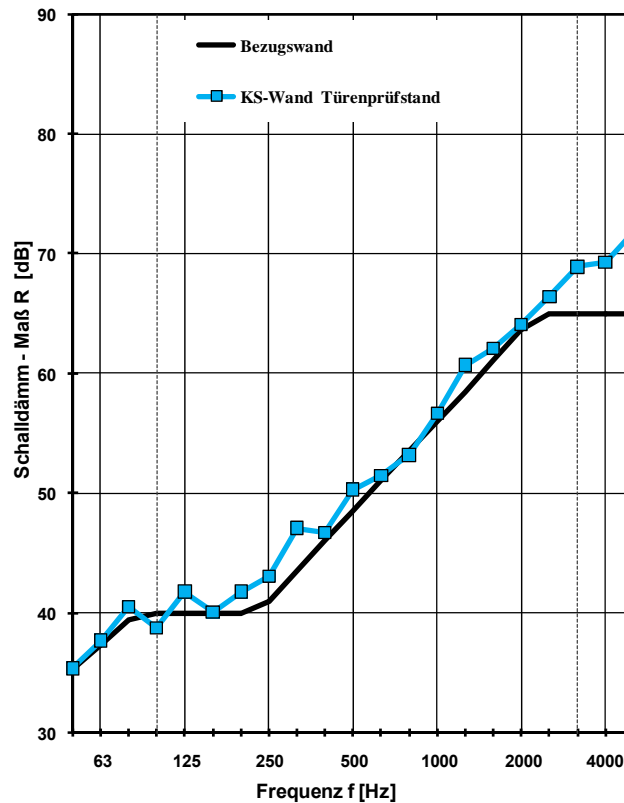


Abbildung AA7: Schalldämm-Maße R der Bezugswand und der Trägerwand im Türenprüfstand

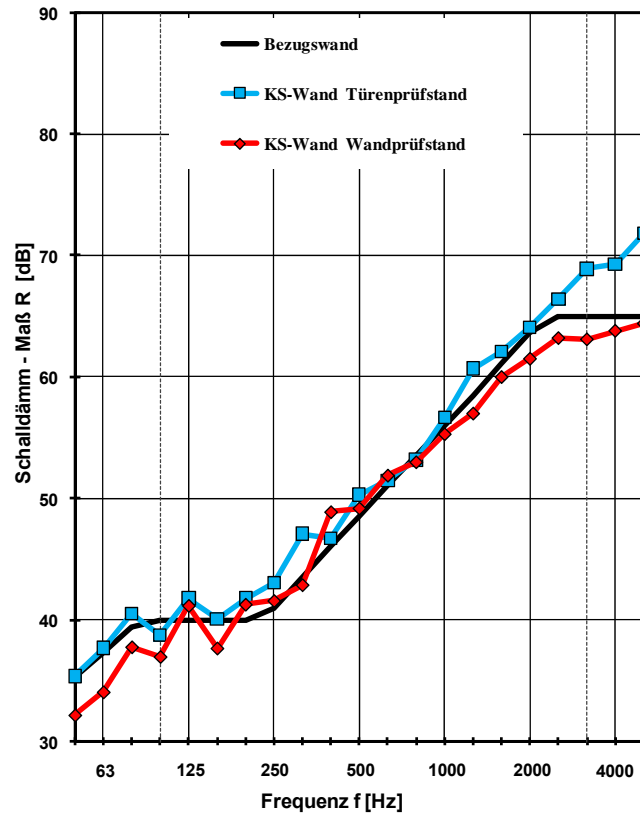


Abbildung AA8: Schalldämm-Maße R der Bezugswand, der Trägerwand im Türenprüfstand und der Trägerwand im Wandprüfstand

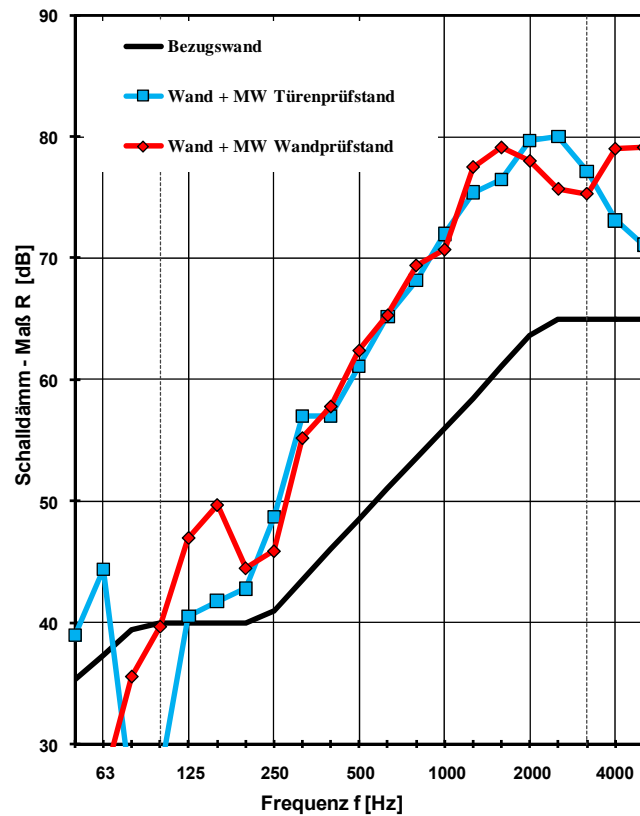


Abbildung AA9: Schalldämm-Maße R der Trägerwände in Türen- und Wandprüfstand mit WDVS 280 mm Mineralwolle

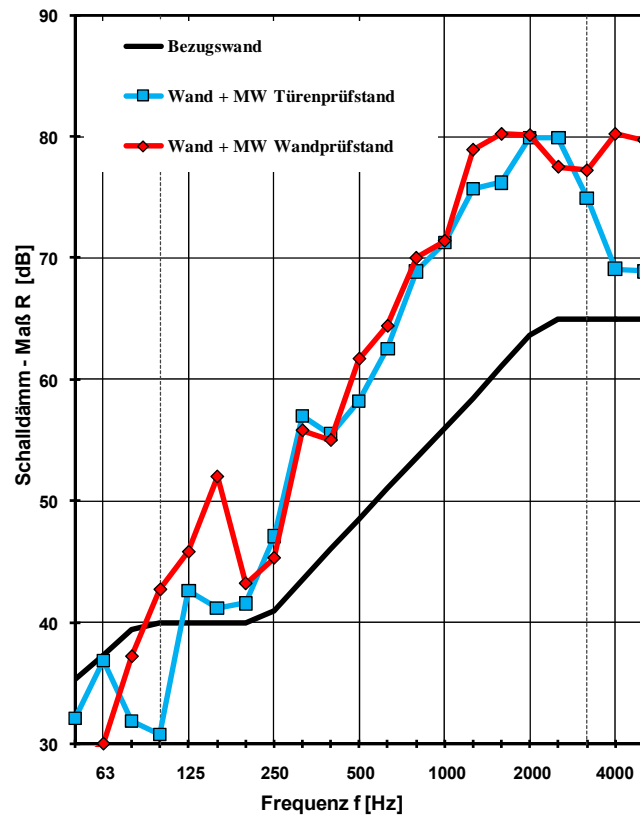


Abbildung AA10: Schalldämm-Maße $R_{ref,with}$ der Trägerwände in Türen- und Wandprüfstand mit WDVS 280 mm Mineralwolle

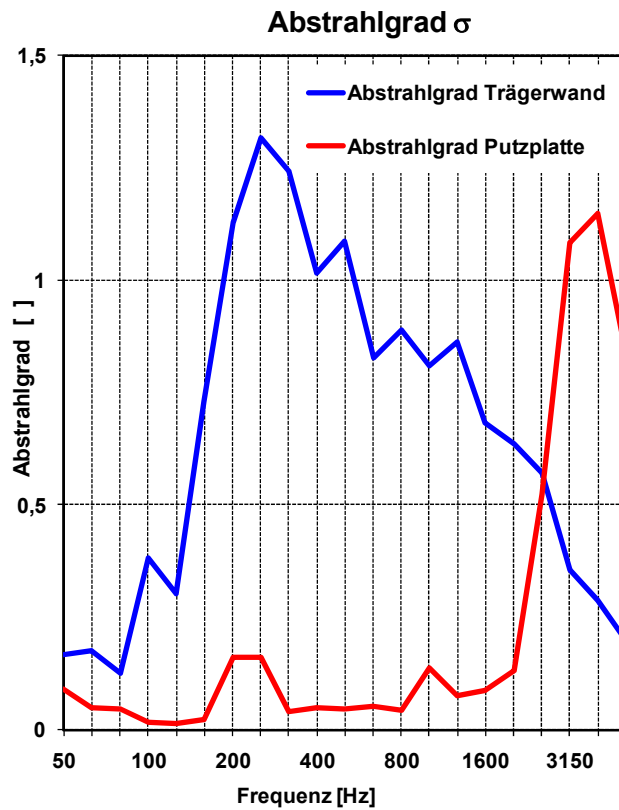


Abbildung AA11: Abstrahlgrad von Trägerwand und Putzplatte des WDVS im Wandprüfstand

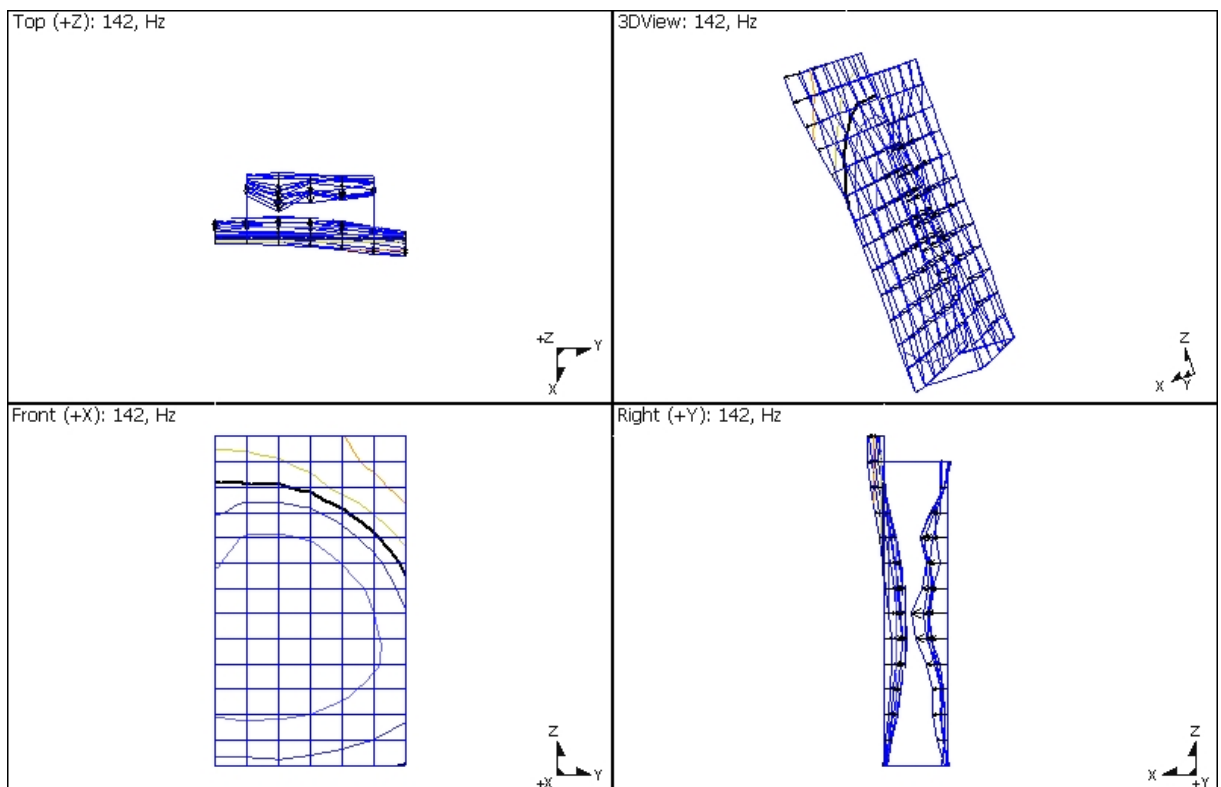
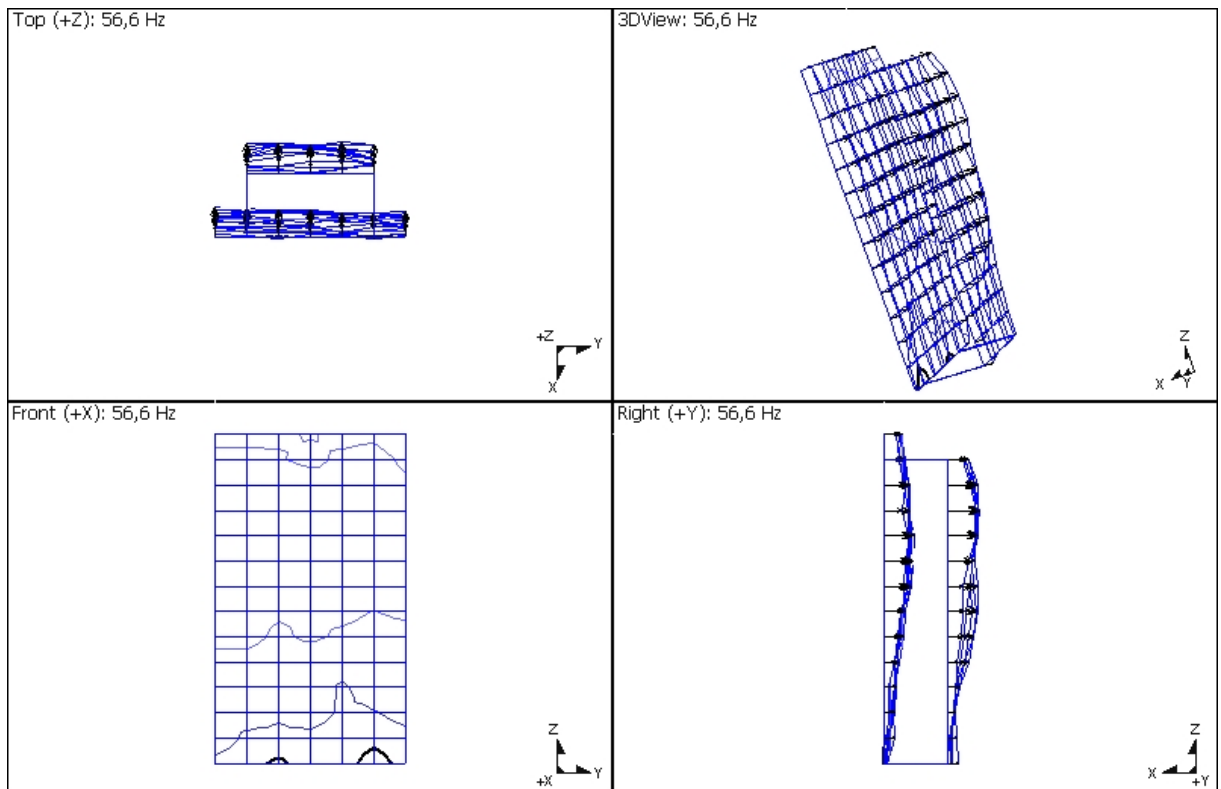


Abbildung AA12: Schwingungsform der 175 mm KS-Trägerwandwand mit 40 mm Vakuumpaneelen und 15 mm Außenputz bei 57 Hz und 142 Hz.

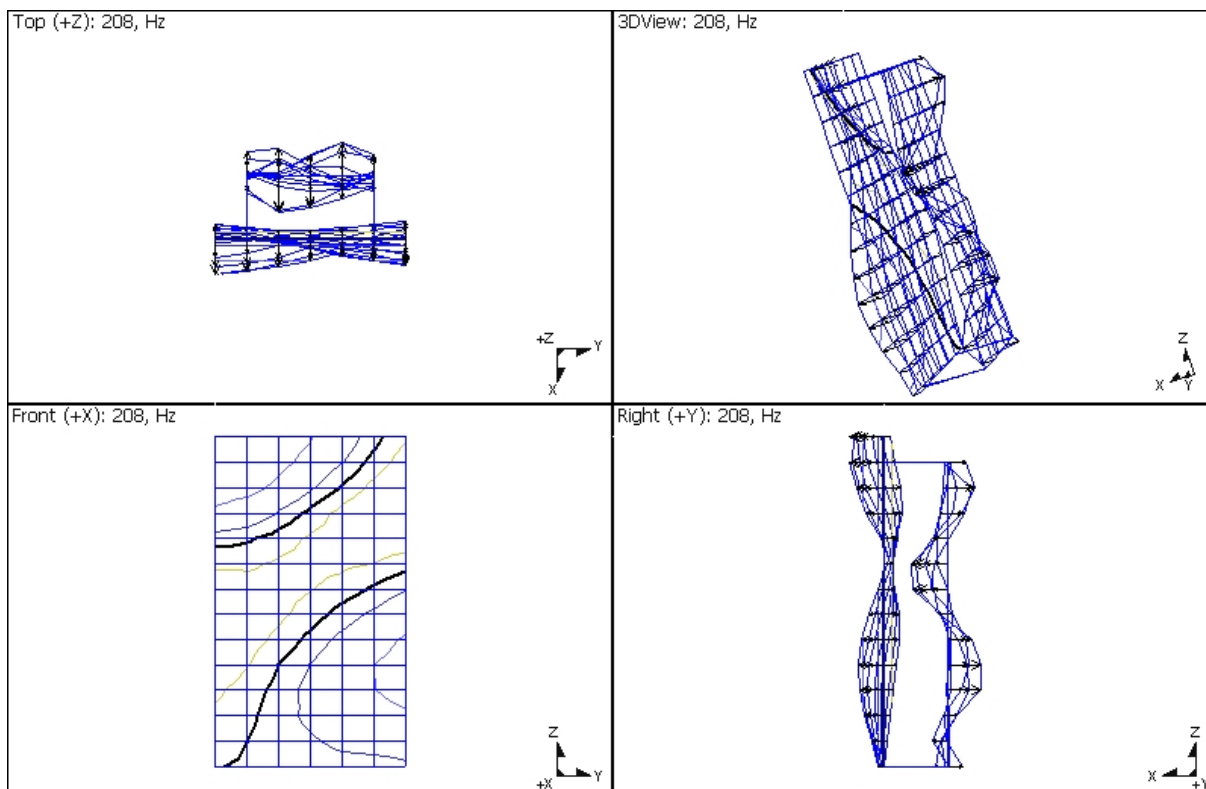


Abbildung AA13: Schwingungsform der 175 mm KS-Trägerwandwand mit 320 mm Mineralwollelamellenplatten und 15 mm Außenputz bei 208 Hz.

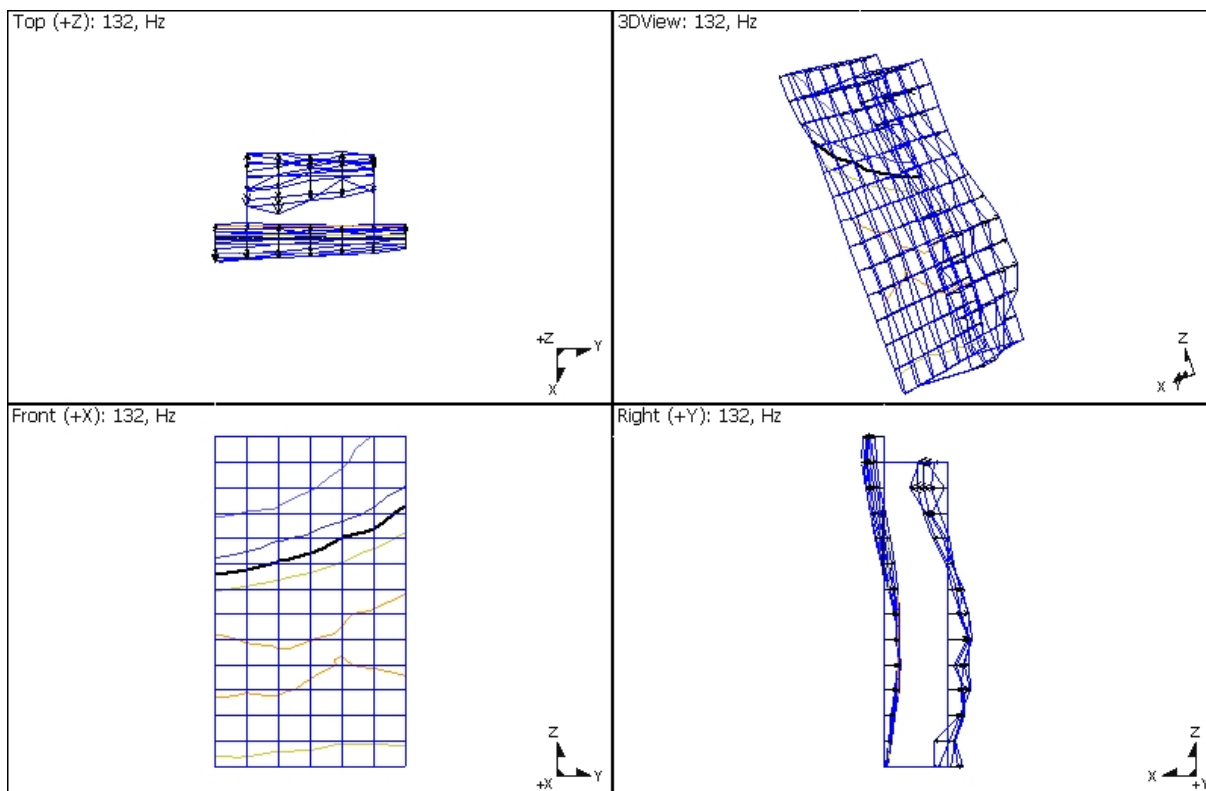


Abbildung AA14: Schwingungsform der 175 mm KS-Trägerwandwand mit 90 mm Vakuumpaneelen in PS, umgeben von Resol und mit 15 mm Außenputz bei 132 Hz.

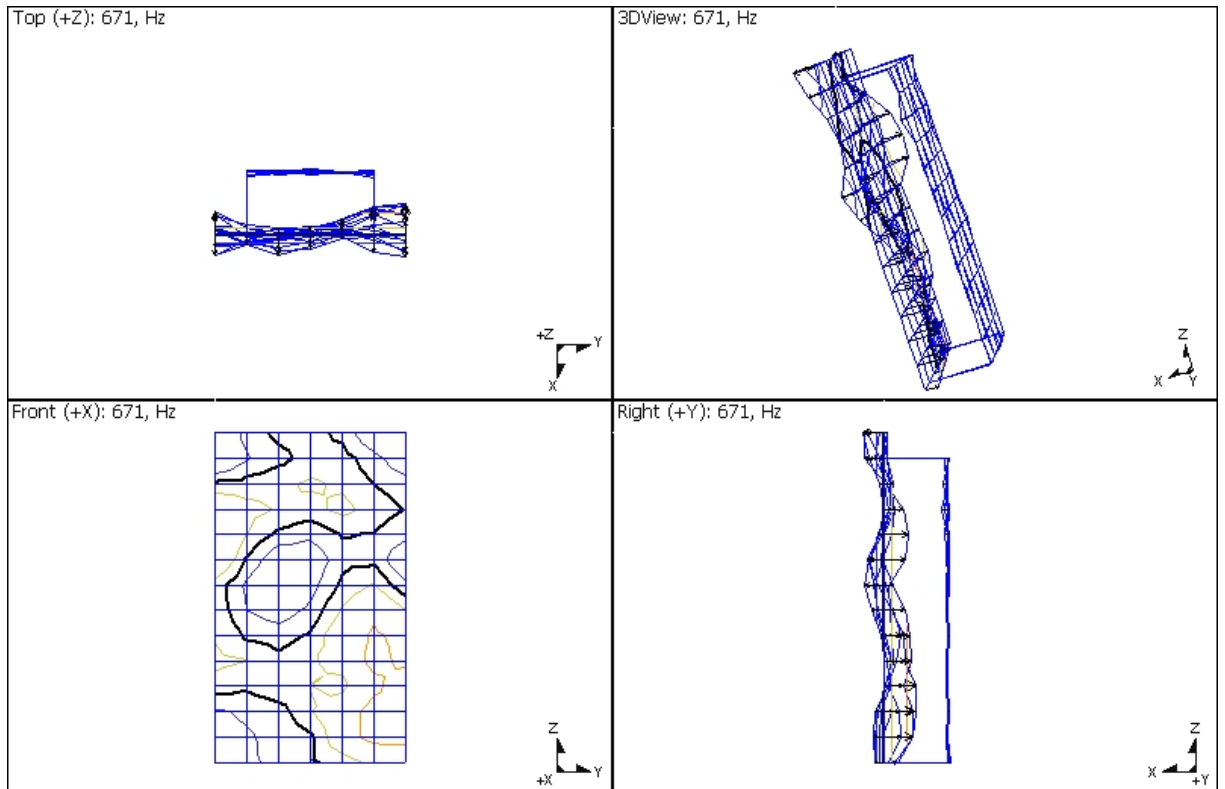


Abbildung AA15: Schwingungsform der 175 mm KS-Trägerwandwand mit 90 mm Vakuumpaneelen in PS, umgeben von Resol und mit 15 mm Außenputz bei 671 Hz.

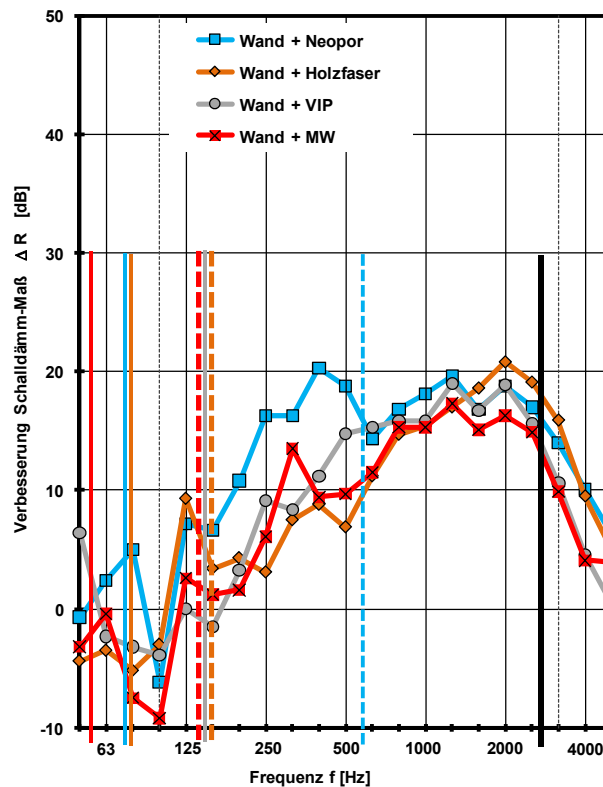


Abbildung AA16: Resonanzfrequenzen (durchgezogene Linien), Eckfrequenzen (gestrichelte Linien) und Koinzidenzfrequenz Putzplatte (schwarze Linie) eingetragen in den Kurven der Verbesserung des Schalldämm-Maßes ΔR

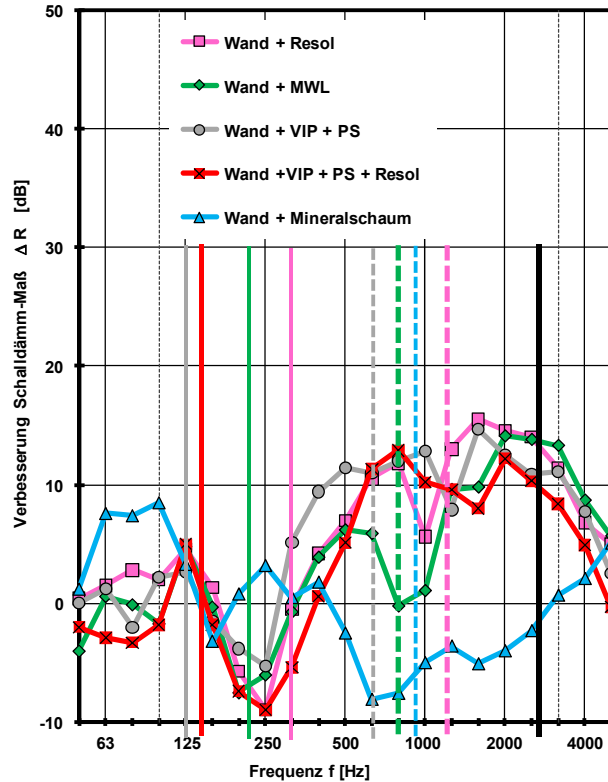


Abbildung AA17: Resonanzfrequenzen (durchgezogene Linien), Eckfrequenzen (gestrichelte Linien) und Koinzidenzgrenzfrequenz Putzplatte (schwarze Linie) eingetragen in den Kurven der Verbesserung des Schalldämm-Maßes ΔR

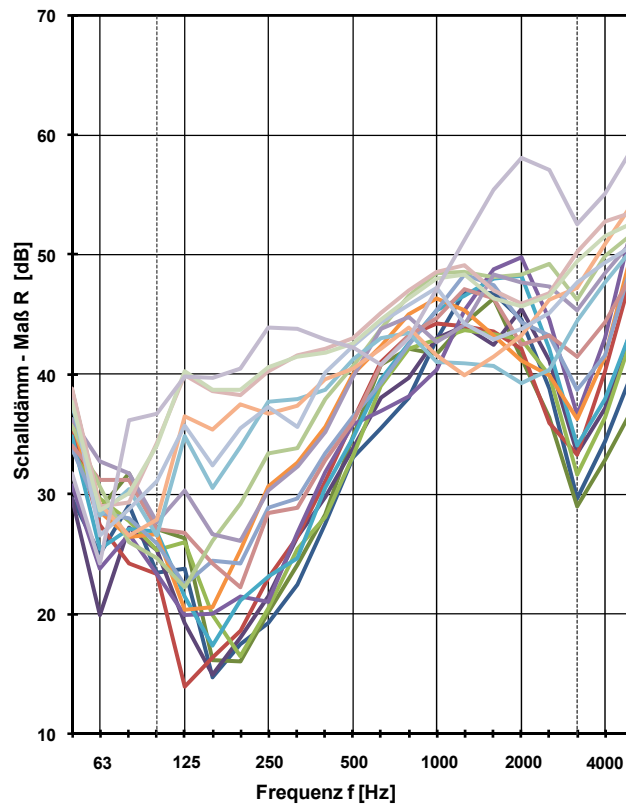


Abbildung AA18: Überblick über die Schalldämm-Maße R von Fenstern mit Dreifachverglasungen, ausgewählt wurden Fenster mit Einzählwerten von $R_w + C_{tr} = 27$ bis 45 dB

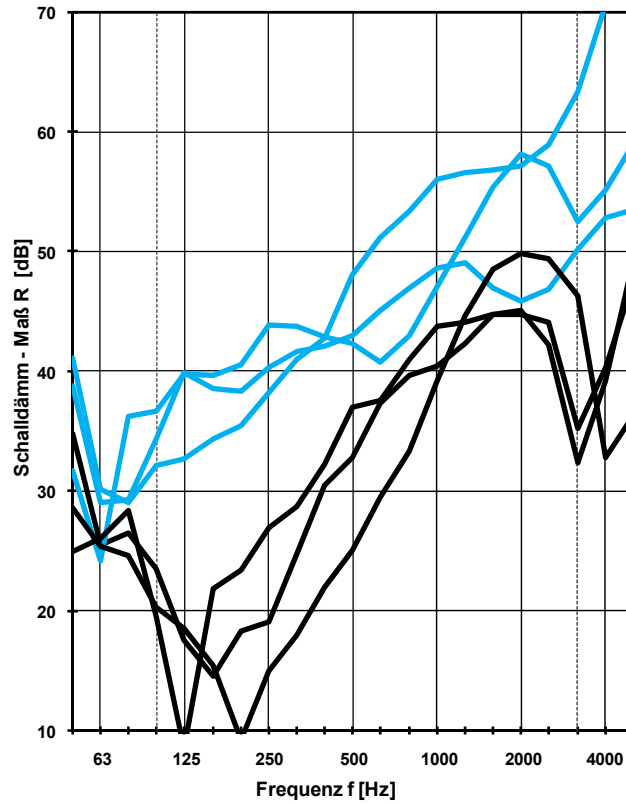


Abbildung AA19: Überblick über die Schalldämm-Maße R der besten und schlechtesten gemessenen Fenster und Dreifachverglasungen. Ausgewählt wurden Fenster und Verglasungen mit Einzahlwerten von $R_w + C_{tr} = 44$ und 45 dB und $R_w + C_{tr} = 22$ und 27 dB

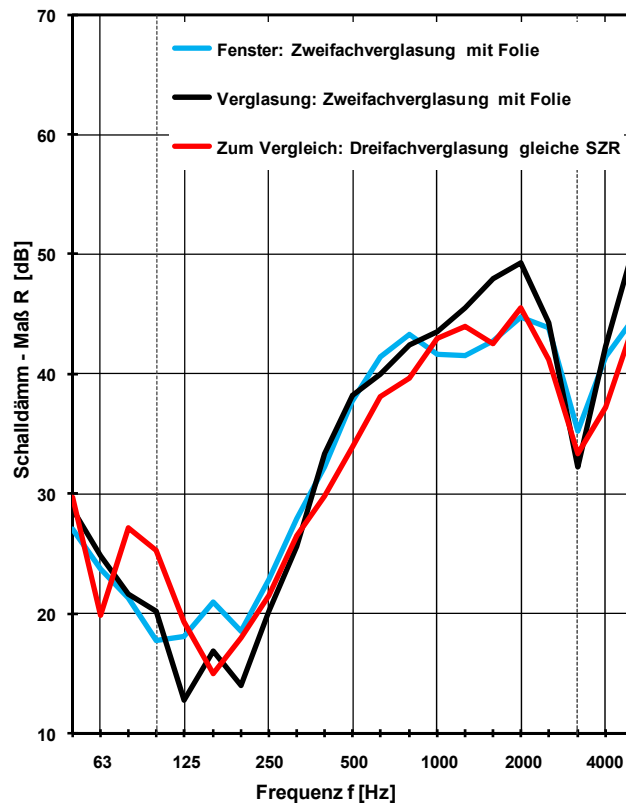


Abbildung AA20: Schalldämm-Maße R der an der HFT Stuttgart gemessenen Zweifachverglasung mit Folie in der Mitte (Aufbau: 4-12 SZR-HM Folie-12 SZR-4 LowE), Fenster $R_w (C, C_{tr}) = 36 (-2, -7)$; Verglasung $R_w (C, C_{tr}) = 33 (-2, -7)$. Vergleich mit Fenster (Aufbau: 4-12-4-12-4).

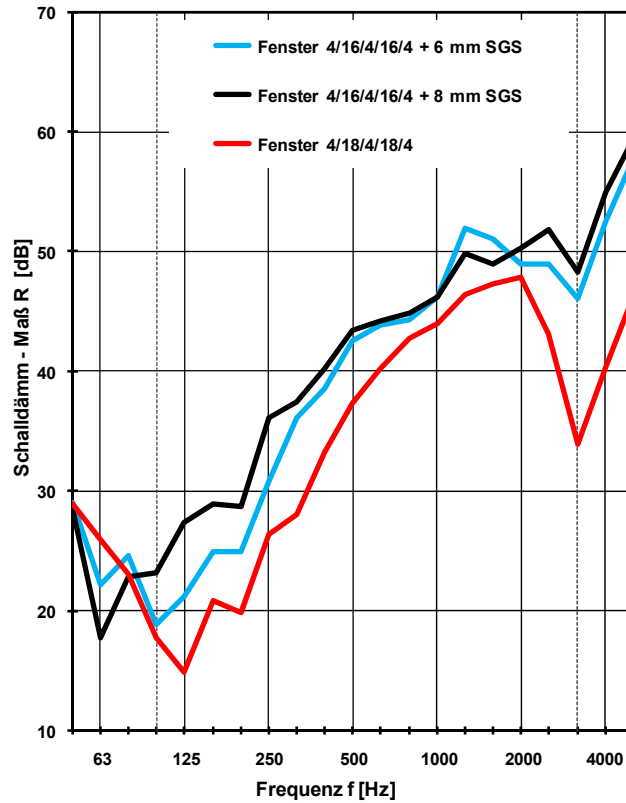


Abbildung AA21: Schalldämm-Maße R der an der HFT Stuttgart gemessenen Fenster mit Dreifachverglasungen und Argonfüllung, Fenster 4/16/4/16/4 + 6 mm SGS $R_w (C, C_{tr}) = 42 (-3, -8)$; Fenster 4/16/4/16/4 + 8 mm SGS $R_w (C, C_{tr}) = 45 (-2, -78)$; Fenster 4/18/4/18/4 $R_w (C, C_{tr}) = 36 (-2, -6)$.

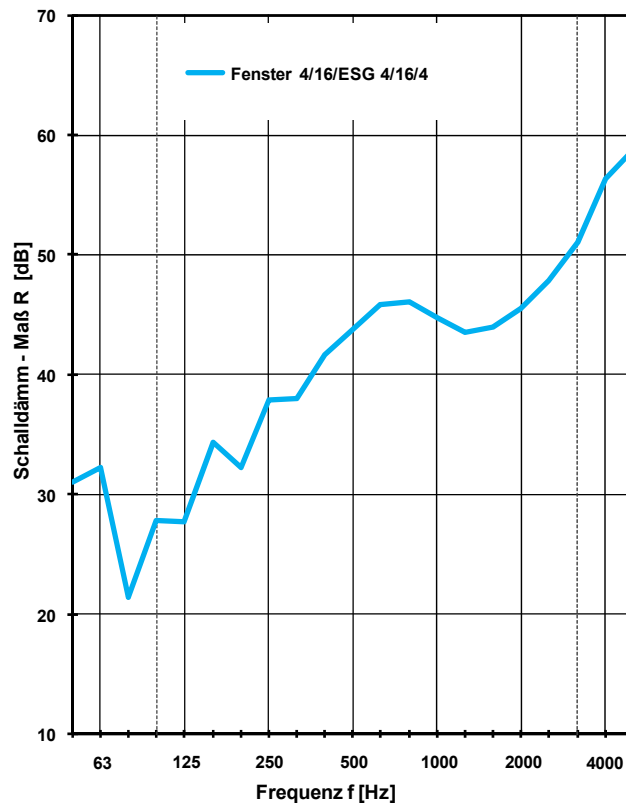


Abbildung AA22: Schalldämm-Maße R des an der HFT Stuttgart gemessenen Holzfensters mit Dreifachverglasung und Argonfüllung, Fenster 4/16/ESG 4/16/4 $R_w (C, C_{tr}) = 45 (-2, -5)$.

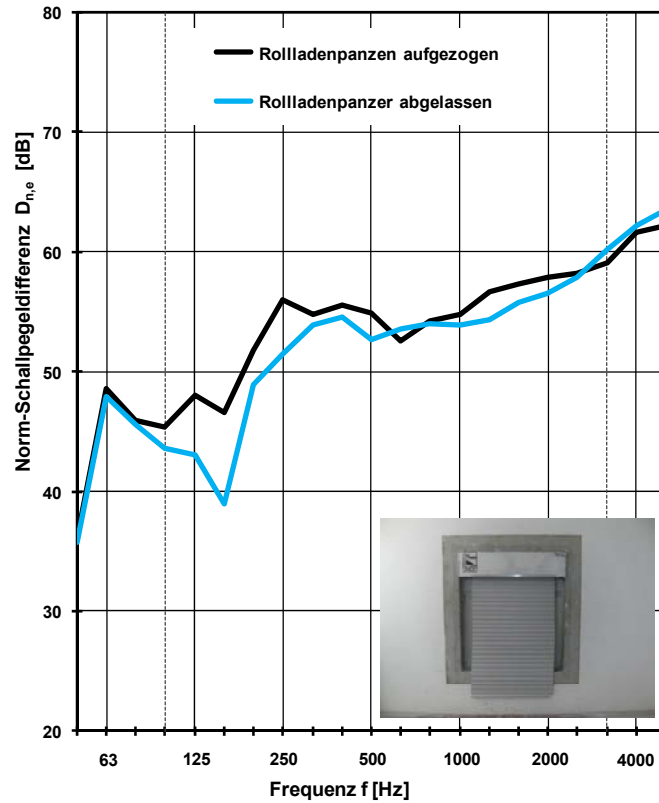


Abbildung AA23: Norm-Schallpegeldifferenz $D_{n,e}$ des an der HFT Stuttgart gemessenen Rolladenkastens $D_{n,e,w} (C, C_{tr}) = 56 (0, -2)$ (Rollpanzen oben), $D_{n,e,w} (C, C_{tr}) = 55 (-1, -3)$ (Rollpanzen unten) .

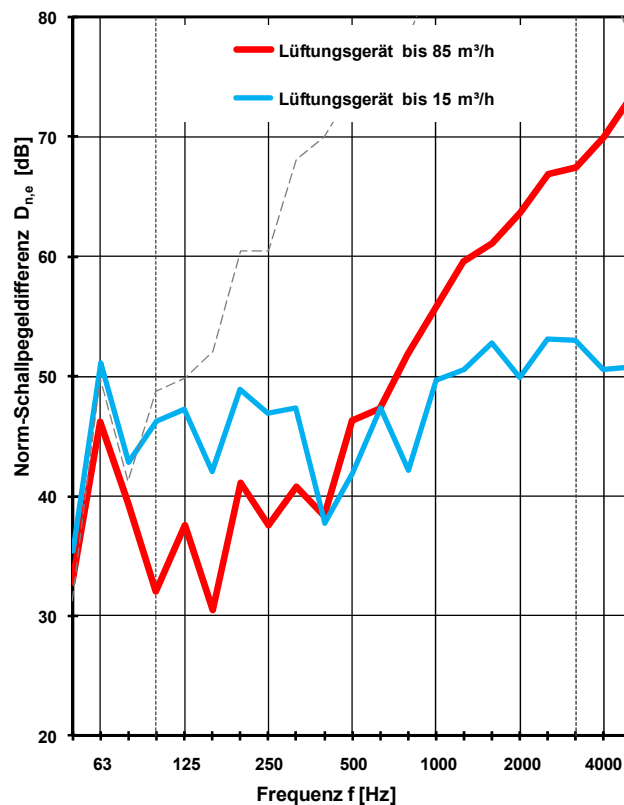


Abbildung AA24: Norm-Schallpegeldifferenzen $D_{n,e}$ der an der HFT Stuttgart gemessenen Einzelraumlüftungsgeräte $D_{n,e,w} (C, C_{tr}) = 48 (-1, -3)$ (bis $15 \text{ m}^3/\text{h}$), $D_{n,e,w} (C, C_{tr}) = 49 (-2, -6)$ (bis $85 \text{ m}^3/\text{h}$).

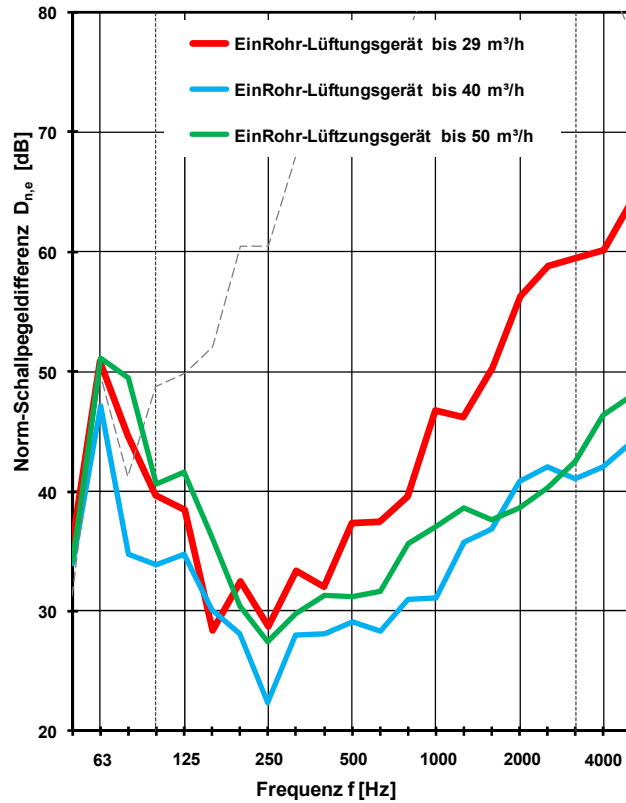


Abbildung AA25: Norm-Schallpegeldifferenzen $D_{n,e}$ der an der HFT Stuttgart gemessenen EinRohr-Lüftungsgeräte $D_{n,e,w} (C, C_{tr}) = 41 (-1, -4)$ (bis $29 \text{ m}^3/\text{h}$), $D_{n,e,w} (C, C_{tr}) = 33 (0, -2)$ (bis $40 \text{ m}^3/\text{h}$) und $D_{n,e,w} (C, C_{tr}) = 36 (0, -2)$ (bis $50 \text{ m}^3/\text{h}$).

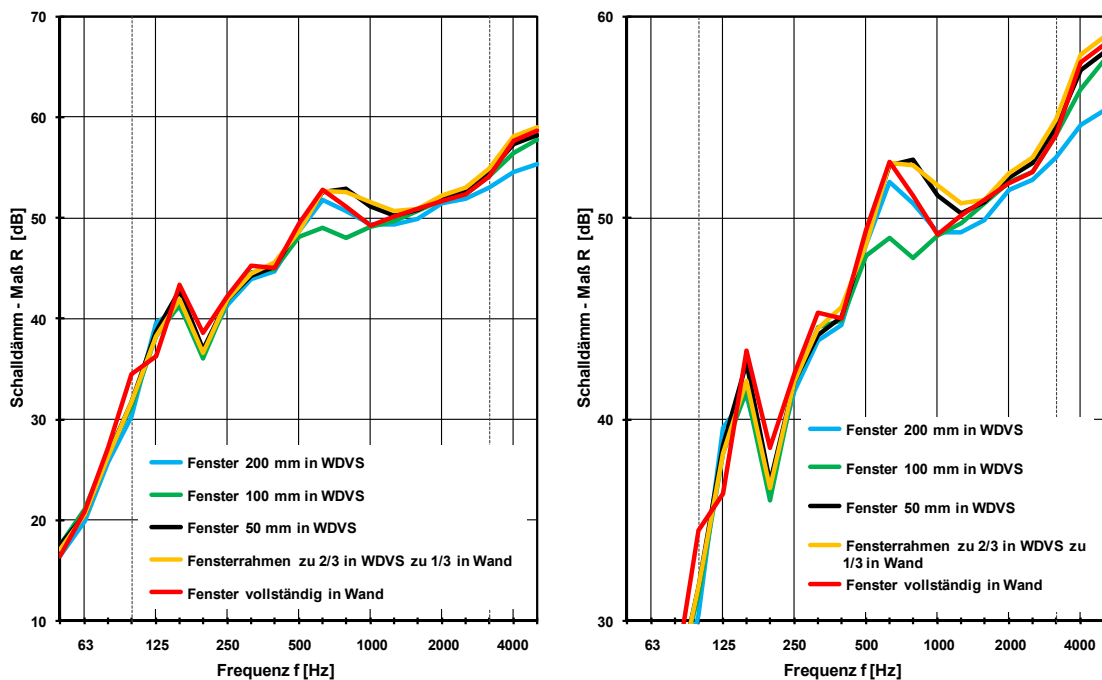


Abbildung AA26: Schalldämm-Maße einer KS-Wand 175 mm mit Fenstereinbau, bei Variation der Einbausituation des Fensters. Abbildung rechts, Vergrößerung der Unterschiede bei hohen Frequenzen. Die Ursache der Unterschiede zwischen 500 und 100 Hz könnten auf Nischeneffekte zurückzuführen sein.

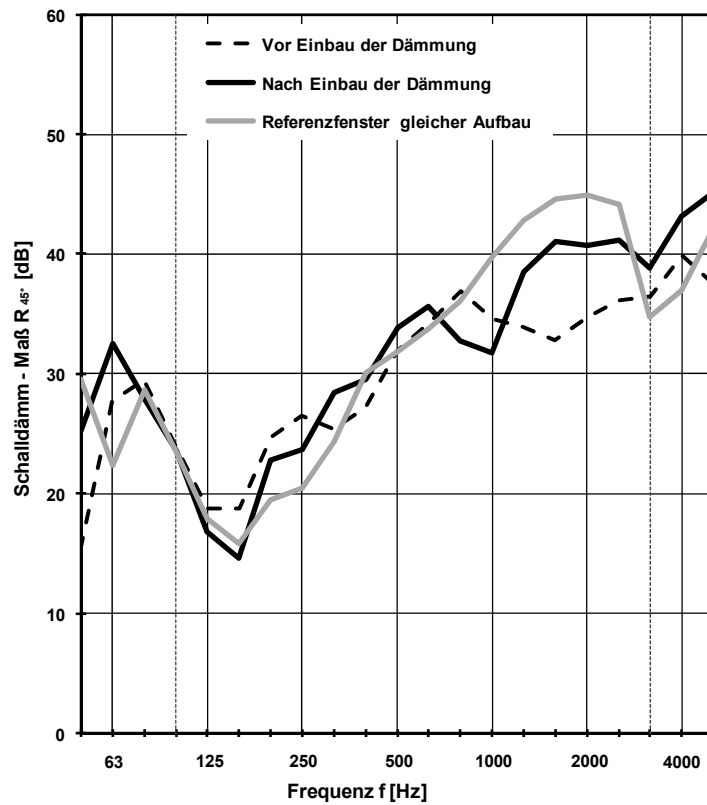


Abbildung AA27: Schalldämm-Maße einer Bausituation (Außenwand mit Fenstertüre) vor ($R'_{45^\circ, w}(C, C_{tr}) = 33 (-1, -3)$) und nach ($R'_{45^\circ, w}(C, C_{tr}) = 34 (-2, -6)$) der Montage der Dämmung der Gebäudehülle. Zum Vergleich ist ein Referenzfenster (4/16/4/16/4) gleichen Aufbaus mit eingezeichnet.

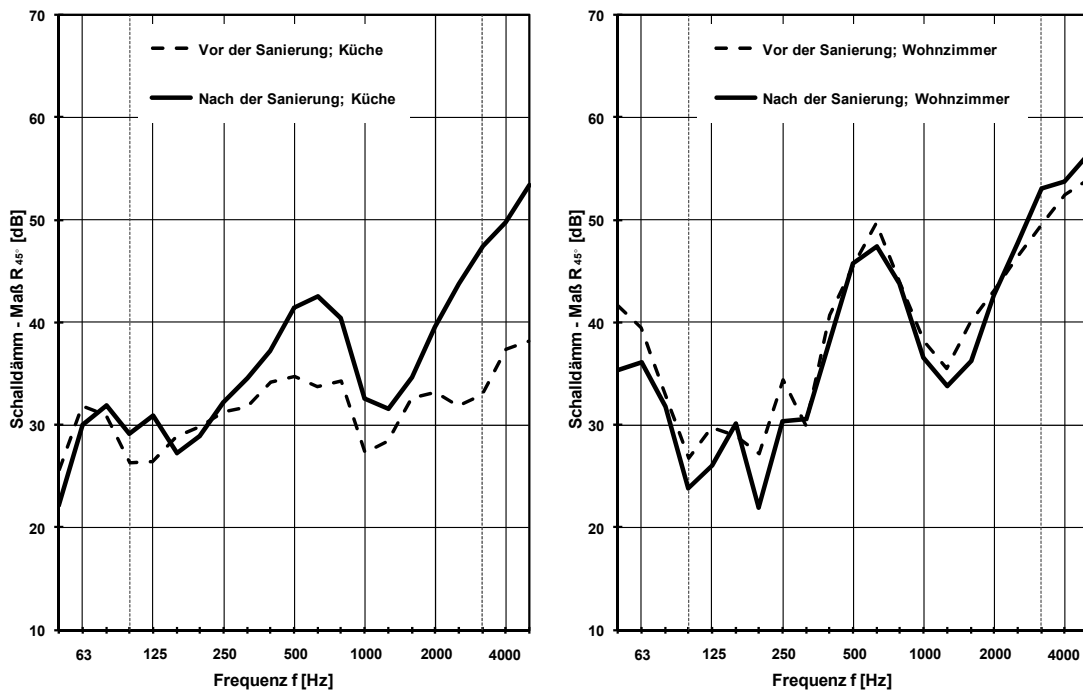


Abbildung AA28: Bau-Schalldämm-Maße von zwei Bausituationen (Außenwand mit Fenster). Abbildung links, Küchenfassade vor und nach der Sanierung der Gebäudehülle mit Vakuumdämmpaneelen ($R'_{45^\circ, w}(C, C_{tr}) = 32 (-1, -1)$, $R'_{45^\circ, w}(C, C_{tr}) = 40 (-1, -4)$). Abbildung rechts, Wohnzimmerfassade ($R'_{45^\circ, w}(C, C_{tr}) = 38 (-2, -4)$, $R'_{45^\circ, w}(C, C_{tr}) = 38 (-1, -4)$).

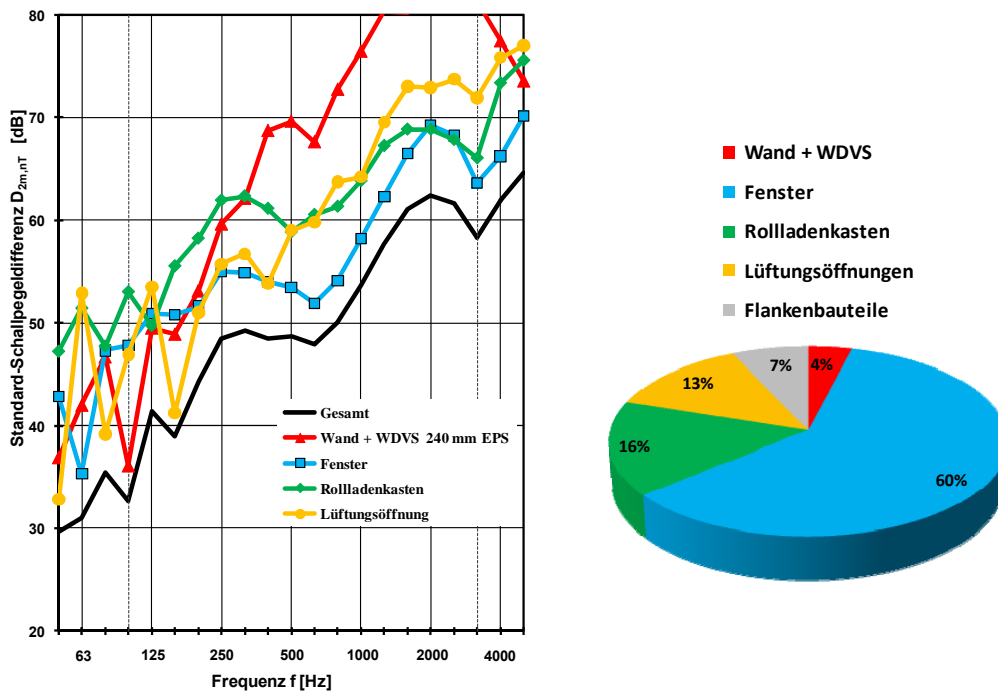


Abbildung AA29: Standard-Schallpegeldifferenzen der jeweils besten Bauteile, kombiniert zu einer optimalen Gesamtfassade von $D_{2m,nT,w}$ (C, C_{tr}) = 54 (-2, -6). Die rechte Abbildung zeigt den prozentualen Schalldurchgang durch die jeweiligen Bauteile.

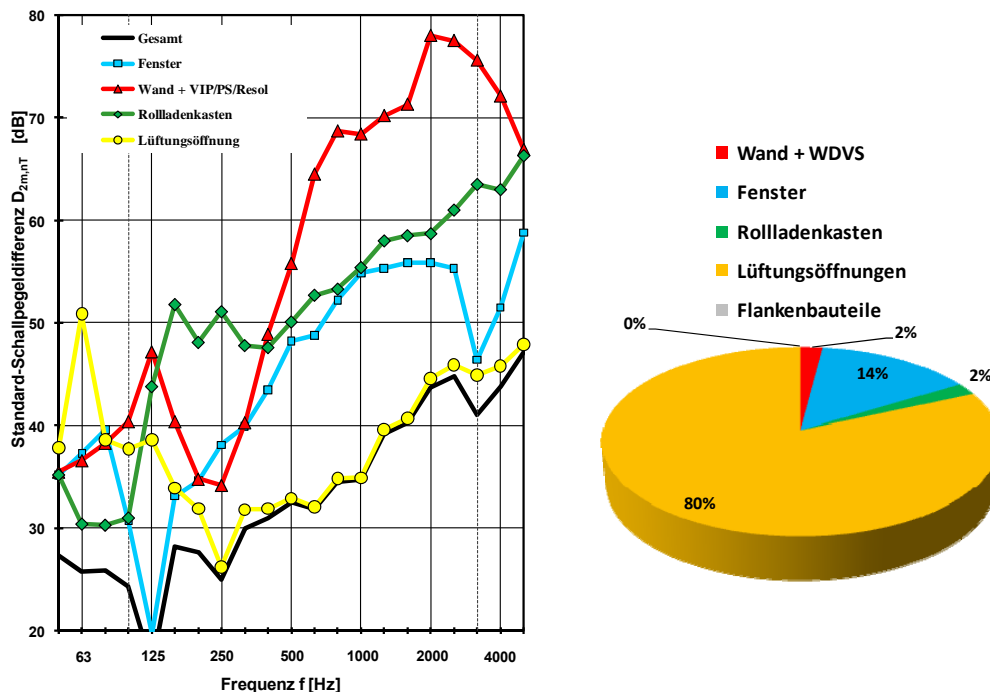


Abbildung AA30: Standard-Schallpegeldifferenzen der jeweils schlechtesten Bauteile, kombiniert zu einer ungünstigen Gesamtfassade von $D_{2m,nT,w}$ (C, C_{tr}) = 36 (-1, -5). Die rechte Abbildung zeigt den prozentualen Schalldurchgang durch die jeweiligen Bauteile.

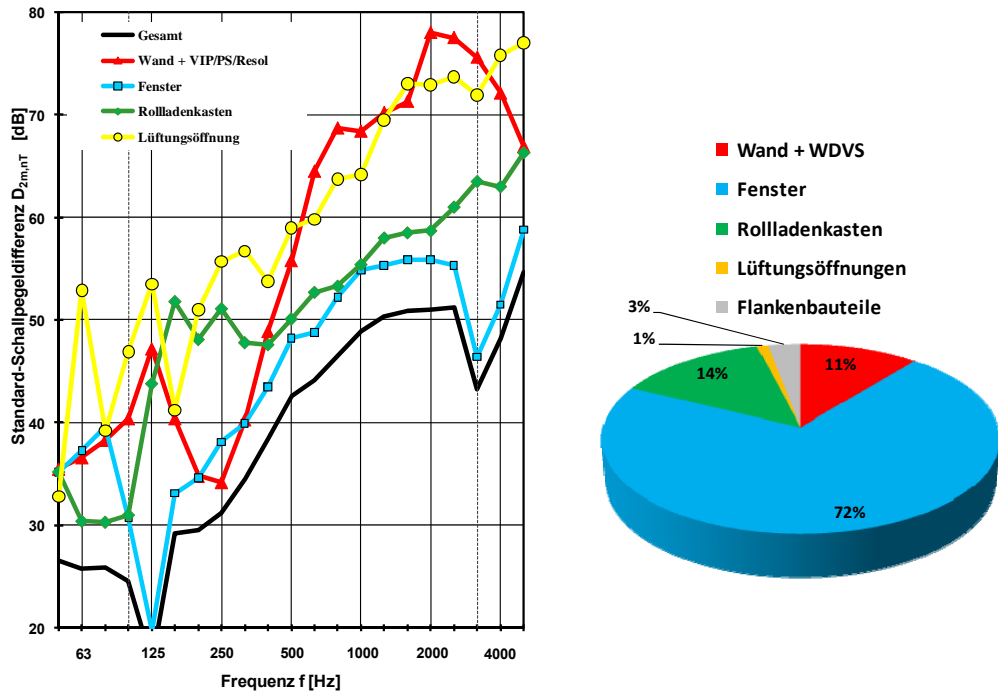


Abbildung AA31: Standard-Schallpegeldifferenzen der ungünstigen Gesamtfassade von Abbildung AA 30, nun mit verbesserter Lüftungsöffnung $D_{2m, nT,w} (C, C_{tr}) = 43 (-4, -9)$. Die rechte Abbildung zeigt den prozentualen Schalldurchgang durch die jeweiligen Bauteile.

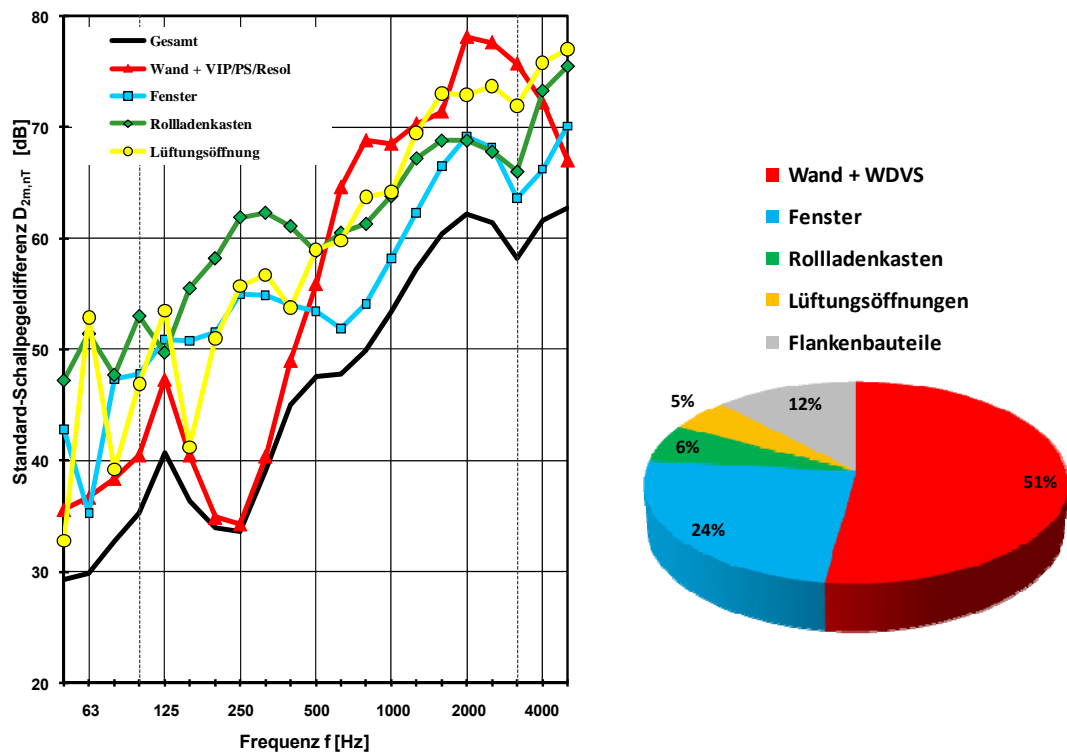


Abbildung AA32: Standard-Schallpegeldifferenzen der ungünstigen Gesamtfassade von Abbildung AA 30, nun mit verbesserter Lüftungsöffnung, und besseren Rollladenkästen und Fenstern $D_{2m, nT,w} (C, C_{tr}) = 49 (-1, -5)$. Die rechte Abbildung zeigt den prozentualen Schalldurchgang durch die jeweiligen Bauteile.

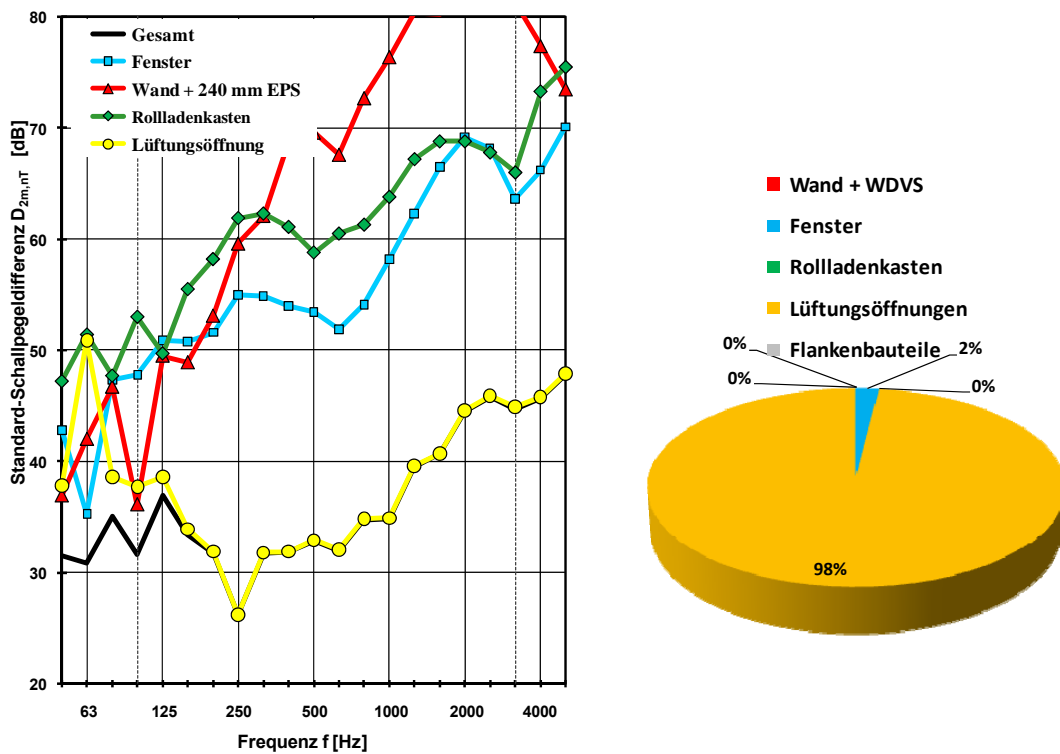


Abbildung AA33: Standard-Schallpegeldifferenzen der günstigsten Gesamtfassade von Abbildung AA 29, nun mit der schlechtesten Lüftungsöffnung $D_{2m,nT,w}$ (C, C_{tr}) = 37 (-1, -3). Die rechte Abbildung zeigt den prozentualen Schalldurchgang durch die jeweiligen Bauteile.

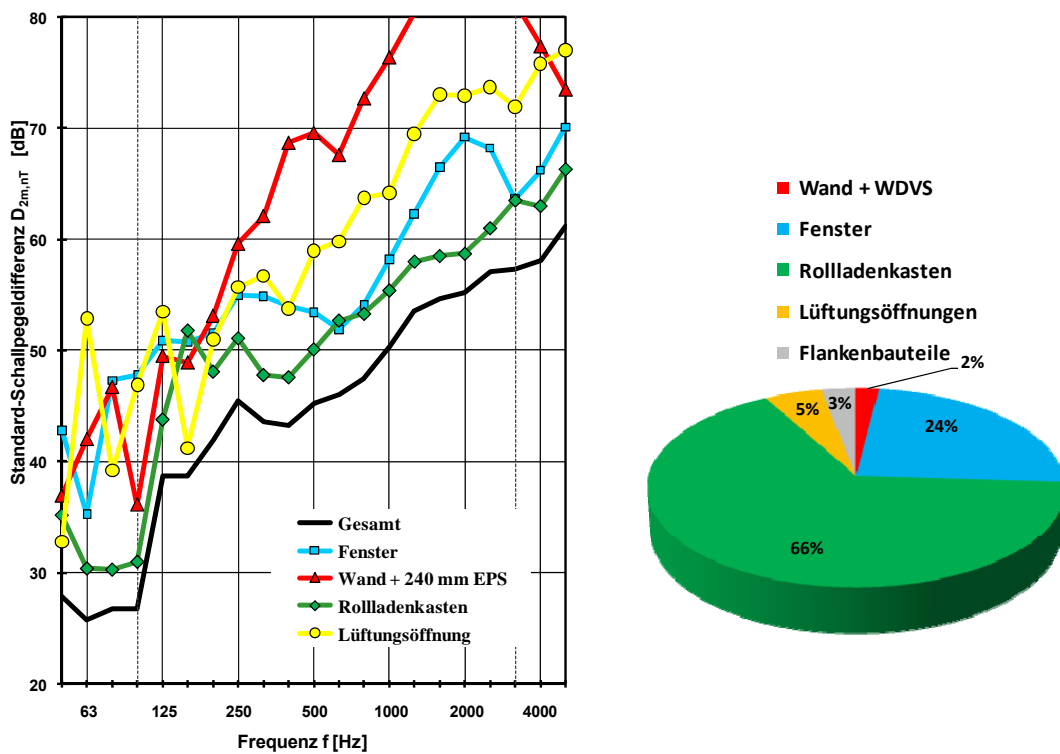


Abbildung AA34: Standard-Schallpegeldifferenzen der günstigsten Gesamtfassade von Abbildung AA 29, nun mit den schlechtesten Rollladenkästen $D_{2m,nT,w}$ (C, C_{tr}) = 50 (-2, -6). Die rechte Abbildung zeigt den prozentualen Schalldurchgang durch die jeweiligen Bauteile.

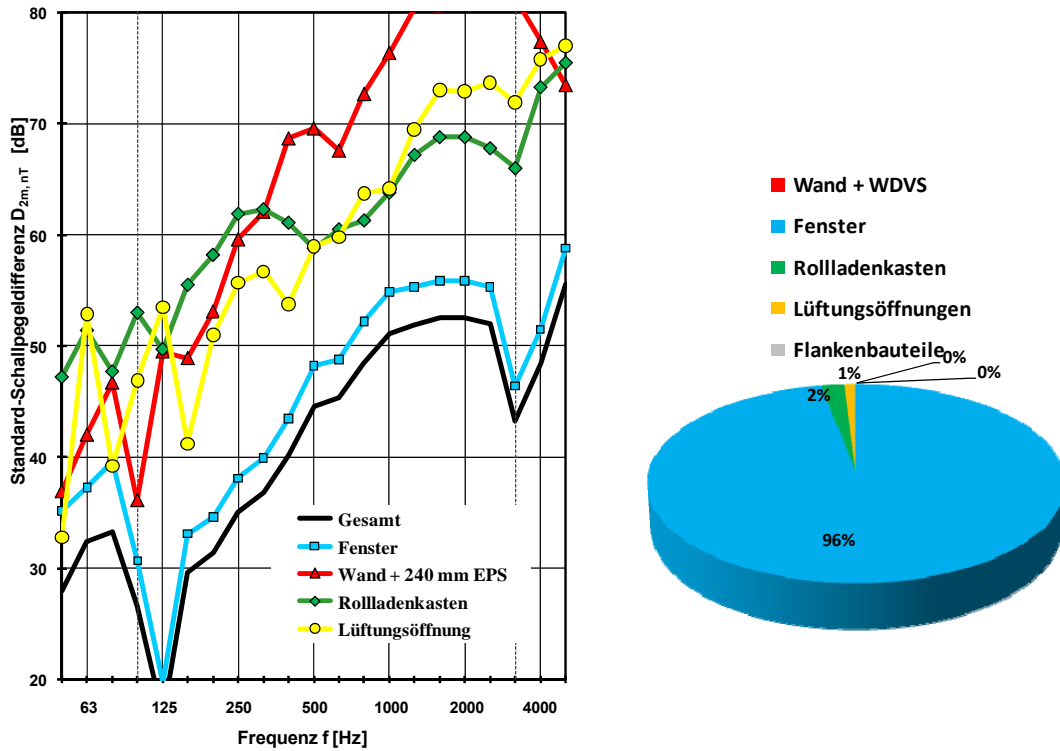


Abbildung AA35: Standard-Schallpegeldifferenzen der günstigsten Gesamtfassade von Abbildung AA 29, nun mit den schlechtesten Fenstern $D_{2m,nT,w}$ (C, C_{tr}) = 44 (-4, -9). Die rechte Abbildung zeigt den prozentualen Schalldurchgang durch die jeweiligen Bauteile.

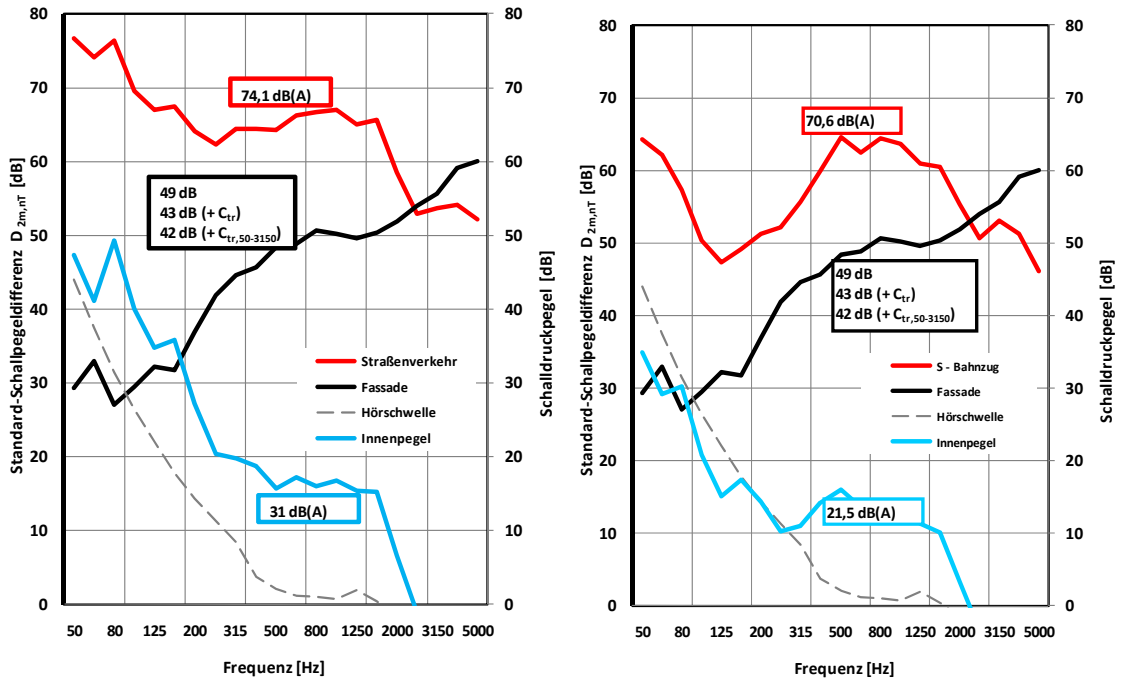


Abbildung AA36: Berechnete Innenschalldruckpegel in einem Raum bei Straßenverkehrslärm (74,1 dB(A) links) und Schienenfahrzeuglärm (70,6 dB(A) rechts) und einer Fassade mit einer bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz von 49 (-1, -6, -7) dB.

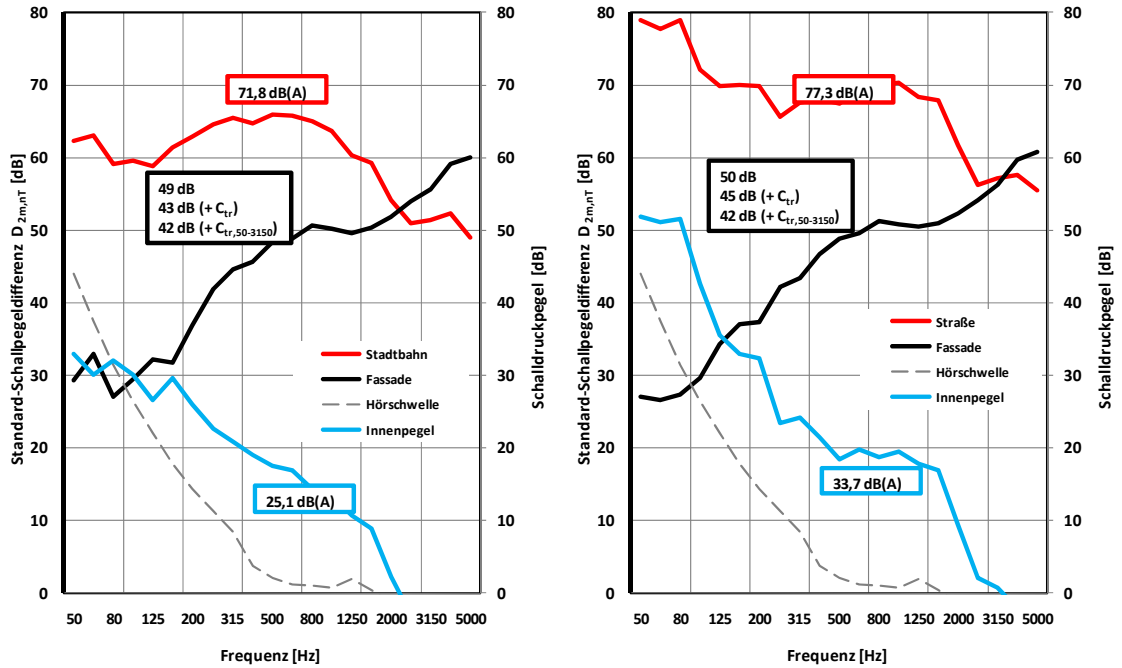


Abbildung AA37: Berechnete Innenschalldruckpegel in einem Raum bei Stadtbahnlärm (71,8 dB(A) links) und einer Fassade mit einer bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz von 49 (-1, -6, -7) dB. Berechnete Innenschalldruckpegel in einem Raum bei Straßenverkehrslärm (77,3 dB(A) rechts) und einer Fassade mit einer bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz von 50 (-1, -5, -8) dB.

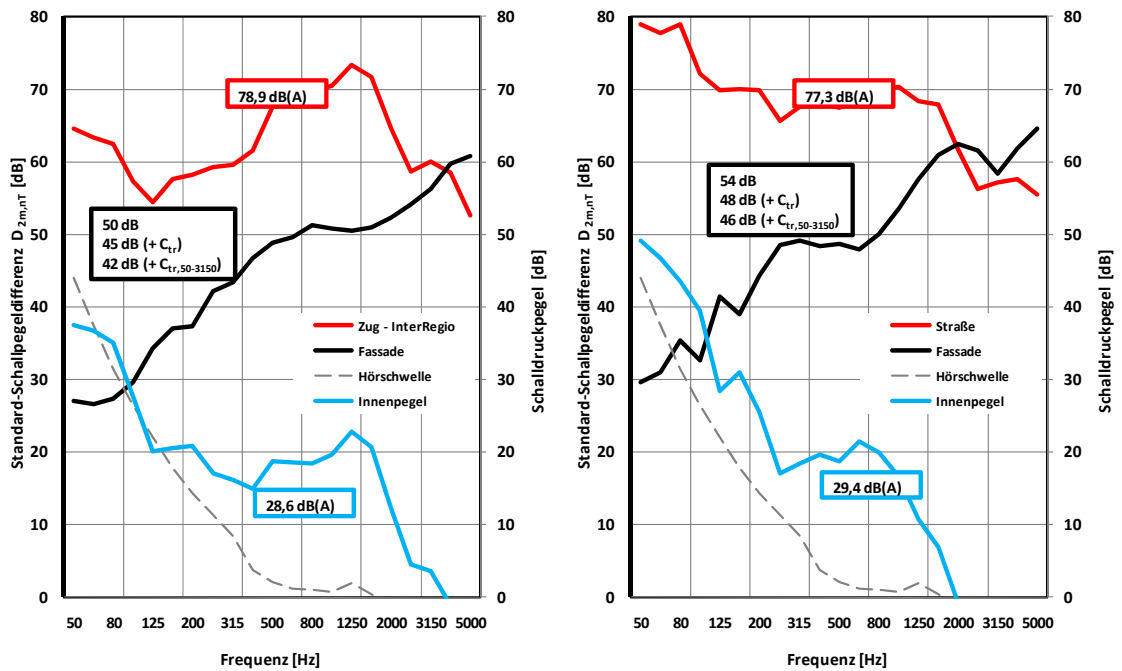


Abbildung AA38: Berechnete Innenschalldruckpegel in einem Raum bei Schienenfahrzeuflärm (78,9 dB(A) links) und einer Fassade mit einer bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz von 50 (-1, -5, -8) dB. Berechnete Innenschalldruckpegel in einem Raum bei Straßenverkehrslärm (77,3 dB(A) rechts) und einer Fassade mit einer bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz von 54 (-2, -6, -8) dB.

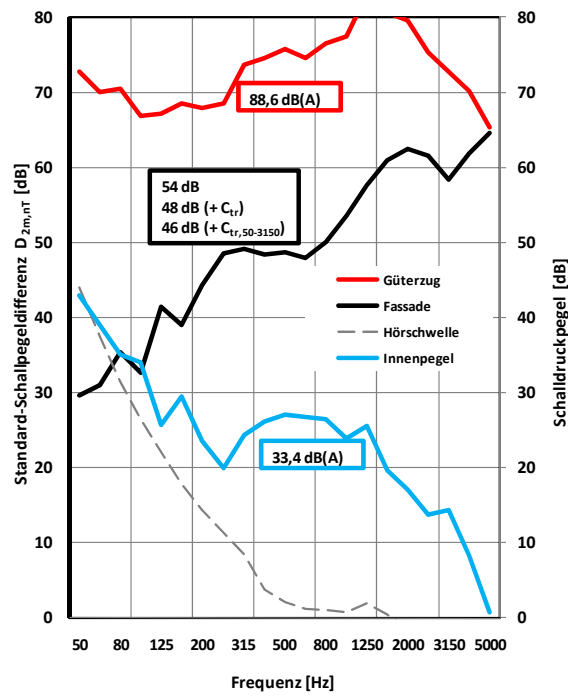


Abbildung AA39: Berechnete Innenschalldruckpegel in einem Raum bei Schienenfahrzeuglärm (88,6 dB(A)) und einer Fassade mit einer bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz von 54 (-2, -6, -8) dB.