Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

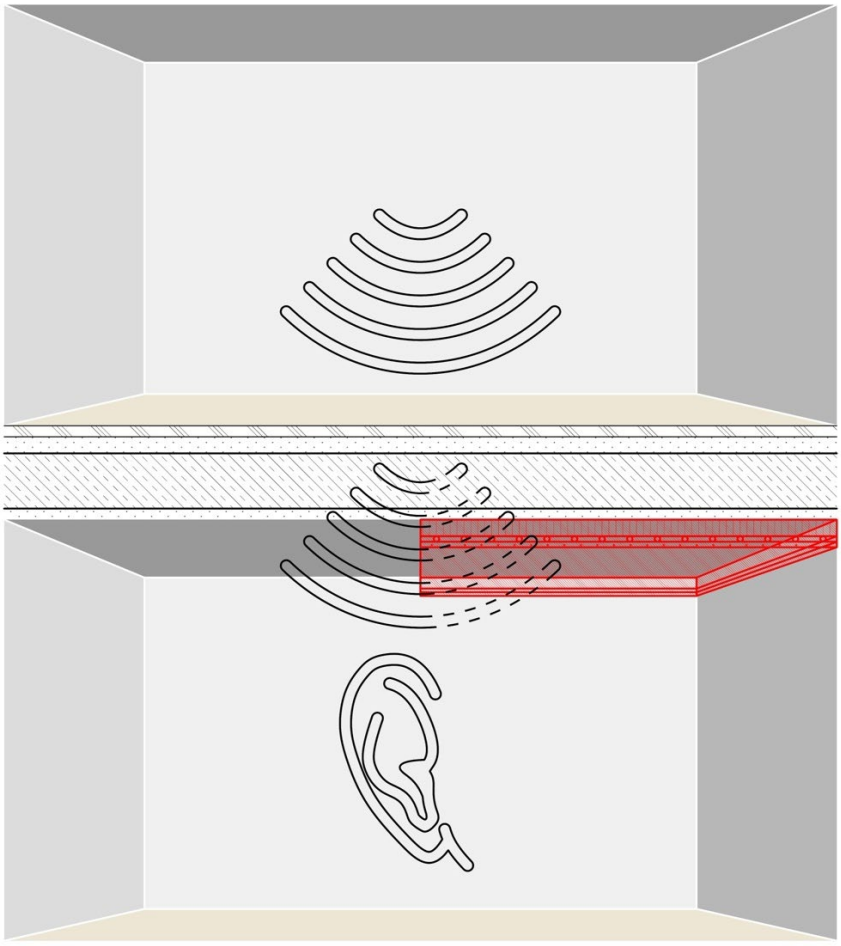
Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 30. Oktober 2026

CombiSound

Kombinierte Sanierungsmassnahmen für Schallschutz und Behaglichkeit in Wohngebäuden



Quelle: CombiSound, 2025

Subventionsgeberin:
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.energieforschung.ch

Kofinanzierung:
Kanton Zürich
AWEL, Abteilung Energie
8090 Zürich
www.zh.ch/energie

Kanton Basel-Stadt
BVD, Fachstelle UPB
4051 Basel
www.bs.ch/upb

Zürich
Amt für Hochbauten
8010 Zürich
www.stadt-zuerich.ch

Stadt St.Gallen
Umwelt und Energie
9001 St.Gallen
www.stadt.sg.ch

Subventionsempfänger/innen:
Ostschweizer Fachhochschule
SPF Institut für Solartechnik
8640 Rapperswil
www.spf.ch

Fachhochschule Nordwestschweiz
Institut Nachhaltigkeit und Energie am Bau
4132 Muttenz
www.fhnw.ch

Empa
Abteilung Akustik/Lärmminderung
8606 Dübendorf
www.empa.ch

Autor/in:
Daniel Philippen, SPF, daniel.philippen@ost.ch
Alexander Schmitt, SPF, alexander.schmitt@ost.ch
Toni Calabrese, SPF, toni.calabrese@ost.ch
Julian Mönig, FHNW, julian.moenig@fhnw.ch
Andrea Klinge, FHNW, andrea.klinge@fhnw.ch
Stefan Schoenwald, Empa, stefan.schoenwald@empa.ch

BFE-Projektbegleitung:
Martin Ménard, menard@lowtechlab.ch
Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502850-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren/Autorinnen dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Das Projekt CombiSound untersucht, ob mit dem Einbau verputzter Abhangdecken mit Heiz- und Kühlfunktion sowohl der Schallschutz als auch die thermische Behaglichkeit in bestehenden Mehrfamilienhäusern verbessert werden kann. Die Decken sind als Masse-Feder-Masse-System ausgelegt, das trotz geringer Aufbauhöhe eine signifikante Reduktion von Luft- und Trittschall ermöglicht. Mit dieser Aufwertung kann möglicherweise dazu beigetragen werden, dass Bestandsbauten eher saniert werden, statt auf Ersatzneubauten mit höherem ökologischem Fussabdruck zu setzen.

Der Einbau wurde für zwei Modellzimmer analysiert: im Farbhof in Zürich (Baujahr 1955 - 57, Stahlbetondecke) und in der Maulbeerstrasse in Basel (Baujahr 1906, Holzbalkendecke). Der Schallschutz wurde nach SN EN ISO 12354 berechnet und mit der SIA 181 verglichen. Der thermische Komfort wurde in IDA ICE mit Klimadaten für 2060 simuliert und nach SIA 180 bewertet. Zusätzlich wurden Umweltwirkungen (GWP, UBP, graue Energie), Brandschutz, Tragwerk, Raumhöhe und Kosten beurteilt. Verglichen wurden mehrere Deckenvarianten, die sich unterscheiden in der Beplankung (Gips- oder Lehmplatte), der Einbindung des Heiz-/Kühlregisters (in die Platte integrierte Rohre oder Wärmeleitblech) und der Abhängung (Federschiene oder Direktabhänger).

Gemäss der durchgeführten Multikriterienanalyse, die neben den oftmals entscheidenden Investitionskosten auch die Umweltwirkungen, die bauliche Umsetzung sowie den Schallschutz mitbetrachtet, schneiden für beide Modellzimmer die Lösungen auf Basis von Lehmklimaelementen am besten ab, allerdings bei höheren Investitionskosten. In der günstigsten Ausführung der Abhangdecke mit Gipsplatte, Wärmeleitblech und Federschiene resultieren Investitionskosten von rund 340 Fr./m^2 Deckenfläche, was den Kosten einer Fussbodenheizung entspricht, wobei sich durch die Deckenheizung Vorteile ergeben, u.a. da die bestehende Fussbodenhöhe beibehalten wird.

Da im sommerlichen Kühlbetrieb der Taupunkt unterschritten werden kann, sollten die in der Abhangdecke eingesetzten Materialien eine hohe Sorptionsfähigkeit bzgl. Luftfeuchtigkeit aufweisen. Viele Lehmprodukte können hier eingesetzt werden und sie weisen oft auch weitere Vorteile bzgl. Umweltbelastung, Kreislauffähigkeit und Wiederverwendung auf.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich durch die Integration von Deckenheizungen Synergien nutzen lassen und moderne Komfortstandards unter Einhaltung der SIA-Normen 180 und 181 erreichbar sind. Für eine erfolgreiche Schallschutzsanierung braucht es ein gutes Verständnis der Einflussfaktoren, wofür der Bericht eine Grundlage liefert.

Résumé

Le projet CombiSound examine si l'installation de plafonds suspendus enduits à fonction de chauffage et de refroidissement permet d'améliorer à la fois l'isolation acoustique et le confort thermique dans les immeubles collectifs existants. Les plafonds sont conçus comme un système masse-ressort-masse qui permet, malgré une faible hauteur de construction, une réduction significative des bruits aériens et des bruits de choc. Cette revalorisation pourrait contribuer à favoriser la rénovation des bâtiments existants plutôt que leur remplacement par de nouvelles constructions présentant une empreinte écologique plus élevée.

L'installation a été analysée dans deux pièces types: au Farbhof, à Zurich (construit entre 1955 et 1957, avec dalle en béton armé), et dans la Maulbeerstrasse, à Bâle (construit en 1906, avec plancher à solives en bois). L'isolation acoustique a été calculée selon la norme SN EN ISO 12354 et comparée aux exigences de la norme SIA 181. Le confort thermique a été simulé dans IDA ICE avec des données climatiques pour 2060 et évalué selon la norme SIA 180. En outre, les impacts environnementaux (GWP, UBP, énergie grise), la protection incendie, la structure porteuse, la hauteur sous plafond et les coûts ont été évalués. Plusieurs variantes de plafond ont été comparées, qui se distinguent par le type de panneau (plaque de plâtre ou plaque de terre crue), l'intégration du registre de chauffage

/refroidissement (tubes intégrés dans le panneau ou tôle de diffusion thermique) et le système de suspension (profilé résilient ou suspente directe).

Selon l'analyse multicritère réalisée, qui prend en compte non seulement les coûts d'investissement, souvent déterminants, mais aussi les impacts environnementaux, la mise en œuvre constructive et l'isolation acoustique, ce sont les solutions à base d'éléments climatiques en terre crue qui obtiennent les meilleurs résultats pour les deux pièces types, mais avec des coûts d'investissement plus élevés. Dans la variante la moins chère du plafond suspendu, composée d'une plaque de plâtre, d'une tôle de diffusion thermique et d'un profilé résilient, les coûts d'investissement s'élèvent à environ 340 CHF/m² de surface de plafond, ce qui correspond au coût d'un chauffage par le sol. Le chauffage par le plafond présente toutefois des avantages, notamment le maintien de la hauteur de sol existante.

Comme le point de rosée peut être franchi en mode refroidissement estival, les matériaux utilisés dans le plafond suspendu devraient présenter une capacité de sorption élevée vis-à-vis de l'humidité de l'air. De nombreux produits à base d'argile peuvent être utilisés à cet effet et présentent souvent d'autres avantages en matière d'impact environnemental, de recyclabilité et de réemploi.

Les résultats montrent que l'intégration de chauffages par le plafond permet d'exploiter des synergies et que des standards de confort modernes peuvent être atteints dans le respect des normes SIA 180 et 181. Une rénovation acoustique réussie nécessite une bonne compréhension des facteurs d'influence, à laquelle le présent rapport entend contribuer en fournissant une base de référence.

Summary

The CombiSound project investigates whether installing plastered suspended ceilings with heating and cooling functions can improve both sound insulation and thermal comfort in existing multi-family buildings. The ceilings are designed as a mass-spring-mass system, which enables a significant reduction in airborne and impact sound despite a low build-up height. This upgrade could potentially help make existing buildings more likely to be renovated rather than replaced by new buildings with a higher ecological footprint.

The installation was analyzed for two model rooms: at the Farbhof in Zurich (built 1955-57, reinforced concrete slab) and at the Maulbeerstrasse in Basel (built 1906, timber beam ceiling). Sound insulation was calculated according to SN EN ISO 12354 and compared with SIA 181. Thermal comfort was simulated in IDA ICE using climate data for 2060 and assessed according to SIA 180. In addition, environmental impacts (GWP, UBP, embodied energy), fire protection, structural system, room height and costs were evaluated. Several ceiling variants were compared, differing in the type of board (gypsum or clay board), the integration of the heating/cooling register (pipes integrated into the board or heat-conducting sheet) and the suspension (resilient channel or direct hanger).

According to the multi-criteria analysis carried out, which considers not only the often decisive investment costs but also environmental impacts, constructability and sound insulation, the solutions based on clay climate panels perform best for both model rooms, albeit at higher investment costs. For the most economical version of the suspended ceiling, with gypsum board, heat-conducting sheet and resilient channel, investment costs amount to around CHF 340/m² of ceiling area, which corresponds to the cost of underfloor heating. However, ceiling heating offers advantages, among other things because the existing floor height is retained.

Since the dew point may be undershot during summer cooling operation, the materials used in the suspended ceiling should have a high capacity for sorbing humidity. Many clay products can be used for this purpose, and they often also offer further advantages with regard to environmental impact, circularity and reusability.

The results show that integrating ceiling heating makes it possible to exploit synergies and that modern comfort standards can be achieved in compliance with SIA standards 180 and 181. A successful sound

insulation renovation requires a good understanding of the influencing factors, for which the report provides a basis.

Kernbotschaften

Schallschutz: Abgehängte, thermisch aktivierte Decken verbessern die direkte Luft- und Trittschalldämmung deutlich. Die Gesamtwirkung wird jedoch oft durch Flankenübertragung begrenzt. Die Luftschallanforderungen sind meist ohne zusätzliche Massnahmen erreichbar, beim Trittschall braucht es häufig ergänzende Massnahmen am Bodenaufbau oder an flankierenden Bauteilen.

Planung: Grundlage für eine erfolgreiche Verbesserung des Schallschutzes ist eine sorgfältige Bestandsanalyse, die Direkt- und Flankenübertragung unterscheidet. Die Schallübertragung sollte berechnet und nach Möglichkeit im Objekt gemessen werden.

Thermischer Komfort: Im Klima 2060 ist in Basel und Zürich eine Kühlung im Sommer nötig. Die Deckenregister gewährleisten den Komfort im Winter wie im Sommer, auch bei unsanierter Aussenhülle. Bei einer moderaten Zieltemperatur von maximal 26 °C ist eine Taupunktunterschreitung mit passendem Lüftungskonzept unwahrscheinlich.

Lehmbaustoffe: Sie senken das Feuchterisiko im Kühlbetrieb, bringen schalltechnische Vorteile (höheres Flächengewicht, geringere Aufbauhöhe) und sind ökologisch vorteilhaft. Da Lehmplatten zerstörungsfrei rückbaubar sind, ist eine Wiederverwendung möglich, was Abbruchabfälle, Umweltwirkungen aber auch Investitionskosten in Folgezyklen reduziert.

Kosten: Die Investitionskosten liegen je nach Deckenvariante bei rund 340 bis 690 Fr./m² sanierter Deckenfläche (inkl. Planung und MwSt.). Die günstigste Variante (Gipsfaserplatte mit Wärmeleitblech) ist mit einer Fussbodenheizung vergleichbar (ca. 330 Fr./m²), lässt sich aber wegen der Installation an der Decke bei Sanierungen einfacher umsetzen.

Danksagung

Wir danken den Teilnehmern der Begleitgruppe für die konstruktiven Rückmeldungen und den fachlichen Austausch während des Projekts. Die Begleitgruppe hat sehr wertvolle Hinweise eingebracht, mit denen die Aussagen des Berichts überprüft und geschärft wurden.

Teilnehmer der Begleitgruppe waren:

Michael Blunschi	Holz und Funktion AG
Stefan Fehlmann	Stadt Zürich, Amt für Hochbauten
Joe Gisler	Thermotec Systemtechnik AG
David Gregori	Kanton Basel-Stadt, Fachstelle umweltgerechtes Planen & Bauen
Georges Nievergelt	Energieplaner
Jan Peter	HSSP AG
Michael Tobler	Kanton Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
Peter Wenig	Stadt St. Gallen, Dienststelle Umwelt und Energie

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung ... **3**
Résumé ... **3**
Summary ... **4**
Kernbotschaften ... **5**
Danksagung ... **5**
Abkürzungsverzeichnis ... **8**
1 Einleitung ... **9**
1.1 Kontext und Motivation ... 9
1.2 Projektziele ... 10
2 Grundlagen ... **11**
2.1 Grundlagen des Schallschutzes ... 11
2.1.1. Luftschall- und Trittschallschutz ... 11
2.1.2. Bauschalldämmung, Direkt- und Flankenübertragung ... 11
2.1.3. Rechenmodel nach SN EN ISO 12354 ... 12
2.1.4. Wirkungsweise von Schallschutzmassnahmen ... 13
2.2 Grundlagen der thermischen Behaglichkeit ... 17
2.3 Geschossdeckentypen und Sanierungsschritte ... 19
2.4 Planungskriterien ... 20
2.4.1. Schallschutz ... 20
2.4.2. Thermische Behaglichkeit ... 21
2.4.3. Umweltwirkungen ... 23
2.4.4. Brandschutz ... 24
2.4.5. Baurechtliche Belange ... 25
2.4.6. Statische Anforderungen ... 26
2.4.7. Kosten ... 26
2.4.8. Weitere Anforderungen ... 26
3 Produktanalyse für Deckenheizsysteme ... **27**
4 Gebäudeauswahl und Modellzimmer ... **30**
4.1 Gebäudeauswahl ... 30
4.1.1. Maulbeerstrasse 44-46, Basel (Holzbalkendecke) ... 30
4.1.2. Farbhof Zürich (Stahlbetondecke) ... 32
4.2 Modellzimmer ... 34
4.2.1. Zimmer mit Holzbalkendecke (Maulbeerstrasse) ... 34
4.2.2. Zimmer mit Stahlbetondecke (Farbhof) ... 36
5 Sanierungsvarianten ... **38**
6 Ergebnisse ... **42**

6.1 Schallschutz ... 42
6.1.1. Vorgehen ... 42
6.1.2. Farbhof vor der Sanierung ... 43
6.1.3. Farbhof nach der Sanierung ... 46
6.1.4. Maulbeerstrasse vor der Sanierung ... 50
6.1.5. Maulbeerstrasse nach der Sanierung ... 53
6.1.5.1. Ersatz der Putzträgerkonstruktion durch eine abgehängte thermisch aktivierte Decke ... 53
6.1.5.2. Ersatz der Putzträgerkonstruktion durch eine abgehängte thermisch aktivierte Decke und Ertüchtigung des Fussbodens ... 55
6.1.6. Schlussfolgerung zum Schallschutz ... 58
6.2 Thermischer Komfort ... 59
6.2.1. Die Modellzimmer vor der Sanierung ... 59
6.2.2. Farbhof nach der Sanierung ... 63
6.2.3. Maulbeerstrasse nach der Sanierung ... 67
6.2.4. Zusätzliche Simulationsstudien ... 69
6.2.5. Schlussfolgerungen zum thermischen Komfort ... 72
6.3 Umweltwirkungen ... 74
6.4 Brandschutz ... 79
6.5 Tragwerk ... 79
6.6 Kostenschätzung ... 81
6.6.1. Investitionskosten ... 81
6.6.2. Jahreskosten ... 82
7 Synthese ... 84
8 Diskussion ... 86
9 Ausblick ... 90
10 Literaturverzeichnis ... 91
11 Anhang ... 94
11.1 Thermische Simulationen: Randbedingungen ... 94
11.2 Massenermittlungen ... 97
11.3 Planung Sanierungsmassnahme ... 98
11.4 Abgrenzung der Investitionskosten ... 102
11.5 Detaillierte Kosten der Sanierungsmassnahmen ... 103

Abkürzungsverzeichnis

BPG	Bauplanungsgesetz (Basel-Stadt)
EBF	Energiebezugsfläche
GWP	Global Warming Potential
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)
LSV	Lärmschutzverordnung
LW-WP	Luft-Wasser-Wärmepumpe
MFH	Mehrfamilienhaus
PBG	Planungsbaugesetz (Zürich)
PE_{NRT}	Primärenergie nicht erneuerbarer
PMV	Predicted Mean Vote (durchschnittliche Bewertung der thermischen Behaglichkeit)
THG	Treibhausgase
$\Delta T_{Kopf\text{-}Knöchel}$	Temperaturdifferenz zwischen Kopf (1.1 m) und Knöchel (0.1 m)
ΔTMR	Asymmetrie der Strahlungstemperatur Decke-Aussenwand

1 Einleitung

1.1 Kontext und Motivation

Ein wichtiger Grund, weshalb ältere Mehrfamilienhäuser (MFH) abgerissen und durch Neubauten ersetzt werden, kann mangelnder Schallschutz zwischen den Nutzungseinheiten in Gebäuden sein, welcher zur bekannten «Ringhörigkeit» führt [1]. Mit gestiegenen Komforterwartungen der Bevölkerung kann der Marktwert solcher Gebäude aufgrund des geringen Schallschutzes sinken. Umfassende Analysen zu den Treibern, die zur Entscheidung für den Ersatz von MFH führen, fehlen in der Literatur. Basierend auf Gesprächen mit WohnbauexpertInnen kann jedoch festgehalten werden, dass die gebäudeinterne Schallproblematik oft ein relevantes Argument für den Abriss ist – neben anderen Faktoren wie Ausnützungsziffer, Wohnungszuschnitt sowie veralteter Gebäudetechnik. Insbesondere tieffrequenter Trittschall – im Wesentlichen Poltern und Rumpeln, verursacht durch gehende Personen in der darüberliegenden Wohnung – wird als besonders störend empfunden [2]. Tieffrequenter Trittschall führt sehr häufig zu Beschwerden, Lärmklagen und vermehrten Mieterwechseln in sanierten Gebäuden, obwohl baurechtliche Schallschutzanforderungen, die den Tieftonbereich aber nicht berücksichtigen, eingehalten sind. Kann der Schallschutz durch geeignete Sanierungsmassnahmen signifikant verbessert werden, ist davon auszugehen, dass eher auf einen Abriss eines betroffenen Gebäudes verzichtet wird. Zudem kann der Marktwert der Wohnungen erhöht werden.

Da Schallschutz zwischen Wohnungen flächig ausgeführt werden muss, kann es vorteilhaft sein, die entsprechende Fläche (Fussboden, Decke) im gleichen Arbeitsschritt auch mit Heizkreisen zur Temperierung der Räume auszurüsten, und somit diesen Teil der Gebäudetechnik im gleichen Arbeitsschritt zu erneuern. Beide Massnahmen – Schallschutz und Flächenheizung – werden heute getrennt geplant und installiert. Werden beide Massnahmen in Produkten mit gewissem Vorfertigungsgrad kombiniert, können möglicherweise Planungs- und Baukosten gesenkt werden bei gleichzeitiger Optimierung der schalltechnischen und energetischen Wirkung.

Mit dem Projekt wird für Betondecken und für Holzbalkendecken untersucht, wie sich Verbesserungen beim Luft- und Trittschallschutz mit flächig ausgeführten Deckenheizungen mit Vorteil kombinieren lassen. Es werden dabei verputzte, abgehängte Decken untersucht. Dabei werden Deckensysteme mit unterschiedlichem Vorfertigungsgrad untersucht. Mit den Deckenheizflächen kann in Zukunft bei potenziell häufiger auftretenden Hitzeereignissen im Sommer auch Raumkühlung effizient vorgenommen werden.

Zimmerdecken sind im Gegensatz zu Fussbodenaufbauten keinen Verkehrslasten ausgesetzt, was eine deutlich höhere Flexibilität bei Materialwahl und Schichtaufbau erlaubt. Die Oberfläche einer Deckenheizung kann zudem aus stark feuchtregulierenden Materialien wie z.B. Lehm bestehen, was der Behaglichkeit und der Funktionalität nützt (reduziertes Risiko der Kondensatbildung bei Taupunktunterschreitung während Kühlung). Bei Bedarf können zudem die Fussbodenaufbauten erhalten bleiben und mögliche Anpassungen der Brüstungshöhen vermieden werden, was ein relevanter Kostenvorteil sein kann.

Deckenheizungen sind in Wohngebäuden nach einer gewissen Verbreitung in Neubauten der 1970/80er Jahren wieder weitgehend vom Schweizer Markt verschwunden, obwohl sie heute in Bürogebäuden häufig eingesetzt werden. Ein öfters kommunizierter Grund für den Marktrückgang im Wohnbau scheint zu sein, dass dazumal die Heizungsvorlauftemperaturen wegen schwach gedämmter Aussenhüllen (u.a. wegen hoher U-Werte der Fenster) hoch gewählt werden mussten, was sich wegen der merklichen Abstrahlung negativ auf den Wohnkomfort ausgewirkt hatte («heisser Kopf»). Grundsätzlich eignen sich Deckenheizungen aber sowohl zum Beheizen als auch zum Kühlen von Räumen, da sie über den Austausch langwelliger Strahlung (also Infrarotstrahlung) die Temperatur von Wänden, Boden und Möbel direkt beeinflussen und wegen reduzierter Konvektion beim Beheizen für ein angenehmes Wohnklima sorgen sollten. Die Effekte werden im Projekt mit verschiedenen Kriterien zum thermischen Komfort analysiert.

Im Projekt werden verschiedenen Sanierungsvarianten anhand Kriterien zum Schallschutz, thermischen Komfort und zu weiteren relevanten Planungszielen anhand zweier Modellzimmer in Referenzgebäuden in Basel und Zürich vor und nach der Sanierung bewertet. Bei der Untersuchung der Vor- und Nachteile von Heiz- und Kühldecken wird neben dem Heizfall auch der Kühlfall im Sommer untersucht.

Die Studie legt einen gewissen Schwerpunkt bei den Grundlagen und den Analysen auf den Schallschutz, da hier das Verständnis der physikalischen und baulichen Zusammenhänge für eine erfolgreiche Umsetzung von Massnahmen zentral ist.

1.2 Projektziele

Es werden kombinierte bauliche Massnahmen untersucht, mit denen bei der Sanierung bestehender Mehrfamilienhäuser der Komfort bezüglich Schallübertragung zwischen den Geschossen und bezüglich thermischer Behaglichkeit deutlich erhöht werden kann. Untersucht werden verschiedene Schallschutzsysteme und der Einbau flächiger Wärme-/Kälteabgabesysteme in der Geschossdecke. Die funktionellen Schichten können dabei kombiniert sein, so dass eine Vorfertigung und ein rascher und kostengünstiger Einbau möglich werden.

Mit dem Projekt sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- In welchen MFH-Gebäudetypen ist von einer Problematik durch Schallübertragung zwischen den Geschossen auszugehen? Welches sind die relevanten Schallübertragungswege? Wie sind die relevanten Bauteile und Bauteilflanken aufgebaut?
- Mit welchen Sanierungsmassnahmen werden die Schallschutzanforderungen der SIA 181:2020 sowie Empfehlungen für den tieffrequenten Trittschallschutz mit optimalem Kosten-Nutzen-Verhältnis und geringem ökologischen Fussabdruck erreicht und wie können dabei Heizkreise integriert werden?
- Können mit dem Einsatz einer Deckenheizung bestehende Wohngebäude «zukunftssicher und robust» gemacht werden, sodass die Räume bei Bedarf mit hoher energetischer Effizienz gekühlt werden können?
- Wie müssen die kombinierten Massnahmen gestaltet werden, um wirtschaftlich und ökologisch zu sein?

2 Grundlagen

2.1 Grundlagen des Schallschutzes

Im laufenden Projekt wird die Schallübertragung in ausgewählte Modellzimmer der repräsentativen Gebäude untersucht, sowie geeignete zusätzliche konstruktive Massnahmen an den verschiedenen Bauteilen zur Verbesserung des Schallschutzes und deren Zusammenspiel definiert.

Die Ausgangssituation wird hierbei jeweils in einem Rechenmodell abgebildet. Dieses umfasst den Grundaufbau mit den tragenden und nichttragenden Bauteilen (Geschossdecke, Innen- und Aussenwände) mit dem jeweiligen Schichtaufbau, der bei einer Sanierung erhalten bleibt. Rechnerisch wird anschliessend die notwendige akustische Leistungsfähigkeit der Massnahmen an den Geschossdecken (Fussbodenaufbauten, abgehängte Decken) und Wänden (Vorsatzschalen) vorbemessen. Anschliessend werden die dafür erforderlichen generischen Eigenschaften der zusätzlichen Schichten, wie die flächenbezogene Masse, Schichtdicke und Federsteifigkeiten, daraus abgeleitet und unter Berücksichtigung der vorgegebenen Randbedingungen, wie zum Beispiel die maximal mögliche Aufbauhöhe und das statisch zulässige Gewicht, deren Realisierbarkeit untersucht.

2.1.1. Luftschall- und Trittschallschutz

Das Projekt konzentriert sich auf die Luft- und Trittschalldämmung innerhalb eines Gebäudes.

Luftschall umfasst Geräusche wie Sprache, Musik und andere Aktivitäten, die durch die Luft übertragen werden. Die Schalldämmung wird mit den Grössen Schalldämm-Mass R (Bauteilkenngrösse) und Standard-Pegeldifferenz $D_{n,T}$ (Gebäudesituation) beschrieben. Numerisch **grössere** Werte kennzeichnen einen besseren Luftschallschutz.

Trittschall umfasst Geräusche, die durch mechanische Einwirkungen auf den Boden entstehen, wie gehende Personen oder fallende Gegenstände. Die Trittschalldämmung wird mit den Grössen Norm-Trittschallpegel L_n (Bauteilkenngrösse) und Standard-Trittschallpegel L_{nT} (Gebäudesituation) beschrieben. Numerisch **kleinere** Werte kennzeichnen einen besseren Trittschallschutz

Andere Schallschutzanforderungen, wie die Schalldämmung der Aussenbauteile und der Schallschutz bei gebäudetechnischen Anlagen, werden nicht behandelt. Dies liegt daran, dass die Schalldämmung der Aussenbauteile massgeblich durch die Fenster bestimmt wird und der Schallschutz bei gebäudetechnischen Anlagen durch das verwendete System und die Qualität der Montagesysteme beeinflusst wird.

2.1.2. Bauschalldämmung, Direkt- und Flankenübertragung

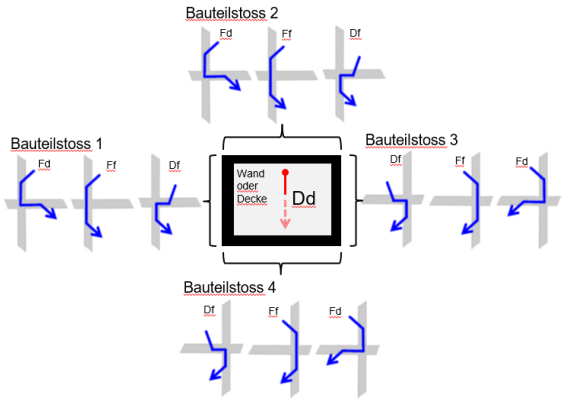
Die Bauschallübertragung zwischen angrenzenden Räumen erfolgt auf zwei Wegen:

1. Direkt durch das Trennbauteil.
2. Über Flankenwege durch Körperschallübertragung zwischen den Bauteilen.

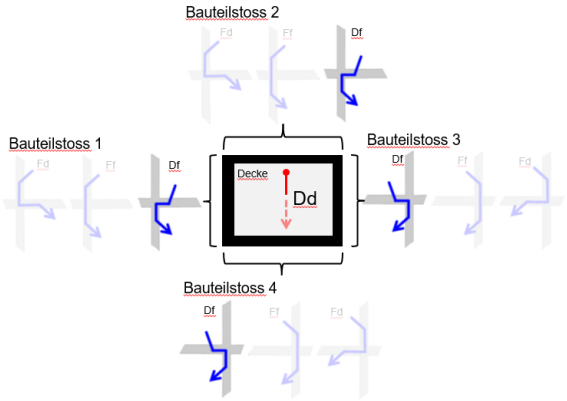
Die Flankenübertragung erfolgt durch die Körperschallübertragung zwischen den im Senderaum angeregten Bauteilen und den abstrahlenden Bauteilen im Empfangsraum über deren Bauteilverbindung (Stossstelle). Der Übertragungsweg mit der geringsten Schalldämmung begrenzt die maximal erreichbare Bauschalldämmung im Gebäude. Bei Luftschall gibt es je Flanke drei mögliche Nebenwege, bei rechteckigen Räumen also insgesamt zwölf. Bei Trittschalldämmung verringert sich die Anzahl auf die Nebenwege, bei denen die Böden angeregt werden (vier für Räume übereinander, zwei für Räume nebeneinander, siehe Abbildung)

Formelsymbole der Kenngrössen für die Bau-Schalldämmung sind mit Ausnahme des D_{nT} mit einem Hochkomma versehen, also R', L'_n und L'_{nT}.

Luftschall - Räume über bzw. nebeneinander:



Trittschall - Räume übereinander:



Trittschall - Räume nebeneinander:

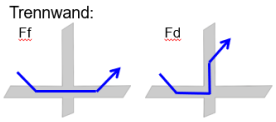


Abbildung 1: Bauschalldämmung zwischen zwei aneinandergrenzenden Räumen im Gebäude mit Darstellung der zu berücksichtigenden Übertragungswege (Direkt- und Flankenwege) und deren Bezeichnung. Links für Luftschallanregung und rechts für Trittschallanregung

2.1.3. Rechenmodel nach SN EN ISO 12354

Die Bauschalldämmung und die Beiträge der einzelnen Flankenwege werden in dem Projekt nach SN EN ISO 12354-1 (Luftschallschutz [3]) und -2 (Trittschallschutz [4]) aus den Eigenschaften:

1) der Bauteile (Luftschalldämm-Mass R und Norm-Trittschallpegel L_n für die direkte Übertragung),
2) der Verbesserung der Schalldämmung durch zusätzliche Lagen (Fussbodenaufbauten, abgehängte Decken und Wandvorsatzschalen), ΔL und ΔR, sowie
3) der Körperschalldämmung an der Verbindung der Bauteile, Stossstellendämm-Mass K_{ij}, berechnet.

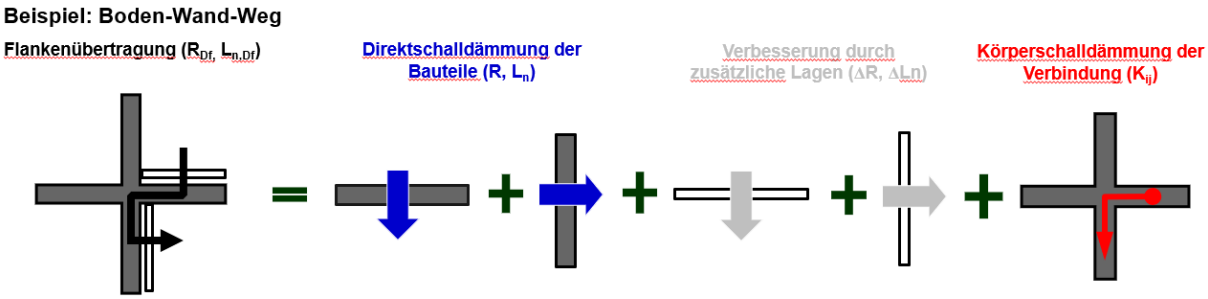


Abbildung 2: Rechenschema der EN ISO 12354-1 und –2 zur Ermittlung der Flankenübertragung am Beispiel des Boden(D)-Wand(f)-Übertragungswegs, sowie die benötigten Eingangsdaten der Bauteile und Flanke.

Die Berechnung erfolgt in dieser Studie frequenzabhängig in einem einfachen Rechenschema. Die Herausforderung bei der Anwendung besteht in der Ermittlung der geeigneten Eingangsdaten. Für die Grundbauteile und betrachteten Flanken, bei denen es sich in der Gebäudeauswahl um traditionelle Bauweisen handelt, gibt es dazu Angaben in den Normanhängen, Literatur [5] oder in Tabellenwerken [6]. Die Verbesserungswirkung zusätzlicher Massnahmen wird zunächst durch einfache analytische

oder empirische Ansätze ermittelt und dann mit Herstellerangaben abgeglichen, falls diese verfügbar sind.

2.1.4. Wirkungsweise von Schallschutzmassnahmen

Bei Neubauten werden Schallschutzmassnahmen in Form eines schwimmenden Estrichs bevorzugt, da sie am effektivsten sind, um die Trittschalleinleitung in die Baustruktur zu minimieren. Allerdings sind die erforderlichen Aufbauhöhen für die notwendige Entkopplung und die Estrichdicke zur Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit bei den üblichen Verkehrslasten bei Sanierung und Umbauten nur sehr selten vorhanden. Zudem bedingt ein zementbasierter, schwimmender Estrich im Vergleich zu nicht zementbasierten Materialien höhere CO_2-Emissionen und schränkt das Kreislaufpotenzial und zukünftige Wiederverwendung oder -verwertung der Deckenaufbauten nach aktuellem Stand der Forschung nahezu vollständig ein.

Daher wird in diesem Projekt untersucht, ob bei Umbauten alternativ mit einer Massnahme auf der Deckenoberseite bzw. dem Fussboden in Kombination mit einer abgehängten Decke eine ausreichende Direktschalldämmung erreicht wird. Da jedoch mit dieser Massnahme die Körperschalleinleitung in die Deckenkonstruktion durch Trittschallanregung nicht unterbunden wird, muss in einem weiteren Schritt überprüft werden, ob zusätzliche Massnahmen an den Wänden zur Reduzierung der Flankenübertragung notwendig sind.

In den folgenden Abschnitten wird die Wirkungsweise verschiedener Massnahmen zur Verbesserung des Schallschutzes und deren Anwendung auf die Realisierbarkeit und auf die erreichbare Wirkung kurz erläutert. In Abbildung 3 ist die jeweils erreichbare Verbesserung beispielhaft für unterschiedliche konstruktive Massnahmen an einer 16 cm Stahlbetondecke veranschaulicht.

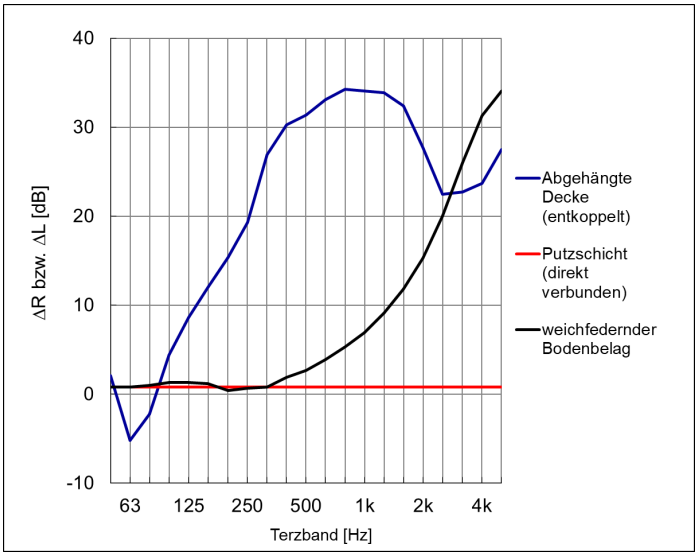


Abbildung 3: Beispiel der erreichbaren Verbesserung der Luft- und Trittschalldämmung durch eine direkt an der 16 cm Stahlbetondecke aufgebrachten 2 cm Putzschicht nach dem Massegesetz (rot), einer abgehängten Decke bestehend aus 15 mm Gipsfaserplatten auf 50 mm bedämpften Hohlraum mit entkoppelter Unterkonstruktion (blau) und Trittschallminderung durch einen weichfedernden Fussbodenbelag (z.B. Kautschuk oder Teppich) (schwarz). Je höher der dB-Wert, desto besser die Schallschutzwirkung für die jeweilige Frequenz des Terzbandes.

Massenerhöhung:

Bei einschaligen Bauteilen kann eine Verbesserung der Schalldämmung durch direkt aufgebrachte zusätzliche schwere Schichten erreicht werden. Die Wirkungsweise ist in Abbildung 4 dargestellt («Masse 1» als zusätzliche Bodenschicht). Durch die starre Verbindung der beiden Schichten (Abbildung 4, links) schwingen sie wie eine einzelne Schicht mit entsprechend grösserer Masse. Die beiden

Oberflächen, dargestellt mit der blauen und schwarzen Linie auf der rechten Seite in Abbildung 4, bewegen sich synchron mit der gleichen Auslenkung. Der Effekt ist breitbandig und verbessert die Schalldämmung im gesamten Frequenzbereich. Bei biegeweichen Bauteilen (z. B. Beplankungen) ist darauf zu achten, dass zusätzliche Masse die Biegesteifigkeit nicht signifikant erhöht, da sonst der Koinzidenzeinbruch in der Schalldämmung zu einer ungünstigen Frequenz verschoben oder verstärkt werden kann.

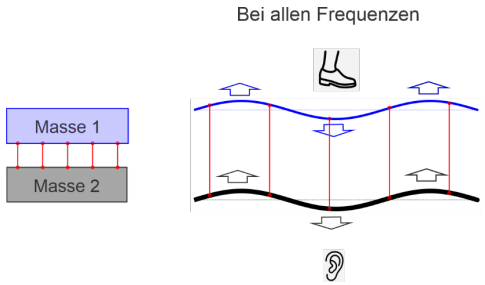


Abbildung 4: Wirkungsweise der Massenerhöhung beim Schallschutz, links: System mit 2 starr gekoppelten Massen, rechts: Schematische Darstellung der Schwingungen beider Oberflächen

Diese Massnahme ist jedoch nur bei leichten Bauteilen sinnvoll, da nach dem sogenannten Massengesetz je Verdopplung der Masse nur eine Verbesserung von 6 dB, also nicht einmal eine Halbierung der wahrgenommenen Lautstärke, erreicht wird.

In Abbildung 3 ist die durch die Massenerhöhung erreichbare schalltechnische Verbesserung beispielshaft für die Stahlbetondecke (2.300 kg/m³, m' ≈ 368 kg/m²) dargestellt. Die rote Linie ist die theoretische Verbesserung durch einen zusätzlichen 20 mm starken Glattstrich mit einer flächenbezogenen Masse von etwa 30 kg/m^2. Da die Masse des Grundelements hier um weniger als 10 % erhöht wird, fällt die Verbesserung sehr gering aus. Eine Erhöhung der Masse ist hier also nicht zielführend.

Biegeweiche entkoppelte Schale:

Als alternative konstruktive Massnahme kann eine zusätzliche biegeweiche Schale auf einer weich federnden Unterlage oder mit einem Hohlraum vor der Grundkonstruktion angebracht werden. Das ist zum Beispiel ein schwimmend verlegter Estrich, eine abgehängte Decke oder eine Wandvorsatzschale. In Abbildung 3 ist mit der blauen Linie beispielhaft die im Labor gemessene schalltechnische Verbesserung dargestellt, die durch eine leichte, abgehängte Decke angebracht unter einer 16 cm Stahlbetondecke (2.300 kg/m³, m' ≈ 368 kg/m²) erreicht wird. Die Unterdecke besteht aus einer 15 mm dicken Gipsfaserplatte (18 kg/m^2), die auf einer entkoppelten Unterkonstruktion befestigt ist. Der 60 mm tiefe Hohlraum zwischen den Schalen ist mit einem porösen Absorber (Glaswolle) gedämmt.

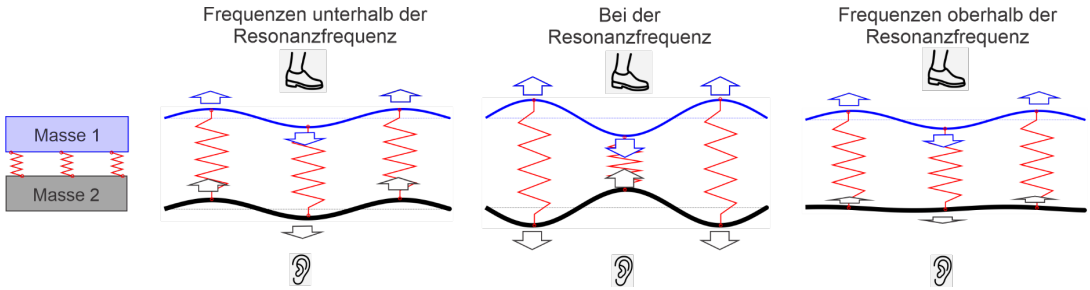


Abbildung 5: Wirkungsweise einer biegeweichen entkoppelten Schale beim Schallschutz, links: System mit Masse 1 und Masse 2, die mit einer Feder (Trittschalldämmschicht oder Hohlraum) verbunden sind, rechts: Schematische Darstellung der Schwingungen beider Oberflächen bei verschiedenen Erregerfrequenzen.

In diesem Fall verhält sich die Konstruktion als Masse-Feder-Masse-System, wobei die Schalen die Massen darstellen, während die Zwischenschicht, also z.B. auch die Luft des Hohlraums, als Feder wirkt. In Abbildung 5 ist links das System vereinfacht dargestellt und in den drei rechten Bildern mit der blauen und schwarzen Linie die Bewegung der beiden Oberflächen in verschiedene Frequenzbereiche illustriert.

Unterhalb der Resonanzfrequenz, im Beispiel mit der abgehängten Decke in Abbildung 3 unterhalb von 63 Hz, sind beide Schichten gekoppelt, was nur zu einer geringen Verbesserung durch die zusätzliche Masse führt. Die beiden Oberflächen dargestellt in Abbildung 5 mit der blauen und schwarzen Linie bewegen sich synchron mit der gleichen Auslenkung, wie bei der starr verbundenen Masse.

Bei der Resonanzfrequenz geraten die beiden Massen in Resonanz, das heisst die beiden Oberflächen in dem 2ten Bild von rechts in Abbildung 5 bewegen sich entgegengesetzt mit hohen Amplituden. Dadurch verringert die zusätzliche Schicht sogar die Schalldämmung des bestehenden Bauteils. In Abbildung 3 mit der Verbesserung ist dies bei der abgehängten Decke (blaue Linie) bei ca. 63 Hz der Fall. Die Werte werden negativ, das heisst die Schalldämmung verschlechtert sich.

Oberhalb der Resonanzfrequenz sind die beiden Massen (Schalen) entkoppelt. Die beiden Oberflächen, dargestellt mit der blauen und schwarzen Linie in Abbildung 5 ganz rechts, bewegen sich unabhängig voneinander und die Auslenkung der Oberfläche auf der Empfangsseite ist viel geringer als auf der angeregten Seite. Dadurch verbessert sich die Schalldämmung signifikant. In Abbildung 3 steigt die Verbesserung der abgehängten Decke oberhalb der Resonanz bei 63 Hz stark an und erreichen Werte von bis über 30 dB.

Damit die Schalldämmung durch die Resonanz in dem baurechtlich relevanten Frequenzbereich ab 100 Hz nicht negativ beeinflusst wird, muss wegen der Breite des Resonanzeinbruchs die Resonanzfrequenz der Massnahme auf mindestens ≤ 80 Hz abgestimmt sein. Für eine Tieftonoptimierung zur Verbesserung des tieffrequenten Dröhnens, das beim Trittschall oft als besonders störend empfunden wird, sollte sie ≤ 50 Hz sein.

Die Resonanzfrequenz kann durch eine Erhöhung der Masse der aufgebrachten Schale oder eine Verringerung der Steifigkeit der weichfedernden Unterlage bzw. des Hohlraums zu tiefen Frequenzen verschoben werden. Die Masse der Schale setzt sich aus dem Eigengewicht der Schale sowie aller Bauteile, die starr mit ihr verbunden sind und mitschwingen, zusammen. Im Falle eines Heizsystems sind das zum Beispiel auch eingebettete Rohrleitungen und deren Füllung. Die Schale muss geschlossen sein, das heisst Fugen oder Öffnungen zwischen den einzelnen Plattenelementen der Vorsatzschale müssen entsprechend abgedichtet werden, der Randanschluss an die Wände muss dauerelastisch abgedichtet werden.

Die Federsteifigkeit ist bei schwimmenden Fussbodenaufbauten durch die dynamische Steifigkeit der verwendeten Trittschalldämmschicht vorgegeben. Bei abgehängten Decken und Wandvorsatzschalen mit gut entkoppelten Abhängern wird die Federsteifigkeit durch den Abstand der Schale zur Grundkonstruktion bestimmt. Es gilt in diesem Fall, je grösser der Abstand, umso geringer ist die Resonanzfrequenz. Der Hohlraum zwischen den Schalen sollte zu mindestens 2/3 mit schallabsorbierendem Dämmstoff ausgefüllt sein. Er kann auch als Installationsebene für die Zuleitungen des Heizsystems oder andere Leitungen dienen. Diese Leitungen dürfen jedoch keine starre Flanke (Schallbrücke) zwischen der Schale und der Grundkonstruktion bilden. Sie müssen daher sorgfältig geplant und ausgeführt werden.

In Abbildung 6 und Abbildung 7 ist die berechnete Resonanzfrequenz f_0 als Funktion der flächenbezogenen Masse der Schale m' und der dynamischen Steifigkeit s'_{dyn} von üblicher Trittschalldämmung bei schwimmenden Fussbodenaufbauten bzw. der Hohlraumtiefe $d_{Hohlraum}$ von abgehängten Decken auf einer Stahlbetondecke dargestellt. Die flächenbezogene Masse ist in beiden Abbildungen gleich und liegt in einem für Plattenmaterialen üblichen Bereich von 5 kg/m^2 bis 50 kg/m^2. Geeignete Kombinationen von Materialeigenschaften ergeben Resonanzfrequenzen unterhalb der zusätzlich eingezeichneten Ebene mit dem 80 Hz-Grenzwert und sind gelb bzw. grün gekennzeichnet. Bei den grünen Werten liegt

die Resonanzfrequenz unterhalb von 50 Hz, das heisst auch tieffrequenter Trittschall wird gut abgeschwächt.

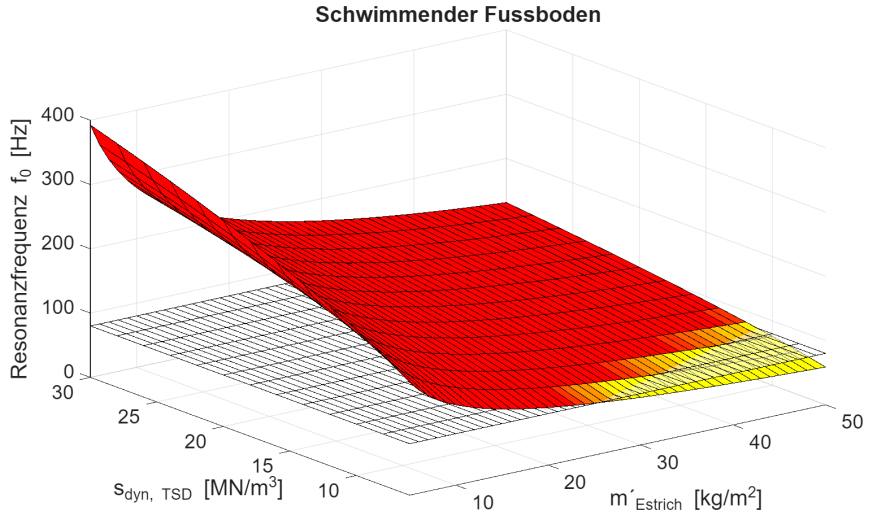


Abbildung 6: Berechnete Feder-Masse-Resonanzfrequenz f_0 eines schwimmenden Fussbodenaufbaus als Funktion der flächenbezogenen Masse $m'_{Estrich}$ des Belags und der dynamischen Steifigkeit $s'_{dyn,TSD}$ von üblichen Trittschalldämmungen. Die Gitterebene und gelb eingefärbte Werte zeigen das Planungsziel $f_0 \leq 80$ Hz an.

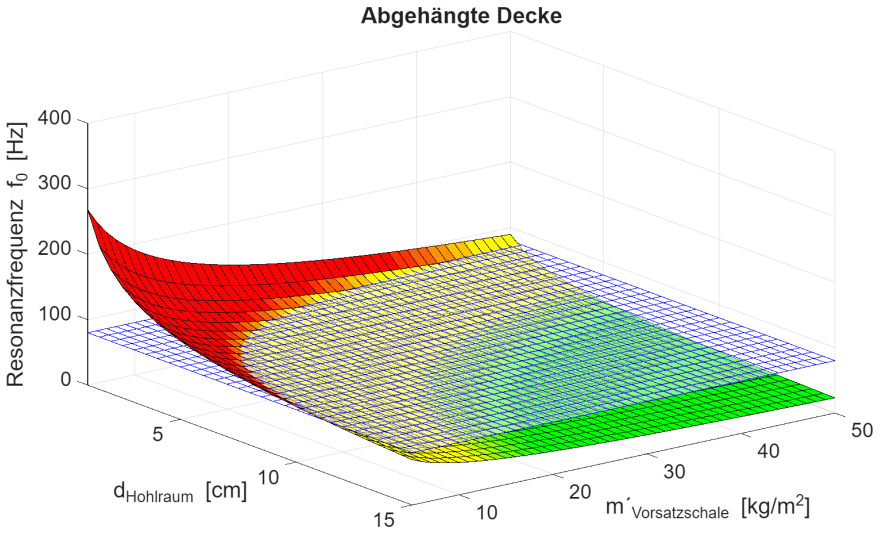


Abbildung 7: Berechnete Feder-Masse-Resonanzfrequenz f_0 einer abgehängten Decke als Funktion der flächenbezogenen Masse $m'_{Vorsatzschale}$ der Deckenschale und der Tiefe $d_{Hohlraum}$ des bedämpften Hohlraums. Die Gitterebene und gelb eingefärbte Werte zeigen das Planungsziel $f_0 \leq 80$ Hz an. Die grünen Werte sind tiefton-optimierte Kombinationen mit einer Resonanzfrequenz $f_0 \leq 50$ Hz.

Bei Fussbodenaufbauten in Abbildung 6 lässt sich die Grenzfrequenz ≤80Hz nur mit sehr weichen Trittschalldämmmaterialien erreichen. Diese Dämmungen sind aber für dünne Estrichplatten nicht gebrauchstauglich. Bei den abgehängten Decken in Abbildung 7 wird der Zielwert bei einer ausreichend schweren Bekleidung schon mit moderaten Schalenabständen von wenigen Zentimetern erreicht. Bei den steiferen für Trockenestriche geeigneten Trittschalldämmmaterialien liegt die Resonanzfrequenz deutlich höher. Der Resonanzeinbruch wird bei den Fussbodenaufbauten durch eine starke Dämpfung des Trittschalldämmmaterials (in der Regel Holz- oder Mineralwolle) ausgeglichen. Die erreichte Verbesserung ist aber deutlich geringer als bei abgehängten Decken.

Abbildung 6 und Abbildung 7 gelten nur für Grundkonstruktionen, die eine sehr viel grössere Masse als die Vorsatzschale haben, wie zum Beispiel Stahlbetondecken mit einer Dicke ≥ 140 mm.

Für leichtere Grundbauteile, wie der Holzbalkendecke, liegt die Resonanzfrequenz höher und lässt sich wie folgt berechnen:

Weichfedernde Bodenbeläge:

Weichfedernde Bodenbeläge, wie zum Beispiel aus Teppich, Kork und Kautschuk, sind effektiv zur Trittschallminderung, da sie die Krafteinleitung reduzieren. Sie sind aber vor allem bei hohen Frequenzen oberhalb der sogenannten Kontaktresonanz wirksam, wo durch die lokale elastische Deformation des Bodenbelags der Aufprall des Gehers abgedämpft wird (siehe Abbildung 8). Durch diese Wirkungsweise sind sie nur zur Trittschallminderung wirksam, auf die Luftschalldämmung haben sie nur geringen Einfluss.

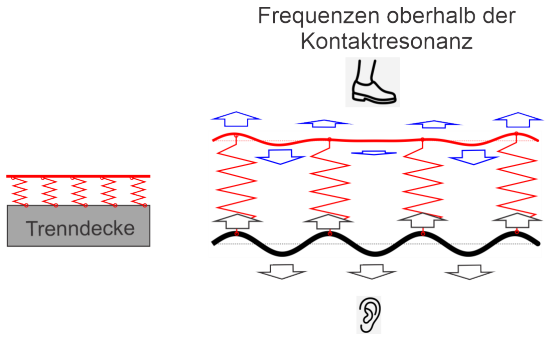


Abbildung 8: Wirkungsweise eines weichfedernden Bodenbelags beim Schallschutz, links: System mit weichfedernder Schicht (rot) auf Trenndecke (grau), rechts: Schematische Darstellung der Schwingungen beider Oberflächen mit lokaler Deformation des weichfedernden Bodenbelags bei Anregung oberhalb der Kontaktresonanz.

Beim Schallschutznachweis von Neubauten werden sie in der Regel nicht angerechnet, da sie austauschbar sind und unter Umständen gegen harte Beläge ersetzt werden können.

2.2 Grundlagen der thermischen Behaglichkeit

Thermische Behaglichkeit ist in einem Raum dann gegeben, wenn eine sich darin aufhaltende Person einen ausgeglichenen Wärmehaushalt hat und den Raum entsprechend thermisch als angenehm empfindet. Zu berücksichtigen ist, dass die Person dabei einer für den Raum typischen Betätigung nachgeht und entsprechend gekleidet ist. Die thermische Behaglichkeit wird von verschiedenen physikalischen Grössen beeinflusst, die auf den Raum einwirken (Abbildung 9).

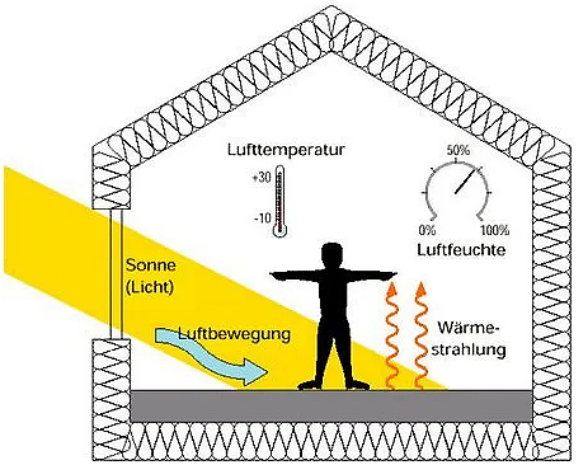


Abbildung 9: Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit [7].

Zur quantitativen Bewertung der thermischen Behaglichkeit können verschiedene Berechnungsverfahren eingesetzt werden, wie sie u.a. in der Norm SIA 180 (2014) «Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden» [8] beschrieben sind:

- Mit der «erwarteten durchschnittlichen Bewertung der thermischen Behaglichkeit» (englisch: Predicted Mean Vote, PMV) kann ein Raum mittels einer Skala von -3 bis +3 bewertet werden, wobei 0 für eine gute Behaglichkeit steht, positive Werte für zu hohe Temperaturen und negativ für zu geringe. In die Berechnung des PMV gehen zahlreiche physikalische Zustandsgrössen sowie auch Grössen zur Bekleidung einer Person ein. Die berechneten PMV-Werte beruhen zudem auf Umfrageergebnissen zu Empfindungen von Testpersonen, welche bei der Entwicklung der Methode befragt wurden. Der PMV-Wert eines Raums lässt eine stark aggregierte und umfassende Bewertung der thermischen Behaglichkeit eines Raumes zu.
- Die empfundene (oder operative) Temperatur ist eine weitere Kenngrösse, welche zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit verwendet wird. Für kleine Räume mit geringer Luftzirkulation entspricht sie dem arithmetischen Mittel aus Lufttemperatur und mittlerer Strahlungstemperatur im Raum. Die SIA 180 (2014) gibt Bereiche für die empfundene Temperatur vor, innerhalb derer man von thermischer Behaglichkeit ausgehen kann (siehe Kapitel 2.4.2).

Zur Bewertung des Einflusses der zu untersuchenden Heiz- und Kühlflächen auf die thermische Behaglichkeit werden Simulationen eines Modellzimmers mit dem Gebäudesimulationsprogramm IDA ICE durchgeführt. Der Fokus der Untersuchung der thermischen Behaglichkeit wird auf kritische Tage im Winter und im Sommer gelegt, wobei Jahressimulationen durchgeführt werden. Im Winter wird davon ausgegangen, dass an den kältesten Tagen aufgrund von Bewölkung keine passiven solaren Gewinne im Gebäude entstehen. Im Sommer wird mit angenommener Südausrichtung des Modellzimmers von hohen passiven solaren Gewinnen im Gebäude ausgegangen, wobei für die Fenster des Gebäudes bei hoher solarer Einstrahlung eine Verschattung modelliert wird (Nutzung von Sonnenstoren). Es werden prognostizierte Wetterdaten für das Jahr 2060 verwendet (SIA 2060 RCP85 DRY). Die Modellierung der Gebäude mit Modellzimmern wird an SIA 380-2 (Energetische Berechnungen von Gebäuden – Dynamisches Verfahren für Bedarfsabklärungen, Leistungs- und Energiebedarf, [9]) angelehnt. Fragen zur Raum- und Oberflächenfeuchte und ihre Beeinflussung durch die eingesetzten Materialien werden qualitativ behandelt.

2.3 Geschossdeckentypen und Sanierungsschritte

Die Studie fokussiert auf Geschossdecken, welche typisch sind für Schweizer Wohngebäude älterer Bauperioden, bei denen der Schallschutz üblicherweise gering ist: die Holzbalken- und die Stahlbetondecke (Abbildung 10).

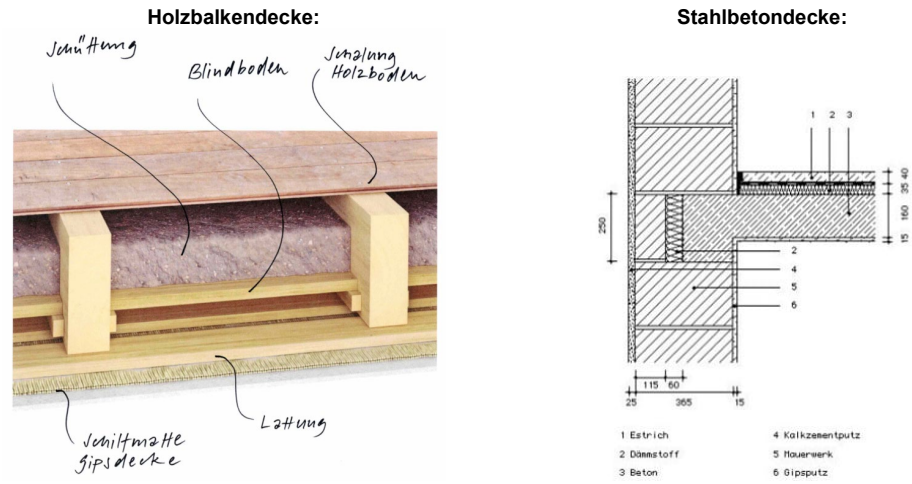


Abbildung 10: Holzbalken- und Stahlbetondecke als typische Geschossdecken in älteren Bestandsbauten, für die geeignete Massnahmen zur Erhöhung von Schallschutz und thermischer Behaglichkeit vorgeschlagen werden (Quellen: Architektur H. Baumann, www.baunetzwissen.de).

Die Untersuchung von Schallschutz und thermischer Behaglichkeit wird für beide Deckenkonstruktionen mit je einem exemplarischem Modellzimmer rechnerisch durchgeführt. Dabei wird angenommen, dass die Modellzimmer in einem mittleren Geschoss eines Mehrfamiliengebäudes gelegen sind und die umliegenden Geschosse somit über einen gleichen Aufbau verfügen (Abbildung 11).

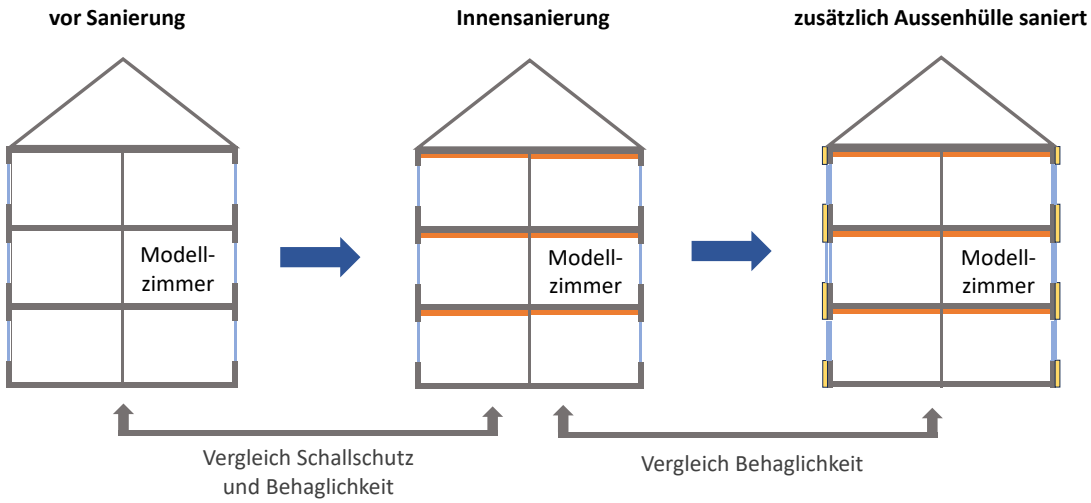


Abbildung 11: Gebäudezustände, für die der Schallschutz und die thermische Behaglichkeit verglichen werden. Sanierungsmassnahmen an den Geschossdecken in Orange.

Für die Untersuchung des Schallschutzes werden nur Schallemissionen aus den benachbarten Geschossen betrachtet und nicht der Schallschutz innerhalb der Nutzungseinheit.

Bei der Untersuchung der thermischen Behaglichkeit werden adiabate Bedingungen für die Innenwände im gleichen Stockwerk angenommen und somit Wärmeleitung zwischen benachbarten Zimmern ausgeschlossen. Allerdings wird die Wärmeleitung durch die Geschossdecken berücksichtigt. Das Modellzimmer ist südausgerichtet, damit der sommerliche Wärmeschutz für ein thermisch stark betroffenes Zimmer abgebildet werden kann. Für die Untersuchung des thermischen Komforts werden die drei in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Fälle untersucht.

Tabelle 1: Sanierungsschritte und Heizungsarten, die untersucht werden.

Gebäude	Radiator	Deckenheizung
Unsaniert	✓	
Innen saniert		✓
Innen und aussen saniert (thermisch)		✓

Die Wirkungen der Sanierungsmassnahmen werden mit dem Zustand vor der Sanierung verglichen. Die thermische Behaglichkeit wird zudem für die Varianten ohne und mit zusätzlicher Sanierung der Aussenhülle betrachtet, um Auswirkungen auf die Behaglichkeit (Kaltluftabfall an Aussenwand/Fenster, höhere Oberflächentemperatur der Heizfläche) und auf die Heizungsvorlauftemperatur mit möglicher Konsequenz für die Energieeffizienz der Wärmeerzeugung zu überprüfen. Für die thermischen Berechnungen werden Klimadatensätze für das Jahr 2060 verwendet (SIA 2060 RCP85 DRY, siehe Anhang 12.1). Mit Verwendung der Klimadaten 2060 kann aufgezeigt werden, ob die untersuchten Bestandsbauten in Zukunft Klimakälte benötigen und ob die vorgeschlagenen Sanierungsmassnahmen eine ausreichende Wirkung hinsichtlich Klimatisierung zeigen werden.

2.4 Planungskriterien

2.4.1. Schallschutz

Schallschutzanforderungen innerhalb eines Gebäudes sind rechtlich verbindlich in der Lärmschutz-Verordnung (LSV) vom 15. Dezember 1986 (Stand am 1. Januar 2025) festgelegt. Gemäss Art. 32 müssen Trennbauteile, welche einen lärmempfindlichen Raum gegen einen anderen Nutzungsbereich im Gebäude abgrenzt, den anerkannten Regeln der Baukunde, das heisst der Norm SIA 181 des Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Vereins entsprechen. Diese Anforderungen gelten für Neubauten als auch für Trennbauteile, die umgebaut, ersetzt oder neu gebaut werden. Bei Erneuerungen und Sanierungen kann die Vollzugsbehörde auf Gesuch hin Erleichterungen gewähren, wenn die Einhaltung der Anforderungen unverhältnismässige Massnahmen erfordert.

Auch wenn es möglich ist für den jeweiligen Einzelfall eine Ausnahmegenehmigung zu beantragen, werden in dem Forschungsprojekt konstruktive Lösungen aufgezeigt, welche die Mindestanforderungen für Umbauten nach SIA 181 für die Modelzimmer zuverlässig erfüllen und auch die übrigen Planungskriterien berücksichtigen. Dies bietet zusätzliche Planungssicherheit, reduziert somit das Risiko von potenziellen Planungsverzögerungen und zusätzlichem administrativen Aufwand. Die entwickelten Lösungen sind auf ein breites Anwendungsspektrum übertragbar, was ihre praktische Relevanz und umfangreiche Anwendbarkeit erhöht. Da der Schallschutz jedoch von der Raumgeometrie und der Gebäudestruktur abhängt, muss die Anwendbarkeit im jeweiligen Einzelfall geprüft werden.

Die SIA 181:2020 legt Werte für den Schallschutz fest, welche im fertiggestellten Gebäude bei Messungen mit den in der Norm festgelegten Messmethoden mindestens erreicht werden müssen [10]. Die Anforderungen gelten nur zwischen Räumen in unterschiedlichen Nutzungsbereichen, das heisst zum Beispiel zwischen zwei unterschiedlichen Wohnungen oder von allgemeinen Bereichen des Gebäudes in eine Wohnung. Die SIA 181 gibt verschiedene Anforderungsniveaus vor. Die Mindestanforderungen gelten für Mietwohnungen und die um 4 dB strengeren erhöhten Anforderungen bei Reihen- oder

Doppelhäusern, sowie Stockwerkseigentum. Bei Umbauten gelten beim Trittschallschutz um 2 dB geringere Anforderungen gegenüber Neubauten. Diese Anforderung hängt jedoch wiederum von der Eingriffstiefe ab. Wird zum Beispiel ein Gebäude entkernt und die Trenndecke komplett ersetzt, gelten die Anforderungen für den Neubau [11].

Die Anforderungswerte D_i für den Luftschallschutz gegenüber Lärmquellen im Gebäude und L' für den Trittschallschutz sind wiederum abhängig von der Lärmempfindlichkeit des Empfangsraums und der Lärmbelastung im Senderaum. Zum Beispiel wird für Schlaf- und Wohnzimmer eine höhere (mittlere) Lärmempfindlichkeit als für Küchen, Bäder, WCs und Korridore (geringe Lärmempfindlichkeit) angenommen. Sendeseitig wird hingegen in allen Räumen der Wohnung von einer mässigen Lärmbelastung ausgegangen.

Dadurch ergeben sich für Schlaf- und Wohnzimmer (Lärmempfindlichkeit: mittel) in Mietwohnungen (Mindestanforderungen) für Störungen aus einer anderen Wohnung (Lärmbelastung: mässig) die folgenden Anforderungswerte:

	Luftschall D_i	Trittschall L'
Neubau	52 dB	53 dB
Umbau	52 dB	55 dB

Die Anforderungen gelten als eingehalten, wenn im fertiggestellten Gebäude folgende Bedingungen erfüllt sind:

Luftschallschutz: $D_{nT,w} + C \geq D_i$ und $R'_w + C \geq D_i - 5dB$

Trittschallschutz: $L'_{nT,w} + C_I \leq L'$ und $L'_{nT,w} \leq L'$

Die Werte $D_{nT,w}$, R'_w und C sind Einzahlangaben, welche gemäss EN ISO 717-1 [12] aus den frequenzabhängigen Ergebnissen der Luftschallmessung nach EN ISO 16283-1 [13] und die Werte $L'_{nT,w}$ und C_I sind Einzahlangaben, welche gemäss EN ISO 717-2 [14] aus den frequenzabhängigen Ergebnissen der Trittschallmessung nach EN ISO 16283-2 [15] ermittelt werden. Hierbei wird der Frequenzbereich mit den Terzbändern von 100 Hz bis 3150 Hz berücksichtigt. Das beim Trittschall als generell sehr störend wahrgenommen tieffrequente "Poltern" wird nicht erfasst.

Bei der Projektierung sieht die SIA 181 vor, dass die mittels Berechnung ermittelten Schallschutzwerte zur Berücksichtigung der Planungsunsicherheiten mit einem Projektierungszuschlag K_P in der Regel von 2 dB oder teils höheren Werten beaufschlagt werden.

2.4.2. Thermische Behaglichkeit

Die SIA-Norm 180 (2014) [8] «Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden» beschreibt die Anforderungen zur thermischen Behaglichkeit (Kapitel 2.2), die für neuerstellte oder sanierte Wohn- und Bürobauten in der Schweiz eingehalten werden müssen.

In der Norm werden die zulässigen Bereiche der empfundenen (oder operativen) Temperatur in einem Raum in Abhängigkeit der Aussentemperatur (Mittelwert über 48 Stunden) angegeben. Dabei wird unterschieden zwischen Perioden, in denen nicht geheizt oder gekühlt wird, und Perioden im Winter bzw. Sommer, in denen dies notwendig sein kann (Abbildung 12).

In der vorliegenden Studie werden zur Bewertung der Simulationsergebnisse zum thermischen Komfort im Sommer beide oberen Begrenzungen in Abbildung 6 verwendet. Im (aktiven) Kühlfall werden 26 °C Zieltemperatur angestrebt. In Kapitel 7.2.5 wird im Sinne einer Sensitivitätsbetrachtung die Auswirkung gezeigt, wenn auf 23 °C Solltemperatur gekühlt wird.

Die untere Begrenzung (Heizfall im Winter) wird angepasst: Gemäss Einschätzung der Autorenschaft und der Begleitgruppe ist in der SIA 180 die untere Grenze des Komfortbereichs mit einer operativen Raumtemperatur von 20.5 °C für mittlere Aussentemperaturen unter 19 °C zu niedrig gefasst. Erfahrungsgemäss wird von vielen Bewohnern erwartet, dass im Winter die Raumtemperaturen eher

zwischen 21 und 24 °C liegen (Lufttemperatur), darunter ist mit Reklamationen zu rechnen. Um den in Realität oft höher eingestellten Solltemperaturen in Wohnungen Rechnung zu tragen, wird in der vorliegenden Studie als Zielwert für die Heizsaison deshalb 21 °C verwendet, also ein leicht erhöhter Zielwert im Vergleich zur SIA 180. Der Zielwert für die Raumtemperatur im Sommer ist 26 °C. Mit den zu untersuchenden Heizflächen könnten bei Bedarf aber auch strengere Zielwerte umgesetzt werden (für Kühlen auf 23 °C siehe Kapitel 6.2.4).

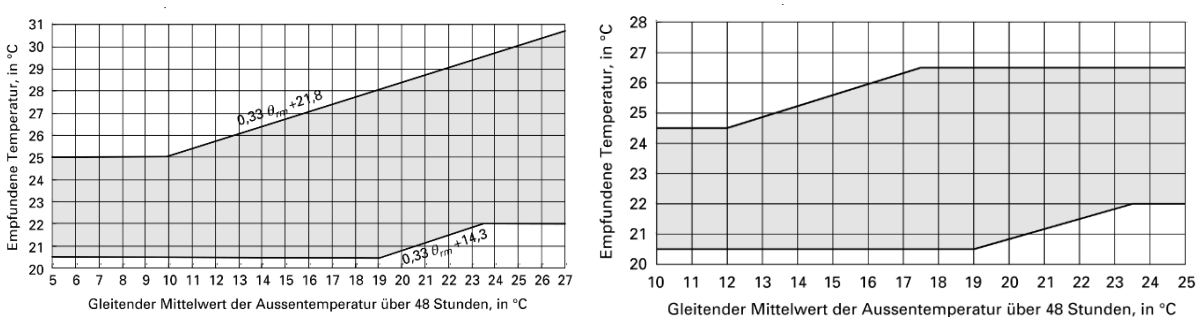


Abbildung 12: Zulässiger Bereich (grau schraffiert) der empfundenen Temperatur in Räumen, wenn diese nicht klimatisiert, d.h. beheizt, gekühlt, mechanisch belüftet werden (links) oder wenn dies vorgenommen wird (rechts) (Quelle: Norm SIA 180, Figuren 3 und 4, Copyright © 2014 SIA Zürich).

Weitere Kriterien, die von der SIA 180 übernommen werden, sind:

- PMV (siehe Kapitel 2.2): das Modellzimmer soll eine PMV zwischen -0.5 und +0.5 erreichen. Anders als der Grenzwert von 26.5 °C in Abbildung 12 b) erwartet die PMV-Methodik, dass im Sommer 26 °C nicht überschritten werden.
- Der relative Anteil zusätzlich Unzufriedener wegen einer zu grossen Temperaturdifferenz (> 3,3 K) zwischen Kopf (1,1 m) und Knöcheln (0,1 m) soll unter 5 % liegen.
- Der relative Anteil zusätzlich Unzufriedener wegen einer Asymmetrie der Strahlungstemperatur soll unter 5 % liegen.

Für die beiden letzteren Kriterien werden die kurven aus der SIA 180 verwenden, siehe nachstehende Abbildungen.

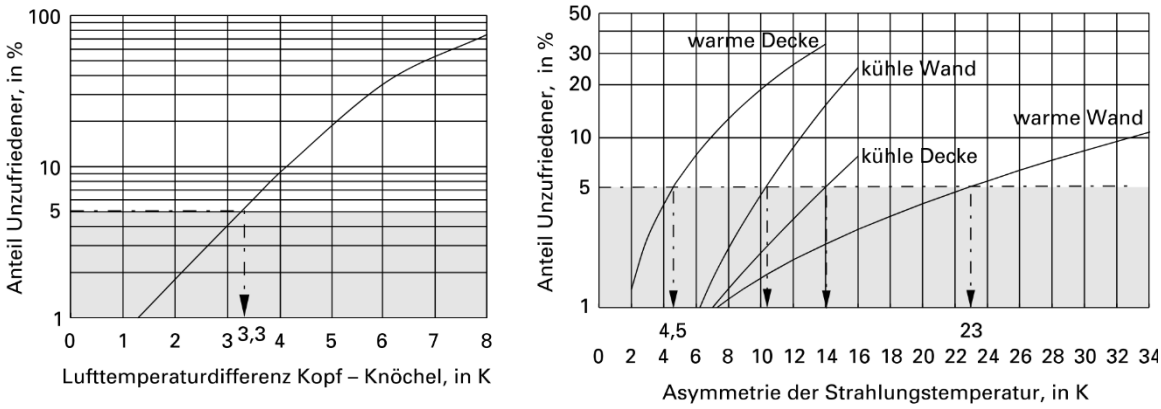


Abbildung 13: Planungskriterien zur Differenz der Lufttemperatur Kopf-Knöchel (links) und zur Asymmetrie der Strahlungstemperatur im Raum (rechts), zulässiger Bereich grau schraffiert (Quelle: Norm SIA 180, Figuren 9 und 11, Copyright © 2014 SIA Zürich).

2.4.3. Umweltwirkungen

Der Bausektor gehört zu den ressourcenintensivsten Wirtschaftsbereichen in der Schweiz und ist für eine Reihe von Umweltauswirkungen verantwortlich. Zu den relevantesten gehören die globalen Treibhausgasemissionen (ca. 40 %), aber auch die Abfallproduktion (ca. 82 %). Mit der Wahl der Konstruktion aber vor allem der Baustoffe haben Planende einen entscheidenden Einfluss auf eben diese Umweltwirkungen. Um mit den im Projekt entwickelten Lösungen die Klimaziele Schweiz 2030 (Halbierung der CO_2-Emissionen) respektive 2050 (Netto-Null-Treibhausgasemissionen) einzuhalten, wird im Projekt ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, der neben den technischen Anforderungen auch Nachhaltigkeitskriterien beinhaltet.

Lebenszyklusanalyse

Mithilfe der Methodik der Ökobilanzierung sollen die relevantesten Umweltwirkungen der im Projekt entwickelten Lösungen während der Konzeptionsphase bewertet, verglichen und bei Bedarf die Ansätze überarbeitet werden. Dieser Prozess wird iterativ gestaltet, damit gewährleistet werden kann, das im Projekt klimafreundliche Lösungen erarbeitet werden. Die Berechnung erfolgt über die KBOB-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich [16] und wird für die Herstellungs- und Entsorgungsphasen erstellt. Die Berechnung bezieht sich auf die baulich konstruktiven Massnahmen und beinhaltet keine technischen Komponenten jenseits der Heiz-/Kühlflächen samt Verteilleitungen, da diese als Daten nicht in der KBOB enthalten sind. Als Wirkungsindikatoren wurden das globale Erwärmungspotenzial, die nicht erneuerbare Primärenergie sowie die Umweltbelastungspunkte ausgewählt.

Graue Treibhausgasemissionen
Graue Treibhausgasemissionen sind die kumulierte Menge der Treibhausgase (CO_2, Methan, Stickoxid und weitere klimawirksame Gase), die bei allen vorgelagerten Prozessen, vom Rohstoffabbau über Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse und bei der Entsorgung, inkl. der dazu notwendigen Transporte und Hilfsmittel, emittiert wird. [17]

Graue Energie
Graue Energie umfasst die gesamte Menge nicht erneuerbarer Primärenergie, die für alle vorgelagerten Prozesse, vom Rohstoffabbau über Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse und für die Entsorgung, inklusive der dazu notwendigen Transporte und Hilfsmittel, erforderlich ist. Sie wird auch als kumulierter, nicht erneuerbarer Energieaufwand bezeichnet. [17]

Umweltbelastungspunkte
Die Methode der ökologischen Knappheit berücksichtigt in einer Ökobilanz ein breites Spektrum von Umweltbelastungen (Schadstoffemissionen und Ressourcenverbrauch) gewichtet und fasst diese durch Vollaggregation mittels sogenannter Ökofaktoren in einer Kennzahl zusammen. Der Ökofaktor eines Stoffes leitet sich aus der Umweltgesetzgebung oder entsprechenden politischen Zielen ab. Je mehr die aktuellen Emissionen respektive der Verbrauch an Ressourcen das gesetzte Umweltschutz-Ziel überschreiten, desto grösser wird der Ökofaktor. Dieser wird ausgedrückt in Umweltbelastungspunkten (UBP). [18]

Um möglichen Unterschieden in der Lebensdauer von Bauteilen Rechnung zu tragen, werden die im Merkblatt (SIA 2032, Anhang C) aufgeführten, theoretischen Standardwerte der Lebensdauer von Bauteilen respektive einzelner Schichten verwendet. Sollten nicht trennbare Schichten mit unterschiedlicher Lebensdauer angedacht werden, ist die Schicht mit der kürzesten Dauer die ausschlaggebende.

Um eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Lösungsansätze gewährleisten zu können, wird als funktionelle Einheit 1 m^2 Decke definiert.

In Ermangelung verpflichtender Grenzwerte, werden die im SIA-Effizienzpfad Energie die Zielwerte für die Treibhausgasausstoss für den Bereich Erstellung herangezogen.

Kreislauffähigkeit

Neben der Ökobilanz ist die Kreislauffähigkeit ein wesentlicher Aspekt in der Bewertung der Sanierungsmassnahmen. Schon heute lässt der Gebäudebestand erkennen, dass nicht-reversible Konstruktionen insofern problematisch sind, als dass eine Wiederverwendung von Bauteilen oder Bauteilschichten meist nicht möglich ist und so bei der Erneuerung oder beim Rückbau Abbruchabfälle entstehen und die CO_2-Emissionen, die durch die Herstellung des Bauteils oder der Bauteilschicht bereits emittiert wurden, erneut anfallen. Bei der Wahl von Sanierungsmassnahmen sollte demnach verstärkt darauf geachtet werden, dass die Konstruktionen demontierbar sind. Dies lässt sich über gesteckte oder verschraubte Verbindungen (maximale Schraubenlänge ca. < 8 cm) ermöglichen. Verklebte, geschweisste oder geklammerte Konstruktionen sollten vermieden werden. Auch wenn letztere tendenziell lösbar sind, zeigt sich in der Praxis, dass der zeitliche Aufwand sehr viel höher als bei dem Herausdrehen von Schrauben ist. Wenn sich ein System wieder in Einzelkomponenten zerlegen lässt, ist entscheidend ob und wie diese wieder eingesetzt werden können. Kann Plattenmaterial z.B. erneut verbaut werden? Lassen sich mineralische Baustoffe mit wenig Energieaufwand wieder aufbereiten? Lassen sich fossile Anteile der Systeme (z.B. Rohrsysteme aus Flächenheizungen) wiederverwenden oder rezyklieren?

Mit der Einführung von Artikel 35j im USG (Umweltschutzgesetz, USG, 2024) erhält der Bundesrat die Kompetenz, Anforderungen an das ressourcenschonende Bauen zu stellen. Diese gesetzliche Verankerung beinhaltet Vorgaben zur Verwendung umweltschonender Baustoffe, zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und zur Verbesserung der Ressourceneffizienz im Bauwesen. Ziel ist es während des gesamten Lebenszyklus die Umweltbelastung durch Produkte und Bauwerke zu reduzieren, Materialkreisläufe zu schliessen und die Ressourceneffizienz zu verbessern. Die wesentlichen Änderungen ab 1. Januar 2025 gestalten sich wie folgt:

- Regelungen zur grauen Energie im Bausektor: Die Kantone sind verpflichtet, Grenzwerte für die graue Energie bei Neubauten und bedeutenden Renovationen festzulegen.
  Art. 45 Abs. 3 Bst. e EnG
- Förderung ressourcenschonenden Bauens: Der Bundesrat erhält die Kompetenz, Anforderungen an ressourcenschonendes Bauen zu definieren, um nachhaltige Baupraktiken weiter zu stärken.
  Art. 35j Abs. 1 USG
- Vorbildfunktion des Bundes: Der Bund ist verpflichtet, bei Beschaffungen und eigenen Bauprojekten eine Vorbildrolle in Bezug auf Ressourcenschonung und Kreislaufwirtschaft einzunehmen
  Art. 35j Abs. 2 USG
- Verankerung der Abfallhierarchie: Das Recycling erhält Vorrang vor der Verbrennung von Abfällen. Dieses Prinzip soll die Ressourcenschonung fördern und die Umweltbelastung reduzieren.

2.4.4. Brandschutz

Gestützt auf die Brandschutzvorschriften BSV 2015 müssen bestehende Gebäude bei Umbauten, Sanierungen, Erweiterungen oder Umnutzungen verhältnismässig an die Brandschutzvorschriften angepasst werden. Es ist zu unterscheiden, ob die Sanierungsmassnahme den Zweck der Brandschutzbekleidung erfüllen soll oder nicht. Dies ist vor allem je nach Bauweise relevant.

Die geltenden Brandschutzanforderungen werden durch die Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF) geregelt. In der Brandschutzrichtlinie sind die Brandverhaltensgruppen definiert [19].

Einige der im Projekt betrachteten Systeme (Kapitel 0) sind Bauprodukte aus Deutschland. Deren Prüfungen in Bezug auf das Brandverhalten unterliegen der DIN EN 13501 [20]. Das Brandverhalten wird über drei verschiedene Kriterien eingestuft und kategorisiert:

- Brandverhalten: z.B. A = nicht-brennbar
- Rauchentwicklung: z.B. s1 = keine/kaum Rauchentwicklung

- Abtropfverhalten: z.B. d0 = kein brennendes Abtropfen/Abfallen

Die “beste” Brandverhaltensgruppe ist RF1 und wird durch Materialien mit den Eigenschaften A1 oder A2-s1, d0 erreicht.

Lehmbaustoffe mit nicht mehr als 1 Masse-% organischer Anteile können grundsätzlich in die Baustoffklasse A1 eingestuft werden [21], [22]. Bei Plattenwerkstoffen wird oftmals ein hoher Faseranteil angesetzt. Allerdings gibt es einige Hersteller denen Prüfzeugnisse über eine A2-s1, d0 Klassierung vorliegen, was bedeutet, dass das Bauteil als nicht brennbar gilt, eine geringe Rauchentwicklung aufweist und nicht brennend abtropft [23]. Produkte mit dieser Einstufung können trotz des geringen Anteils an brennbaren Bestandteilen dort eingesetzt werden, wo höchste Brandschutzanforderungen gelten, da sie keinen wesentlichen Anteil zum Brand leisten.

Laut der Brandschutzrichtlinie der VKF gelten folgende Anforderungen, die die für das Projekt relevanten Bauteile:

- Unterdecke: Vgl. Brandschutzrichtlinie VKF 3.2.3 (3): Bei F 60 müssen die Baustoffe RF1 einhalten

Der Feuerwiderstand, der mittels Lehmbaustoffe in Verbundkonstruktionen erreicht werden kann, ist noch nicht vollständig erforscht. Laut Liblik et al. [24] kann eine Lehmbauplatte von 22 mm Stärke eine dahinter liegende Holzkonstruktion 30 Minuten vor dem Verkohlen schützen. Die Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Aussenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL) aus Deutschland setzt für dieselbe Schutzdauer eine Gipsplatte von 18 mm Stärke voraus [25].

2.4.5. Baurechtliche Belange

Die in 2.4.1 beschriebenen schallschutztechnischen Anforderungen ergeben sich aus der SIA 181. Diese gelten bei Neubauten, Umbauten oder Umnutzungen.
Nach Art 32 Abs. 3 LSV kann Abweichung beantragt werden, wenn Einhaltung der Anforderung unverhältnismässig ist. Als Begründung für eine Abweichung von der Norm kann gemäss Aussage eines Kreisarchitekten vor allem ein Verzicht auf einen Ersatzneubau ins Feld geführt werden. Sanierungen sind in der Regel ressourcenschonender und sozialverträglicher. Des Weiteren kann mit einem Umstieg auf ein effizientes Heizsystem sowie die Verwendung von ökologischen Materialien argumentiert werden.
Durch eine Sanierung darf der bestehende Schallschutz nicht verringert werden., d.h. in Fällen in denen ein entkoppelter Aufbau einen Einbruch oberhalb 100Hz ergibt, müssen direkt befestigt Massnahmen ergriffen werden. Falls ein weicher Bodenbelag vorhanden ist, sollte auch wieder einer mit gleichen Eigenschaften eingebaut werden.

Je nach Projekt ist vor allem die zulässige lichte Raumhöhe relevant für eine mögliche Sanierungsmassnahme. Die jeweils geltenden kantonalen Bestimmungen sind hierbei anzuwenden. Bei den Beispielen Basel-Stadt und Zürich legen Raumzonen die mindeste lichte Raumhöhe fest. In Basel-Stadt gilt das Bau- und Planungsgesetz (BPG) [26]. In §66 wird eine mindeste lichte Raumhöhe von 2.50 m in Aufenthaltsräumen angegeben. Gebäude, die in Zone 2 und 2a liegen, dürfen abweichend eine lichte Raumhöhe von 2.30 m aufweisen. Der Zonenplan ist online abrufbar und definiert die städtebaulichen Zonierungen. In Zürich ist das Baurecht durch das Planungs- und Baugesetz (PBG) geregelt [27]. In §304 ist die mindeste lichte Raumhöhe mit 2.40 m angegeben. In Kernzonen darf diese unterschritten werden und beträgt 2.30 m.

Je nach Bestandsgebäude können dementsprechend Sanierungsmassnahmen nicht genehmigungsfähig sein, wenn die lichte Raumhöhe gemäss dem Baurecht schon ausgereizt ist. Daher muss im Einzelfall geprüft werden, ob eine Abweichung zulässig ist. Ein Ansatz könnte z.B. sein, dass im Sinne des Bestanderhalts die Ausnahmeregelung von Gebäuden in Kernzonen bzw. der Zonen 2 und 2a übertragen wird und eine lichte Raumhöhe von 2.30 m zulässig wäre.

2.4.6. Statische Anforderungen

Für das Vorhaben sind insbesondere die Tragreserven relevant, da sich hieraus mögliche Bausysteme ableiten. Je nach System handelt es sich um vergleichsweise schwere Baustoffe, die ein hohes Flächengewicht aufweisen. Um eine belastbare Aussage über die Tragfähigkeit der Decken zu machen, muss eine entsprechende statische Berechnung angestellt werden. Diese sollte nach einer entsprechenden Aufnahme der Bauteile vor Ort in Kombination mit den Bestandsunterlagen erfolgen. Für das Projekt wurde ein vereinfachtes Verfahren verwendet.

Bei der Bemessung von Gebäuden sind sogenannte Teilsicherheitsbeiwerte vorgesehen. Diese werden in der SIA 260 «Grundlagen der Projektierung von Tragwerken» definiert [28]. Es wird zwischen ständigen Lasten und veränderlichen Lasten unterschieden. Für veränderliche Lasten liegt der Faktor bei 1.50. Es wird also ein Aufschlag von 50 % vorgenommen, um sicherzustellen, dass leicht erhöhte Lasten als Resultat statistischer Abweichungen abgedeckt sind. Bei ständigen Lasten wird mit einem Wert von 1.35 gerechnet. Unter die ständigen Lasten fällt z.B. das Eigengewicht der Bauteile. Da bei der Errichtung eines Gebäudes Abweichungen entstehen können, kann es bei den Eigengewichten Diskrepanzen zwischen Planung und Ausführung geben. Dies wird in den sogenannten Baumeistertoleranzen berücksichtigt. Bei einer Betondecke etwa kann die reale Höhe um ein paar Millimeter abweichen oder im Transportbeton kann es zu Schwankungen in der Rohdichte kommen. Alle diese Faktoren, werden in dem Teilsicherheitsbeiwert von 1.35 abgedeckt. Mit der Normenreihe SIA 269 «Erhaltung von Tragwerken» (269/1-8) [29] gibt es eine Regelung nach der man nach exakter Bestimmung der Bauteildimensionen vor Ort den Teilsicherheitsbeiwert auf 1.20 mindern darf. Im Projekt wird daher von einer groben Faustformel ausgegangen. Die Minderung des Beiwerts entspricht 15 %. Daher darf die Lasterhöhung der Sanierung maximal 15 % betragen.

2.4.7. Kosten

Die Investitionskosten der vorgeschlagenen Massnahmen werden abgeschätzt, um die Wirtschaftlichkeit der Massnahmen untereinander vergleichen zu können. Die Kosten werden von den Firmen der Begleitgruppe und Produktanbietern eingeholt.

2.4.8. Weitere Anforderungen

Im Raum Basel und entlang des Alpenbogens ist die Erdbebensicherheit auch ein wichtiges Planungskriterium. Im Rahmen des Projekts können spezielle Anforderungen an die Erdbebensicherheit jedoch nicht explizit untersucht werden.

3 Produktanalyse für Deckenheizsysteme

Die nachträgliche Installation von Deckenheizungen ist sowohl im Trockenbau- als auch im Nasssystem möglich. Trockenbausysteme bieten den Vorteil einer schnellen Montage und sie können sofort weiterbearbeitet werden. Nasssysteme, bei denen die Heizrohre in Putz eingebettet werden, bieten oft eine höhere Wärmespeicherkapazität, erfordern jedoch längere Trocknungszeiten und sind arbeitsintensiver. Die Verteilleitungen werden häufig in abgehängten Decken oder Trockenbaukonstruktionen verlegt. Diese bieten, wie in Abbildung 14 zu sehen, in der Regel ausreichend Raum für die Unterbringung der Rohrleitungen und ermöglichen einen einfachen Zugang für Wartungsarbeiten [30].

Im Rahmen des Projektes wurden marktverfügbare Produkte für Deckenheizsysteme recherchiert und miteinander verglichen. Ziel dieser Produktübersicht ist es, einige technische und praktische Aspekte herauszuarbeiten, die bei der Integration solcher Systeme in Sanierungsprojekten relevant sind und die für eine Vorauswahl der zu analysierenden Produktkategorien verwendet wird.

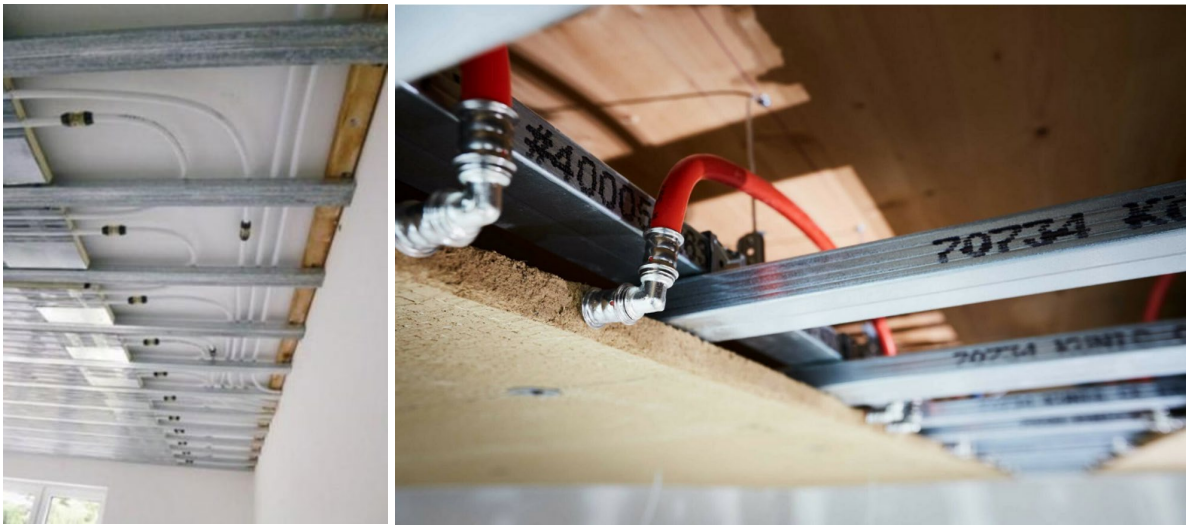


Abbildung 14: Bei abgehängten Deckenheizsystemen lassen sich die Zuleitungen und Verteilbalken gut im Zwischenraum installieren. Darstellung der Systeme in beiden Bildern bevor Vorsatzschale montiert bzw. Putz aufgebracht ist (Quellen: linkes Bild Uponor GmbH, rechtes Bild WEM/OBM Bionik).

Die minimale Aufbauhöhe der Systeme ist ein wichtiges Kriterium, da die lichte Raumhöhe häufig begrenzt ist, insbesondere in älteren Gebäuden, die ab 1950 errichtet worden sind. Die Aufbauhöhe und Montageart steht dabei in direktem Zusammenhang mit den Schallschutzanforderungen (vgl. Kapitel 2.1). Die im Projekt konzipierten Decken müssen aus Schallschutzgründen als Abhangdecken realisiert werden, d.h. zwischen Geschossdecke und neuer sichtbarer Deckenschicht ist ein Luftspalt vorhanden, der zudem mit einer lockeren Dämmmatte ausgefüllt sein kann. Diese Abhängung der neuen Decke kann mit Direktabhängern oder mit Federschienen erfolgen (Abbildung 15), die jeweils oben an die Geschossdecken geschraubt werden und unten die neue Deckenkonstruktion halten.



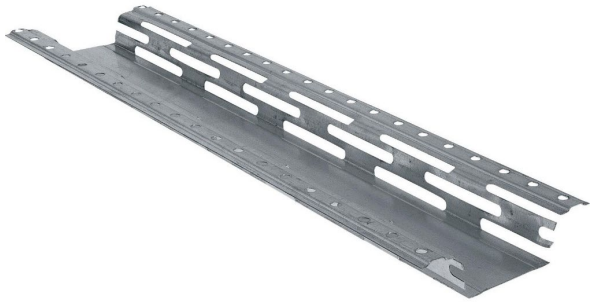
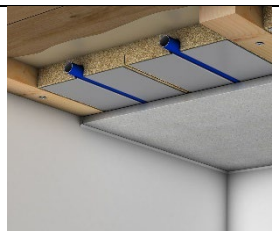


Abbildung 15: Direktabhänger (links) und Federschiene (rechts), welche zur Realisation einer Abhangdecke verwendet werden können. Am Direktabhänger können Holzleisten wie im Bild montiert werden oder Metallleisten, an welche dann Vorsatzschalen geschraubt werden. An Federschienen werden die Vorsatzschalen direkt angeschraubt. (Bildquelle: beides Knauf AG).

Die Materialwahl der Deckenmaterialen spielt hinsichtlich ökologischer Nachhaltigkeit eine wichtige Rolle. Vorzugsweise sollten Materialien eingesetzt werden, die geringe Umweltwirkungen haben, kreislauffähig, wiederverwendbar und am Ende des Lebenszyklus mit wenig Energie rezyklierfähig sind. Gängige Trägermaterialien für Deckenheizungen sind Gipsfaserplatten, mineralische Bauplatten und Lehmplatten. Letztere zeichnen sich durch eine sehr gute Fähigkeit zur Regulierung der Raumluftfeuchtigkeit aus und verbessern dadurch das Raumklima. Zudem eignen sich Lehmsysteme besonders gut für den Kühlbetrieb, da sie die Kondensationsgefahr durch ihre hygroskopischen Eigenschaften reduzieren und somit auch temporär Temperaturen unterhalb des Taupunktes gefahren werden können. Die Rohrleitungen sind bei allen gängigen Produkten aus Verbundmaterial (Alu-PEX), die aus Polyethylen- und Aluminiumschichten bestehen, oder reinen Kunststoffen. Verbundrohre gelten heute als nicht rezyklierbar und werden in der Schweiz nach dem Rückbau in der Regel via Kehrichtverbrennungsanlage entsorgt. Reine Kunststoffrohre können über verschiedene Funktionsschichten verfügen wie z.B. Diffusionssperrschichten. Ihre Kreislauffähigkeit muss für jedes Produkt geklärt werden und ist ggf. nicht gegeben.

Anhand dieser Kriterien wurden mehrere Produkte verschiedener Hersteller gegenübergestellt, bewertet und kategorisiert, die sich für verputzte Decken in Wohnungen eignen können. Tabelle 2 dient dazu, eine Entscheidungsgrundlage für die Auswahl geeigneter Systeme in den Modellzimmern zu schaffen.

Tabelle 2: Übersicht verschiedener Deckenheizsysteme die sich für verputze Decken in Wohnungen eignen (Produkte i.d.R. zum direkten Anbringen auf bestehende Decke gedacht, ohne Abhangdecke).

	Heizungsrohr vor Ort in Wärmeleitblech montiert	**Vorgefertigte Lehmplatte mit Heizungsrohr**	**Verputzte Kapillarrohrmatten**
Produktbild (Beispiel)	 [31]	 [32]	 [33]
Mögliche Hersteller	Frigoma, MFH-Systems, Quick-Tec	ArgillaTherm, Naturbo, WEM	Beka Klima, Clina
Installationsart	Trocken	Trocken / Nass	Nass
Max. Gewicht (gefüllt)	ca. 25 kg/m^2	Variiert stark, bis zu 85 kg/m^2	ca. 14 kg/m^2
Minimale Aufbauhöhe Heizschicht	ca. 33 mm	55 - 70 mm (je nach Stärke der Lehmschicht)	ca. 13 mm (ohne Sammelrohr)
Materialien	PEX-Aluminium-Verbundrohr, ökologische Trägermaterialen oder Styropor, Wärmeleitblech, Gipsfaser- oder Lehmplatte als Deckschicht	PEX-Aluminium-Verbundrohr, Lehm, z.T. in Kombination mit Holzfaserplatte, vorgefertigtes Element mit integrierten Rohren, Lehmputz als Deckschicht	Polypropylen-Rohre, verputzt
Vorteile	Einfache Montage, Vielseitigkeit (wird auch für Bodenheizungen verwendet), gute Rückbau- und Recyclierbarkeit der Trägermaterialien, hohe Flexibilität was Verlegung betrifft, da viele Freiheitsgrade, Bei Vorsatzschale aus Lehm: Feuchteregulation	Nachhaltige Materialien, hoher Vorfertigungsgrad (Heizungsrohr integriert), rückbaubar und wiederverwendbar, Bei Lehmputz: Feuchteregulation	Geringe Aufbauhöhe, hohe Homogenität der Wärme- und Kälteverteilung
Nachteile	hoher Montageaufwand	i.d.R. höhere Investitionskosten	hoher Montageaufwand, Rohre nicht sauerstoffdiffusionsdicht, keine Wiederverwendung der Materialien möglich

Für die weiteren Analysen werden die ersten beiden Produktkategorien aus der voranstehenden Tabelle betrachtet, weil davon ausgegangen wird, dass sich Abhangdecken, die im Trockenbau erstellt werden, leichter realisieren lassen. Die Projektergebnisse sind mutmasslich aber auf andere Bauweisen übertragbar.

4 Gebäudeauswahl und Modellzimmer

Für das Projekt wurden durch die Stadt Zürich und den Kanton Basel-Stadt insgesamt vier Projekte zur Auswahl gestellt. Die zwei ausgewählten Projekte werden im Folgenden beschrieben. Die Informationen zu den restlichen Gebäuden können im Anhang des Berichts eingesehen werden. In einem ersten Schritt wurden zunächst auf Grundlage der zur Verfügung gestellten Bestandsunterlagen verschiedene Parameter der Gebäude gesammelt und verglichen. Für die weiteren Arbeiten wurden zwei Gebäude ausgewählt. In beiden Gebäuden wurden Modellzimmer identifiziert, die Grundlage für die Simulationen sind. Da die Unterlagen nicht alle gewünschten Informationen enthalten haben, wurden sinnvolle Annahmen getroffen, die in der Beschreibung in *kursiv* gekennzeichnet sind. Alle Werte, die eindeutig aus den Planunterlagen hervorgehen sind **fett** geschrieben.

4.1 Gebäudeauswahl

Im Projekt wird angestrebt, skalierbare Lösungen zu entwickeln, die sich auf möglichst viele Gebäude übertragen lassen. Als Typologie wurden daher Wohngebäude identifiziert, deren Baualter zwischen 1900 und 1980 liegt, da bei diesen Gebäudeklassen davon auszugehen ist, dass eine energetische Sanierung vorteilhaft wäre und dass der Schallschutz nicht mehr den heutigen Erwartungen entspricht. Da im Wohnungsbau in der Vergangenheit unterschiedliche Deckensysteme ausgeführt wurden, sollen im Projekt die am häufigsten vorkommenden Konstruktionen, nämlich Holzbalkendecken und Stahlbetondecken untersucht werden.

4.1.1. Maulbeerstrasse 44-46, Basel (Holzbalkendecke)

Das Gebäude in der Maulbeerstrasse wurde 1906 vom Basler Architekten Eduard Pfrunder erbaut, der vor allem in der Zeit nach 1900 massgeblich das Basler Stadtbild durch vorwiegend Wohn- und Geschäftshäuser geprägt hat [34]. Die 18 Wohneinheiten in der Maulbeerstrasse 44-46 wurden nach der Errichtung vorwiegend durch Bahnangestellte und Zöllner bezogen. In der ursprünglichen Ausführung waren die Toiletten im Zwischengeschoss im Treppenhaus positioniert. Im Jahr 1966 und 1969 gab es Baueingaben, in denen Teile des Gebäudeteils mit der Hausnummer 46 in Labore und Büros umgenutzt werden sollten.



Abbildung 16: Strassenansicht Maulbeerstrasse.

Eckdaten:
Baujahr: 1906
Lichte Raumhöhe: 280 cm
Minimum nach BPG [26]: 250 cm
Kanton: Basel-Stadt
Adresse: Maulbeerstrasse 44-46, 4058 Basel, Schweiz (ehemals Maulbeerweg 46-48)
Zone [36]: 5a: Erleichterung für Industrie- & Gewerbebauten möglich

Aufbauten:

Decke	mm	Aussen-wand	mm	Wohnungs-trennwand	mm	Innen-wand	mm	Raumfläche	m^2
Belag	*k.A.*	Mauer-werk	*k.A.*	Mauerwerk	**250**	Holz-stütze	**120**	Schlafzi. (2.77x5.23m)	**14.5**
Dielung	*k.A.*	Luft-schicht	*k.A.*	Luftschicht	*k.A.*				
Schüttung	*k.A.*	Mauer-werk	*k.A.*	Mauerwerk	**250**				
Balken	*k.A.*								
Stakung	*k.A.*								
Abhangd.	*k.A.*								
Gesamt	**320**	Gesamt	**450**	Gesamt	**500**	Gesamt			

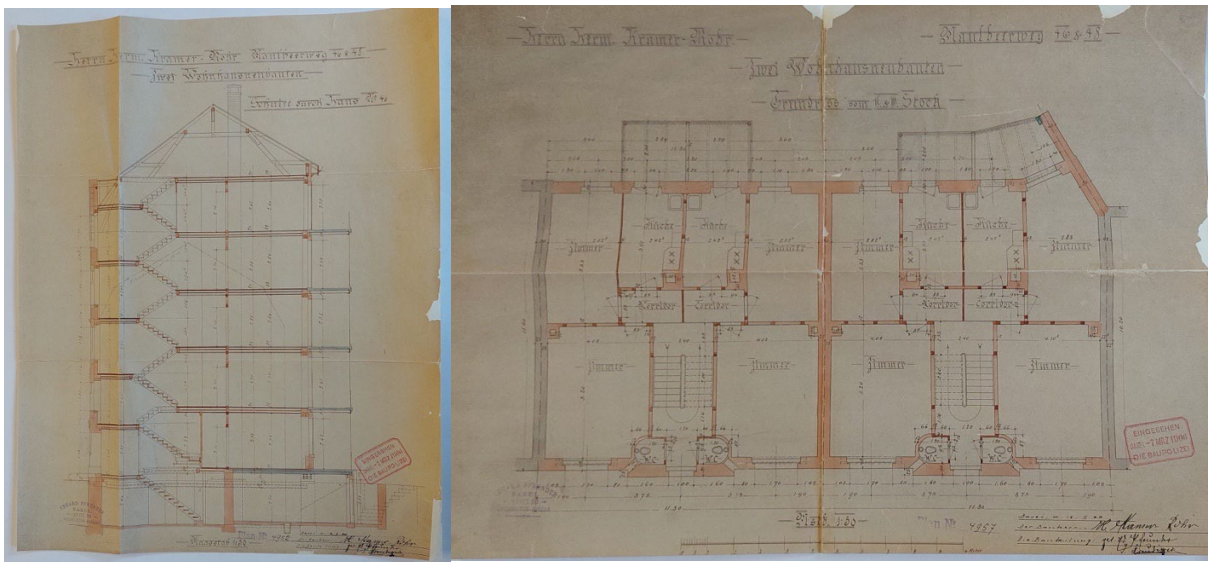


Abbildung 17: Schnitt- und Grundrisszeichnung, Quelle: Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt.

Bewertung:
Aus den Bestandsunterlagen gehen nicht alle gewünschten Informationen hervor. Es fehlen insbesondere Detailpläne, die die verschiedenen Bauteilaufbauten und Anschlüsse zeigen. Für das weitere Vorgehen werden daher Annahmen getroffen, die auf historischen Aufbauten vergleichbarer Gebäude basieren. Prinzipiell ist das Projekt für eine Betrachtung im Forschungsprojekt geeignet, da sich bisher keine Einschränkungen identifiziert wurden, die einer Sanierungsmassnahme entgegenstehen.

4.1.2. Farbhof Zürich (Stahlbetondecke)

Die Siedlung umfasst insgesamt 144 Wohnungen, die sich auf fünf Baukörper aufteilen. Die Stadt Zürich beauftragte die Architekten Haefeli Moser Steiger in den 50er Jahren mit der kommunalen Wohnsiedlung im Quartier Altstetten [37], [38].



Abbildung 18: Farbhof Zürich während der Erstellung, Quelle: Baugeschichtliches Archiv Zürich (BAZ), © Michael Wolgensinger.

Eckdaten:
Baujahr: 1955-1957
Lichte Raumhöhe: 241-244 cm
Minimum nach PBG: 240 cm
Adresse: Hohlstrasse 699 (und weitere), 8048 Zürich
Quartier: Altstetten (Kreis 9)
Kernzone: Nein?
Heizung: Radiatoren

Aufbauten:

Decke	mm	Aussen-wand	mm	Woh-nungs-trenn-wand	mm	Innen-wand	mm	Raumfläche	m^2
Tonplatten (Bad/Kü-che)	**30**	Mauer-werk	**320**	Mauerwerk	**150**	Mauer-werk	**120**	Wohnzi. (3.75x4.2m)	**15.7**
Mörtelbett (Bad/Kü-che)	**20**								
Linoleum (Zimmer)	*2*								
Ausgleich (Zimmer)	*18*								
STB-Decke PC 300	**140**								
Putz	**20**								
Anstrich	*k.A.*								
Gesamt	*210 (180)*	Gesamt	*k.A.*	Gesamt	*k.A.*	Ge-samt	*k.A.*		

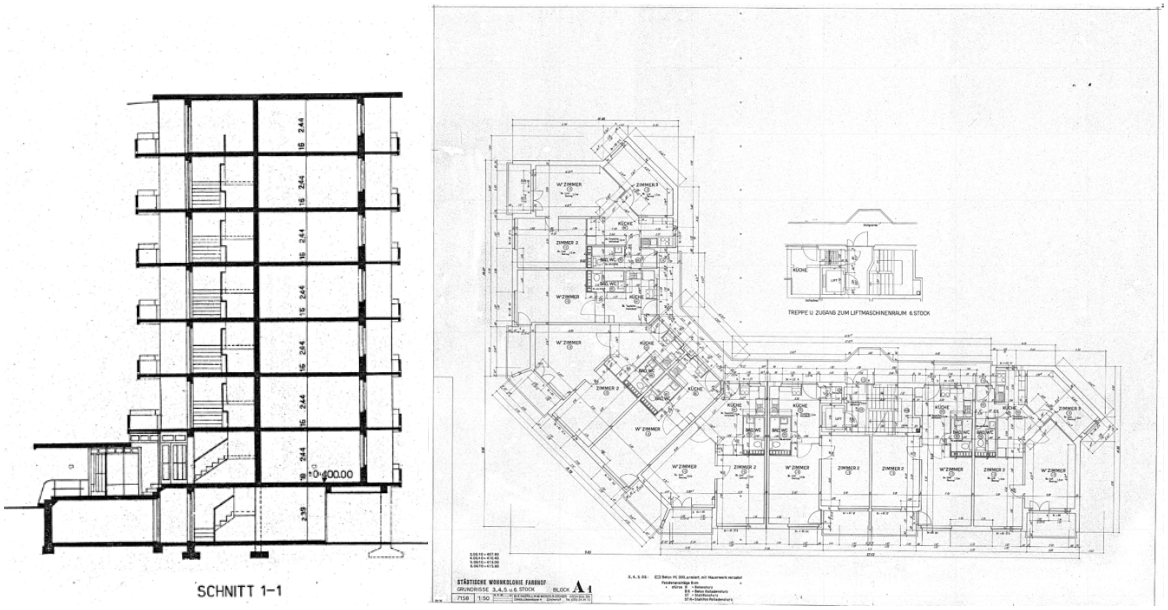


Abbildung 19: Schnitt und Grundriss eines der fünf Baukörper des Farbhofs, Quelle: Stadt Zürich, AHB.



Abbildung 20: Innenraum Farbhof, Quelle: Baugeschichtliches Archiv Zürich (BAZ), © Michael Wolgensinger

Bewertung:
Die Bauteilaufbauten sind textlich aus den Bestandsunterlagen zu erkennen. Die Belagsstärken sind nicht vollständig erfasst. In den Zimmern wurde Linoleum, in den Küchen und Bädern wurden Tonplatten verlegt. Dort ist die lichte Raumhöhe 241 cm. Da sich das Gebäude ausserhalb einer Kernzone befindet, muss im weiteren Verlauf geprüft werden, ob baurechtlich eine Abweichung der lichten Raumhöhe erwirkt werden kann. Aus den Plänen leitet sich eine Geschosshöhe von 2.60 m ab. Im Bereich der Einbauschränke, welche in Räumen mit Tonplatten liegen, ist eine lichte Raumhöhe von 2.41 m vorhanden ist. Die normalen Zimmer liegen 3 cm niedriger und haben demnach eine lichte Raumhöhe von 2.44 m aufweisen. Das Gebäude wurde für die weitere Bearbeitung ausgewählt.

4.2 Modellzimmer

Für den weiteren Projektverlauf werden die Projekte «Maulbeerstrasse» und «Farbhof» ausgewählt. Beide Gebäude stellen jeweils eine typische Holz- bzw. Betonbauweise dar, die in der jeweiligen Form oftmals verbreitet ist. Bei beiden Gebäuden gehen nicht alle erforderlichen Informationen aus den Bestandsunterlagen hervor. Daher werden bei der Erstellung der Modellräume teilweise Annahmen zu bestimmten Materialien oder Bauteilanschlüssen getroffen, die entsprechend gekennzeichnet werden. In den Simulationen kann ausserdem die Positionierung bzw. Ausrichtung der Modellräume angepasst werden.

4.2.1. Zimmer mit Holzbalkendecke (Maulbeerstrasse)

Das Projekt Maulbeerstrasse hat eine Gebäudehöhe von ca. 20 m und fällt damit in die Kategorie Gebäude mittlerer Höhe (vgl. VKF Brandschutznorm [39]). Für Gebäude mittlerer Höhe besteht die Anforderung an tragende Decken von R60.

Die maximale Spannweite der Decken beträgt 4.20 m und wird entsprechend für die Berechnung der Tragreserven angesetzt.

Die Wände bestehen nach aktuellem Kenntnisstand aus tragendem Ziegelmauerwerk. Es wird davon ausgegangen, dass die Aussenwand als zweischaliges Mauerwerk mit Luftschicht ausgebildet wurde. Bei den Innenwänden sind in den historischen Grundrissen tragende Stützen angedeutet. Zunächst wird davon ausgegangen, dass es sich um entsprechende Wände aus Holzstielen mit Ziegelsteinfüllung handelt. Die Decken sind wahrscheinlich als Balkendecke ausgeführt. Da es keine Detailzeichnung gibt wird von einer klassischen Ausführung mit Stakung und Schüttung ausgegangen. Beim Fenster wird davon ausgegangen, dass dieses in der Vergangenheit erneuert wurde, da dieses aus Zweifach-Isolierglas und einem Rahmen üblicher thermischer Qualität besteht.

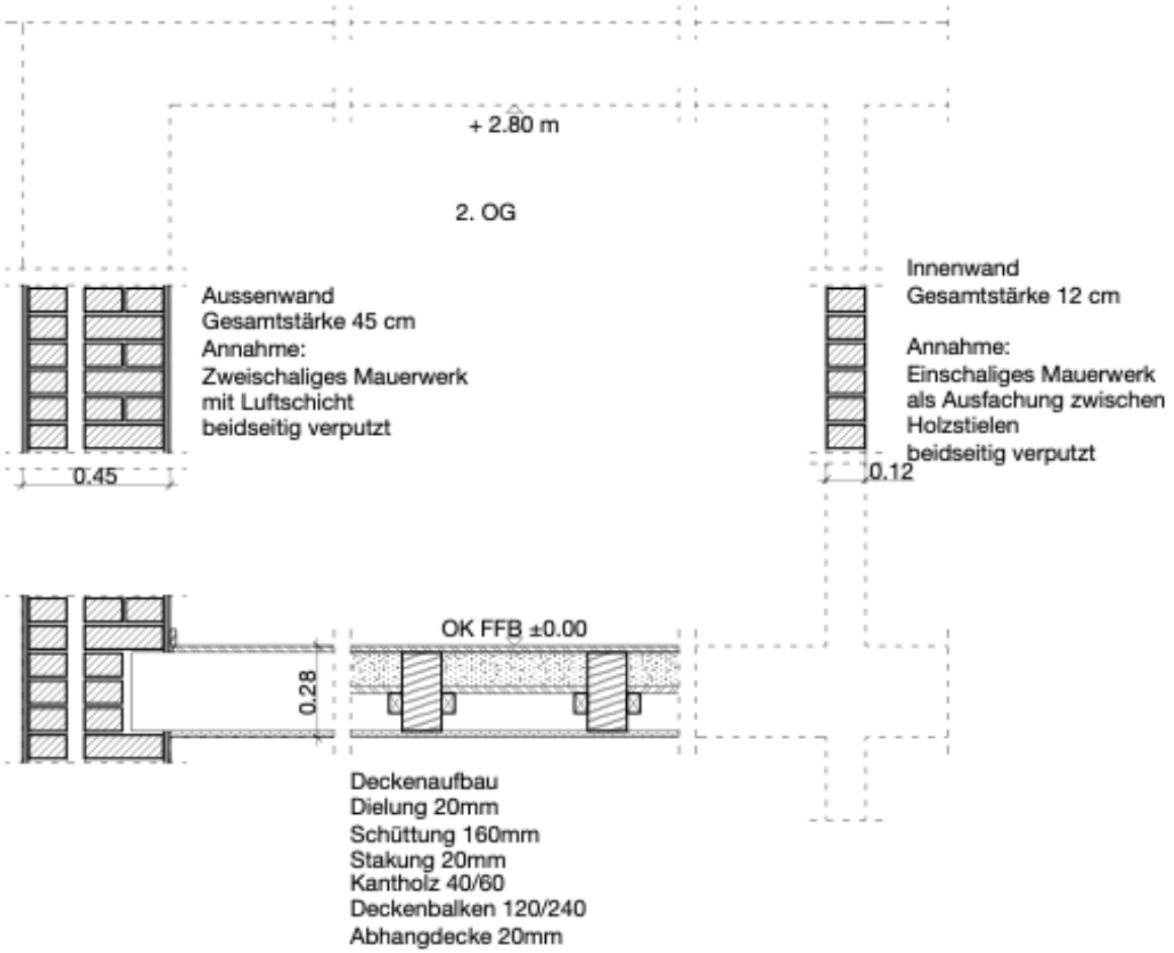


Abbildung 21: Detailzeichnung des Modellzimmers mit Holzbalkendecke.

Das Modellzimmer ist zum Innenhof nach Süden orientiert. Das Zimmer hat eine Fläche von 14.8 m^2. Es schliesst über tragende Innenwände an die restliche Wohnung und mit einer Wohnungstrennwand zum benachbarten Gebäude an. Es wurde das 2. OG ausgewählt, damit die angrenzenden Nutzungen gleichwertig (Wohnen) angesetzt werden können. Ausserdem kann somit von den gleichen Bauteilaufbauten ausgegangen werden.

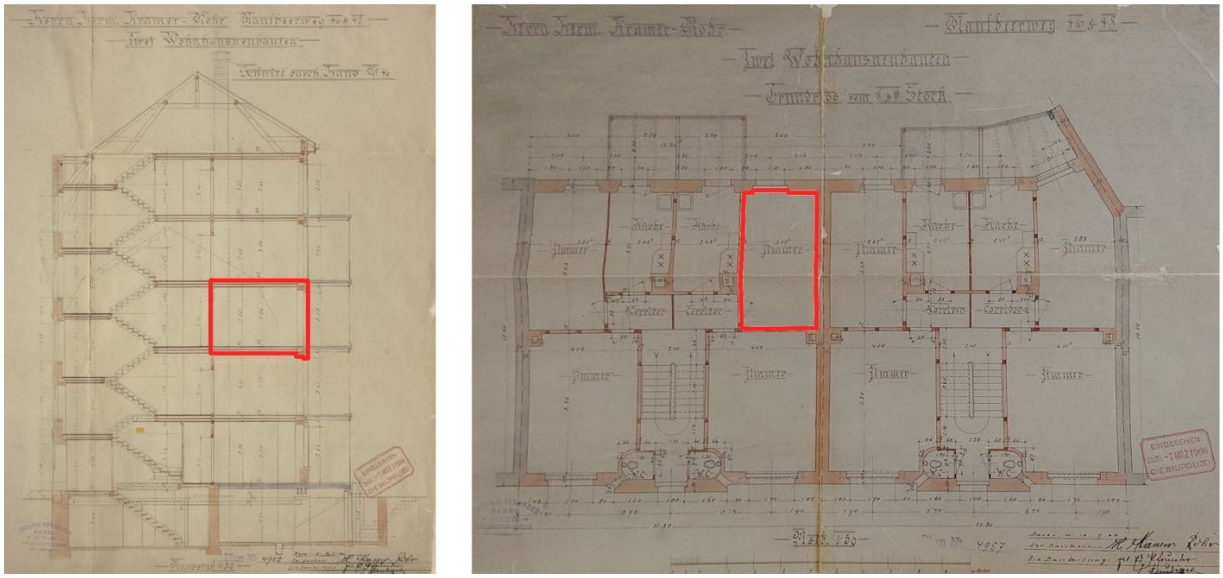


Abbildung 22: Verortung Modellzimmer mit Holzbalkendecke.

4.2.2. Zimmer mit Stahlbetondecke (Farbhof)

Für das Referenzgebäude Farbhof (Massivbau) in Altstetten, Zürich, ist die Erfüllung von Brandschutzanforderungen bereits durch die 140 mm starke Betondecke gegeben. Daher gilt hier für die Deckenheizung lediglich die Mindestanforderung RF3 (gültig, solange ein Raum nicht für mehr als 300 Personen ausgelegt ist). Anstriche, Wandbekleidungen oder andere Beschichtungen dürfen aus brennbaren Baustoffen bestehen, wenn sie nicht dicker als 1,5 mm sind und nicht in Fluchtwegen verbaut sind. In diesem Fall werden keine Anforderungen an das Brandverhalten der Beschichtungen gestellt.

Wie das vorherige Projekt hat das Gebäude eine Höhe von ca. 20 m und fällt ebenso in die Kategorie «Gebäude mittlerer Höhe». Damit besteht ebenso die Anforderung an tragende Decken von R60.

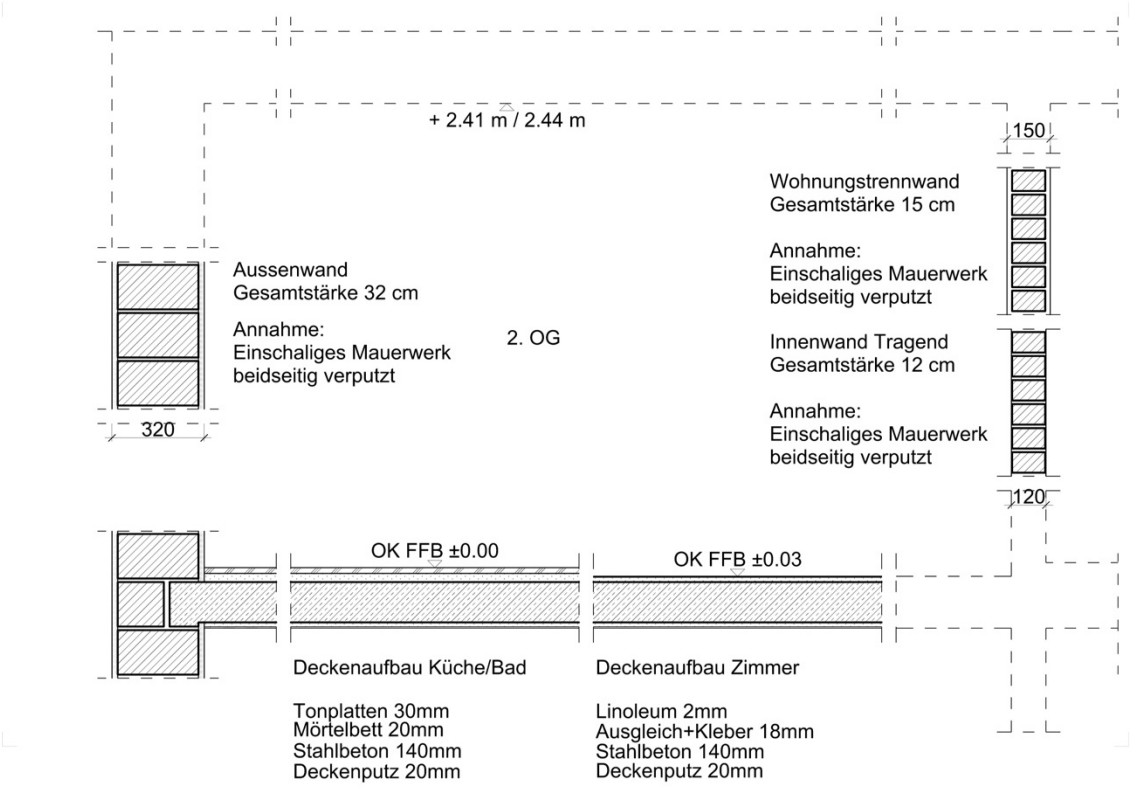


Abbildung 23: Detailzeichnung des Modellzimmers mit Stahlbetondecke, Quelle: Zeichnung INEB nach Informationen aus Bestandsunterlagen

Das Modellzimmer ist im Gebäudeblock A1 verortet. Es handelt sich um ein Zimmer mit Linoleumbelag und einer lichten Raumhöhe von 2.44 m. Das Zimmer ist nach Süd-Ost orientiert und hat eine Fläche von 13.95 m^2. Beim Fenster wird davon ausgegangen, dass dieses in der Vergangenheit erneuert wurde und aus Zweifach-Isolierglas und einem Rahmen üblicher Qualität besteht. Das Fenster des Modellzimmers hat eine Fläche von 2.47 m^2 (1.87 m * 1.32 m).

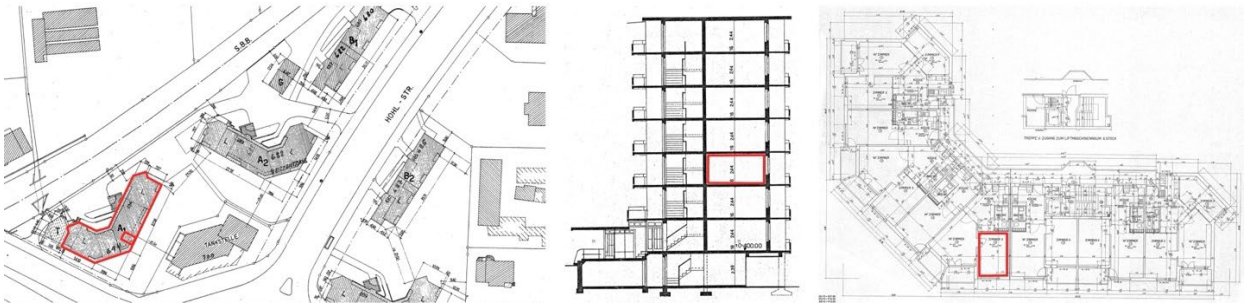


Abbildung 24: Verortung Modellzimmer mit Stahlbetondecke, Quelle: Stadt Zürich, AHB.

5 Sanierungsvarianten

In der folgenden Abbildung 25 sind die im Projekt untersuchten Varianten dargestellt. In allen Varianten werden Schichten zur Verbesserung des Schallschutzes mit einer Heiz- und Kühlschicht kombiniert. Es werden die Bauweisen Betondecke (1.) und Holzbalkendecke (2.) unterschieden. Bei der Betondecke gibt es die Möglichkeit mit einer Federschiene zu arbeiten (1.1.) oder per schallentkoppelten Direktabhänger (1.2.). Bei der Federschiene handelt es sich um die Variante mit der minimalen Aufbauhöhe. Bei dem schallentkoppelten Direktabhänger wird mehr Federweg erreicht sowie ein Höhenausgleich bei unebenen Decken, wie sie bei Holzbalkenlagen oft vorliegen, ermöglicht.

Die Hohlräume der Konstruktion sind zu mindestens 70 % der Höhe mit einer weichen, porösen Dämmung ohne Verdichtung zu füllen. Diese soll einen ausreichenden Strömungswiderstand - typisch im Bereich von ca. 5 - 30 kPa·s/m² - aufweisen, um die Schallabsorption im Hohlraum zu gewährleisten, ohne die Entkopplungswirkung der Konstruktion zu beeinträchtigen. Gängige Materialien sind Mineral-, Holz- und Schafwolldämmung mit einer Rohdichte ≤50 kg/m^3. Die Dämmung verringert zudem die Wärmeabgabe aus der Heizschicht an die obere Wohnung, was gewünscht ist.

Das Heiz-/Kühlsystem ist entweder in die Platte integriert (1.1.3. und 1.2.2.) oder wird in Wärmeleitblechen geführt. Bei Letzteren wurden in den Varianten entweder die Ausführung als Gipsfaserplatte oder Lehmplatte betrachtet. Bei der Bezeichnung «Klimaelement» handelt es sich um eine Lehmplatte, in welche die Rohrleitungen bereits integriert sind. Ausserdem ist die Rohdichte i.d.R. höher, was ebenfalls ein Vorteil im Schallschutz darstellt und damit vergleichbarer mit den meist schwereren Lehmplatten ist.

Bei der Holzbalkendecke wurden Untervarianten mit einer Federschiene nicht betrachtet. Da davon auszugehen ist, dass die Unterkante der bestehenden Deckenbalken unregelmässig ist, ist eine Montage nicht praxistauglich, da eine gleichmässig Abhangebene erzielt werden muss.

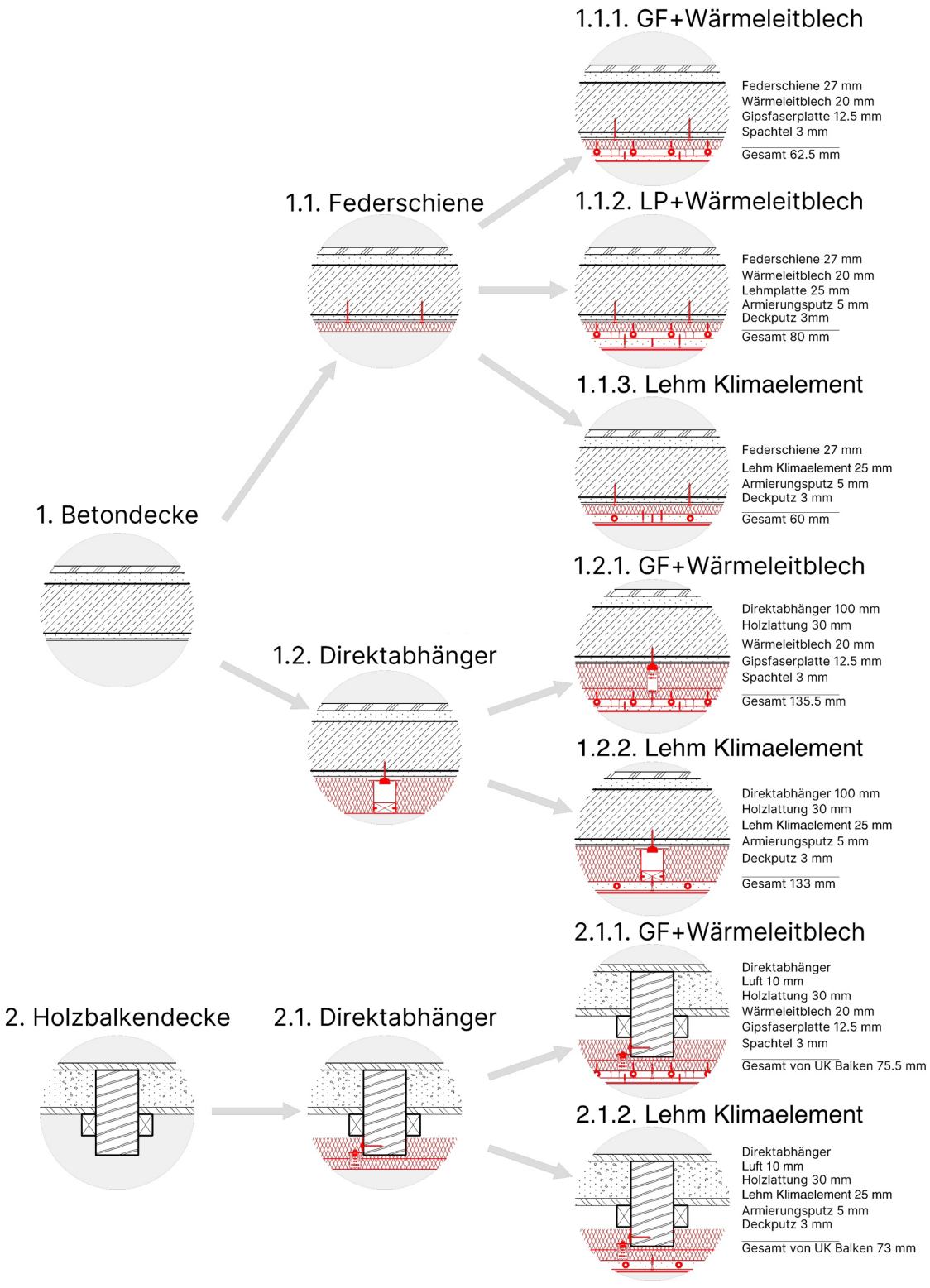
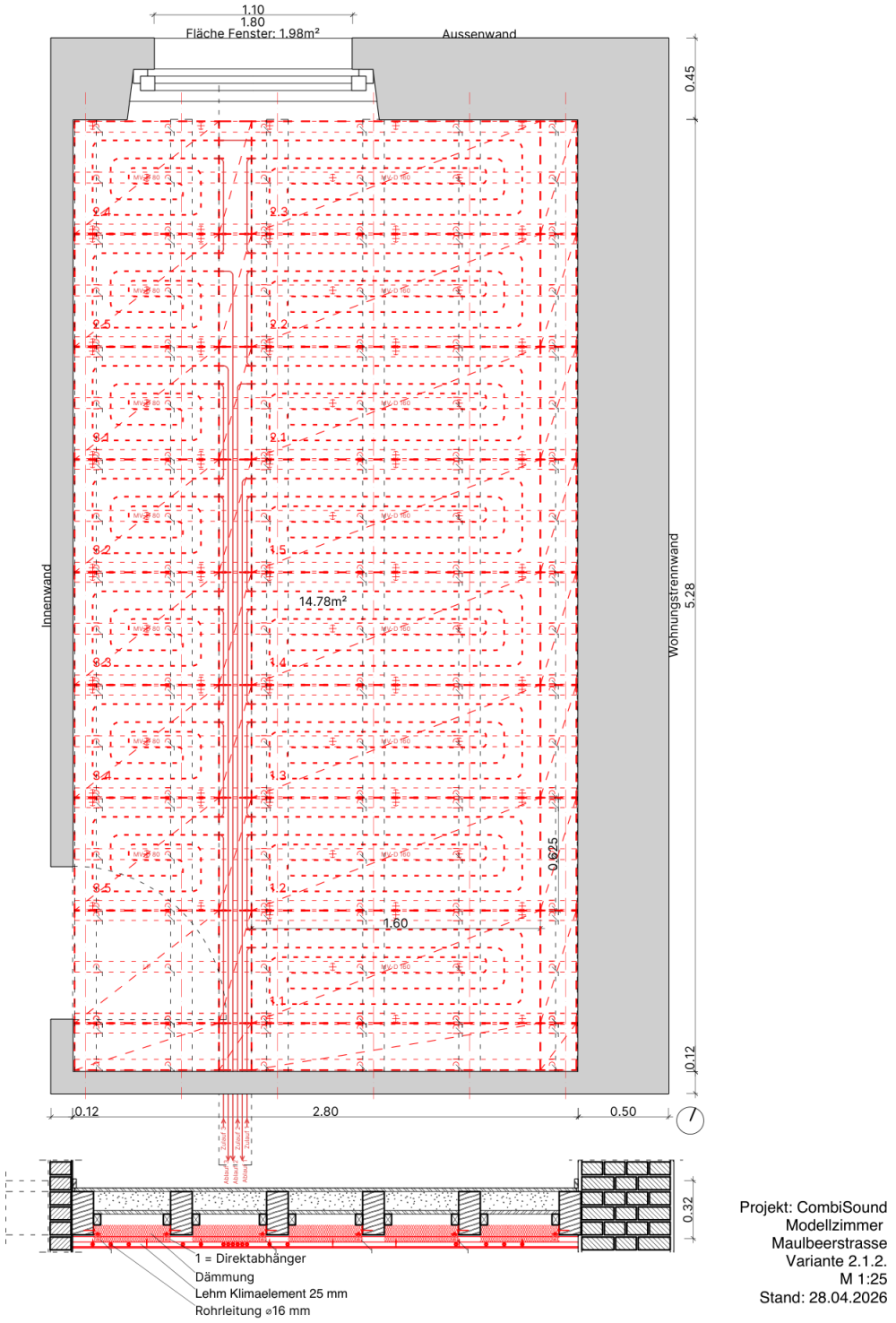
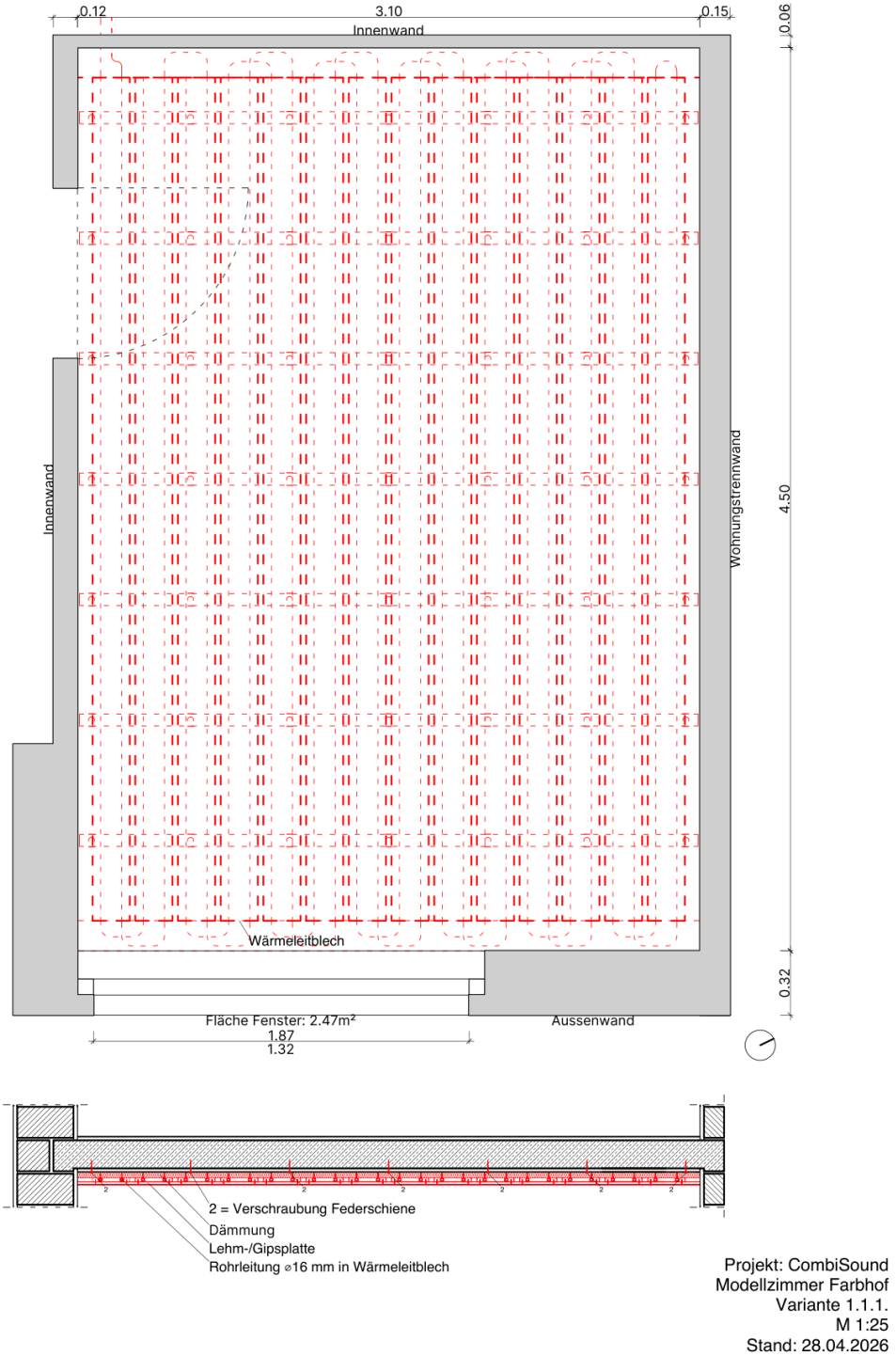


Abbildung 25: Betrachtete Deckenvarianten.

Die Platten oder Wärmeleitbleche werden systemkonform entweder mit Lehm verputzt und gestrichen oder gespachtelt und gestrichen. In die Putzlage wird vollflächig ein Gewebe eingelegt, dass sich an den Stössen ca. 10 cm überlappt. In beiden Varianten wurde von einer vollständigen Belegung mit der Flächenheizung ausgegangen. Hier dargestellt ist die Variante 2.1.2. mit Anordnung von Klimaelementen.



In Variante 1.1.1. wird das System mit sogenannten Wärmeleitblechen verwendet. Hierbei werden die Heizschlaufen innerhalb der Bleche verlegt. Im Anhang des Berichts sind zwei weitere Varianten der Maulbeerstrasse und des Farbhofs dargestellt.



6 Ergebnisse

6.1 Schallschutz

6.1.1. Vorgehen

Die Abschätzung der Schalldämmung im Gebäude beruht bei beiden Modellzimmern auf dem Schema des normierten Rechenverfahrens der EN ISO 12354 (siehe Abschnitt 2.1) [3], [4], das heisst die Direkt- und Flankenschalldämmung wurde gesondert ermittelt und anschliessend zur Beurteilung der Bauschalldämmung energetisch summiert.

Im Farbhof wurde die Schalldämmung der einzelnen Übertragungswege aus den Bauteilangaben, der Körperschalldämmung an den Bauteilflanken, der Verbesserung durch zusätzliche Massnahmen und der Bauteilgeometrie berechnet. Die Berechnung erfolgte frequenzabhängig mit dem sogenannten detaillierten Verfahren nach SN EN ISO 12354-1 [3] und -2 [4]. Die Herausforderung bei der Berechnung bestand in der Ermittlung geeigneter Eingangsdaten. Für die massiven Grundbauteile wurden Werte aus der Literatur [40] oder einschlägigen Bauteilkatalogen [41] verwendet. Die Stossstellen-Dämmmasse für die Bauteilflanken wurden gemäss SN EN ISO 12354-1, Anhang E.4, aus den Eigenschaften der gekoppelten Bauteile und die Verlustfaktoren zur Umrechnung auf die Bausituation gemäss SN EN ISO 12354-1, Anhang C.3, Gleichung C.6, ermittelt. Da für die betrachteten Deckenheizungssysteme unter anderem mit Lehmbauplatten keine belastbaren Messwerte vorliegen, wurde die Verbesserung ΔR bzw. ΔL konservativ als Funktion der Masse-Feder-Masse Resonanzfrequenz f_0 mit $\Delta L = 20lg(f/f_0)$ abgeschätzt, während hingegen bei idealer Entkopplung theoretisch Werte von $\Delta L = 40lg(f/f_0)$ [42] erreichbar sind. Das bedeutet, die Verbesserung steigt oberhalb der Resonanzfrequenz weniger steil mit der Frequenz an. Zusätzlich sind die Werte bei hohen Frequenzen auf maximal 30 dB begrenzt. Damit liegt die Abschätzung auf der sicheren Seite, da sie Effekte nicht mitabdeckt, die sich aus der Biegesteifigkeit der Beplankung (Materialeigenschaften, Lagenaufbau und Schichtdicken) sowie beispielsweise aus der Befestigung der Decke ergeben können. Diese Einflüsse werden insbesondere aufgrund der nur begrenzt verfügbaren Schallschutzangaben für thermisch aktivierte Decken in der vorliegenden vereinfachten Betrachtung nicht explizit berücksichtigt. Unterhalb der Resonanzfrequenz wurde die zusätzliche Masse als Verbesserung angesetzt (siehe Abschnitt 2.1.4). Für die weichfedernden Gehbeläge wurden Werte basierend auf Herstellermessungen abgleitet, die in der Einzahlangabe[1] gut mit den Literaturwerten übereinstimmen [43]. Nach der Ermittlung der frequenzabhängigen Luft- und Trittschallwerte der Einzelwege wurden diese energetisch aufsummiert und anschliessend die jeweiligen Einzahlangaben nach EN ISO 717-1 [12] und -2 [14] bestimmt.

In der Maulbeerstrasse beruht die Ermittlung der Luft- und Trittschalldämmung der Übertragungswege auf Angaben aus abgeschlossenen Forschungsvorhaben [44], [45] in Deutschland und den dabei erarbeiteten Planungsleitfäden [46],[47]. Hierin sind Angaben zu der Schalldämmung der Wege gemacht unter Berücksichtigung verschiedener Massnahmen und Konstruktionen. Die Planungswerte stammen von einer Vielzahl an Messungen, die entweder im Labor (Direktschalldämmung) oder repräsentativen Gebäuden (Flankenübertragung) durchgeführt wurden. Die Schlussfolgerungen der deutschen Untersuchung decken sich in den Grundaussagen auch mit einer österreichischen Studie [48], [49], jedoch stimmt die Deckenkonstruktionen in der Maulbeerstrasse sehr gut mit denen der deutschen Studie überein, so dass die Planungswerte aus dieser übernommen wurde. Basierend auf den Schlussfolgerungen wurden folgende Annahmen bei der Berechnung gemacht:
Bei der Flankenübertragung beim Luftschall sind ausschliesslich die Übertragungswege über die Mauerwerkswände zwischen der oberen und unteren Wand massgeblich, da diese die Schwachstelle darstellen. Diese Wege wurden jedoch abweichend von [47] nicht mit deren vereinfachten Modell sondern mit dem detaillierten, frequenzabhängigen Berechnungsmodel der SN EN ISO 12354-1 berechnet. Die Flankenübertragungswege zwischen der leichten Trenndecke und den Wänden (Wege Df und Fd)

[1] Einzahlangaben bzw. Einzahlwerte, wie zum Beispiel R_w, $L_{n,w}$ oder ΔL_w beschreiben die schalltechnische Leistung mit einer einzelnen Zahl/Wert. Sie werden aus den frequenzabhängigen Grössen abgeleitet, um zum Beispiel den Vergleich von Produkten oder die Konformität mit Anforderungswerten zu vereinfachen.

wurden, wie in den anderen Studien mit einer weitaus höheren Schalldämmung angesetzt und gingen somit nicht in die Berechnung ein.
Die Trittschalldämmung wurde in dieser Untersuchung ebenfalls frequenzabhängig durchgeführt. Es wurde jedoch die Flankenübertragung nur an den Wänden, in denen die Holzbalken in die Mauerwerkswand einbinden, betrachtet. Die Balkenlage wird gemäss [45], [49] effizient durch Trittschall angeregt und überträgt den Körperschall effizient an das Mauerwerk. Somit stellt die Verbindung mit den Balken beim Trittschall die Schwachstelle dar. Auf die Wände parallel zu den Balken wird von der Decke wenig Körperschall übertragen und somit werden diese bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Wegen der geringen Schalldämmung und den geplanten Fussbodenaufbauten ist für die betrachtete Situation in der Maulbeerstrasse der Übertragungsweg zwischen dem schwimmenden Fussbodenaufbau und der Trennwand (DFf) in dem Berechnungsmodell in [47] nicht relevant und wurde ausser Betracht gelassen.

6.1.2. Farbhof vor der Sanierung

Angaben zu den Bauteilen und Flanken wurden aus Bauteilangaben abgeschätzt, da eine Besichtigung oder gar eine Messung im Objekt nicht möglich war. Dadurch ist die Unsicherheit bei der Berechnung erhöht, es wurden aber konservative Annahmen bei der Abschätzung der Eingangsdaten gemacht, zum Beispiel wurden starre Verbindungen der Decken mit den flankierenden Wänden angenommen. Dies ist bei den lastabtragenden Wänden sicher der Fall. Bei den leichten, nicht-tragenden Innenwänden könnten unter Umständen Trennlagen (z.B. Natronpapier oder Teerpappe) als Gleitlager vorhanden sein, die die Kopplung der Bauteile und somit die Schallübertragung verringern.

In Tabelle 3 sind die in der Schallschutzberechnung berücksichtigten Bauteile sowie die für die Berechnung relevanten Angaben zur flächenbezogenen Masse m', deren Koinzidenzfrequenz f_c, sowie zur Orientierung das bewertete Schalldämmmass R_w und der bewertete Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$ der verwendeten Schallspektren angegeben. Die angegebenen flächenbezogenen Massen der Bauteile enthalten direktverbundene Putzschichten und die Ausgleichsschicht beim Boden. Der Verbindungstyp kennzeichnet bei den Flankenbauteilen, ob es sich um einen Kreuzstoss (X, Trenndecke läuft hinter Wand weiter) oder einen T-Stoss (T, Trenndecke endet an der Wand) handelt.

Tabelle 3: Beschreibung der Bausituation in der SN EN ISO 12354-Berechnung mit Angaben zu den angenommen Bauteileigenschaften und den schalltechnischen Kennwerten für den direkten Schalldurchgang (m': flächenbezogene Masse, f_c: Koinzidenzfrequenz, R_w: Schalldämm-Mass (direkt), $L_{,w}$: Norm-Trittschallpegel (direkt)

Bezeichnung	Verbindungstyp	Bauteil	m'	f_c	R_w	L_w
Trennbauteil	n.a.	140 mm Betondecke inkl. 20 mm Putz und 18 mm Glattstrich	380 kg/m^2	125 Hz	52 dB	77 dB
Flanke 1	T	280 mm Backsteinwand inkl. Innenputz	420 kg/m^2	50 Hz	56 dB	n.a.
Flanke 2	T	280 mm Backsteinwand inkl. Innen- und Aussenputz	458 kg/m^2	50 Hz	56 dB	n.a.
Flanke 3	X	150 mm Backsteinwand inkl. Putzschichten	267 kg/m^2	200 Hz	47 dB	n.a.
Flanke 4	X	60 mm Gipsdielenwand	72 kg/m^2	500 Hz	36 dB	n.a.

In Tabelle 4 sind die bereits vorhanden zusätzliche Massnahmen an den Bauteilen und deren für die Berechnung wesentlichen schallschutztechnischen Eigenschaften aufgelistet. In dem Bestand wurde

angenommen, dass der Linoleumbelag bereits erneuert wurde und eine geringe Trittschallminderung aufweist. Ansonsten sind keine weiteren Massnahmen ausgeführt.

Tabelle 4: Zusätzliche Massnahmen in der SN EN ISO 12354-Berechnung und Angaben zu deren Eigenschaften und Schallschutzwerte (m_{VS}': flächenbezogene Masse der zusätzlichen Schale (z.B. abgehängte Decke, Estrich), $d_{Hohlraum}$ Tiefe des Hohlraums bzw. s'$_{dyn}$ dynamische Steifigkeit der elastischen Zwischenschicht (z.B. Trittschalldämmplatte), ΔR_w bewertetes Luftschallverbesserungsmass, ΔL_w bewertete Trittschallpegelminderung)

Bezeichnung	**Bauteil**	**m'$_{VS}$**	**$d_{Hohlraum}$ bzw. s'$_{dyn}$**	**f_0**	**ΔR_w**	**ΔL_w**
Fussboden:	Linoleum	-	-	-	0 dB	8dB
Decke:	Keine	-	-	-	0 dB	-
Flankenwand 1:	Keine	-	-	-	0 dB	-
Flankenwand 2:	Keine	-	-	-	0 dB	-
Flankenwand 3:	keine	-	-	-	0 dB	-
Flankenwand 4:	keine	-	-	-	0 dB	-

In Abbildung 26 sind die berechneten Frequenzspektren der Standard-Schallpegeldifferenz D_{nT} (Luftschall) und des Standard-Trittschallpegels L_{nT} (Trittschall) für die relevanten Übertragungswege, sowie die resultierenden energetischen Summen dargestellt. In Tabelle 5 sind die daraus abgeleiteten Einzahlangaben $D_{nT,w}$ und unter Berücksichtigung der Spektrum-Anpassungswerte $D_{nT,w}$+C für den Luftschall sowie $L_{nT,w}$ und $L_{nT,w}$+C_i für den Trittschall zusammengefasst. Die Bauschalldämmung beschreibt die Gesamtübertragung zwischen den Räumen. Diese Werte werden auch zum Vergleich mit den Anforderungswerten der SIA 181 herangezogen. Die Flanken-Schalldämmung umfasst Schalldämmung aller Flankenwege an den vier Flanken. Die Schwachstelle ist in Tabelle 5 jeweils blau gekennzeichnet und hat beim Luftschall geringe Werte und beim Trittschall hingegen hohe Werte.

Tabelle 5: Ergebnisse der Schallschutzberechnung nach SN EN ISO 12354-1 und -2 im Farbhof vor der Sanierung. Bewertete Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ und bewertete Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ mit und ohne Berücksichtigung der Spektrum-Anpassungswerte C beziehungsweise C_i für die Gesamtübertragung (Bau-Schalldämmung) sowie die Direktübertragung und die Flankenübertragung. Die jeweilige Schwachstelle ist blau gekennzeichnet. Der Projektierungszuschlag K_P nach SIA 181 ist in den Ergebnissen nicht berücksichtigt.

	Luftschall		**Trittschall**	
	$D_{nT,w}$ [dB]	**$D_{nT,w}$ + C [dB]**	**$L'_{nT,w}$ [dB]**	**$L'_{nT,w}$ + C_i [dB]**
Bau-Schalldämmung:	**51**	**50**	**67**	**60**
Direkt-Schalldämmung:	53	52	64	58
Flanken-Schalldämmung:	55	54	63	52
Flanke 1	61	60	59	49
Flanke 2	63	61	58	48
Flanke 3	63	62	56	45
Flanke 4	58	57	54	42

Beim Luftschall in Tabelle 5 sind beide Einzahlwerte der Direktübertragung nur 2 dB geringer als die Übertragung über alle Flankenwege und ist somit in etwa ausgeglichen. Dies bestätigt auch der

Frequenzverlauf in Abbildung 26 (links). Die Direktübertragung dominiert die Bauschalldämmung bei tiefen Frequenzen, während hingegen die Flankenübertragung die Schwachstelle bei mittleren und hohen Frequenzen oberhalb von 500 Hz darstellt.

Ein Vergleich der Werte für die einzelnen Flanken zeigt auf, dass die Flanke 4 mit den Gipsdielenwänden die Schwachstelle bildet. Von den drei möglichen Übertragungswegen (Fd: Wand-Decke, Df: Boden-Wand, Ff: Wand-Wand) an dieser Flanke, hat der Ff-Weg die geringste Schalldämmung, da beide Flankenwände leicht sind und die gleiche Masse haben, und zudem wegen der geringen Steifigkeit einen ungünstigen Einbruch der Schalldämmung bei 500 Hz aufweisen. Es ist daher zur erwarten, dass eine Massnahme an der Trenndecke zur Verbesserung der Direktschalldämmung in diesem Fall nur eine beschränkte Verbesserung der Bauschalldämmung bringen wird.

Beim Trittschall in Tabelle 5 ist der Einzahlwert $L_{nT;w}$ der Direktübertragung nur 1 dB höherer als die Übertragung über alle Flankenwege, während hingegen unter Berücksichtigung der Spektrum-Anpassungswerte C_i, welche den tieferen Frequenzbereich oberhalb von 100 Hz deutlich stärker gewichten, die Direktübertragung mit 58 dB deutlich grösser als die Flankenübertragung ist. Dies bestätigt auch der Frequenzverlauf in Abbildung 26 (rechts). Die Direktübertragung dominiert die Bauschalldämmung im gesamten Frequenzbereich unterhalb 1.6 kHz, mit teils über 10 dB höheren Trittschallpegeln, während hingegen die Flankenübertragung die Schwachstelle bei den hohen Frequenzen darstellt.

Ein Vergleich der Werte für die einzelnen Flanken zeigt nun ein umgekehrtes Bild wie beim Luftschall. Beim Trittschall übertragen nun die Flanke 1 und Flanke 2 mit den schweren Backsteinwänden am meisten, während die Flanke 4 mit den Gipsdielen Wänden am wenigsten überträgt. Da beim Trittschall nur der Df-Weg vom Boden zur Wand angeregt wird, ist nun das Masseverhältnis der gekoppelten Bauteile, welches die Körperschalldämmung an der Bauteilverbindung beeinflusst, zwischen der Trenndecke und den schweren Mauerwerkswänden ungünstiger als bei der leichten Gipsdielenwand.

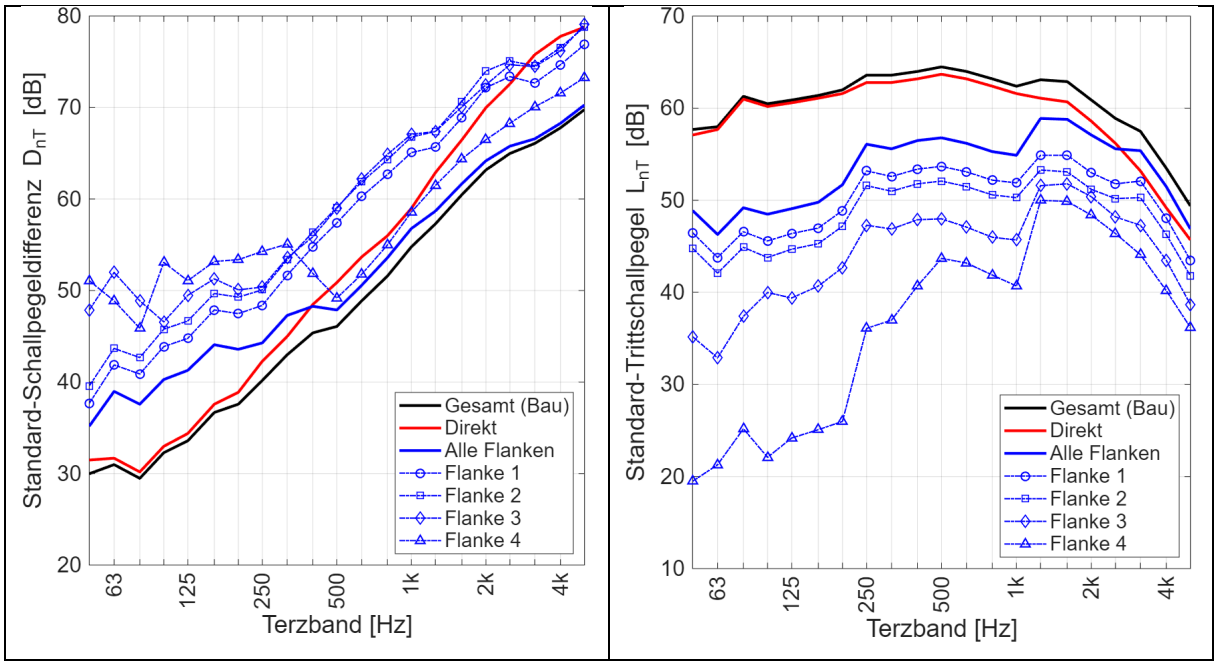


Abbildung 26: Ergebnisse der Schallschutzberechnungen nach SN EN ISO 12354 der massgeblichen Übertragungswege vor der Sanierung; links: Luftschalldämmung - Frequenzspektren der Standard-Schallpegeldifferenz D_{nT} (höhere Werte ⇒ besser), rechts: Trittschalldämmung - Frequenzspektren des Standard-Trittschallpegels L_{nT} (geringere Werte ⇒ besser)

Da bei der Trittschalldämmung die Flankenübertragung unterhalb 1.6 kHz signifikant geringer ist, besteht mit einer Massnahme an der Decke sehr grosses Potenzial zur Verbesserung der Trittschall-

dämmung in diesem Frequenzbereich. Gleichzeitig müssen aber auch Massnahmen vorgesehen werden, welche die Flankenübertragung bei hohen Frequenzen reduzieren.

In Abbildung 27 sind die berechneten Werte wie in Abschnitt 2.4.1 mit den baurechtlichen Anforderungsniveaus der SIA 181 verglichen, die gegenwärtig für Neubauten und Sanierung zu erfüllen sind. Zu den Angaben der Bau-Schalldämmung in Tabelle 5 wurde, wie in der SIA 181 gefordert, ein Projektierungszuschlag K_P = 2 dB als eine Art Sicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung etwaiger Unsicherheiten bei der Planung und Ausführung hinzugeschlagen. Beim Luftschallschutz liegt die Berechnung für den Bestand damit 4 dB unterhalb der Mindestanforderungen, die Anforderungen wären bei einem gerade sanierten Objekt oder einem erstellten Neubau also nicht erfüllt. Beim Trittschallschutz ist der Wert des $L'_{nT,w}$ zur Ermittlung des Projektierungswertes L'_d massgeblich und dieser liegt sehr deutlich (14 dB) oberhalb der geforderten verringerten Mindestanforderung für Sanierungen und wäre somit ebenfalls nicht erfüllt.

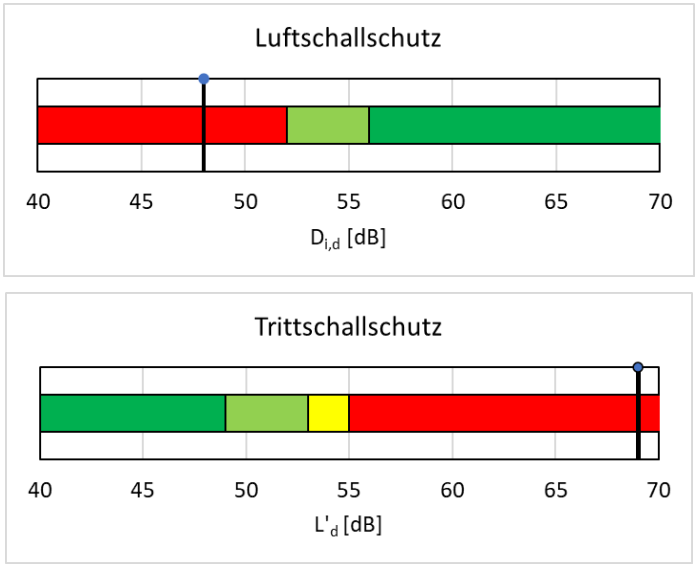


Abbildung 27: Bewertung des Schallschutzes im Farbhof vor der Sanierung. Vergleich der Projektierungswerte ermittelt aus Schallschutzberechnungen nach SN EN ISO 12354 unter Berücksichtigung des Projektierungszuschlags K_p = 2 dB (schwarze Linie) mit den Anforderungsniveaus der SIA 181:rot: unterhalb der Anforderung, gelb: verringerte Anforderungen bei Sanierung erfüllt (nur Trittschall), hellgrün: Mindestanforderungen erfüllt (Mietwohnungen), dunkelgrün: erhöhte Anforderungen erfüllt (Wohneigentum);
oben: Projektierungswert für den Luftschallschutz $D_{i,d}$ (höhere Werte ⇒ besser)
unten: Projektierungswert für den Trittschallschutz L'_d (geringere Werte ⇒ besser)

6.1.3. Farbhof nach der Sanierung

Die im Rahmen der Sanierung geplanten Massnahmen sind in Tabelle 6 aufgeführt. Die zugrunde gelegte Grundkonstruktion ist identisch mit jener vor der Sanierung (siehe Tabelle 3).

In den Räumen ist als thermisch aktivierte abgehängte Decke die Variante 1.1.3 in Abbildung 25 mit einer Gesamtaufbauhöhe von etwa 60 mm vorgesehen, wobei der Hohlraum mit porösem Absorptionsmaterial gefüllt ist. Diese Variante stellt schallschutztechnisch den ungünstigsten Fall dar, da sich mit $f_0 \approx 55$ Hz eine vergleichsweise hohe Resonanzfrequenz ergibt (siehe Tabelle 6). Sie ist in etwa gleichwertig mit der Variante 1.1.1 mit den leichteren Gipsfaserplatten ($m'_{VS} \approx 26$ kg/m^2 (inkl. Wärmeleitblech)) und der grösseren Hohlraumtiefe ($d_{Hohlraum} \approx 47$ mm). Bei den übrigen Varianten ist der Deckenhohlraum grösser, so dass sich selbst bei der Verwendung der leichteren Gipsfaserplatten eine tiefere Resonanzfrequenz ergibt.

Tabelle 6: Zusätzliche Massnahmen in der SN EN ISO 12354-Berechnung und Angaben zu deren Eigenschaften und Schallschutzwerte (m_{VS}': flächenbezogene Masse der zusätzlichen Schale (z.B. abgehängte Decke, Estrich), $d_{Hohlraum}$ Tiefe des Hohlraums bzw. s'$_{dyn}$ dynamische Steifigkeit der elastischen Zwischenschicht (z.B. Trittschalldämmplatte), ΔR_w bewertetes Luftschallverbesserungsmass, ΔL_w bewertete Trittschallpegelminderung)

Bezeichnung	**Bauteil**	**m'$_{VS}$**	**$d_{Hohlraum}$ bzw. s'$_{dyn}$**	**f_0**	**ΔR_w**	**ΔL_w**
Fussboden:	Fertigparkett auf trittschalldämmender Unterlage	-	-	-	0 dB	15dB
Decke:	Klimadeckensystem, Var. 1.1.3	~50 kg/m^2	~27 mm	~55 Hz	14 dB	-
Flankenwand 1	keine	-	-	-	0 dB	-
Flankenwand 2	keine	-	-	-	0 dB	-
Flankenwand 3	keine	-	-	-	0 dB	-
Flankenwand 4	keine	-	-	-	0 dB	-

Zusätzlich ist im Wohnbereich ein dünner Fertigparkettbelag auf trittschalldämmender Unterlage mit einer Aufbauhöhe von ca. 13–15 mm erforderlich. Diese minimale Massnahme ist notwendig, um die Trittschalleinleitung in die Grundkonstruktion zu reduzieren, eine ausreichende Trittschalldämmung der Flankenwege sicherzustellen und dadurch zusätzliche Vorsatzschalen an den flankierenden Wänden zu vermeiden. Diese Massnahme ist wegen ihrer geringen Aufbauhöhe mit einem einfachen Austausch der Bodenbeläge vergleichbar und stellt keinen signifikanten Höhenversatz im Vergleich zum Bestand dar. In den Badezimmern kann alternativ zum Parkett ein Plattenbelag auf trittschalldämmender Belagsunterlage oder ein für Feuchträume geeigneter weichfedernder Bodenbelag (z. B. auf Naturkautschuk-, Gummigranulatbasis) mit gleicher oder höherer bewerteter Trittschallminderung eingesetzt werden.
Zwar sind Fussbodenbeläge bei Neubauten grundsätzlich nicht für den Schallschutznachweis anrechenbar. Da es sich hier jedoch um dauerhafte Systeme handelt, die nicht ohne Weiteres durch die Mieter ausgetauscht werden können, erscheint es bei Sanierungen fachlich begründet und sachgerecht, diese Massnahmen schallschutztechnisch anzurechnen bzw. von den Genehmigungsbehörden zu akzeptieren.

In Abbildung 28 und Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Berechnungen in gleicher Weise wie bereits in Abschnitt 6.1.2 dargestellt. Beim Luftschall zeigt sich gemäss Tabelle 7, dass mit den oben aufgeführten Massnahmen bei der Bauschalldämmung mit einem $D_{n,T,w}$ = 55 dB bzw. $D_{n,T,w}$+C = 54 dB gegenüber dem Ausgangszustand in Tabelle 5 nur eine Verbesserung von bis zu 4 dB erreicht wird. Die Schalldämmung aller Flankenwege bleibt in etwa auf dem Niveau wie vor der Sanierung, während die Direktschalldämmung sich in Folge der abgehängten Decke um bis zu 12 dB auf $D_{n,T,w}$ = 65 dB bzw. $D_{n,T,w}$+C = 62 dB verbessert hat. Damit ist nun die Flankenübertragung die Schwachstelle. Dies bestätigt auch der Frequenzverlauf in Abbildung 28 (links). Die Direktschalldämmung ist wegen der Feder-Masse-Feder-Resonanz der Decke für die Gesamtübertragung nur bei Frequenzen unterhalb 160 Hz relevant. Bei höheren Frequenzen dominiert hingegen die Flankenübertragung.

Tabelle 7: Ergebnisse der Schallschutzberechnung nach SN EN ISO 12354-1 und -2 im Farbhof nach der Sanierung. Bewertete Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ und bewertete Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ mit und ohne Berücksichtigung der Spektrum-Anpassungswerte C beziehungsweise C_i für die Gesamtübertragung (Bau-Schalldämmung) sowie die Direktübertragung und die Flankenübertragung. Die jeweilige Schwachstelle ist blau gekennzeichnet. Der Projektierungszuschlag K_P nach SIA 181 ist nicht berücksichtigt.

	Luftschall		Trittschall	
	$D_{nT,w}$ [dB]	$D_{nT,w} + C$ [dB]	$L'_{nT,w}$ [dB]	$L'_{nT,w} + C_i$ [dB]
Bau-Schalldämmung:	**55**	**54**	**51**	**49**
Direkt-Schalldämmung:	65	62	44	45
Flanken-Schalldämmung:	55	55	51	49
Flanke 1	64	62	47	44
Flanke 2	65	64	46	44
Flanke 3	64	63	42	39
Flanke 4	58	57	38	32

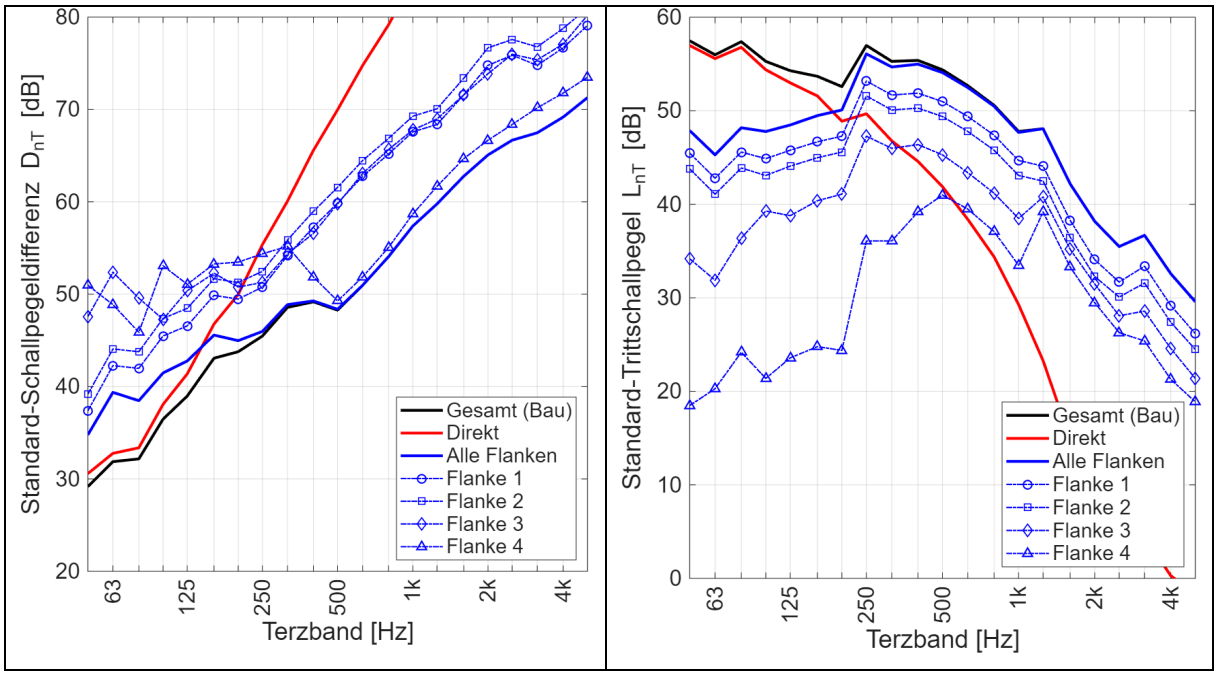


Abbildung 28: Ergebnisse der Schallschutzberechnungen nach SN EN ISO 12354 der massgeblichen Übertragungswege nach der Sanierung; links: Luftschalldämmung - Frequenzspektren der Standard-Schallpegeldifferenz D_{nT} (höhere Werte ⇒ besser), rechts: Trittschalldämmung - Frequenzspektren des Standard-Trittschallpegels L_{nT} (geringere Werte ⇒ besser)

Ein Vergleich der Werte für die einzelnen Flanken zeigt wiederum auf, dass die Flanke 4 mit den Gipsdielenwänden unverändert die Schwachstelle bildet, da die konstruktiven Massnahmen an der Decke keinen Einfluss auf den Df- und Ff-Weg haben.

Beim Trittschall zeigt sich gemäss Tabelle 7 im Vergleich zu den Werten vor der Sanierung (vgl. Tabelle 5) ein ähnliches Bild. Die Bau-Trittschallpegel verringert sich hier um 16 dB auf $L'_{nT,w}$ = 51 dB bzw. um 10 dB auf $L'_{nT,w}+C_i$ = 49 dB. Die Verbesserung fällt damit deutlich höher als beim Luftschall aus.

Ursache hierfür ist der weichfedernde Bodenbelag, der zusätzlich zur abgehängten Decke eine Trittschallminderung bewirkt. Bei der Direktübertragung reduziert sich der Trittschallpegel gegenüber der Ausgangsituation um 20 dB auf $L_{nT,w}$ = 44 dB bzw. um 13 dB auf $L_{nT,w}+C_i$ = 45 dB. Bei der Flankenübertragung wirkt hingegen nur der Bodenbelag, so dass sich geringere Verbesserungen um 12 dB auf $L_{nT,w}$ = 51 dB bzw. um 3 dB auf $L_{nT,w}+C_i$ = 49 dB ergeben. Entsprechend trägt die Direktschallübertragung – analog zum Luftschallfall - nur bei tiefen Frequenzen unterhalb 160 Hz zur Gesamtschalldämmung bei (siehe Abbildung 28 (rechts)). Bei höheren Frequenzen dominiert wiederum die Übertragung über die Flankenwege.

Da der Fussbodenaufbau für alle Flanken die gleiche Verbesserung ergibt, ändert sich deren relative Bedeutung nicht. Wie im Ausgangszustand vor der Sanierung übertragen die Flanken 1 und 2 mit den schweren Backsteinwänden den grössten Anteil des Trittschalls, während die Flanke 4 mit den Gipsdielen Wänden am wenigsten überträgt.

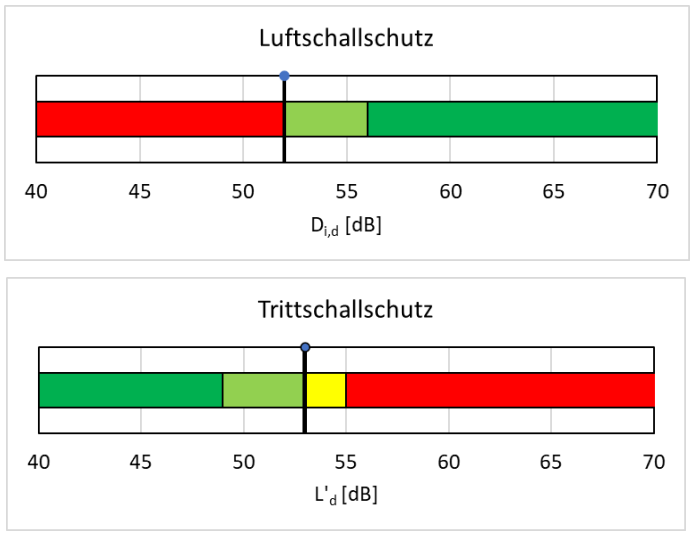


Abbildung 29: Bewertung des Schallschutzes im Farbhof nach der Sanierung (mit Variante 1.1.3). Vergleich der Projektierungswerte ermittelt aus Schallschutzberechnungen nach SN EN ISO 12354 unter Berücksichtigung des Projektierungszuschlags K_p = 2 dB (schwarze Linie) mit den Anforderungsniveaus der SIA 181:rot: unterhalb der Anforderung, gelb: verringerte Anforderungen bei Sanierung erfüllt (nur Trittschall), hellgrün: Mindestanforderungen erfüllt (Mietwohnungen), dunkelgrün: erhöhte Anforderungen erfüllt (Wohneigentum);
oben: Projektierungswert für den Luftschallschutz $D_{i,d}$ (höhere Werte ⇒ besser)
unten: Projektierungswert für den Trittschallschutz L'_d (geringere Werte ⇒ besser)

In Abbildung 29 sind die berechneten Werte – analog zu Abschnitt 2.4.1 - mit den baurechtlichen Anforderungsniveaus der SIA 181 verglichen, die gegenwärtig für Neubauten und Sanierung zu erfüllen sind. Zu den Angaben der Bau-Schalldämmung in Tabelle 7 wurde, wie in der SIA 181 gefordert, ein Projektierungszuschlag K_P = 2 dB berücksichtigt. Mit den vorgeschlagenen Massnahmen werden die Mindestanforderungen an den Luft- und Trittschallschutz somit gerade eingehalten – und dies trotz durchgehend konservativer Annahmen in der Berechnung. Insbesondere wurden konsequent Worst-Case-Situationen angesetzt (z. B. die Flankenübertragung über Gipsdielenwände beim Luftschall) sowie vorsichtig gewählte Reduktionswerte für die schalldämmende Wirkung der Massnahmen verwendet. Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass bei einer detaillierteren Projektierung und präziseren Eingangsdaten tendenziell günstigere akustische Kennwerte erzielt werden können.

Die gewählte Deckenvariante 1.1.3 ergibt aus schalltechnischer Sicht die geringste Verbesserung, da sie die höchste Resonanzfrequenz aufweist. Die übrigen in Abbildung 25 dargestellten Deckenvarianten ergeben zwar etwas höhere Verbesserungen, diese haben jedoch keinen Einfluss auf die Beurteilung hinsichtlich der baurechtlichen Anforderungen. Ursache hierfür ist, dass in dem dort relevanten Frequenzbereich - bereits bei der mit der Variante 1.1.3 erreichten Verbesserung - sowohl für die Luft- als auch die Trittschalldämmung die Flankenübertragung dominiert. Diese wird durch die abgehängte

Decke nicht beeinflusst. Um bessere für die baurechtliche Beurteilung relevante Werte zu erreichen, sind daher gezielte Massnahmen an den Flanken notwendig: Beim Luftschallschutz insbesondere an den leichten Gipsdielenwänden sowie beim Trittschallschutz am Fussbodenaufbau oder an den schweren Wänden der Flanken 1 und 2.

Die übrigen Deckenvarianten in Abbildung 25 sind dennoch aus schalltechnischer Sicht empfehlenswert. Aufgrund der tieferen Resonanzfrequenzen wirken sie sich insbesondere beim Trittschall positiv aus, da sie die als besonders störend empfunden tiefen Frequenzen der Direktübertragung wirksam reduzieren. Zudem sind sie infolge der grösseren Hohlräume weniger anfällig für Ausführungsfehler, beispielsweise in Form von Schallbrücken durch eingeklemmte Leitungen oder durch zu lange Befestigungsmittel, die die Deckenschalen mit dem Grundbauteil verbinden.

Weiterhin muss beachtet werden, dass sich bei der Trittschalldämmung bei kleineren Empfangsraumvolumen schlechtere Werte ergeben. Jedoch beträgt diese Korrektur bei für Aufenthaltsräumen üblichen Raumvolumen maximal 1-2 dB. Bei Nicht-Aufenthaltsräumen (zum Beispiel Bad; WC; Küche) gelten ohnehin geringere Anforderungswerte. Bei der Luftschalldämmung ist die Raumkorrektur abhängig von der Raumhöhe, die in diesem Beispiel bereits minimal zulässig ist, so dass sich hier bei grösseren Raumhöhen geringfügig bessere Werte von max. 1-2 dB ergeben.

Neben diesen Unsicherheiten ist es viel wichtiger, dass sich durch die vorgeschlagenen Massnahmen eine deutliche Reduzierung der Trittschallpegels von $L'_{nT,w}$ von 16 dB im Vergleich zum Bestand ergeben. Diese entspricht subjektiv deutlich mehr als einer Halbierung der wahrgenommenen Lautstärke.

6.1.4. Maulbeerstrasse vor der Sanierung

Die Eingangsdaten für die Schallschutzberechnung sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Das Deckensystem in der Maulbeerstrasse stimmt sehr gut mit der Grundkonstruktion der Decke in der Ausgangssituation, wie in den Forschungsberichten [44], [47] beschrieben, überein, sodass für die Berechnungen in dieser Studie direkt die frequenzabhängigen Schallschutzdaten - das heisst die Direktübertragung beim Luft- und Trittschall sowie die Flankenwege beim Trittschall - aus den Anhängen der Forschungsberichte übernommen wurden. Auf die Darstellung und Analyse der frequenzabhängigen Berechnungsergebnisse wird jedoch hier und bei den Sanierungsvarianten verzichtet, da sie für die wesentlichen Sachverhalte nur eine untergeordnete Rolle spielt. Für die Direktschalldämmung wurde das Deckensystem mit der schwersten Schüttung von 120 kg/m^2 und einer Unterdecke mit einer Putzmasse von 15 kg/m^2 verwendet. Bei einer Schütthöhe von 16 cm, wie sie in der Maulbeerstrasse vorliegt, ergibt sich eine Schüttungsdichte von 750 kg/m^3. Dies entspricht der Dichte organischer Schüttungen aus Pflanzenfasern oder leichter mineralischer Schüttungen und liegt somit schalltechnisch auf der konservativen Seite.

Bei der Berechnung der Luftschalldämmung wurde angenommen, dass das Mauerwerk aus verputzten Backsteinen mit einer Dichte von 1’600 kg/m^3 besteht. Für das sogenannte Stossstellendämm-Mass K_{ij} wurde bei der an der Trenndecke durchlaufenden Aussenwand und Wohnungstrennwand ein Wert von 0 dB angesetzt [47]. Dies bedeutet, dass die Körperschallübertragung durch die Einbindung der Decke nicht abgeschwächt wird. Bei den beiden dünneren Innenwänden ist das Mauerwerk im Bereich der Deckenanschlüsse nicht durchlaufend. Hier wurde daher ein etwas höheres, jedoch weiterhin konservatives Stossstellendämm-Mass von K_{ij} = 5 dB angenommen.

Bei der Berechnung der Trittschalldämmung wurde an den Bauteilstössen, an denen die Deckenbalken senkrecht in die Mauerwerkswand einbinden, der Flankentrittschallpegel für den gesamten Übertragungsweg aus [47] übernommen. Die flächenbezogenen Massen der dort betrachteten Wände stimmen sehr gut mit denen in der Maulbeerstrasse überein.

In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Berechnung, die nach dem Schema der SN EN ISO 12354-1 und -2 durchgeführt wurde, in Form der Einzahlwerte dargestellt. Die jeweiligen Schwachstellen sind wiederum blau gekennzeichnet.

Für die Bestandssituation ist sowohl bei der Luftschall- als auch bei der Trittschallübertragung der Direktdurchgang durch die Trenndecke massgeblich. Die Flankenschalldämmung ist sowohl beim Luft- als auch beim Trittschall jeweils um mindestens 10 dB besser als die Direktschalldämmung.

Tabelle 8: Beschreibung der Bausituation in der SN EN ISO 12354-Berechnung mit Angaben zu den angenommen Bauteileigenschaften und den schalltechnischen Kennwerten für den direkten Schalldurchgang (m': flächenbezogene Masse, f_c: Koinzidenzfrequenz, R_w: Schalldämm-Mass (direkt), $L_{,w}$: Norm-Trittschallpegel (direkt)

Bezeichnung	Verbindungstyp	Bauteil	m'	R_w	$L_{n,w}$
Trennbauteil	n.a.	Balkendecke mit Schüttung 120 kg/m² nach [46]	n.a.	52 dB	69 dB
Flanke 1	¦* / n.r.**	250 mm Backsteinwand inkl. Innenputz	432 kg/m²	56 dB	n.a.
Flanke 2	¦* / Df **	250 mm Backsteinwand inkl. Innenputz	432 kg/m²	56 dB	n.a.
Flanke 3	¦* / n.r.**	120 mm Backsteinmauerwerk: Ausmauerung zwischen Holzstielen inkl. Putzschichten	224 kg/m²	50 dB	n.a.
Flanke 4	¦* / Df**	120 mm Backsteinmauerwerk: Ausmauerung zwischen Holzstielen inkl. Putzschichten	224 kg/m²	50 dB	n.a.

* Bei Luftschallübertragung wird nur der Flankenweg zwischen der oberen und unteren Mauerwerkswand (Weg Ff) betrachtet. Bei Flanke 1 und Flanke 2 (Aussenwand und Haustrennwand) wurde in der Berechnung konservativ K_{ij} = 0 dB (Abbildung 19 in [47]) angesetzt. Bei Flanke 3 und Flanke 4 wurde K_{ij} = 5 dB geringfügig erhöht, da das Mauerwerk (Ausmauerung zwischen Holzrahmen) an der Trenndecke unterbrochen ist.

** Trittschall: Flanke 1 und Flanke 3 sind parallel zur Balkenrichtung der Decke. Körperschallübertragung erfolgt beim Trittschall massgeblich durch die ins Mauerwerk einbindenden Balken. Daher sind diese Flanken nicht relevant.

*** Trittschall: Für die Flankenübertragung auf dem Weg Df wurden Werte $L_{n,Df}$ aus Abbildung 13 in [47] bzw. Datenblättern im Anhang angesetzt.

Tabelle 9: Ergebnisse der Schallschutzberechnung im Schema nach SN EN ISO 12354-1 und -2 in der Maulbeerstrasse vor der Sanierung. Bewertete Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ und bewertete Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ mit und ohne Berücksichtigung der Spektrum-Anpassungswerte C beziehungsweise C_i für die Gesamtübertragung (Bau-Schalldämmung) sowie die Direktübertragung und die Flankenübertragung. Die jeweilige Schwachstelle ist blau gekennzeichnet. Der Projektierungszuschlag K_P nach SIA 181 ist nicht berücksichtigt.

	Luftschall		Trittschall	
	$D_{nT,w}$ [dB]	$D_{nT,w}$ + C [dB]	$L'_{nT,w}$ [dB]	$L'_{nT,w}$ + C_i [dB]
Bau-Schalldämmung:	47	46	**68**	**67**
Direkt-Schalldämmung:	47	47	67	64
Flanken-Schalldämmung:	57	56	54	54
Flanke 1 *	65	64	n.r.	n.r.
Flanke 2	68	66	50	49
Flanke 3 *	60	59	n.r.	n.r.
Flanke 4	63	61	55	54

*Flanke 1 und Flanke 3 sind parallel zur Balkenrichtung der Decke. Körperschallübertragung erfolgt beim Trittschall massgeblich durch die ins Mauerwerk einbindenden Balken. Daher sind diese Flanken nicht relevant.

In Abbildung 30 sind die Ergebnisse der Schallschutzberechnung mit den derzeitig für Bauvorhaben geltenden baurechtlichen Anforderungen verglichen. Die Projektierungswerte der Luftschalldämmung $D_{i,d}$ liegen 9 dB unter den Mindestanforderungen und der Trittschalldämmung L'_d sogar 15 dB oberhalb der verringerten Anforderungen für die Sanierung.

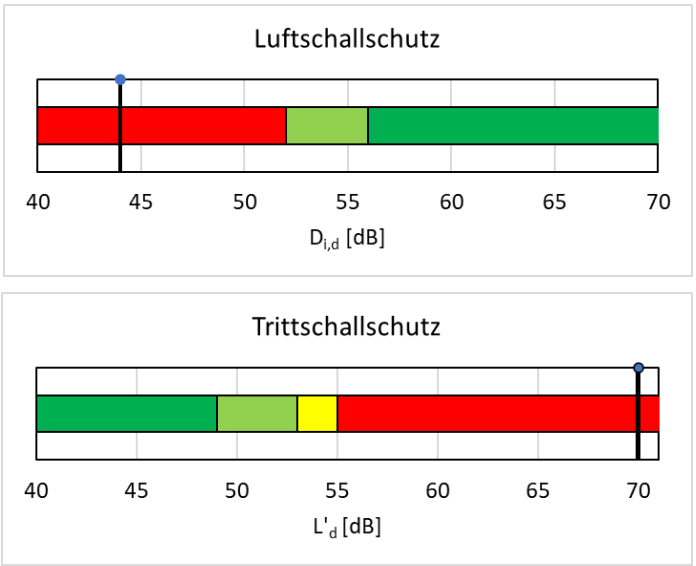


Abbildung 30: Bewertung des Schallschutzes in der Maulbeerstrasse vor der Sanierung. Vergleich der Einzahlangaben der Schallschutzberechnungen im Schema der SN EN ISO 12354 unter Berücksichtigung des Projektierungszuschlags K_p = 2 dB (schwarze Linie) mit den Anforderungsniveaus der SIA 181:rot: unterhalb der Anforderung, gelb: verringerte Anforderungen bei Sanierung erfüllt (nur Trittschall), hellgrün: Mindestanforderungen erfüllt (Mietwohnungen), dunkelgrün: erhöhte Anforderungen erfüllt (Wohneigentum);
oben: Projektierungswert für den Luftschallschutz $D_{i,d}$ (höhere Werte ⇒ besser)
unten: Projektierungswert für den Trittschallschutz L'_d (geringere Werte ⇒ besser)

6.1.5. Maulbeerstrasse nach der Sanierung

In der Maulbeerstrasse werden zwei Sanierungsschritte analysiert, um deren Einfluss auf den Schallschutz zu verdeutlichen. Im ersten Schritt wird nur der Einbau der thermisch aktivierten Decke betrachtet. Im zweiten Schritt wird zusätzliche eine moderate Massnahme am Fussboden berücksichtigt, beispielsweise in Form einer Aufdopplung des Dielenbelags. An der Tragkonstruktion der Trenndecke, sowie den flankierenden Wänden und deren Anschlüsse mit der Trenndecke sind keine weiteren Massnahmen vorgesehen.

6.1.5.1. Ersatz der Putzträgerkonstruktion durch eine abgehängte thermisch aktivierte Decke

Im ersten Schritt wurde in der Berechnung die Bestandsdecke, das heisst der Putz auf der Schilfträgermatte, durch eine thermisch aktivierte abgehängte Decke gemäss Variante 2.1.1 der Abbildung 25 in der Berechnung ersetzt, ansonsten wurden keine weiteren Massnahmen vorgesehen (siehe Tabelle 10).

Da für diese Deckenkonstruktionen keine Labormessdaten vorliegen, wurden die Eingangsdaten für die erreichbare Schallschutzverbesserung aus den verfügbaren Messergebnissen in [46] abgeleitet. Dort sind Ergebnisse für zwei Deckenvarianten mit jeweils doppelter Beplankung (12.5 mm Gipsfaserplatten, $m'_{VS} \approx 29.6$ kg/m^2) angegeben: einerseits auf Federschienen mit einem Abstand von 13 mm zu den Deckenbalken und andererseits mit Abhängern mit PUR-Elastomeren mit 130 mm Abstand zu den Deckenbalken.

Die betrachteten Varianten 2.1.1 und 2.1.2 unterscheiden sich jedoch durch einen grösseren bzw. geringeren Schalenabstand und durch eine grössere flächenbezogene Masse bei Variante 2.1.2. Die durch die Variante 2.1.1 und 2.1.2 erreichbare Verbesserung liegt daher zwischen den Ergebnissen der beiden untersuchten Referenzvarianten in [47]. Als einfache Näherung wurde in der Berechnung der arithmetische Mittelwert der Verbesserungen dieser beiden Deckenvarianten angesetzt.

Tabelle 10: Zusätzliche Massnahmen in der Berechnung nach SN EN ISO 12354 und Angaben zu deren Eigenschaften und Schallschutzwerte (m_{VS}': flächenbezogene Masse der zusätzlichen Schale (z.B. abgehängte Decke, Estrich), $d_{Hohlraum}$ Tiefe des Hohlraums zwischen Untersicht der Stakung und Deckenoberseite, ΔR_w bewertetes Luftschallverbesserungsmass, ΔL_w bewertete Trittschallpegelminderung)

Bezeichnung	**Bauteil**	**m'_{VS}**	**$d_{Hohlraum}$**	**ΔR_w**	**ΔL_w**
Fussboden:	keine	-	-	0 dB	0 dB
Decke:	Klimadecken-system Var. 2.1.1/2.1.2	≥26 kg/m^2	≥90 mm	≥15 dB*	≥14 dB*
Flankenwand 1	keine	-	-	0 dB	-
Flankenwand 2	keine	-	-	0 dB	-
Flankenwand 3	keine	-	-	0 dB	-
Flankenwand 4	keine	-	-	0 dB	-

* Da es keine normierten Angaben für die Luftschallverbesserung bzw. Trittschallminderung bei abgehängten Decken im Holz-/Leichtbau gibt, beziehen sich diese Grössen auf die direkte Differenz zwischen den Einzahlwerte der Trenndecke im Bestand mit der Putzschicht auf der Schilfmatte und wenn diese durch eine thermisch aktivierte abgehängte Decke ersetzt wird.

Tabelle 11: Ergebnisse der Schallschutzberechnung im Schema nach SN EN ISO 12354-1 und -2 in der Maulbeerstrasse nach der Sanierung der Decke (keine Massnahme am Boden). Bewertete Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ und bewertete Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ mit und ohne Berücksichtigung der Spektrum-Anpassungswerte C beziehungsweise C_i für die Gesamtübertragung (Bau-Schalldämmung) sowie die Direktübertragung und die Flankenübertragung. Die jeweilige Schwachstelle ist blau gekennzeichnet. Der Projektierungszuschlag K_P nach SIA 181 ist nicht berücksichtigt.

	Luftschall		Trittschall	
	$D_{nT,w}$ [dB]	**$D_{nT,w}$ + C [dB]**	**$L'_{nT,w}$ [dB]**	**$L'_{nT,w}$ + C_i [dB]**
Bau-Schalldämmung:	56	**55**	**57**	**56**
Direkt-Schalldämmung:	62	60	53	52
Flanken-Schalldämmung:	57	56	54	54
Flanke 1 *	65	64	n.r.	n.r.
Flanke 2	68	66	49	48
Flanke 3 *	60	59	n.r.	n.r.
Flanke 4	63	61	53	53

*Flanke 1 und Flanke 3 sind parallel zur Balkenrichtung der Decke. Körperschallübertragung erfolgt beim Trittschall massgeblich durch die ins Mauerwerk einbindenden Balken. Daher sind diese Flanken nicht relevant.

In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Schallschutzberechnungen nach SN EN ISO 12354-1 und -2 nach dem Einbau der abgehängten thermisch aktivierten Decke dargestellt. Die Massnahme führt gegenüber der Ausgangssituation vor der Sanierung (vgl. Tabelle 9) zu einer deutlichen Verbesserung in der Bau-Schalldämmung, sowohl bei der Luftschalldämmung (Zunahme um 9 dB), als auch beim Trittschallpegel (Abnahme um 11 dB). Die jeweiligen Schwachstellen der Übertragungswege sind wiederum blau gekennzeichnet.

Beim Luftschall ist die Flankenübertragung massgebend. Deren Werte sind 5 dB schlechter als die Direktübertragung. Insbesondere die dünnen Innenwände stellen dabei die dominierenden Schwachstellen dar (Flanke 3 und 4). Um die Situation weiter zu verbessern, wären in diesen Bereichen zusätzliche Massnahmen erforderlich.

Beim Trittschall sind Direkt- und Flankenübertragung in etwa gleich gross, wie die nahezu gleichen Werte in Tabelle 11 zeigen. Eine weitere Verbesserung der abgehängten Decke würde primär die Direktübertragung reduzieren. Aufgrund der dominierenden Flankenübertragung liesse sich der Bau-Trittschallpegel im Idealfall ohne zusätzliche Massnahmen jedoch nur um maximal 3 dB weiter reduzieren.

In Abbildung 31 sind die Ergebnisse der Schallschutzberechnung den derzeitig für Bauvorhaben geltenden baurechtlichen Anforderungen gegenübergestellt. Die Projektierungswerte der Luftschalldämmung $D_{i,d}$ erfüllen nun mit der abgehängten Decke unter Berücksichtigung des Projektierungszuschlags von 2 dB die Mindestanforderungen.

Die Trittschalldämmung L'_d hat sich im Vergleich zur Ausgangsituation zwar ebenfalls deutlich verbessert, überschreitet die verringerten Anforderungen für die Sanierung, jedoch noch um 4 dB.

Eine weitere Verbesserung der abgehängten Decke allein ist jedoch nicht ausreichend, um die Trittschallanforderung zu erreichen, da in diesem Fall zusätzliche Massnahmen an den Wänden erforderlich wären. Massnahmen am Fussbodenaufbau erweisen sich in diesem Fall als deutlich effizienter, da sie sich gleichermassen auf die Direkt- und Flankenübertragung auswirken.

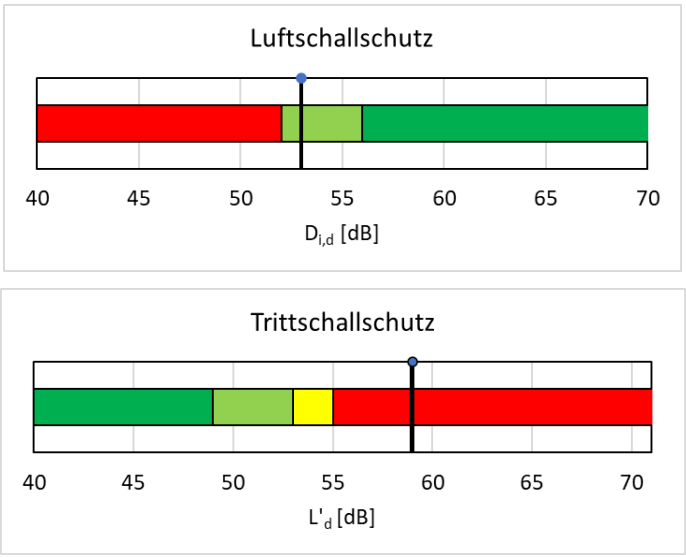


Abbildung 31: Bewertung des Schallschutzes in der Maulbeerstrasse nach der Sanierung der Decke. Vergleich der Einzahlangaben der Schallschutzberechnungen im Schema der SN EN ISO 12354 unter Berücksichtigung des Projektierungszuschlags K_P = 2 dB (schwarze Linie) mit den Anforderungsniveaus der SIA 181:rot: unterhalb der Anforderung, gelb: verringerte Anforderungen bei Sanierung erfüllt (nur Trittschall), hellgrün: Mindestanforderungen erfüllt (Mietwohnungen), dunkelgrün: erhöhte Anforderungen erfüllt (Wohneigentum);
oben: Projektierungswert für den Luftschallschutz $D_{i,d}$ (höhere Werte ⇒ besser)
unten: Projektierungswert für den Trittschallschutz L'_d (geringere Werte ⇒ besser)

6.1.5.2. Ersatz der Putzträgerkonstruktion durch eine abgehängte thermisch aktivierte Decke und Ertüchtigung des Fussbodens

Im Folgenden ist nun dargestellt, wie sich eine Ertüchtigung am Fussbodenaufbau, welche noch eine zusätzliche moderate Verbesserung der Trittschalldämmung mit sich bringt, auf die Bauschalldämmung auswirkt.

Um die verringerten Anforderungen für Sanierungen zu erfüllen, muss eine Massnahme am Fussbodenaufbau bei Holzbalkendecken eine Trittschallminderung von nur mehr als 4 dB erreichen. Dies wäre bereits mit einer einfachen Aufdopplung der bestehenden Bodendielen oder einem geeigneten neuen Bodenbelag erreichen, was aus ästhetischen Gründen oder der Gebrauchstauglichkeit des Bodens oft ohnehin erforderlich ist [50].

Mit einem geringfügig besseren Bodenaufbau, der eine Trittschallminderung von mehr als 6 dB erreicht, lassen sich sogar die Mindestanforderungen für den Neubau erfüllen. Hierzu ist eine dünne weichfedernde Schicht - beispielsweise aus Holzfaserplatte, Mineralfaserplatte oder Kork - zwischen der bestehenden Dielenlage und der neuen Bodenauflage notwendig [46]. Diese Systeme weisen in der Regel nur geringe Aufbauhöhen von wenigen Zentimetern auf. Ein solches System ist gemäss Tabelle 12 in den folgenden Berechnungen berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Berechnung gemäss SN EN ISO 12354-1 und -2 mit Berücksichtigung des dünnen Fussbodenaufbaus sind in Tabelle 13 dargestellt. Die Verbesserung durch den Fussbodenaufbau wurde ausschliesslich beim Trittschall berücksichtigt.

Bei der Luftschalldämmung stellt die Flankenschalldämmung von der oberen zur unteren Wand die massgebliche Schwachstelle dar. Der Fussbodenaufbau hat hierauf keinen Einfluss, zudem sind auch Lösungen zulässig, die keine Verbesserung der Luftschalldämmung bewirken, wie beispielsweise einfache Bodenbeläge.

Tabelle 12: Zusätzliche Massnahmen in der Berechnung nach SN EN ISO 12354 und Angaben zu deren Eigenschaften und Schallschutzwerte (m_{VS}': flächenbezogene Masse der zusätzlichen Schale (z.B. abgehängte Decke, Estrich), $d_{Hohlraum}$ Tiefe des Hohlraums zwischen Untersicht der Stakung und Deckenoberseite, ΔR_w bewertetes Luftschallverbesserungsmass, ΔL_w bewertete Trittschallpegelminderung)

Bezeichnung	Bauteil	m'_{VS}	$d_{Hohlraum}$	ΔR_w	ΔL_w
Fussboden:	Ertüchtigung des Fussbodens	-	-	0 dB	6 dB**
Decke:	Klimadecken-system Var. 2.1.1/2.1.2	≥26 kg/m²	≥90 mm	≥15 dB*	≥14 dB*
Flankenwand 1	keine	-	-	0 dB	-
Flankenwand 2	keine	-	-	0 dB	-
Flankenwand 3	keine	-	-	0 dB	-
Flankenwand 4	keine	-	-	0 dB	-

* Da es keine normierten Angaben für die Luftschallverbesserung bzw. Trittschallminderung bei abgehängten Decken im Holz-/Leichtbau gibt, beziehen sich diese Grössen auf die direkte Differenz zwischen den Einzahlwerte der Trenndecke im Bestand mit der Putzschicht auf der Schilfmatte und wenn diese durch eine thermisch aktivierte Unterdecke ersetzt wird.

** In diesem Fall ist der angegebene Wert die Trittschallminderung $\Delta L_{t,1,w}$ gemäss EN ISO 717-2, welche auf einer Referenzholzdecke Typ 1 ermittelt wurde.

Bei der Trittschalldämmung bleiben Direkt- und Flankenübertragung weiterhin ausgeglichen, die entsprechenden Einzahlangaben sind nahezu identisch. Durch energetische Pegelsummierung ergibt sich aufgrund der Verdopplung der Beiträge eine Erhöhung des Bau-Trittschallpegels um etwa 3 dB im Vergleich zur Direkt- und Flankenübertragung.

Tabelle 13: Ergebnisse der Schallschutzberechnung im Schema nach SN EN ISO 12354-1 und -2 in der Maulbeerstrasse nach der Sanierung der Decke und mit Ertüchtigung des Fussbodens. Bewertete Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ und bewertete Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ mit und ohne Berücksichtigung der Spektrum-Anpassungswerte C beziehungsweise C_i für die Gesamtübertragung (Bau-Schalldämmung) sowie die Direktübertragung und die Flankenübertragung. Die jeweilige Schwachstelle ist blau gekennzeichnet. Der Projektierungszuschlag K_P nach SIA 181 ist nicht berücksichtigt.

	Luftschall		Trittschall	
	$D_{nT,w}$ [dB]	$D_{nT,w} + C$ [dB]	$L'_{nT,w}$ [dB]	$L'_{nT,w} + C_i$ [dB]
Bau-Schalldämmung:	56	**55**	**51**	**50**
Direkt-Schalldämmung:	62	60	47	46
Flanken-Schalldämmung:	57	56	48	48
Flanke 1 *	65	64	n.r.	n.r.
Flanke 2	68	66	43	42
Flanke 3 *	60	59	n.r.	n.r.
Flanke 4	63	61	47	47

*Flanke 1 und Flanke 3 sind parallel zur Balkenrichtung der Decke. Körperschallübertragung erfolgt beim Trittschall massgeblich durch die ins Mauerwerk einbindenden Balken. Daher sind diese Flanken nicht relevant.

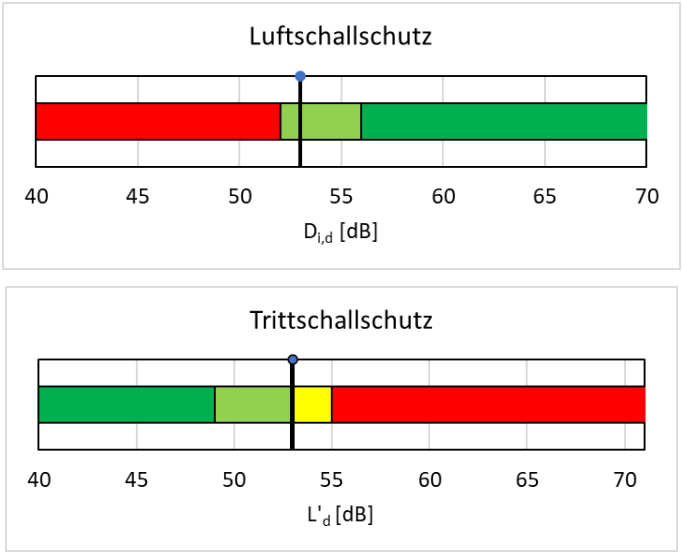


Abbildung 32: Bewertung des Schallschutzes in der Maulbeerstrasse nach Sanierung von Decke und Fussboden. Vergleich der Einzahlangaben der Schallschutzberechnungen im Schema der SN EN ISO 12354 unter Berücksichtigung des Projektierungszuschlags K_p = 2 dB (schwarze Linie) mit den Anforderungsniveaus der SIA 181:rot: unterhalb der Anforderung, gelb: verringerte Anforderungen bei Sanierung erfüllt (nur Trittschall), hellgrün: Mindestanforderungen erfüllt (Mietwohnungen), dunkelgrün: erhöhte Anforderungen erfüllt (Wohneigentum);
oben: Projektierungswert für den Luftschallschutz $D_{i,d}$ (höhere Werte ⇒ besser)
unten: Projektierungswert für den Trittschallschutz L'_d (geringere Werte ⇒ besser)

In Abbildung 32 sind die Ergebnisse der Schallschutzberechnung den derzeitig für Bauvorhaben geltenden baurechtlichen Anforderungen genübergestellt. Die Trittschalldämmung L'_d hat sich durch den zusätzlichen Fussbodenaufbau im Vergleich zu der Situation mit nur der abgehängten Decke deutlich verbessert und erfüllt nun unter Berücksichtigung des Projektierungszuschlags K_p = 2 dB sogar die Mindestanforderungen für Neubauten.

Die Berechnungen zeigen, dass sogar die Mindestanforderungen für den Schallschutz mit den geplanten Massnahmen mit hoher Wahrscheinlichkeit erreicht werden können. Da jedoch weder für die Trenndecke im Bestand noch für die vorgesehenen Deckenvarianten Messwerte oder Prüfzeugnisse vorliegen, wurden die Eingangsdaten aus vergleichbaren Konstruktionen abgeleitet und durchwegs konservative Annahmen bei der Berechnung getroffen.

Die Berechnung zeigen ausserdem - wie bereits beim Farbhof-, dass eine schalltechnisch gute abgehängte Decke die direkte Luft- und Trittschalldämmung deutlich verbessert. Dieses Potenzial kann jedoch nicht vollausgeschöpft werden, da ab einem für die Bau-Situation bestimmten Niveau die Flankenübertragung massgebend wird und die weitere Verbesserung der Bauschalldämmung begrenzt.

Beim Trittschall ist dann, um eine weitere Verbesserung zu erreichen, ein Fussbodenbelag oder Fussbodenaufbau am effizientesten, da damit die Direkt- und Flankenübertragung gleichsam verbessert werden.

Beim Luftschall erfolgt die Flankenübertragung über die an dem Bodenanschluss durchlaufenden Flankenwände, so dass in diesem Fall nur Massnahmen an den Wänden eine weitere Verbesserung der Bau-Schalldämmung bewirken.

Bei einer geplanten Sanierung ist es daher unerlässlich, Schallmessungen im Gebäude durchzuführen sowie die Eigenschaften und den Zustand der Bauteile und ihrer Verbindungen für eine belastbare Planung sorgfältig zu erfassen. Nur so können die Massnahmen optimal auf die Ausgangssituation abgestimmt werden.

6.1.6. Schlussfolgerung zum Schallschutz

Mit einer abgehängten, thermisch aktivierten Decke wird sowohl die direkte Luft- als auch die Trittschalldämmung der Trenndecke in beiden betrachteten Modellsituationen im Vergleich zur Ausgangsdecke signifikant verbessert. Bei der vertikalen Übertragung zwischen übereinanderliegenden Räumen kann deren Potenzial jedoch nicht voll ausgeschöpft werden, da die Flankenübertragung über die Nebenwege die Schwachstelle bildet. Die Gesamtschalldämmung im baurechtlich relevanten Frequenzbereich wird durch diese dominiert. Weitere Verbesserungen an der Deckenunterseite erhöhen die Schalldämmung zwar bei tiefen Frequenzen – die als kritisch einzustufen sind, da hier der Trittschall oft als besonders störend wahrgenommen wird –, auf die Luft- und Trittschallkennwerte, die den baurechtlichen Anforderungen gegenübergestellt werden, wirkt sich dies jedoch nicht aus. Dies ist auch in anderen Bausituationen so zu erwarten.

Beim Trittschallschutz ist die Schwachstelle kritischer, da in beiden Modellzimmern mit der abgehängten Decke ohne weitere Massnahmen selbst die verringerten Anforderungen der SIA 181 nicht erreicht würden. Zur Überwindung dieses Limits sind daher zusätzliche Massnahmen am Fussbodenaufbau oder an den kritischen flankierenden Wänden erforderlich. Es hat sich jedoch gezeigt, dass bereits moderate Massnahmen – wie trittschalldämmende Fussbodenaufbauten mit geringen Aufbauhöhen – ausreichen können, um eine Verbesserung zu erzielen, sodass es wahrscheinlich ist, dass selbst die etwas strengeren Mindestanforderungen für Neubauten in den meisten Situationen erreicht werden können. Die Fussbodenbeläge sollten so gestaltet sein, dass sie dauerhaft sind und vom Bewohner nicht ohne Weiteres ausgetauscht werden können, damit die Schalldämmung langfristig gewährleistet bleibt.

Beim Luftschall hat sich gezeigt, dass die baurechtlichen Mindestanforderungen nach SIA 181 trotz Flankenübertragung in der Regel erfüllbar sind. Kritisch sind bei Stahlbetondecken insbesondere Wände mit einem sehr geringen Flächengewicht, beispielsweise aus Gipsdielen, Bims- oder Porenbeton, die starr mit der Stahlbetondecke verbunden sind. Hier sind Massnahmen entweder in Form von Vorsatzschalen vor den kritischen Flankenwänden erforderlich. Falls deren Ersatz aus anderen Gründen ohnehin vorgesehen ist, kann auf die Vorsatzschalen verzichtet werden, wenn die leichten Wände wie heutzutage üblich von der Stahlbetondecke durch die Verwendung von Randanschlussstreifen (z. B. aus Kork oder Filz) entkoppelt werden. Bei Holzbalkendecken sind am Deckenanschluss durchlaufende Wände, auch mit höherem Flächengewicht, kritisch zu untersuchen, da die Körperschallübertragung hier auf nur geringen Widerstand trifft, weil kein Materialwechsel oder keine Verzweigung, bei der Körperschallenergie auf andere Bauteile übertragen wird, vorliegt.

Die Ergebnisse der Modellzimmer verdeutlichen insgesamt, dass die Wirksamkeit der abgehängten Decke stark von der jeweiligen Einbausituation und den flankierenden Bauteilen abhängt. Eine präzise Bestandsanalyse ist daher notwendig, um die relevanten Übertragungswege zu identifizieren und die Wirkung geplanter Massnahmen realistisch zu bewerten.

Die thermisch aktivierten Decken aus Lehmplatten sind schalltechnisch als positiv zu bewerten, da sie ein höheres Flächengewicht als vergleichbare Decken aus Gips- oder Gipsfaserplatten aufweisen. Dies wirkt sich günstig auf die Feder-Masse-Feder-Resonanz aus, sodass diese bei gleicher Hohlraumtiefe tiefer liegt als bei Gipsplatten. Es erscheint daher möglich, die Hohlraumtiefe zu reduzieren, was bei begrenzten Raumhöhen von Vorteil ist. Allerdings liegen bislang keine belastbaren akustischen Messdaten zu diesen Deckensystemen vor, weshalb in diesem Bericht mit konservativen Annahmen gearbeitet wurde. Die Auswirkungen von Effekten auf den Schallschutz – etwa durch die erhöhte Biegesteifigkeit (Koinzidenzeinbruch, Plattenmoden infolge der grösseren Plattenstärke) oder durch die aufgrund des höheren Flächengewichts erforderliche Anzahl zusätzlicher Abhänger – sind derzeit nicht ausreichend bekannt. Hier wären verlässliche akustische Messdaten der Hersteller für eine zielgerichtete Planung wünschenswert.

6.2 Thermischer Komfort

Die in Abschnitt 4.2 beschriebenen Zimmermodelle der Gebäude „Farbhof" und „Maulbeerstrasse" wurden mit Hilfe der Software Ida-Ice (Version 5.1.1) einer Simulationsstudie unterzogen, um die Raumtemperierung und den thermischen Komfort zu bewerten. Für beide Zimmer wurden drei Varianten berücksichtigt: vor der Sanierung, mit Innensanierung, mit Innen- und Aussensanierung.

Bei der Variante „Innensanierung" wird nur die Deckenkonstruktion saniert, während bei der Variante „Innen- und Aussensanierung" zusätzlich die Aussenwand gedämmt und das Fenster erneuert wird.

Mit der Simulationsstudie wird untersucht, ob die Heiz-/Kühl-Decke in der Lage ist, das ganze Jahr über den thermischen Komfort im Raum zu gewährleisten. Dabei wird ein zukünftiger Klimadatensatz für das Jahr 2060 verwendet (SIA 2060 RCP85 DRY, siehe Anhang 12.1). Die Bewertung des thermischen Komforts basiert auf den im Abschnitt 2.4.2 beschriebenen Indikatoren. Details zu den Raummodellen und den Randbedingungen der Simulationen befinden sich im Anhang 11.1.

6.2.1. Die Modellzimmer vor der Sanierung

Farbhof vor der Sanierung

Abbildung 33 zeigt den Grundriss des Raums «Farbhof» in Zürich und das in Ida-Ice erstellte 3D-Modell. Der Raum mit einer Grundfläche von 13.9 m² und einer lichten Zimmerhöhe von 2.4 m wird auf der Nord-Süd-Achse angeordnet (Aussenwand mit Fenster Richtung Süden). Unter der Annahme, dass die benachbarten Räume identisch klimatisiert werden, wurden die Innenwände adiabatisch modelliert. Der Wärmeaustausch des Raums erfolgt somit nur über Aussenwand und Fenster. Das Fenster mit einer Fläche von 2.5 m^2 ist mit einem aussenliegenden Sonnenschutz ausgestattet, der in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung in der Fensterebene aktiviert wird (unten, wenn 200 W/m^2 überschritten werden). Der Raum verfügt nicht über ein mechanisches Belüftungssystem, in der Simulation wurde jedoch ein konstanter Luftwechsel von 0.19 L/(s * m²) angenommen.

Der Einfachheit halber wurde eine „ideale" Heizung mit einem Sollwert von 21.0 °C angenommen. Es wurde keine Klimaanlage, aber eine Nachtauskühlung für die Sommersaison angenommen (basierend auf dem manuellen Öffnen des Fensters), die aktiviert ist, wenn die Aussentemperatur unter der Raumtemperatur fällt.

Die internen Gewinne wurden unter der Annahme modelliert, dass es sich um ein Schlafzimmer handelt. Der Raum wird somit nur nachts (21:00 - 06:00 Uhr) von zwei Personen genutzt. Ein weiterer interner Gewinn entsteht durch die Beleuchtung mit 1.7 W/m² für zwei Stunden am Tag (6 - 7 Uhr und 21 - 22 Uhr). Weitere Details zu Wandkonstruktionen, Fensterdaten oder Klimadaten befinden sich im Anhang 11.1.

Mit dem aussenliegenden Sonnenschutz und der Nachtauskühlung werden sowohl für den Zustand vor der Sanierung also auch nach der Sanierung bauliche und betriebliche Massnahmen umgesetzt, die den sommerlichen Wärmeschutz passiv unterstützen.

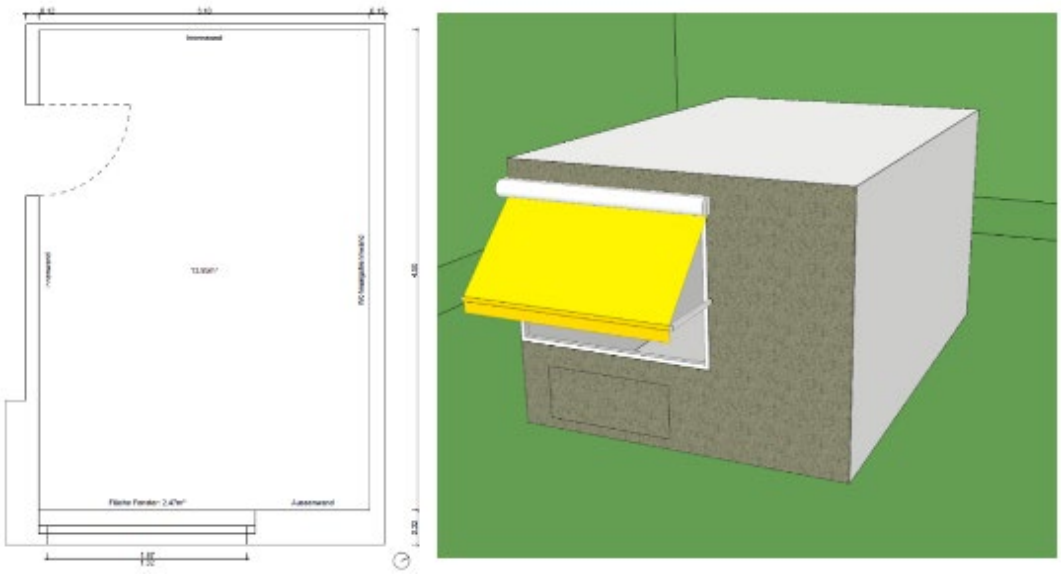


Abbildung 33: Raumplan (links) und 3D-Modell des Raums «Farbhof» in Ida-Ice (rechts).

Abbildung 34 zeigt die Ergebnisse der Simulation des Zimmers vor der Sanierung. Der Heizenergiebedarf beträgt 751 kWh/a (d. h. 54 kWh/(m^{2}a)) mit einer maximalen Heizlast von etwa 370 W (27 W/m^2). Der Raum überhitzt im Sommer trotz aussenliegendem Sonnenschutz und Nachtauskühlung via Fenster merklich, mit Stundenmittelwerten von über 29 °C. Gemäss der Definition der Norm SIA 180 für Räume, die nicht gekühlt werden, befindet sich der Raum aber innerhalb der Komfortzone (unterhalb der oberen roten Grenzlinie in linker Grafik). Abbildung 35 zeigt den stündlichen Verlauf des PMV-Werts (Predicted Mean Vote). Da der Raum nicht über eine aktive Kühlung verfügt, überschreitet der PMV-Wert in der Sommersaison deutlich die Komfortwerte (320 Stunden über dem Schwellenwert von +0.5) und erreicht einen Spitzenwert von etwa 1.4.

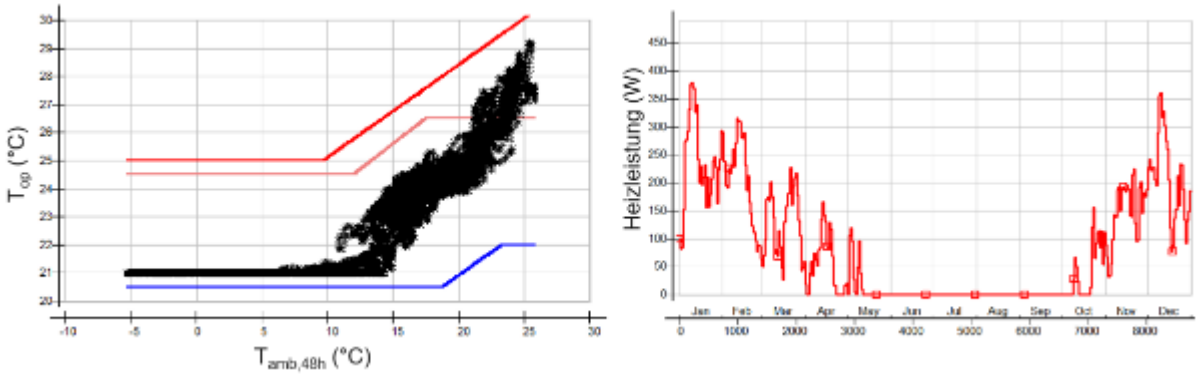


Abbildung 34: Thermische Behaglichkeit gemäss SIA 180 (links) und Tagesmittelwert der benötigten Heizleistung (rechts) des Raums im «Farbhof», Zürich (Klimadatensatz für das Jahr 2060 verwendet).

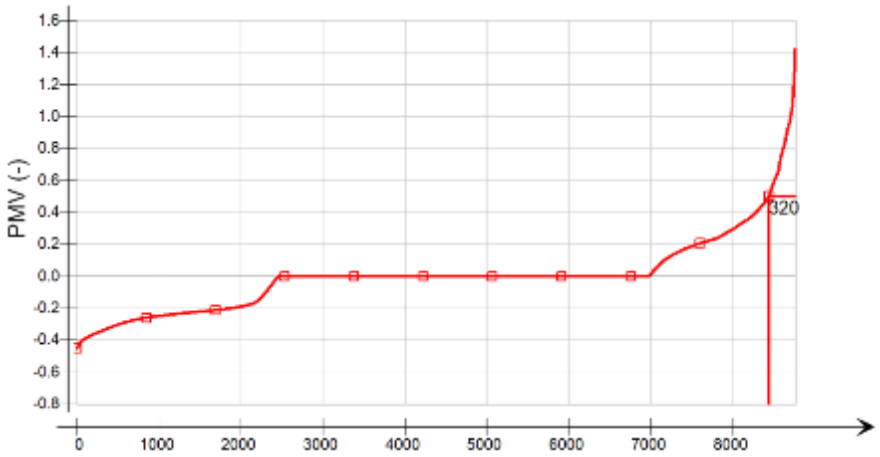


Abbildung 35: Dauerlinie des Predicted Mean Vote PMV auf Stundenbasis – 320 Stunden (4 % der Zeit auf Jahresbasis) stellen die Anzahl der Stunden dar, in denen der PMV > +0.5 ist (Klimadatensatz für das Jahr 2060 verwendet).

Maulbeerstrasse vor der Sanierung

Abbildung 36 zeigt den Grundriss des Raums «Maulbeerstrasse» in Basel und das in Ida-Ice erstellte 3D-Modell.

Der Raum hat eine Fläche von 14.8 m² und eine lichte Zimmerhöhe von 2.8 m. Wie auch der Raum „Farbhof" verfügt dieser Raum über eine einzige nach Süden ausgerichtete Aussenwand mit einem Fenster von etwa 2 m².

Infiltration, Beschattungsstrategie, Heizung und interne Gewinne entsprechen denen, die bereits im Abschnitt 6.2.1 für den Raum „Farbhof" beschrieben wurden. Auch in diesem Fall werden Klimadaten der SIA-Zukunftsszenarien für 2060 verwendet (hier: Basel Binningen, 2060 RCP85 DRY). Weitere Details zu den Konstruktionen oder Klimadaten befinden sich im Anhang 11.1.

Die wichtigsten Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 37 dargestellt. Der jährliche Heizenergiebedarf beträgt 398 kWh/a, d. h. 27 kWh/(m^{2}a), was der Hälfte des Heizbedarfs für den Raum „Farbhof" entspricht. Der Unterschied lässt sich sowohl durch den niedrigeren U-Wert der Aussenwand (im Vergleich zum Fall „Farbhof") als auch durch die höheren Aussentemperaturen in Basel im Vergleich zu Zürich erklären. Grundsätzlich niedrig sind die Energiekennzahlen für die Raumheizung, da mit Klimadaten für das Jahr 2060 simuliert wurde. Die maximale Heizleistung liegt bei 210 W resp. 14 W/m^2.

Im Sommer entstehen mit der verwendeten Klimaprognose von 2060 im Raum „Maulbeerstrasse" trotz aussenliegendem Sonnenschutz und Nachtauskühlung via Fenster sehr hohe Temperaturen mit einer Höchsttemperatur von 32 °C. Diese liegen ausserhalb des Komfortbereichs gemäss Norm SIA 180 für Räume, die nicht gekühlt werden.

Abbildung 38 zeigt den stündlichen Verlauf des PMV-Werts (Predicted Mean Vote). Ähnlich wie im Raum „Farbhof" betreffen auch hier die kritischsten PMV-Werte die Sommermonate. In diesem Fall ist zu erkennen, dass der PMV-Wert über 2 liegt und die Werte über einen Zeitraum von 1200 Stunden über dem Schwellenwert von +0.5 liegen.

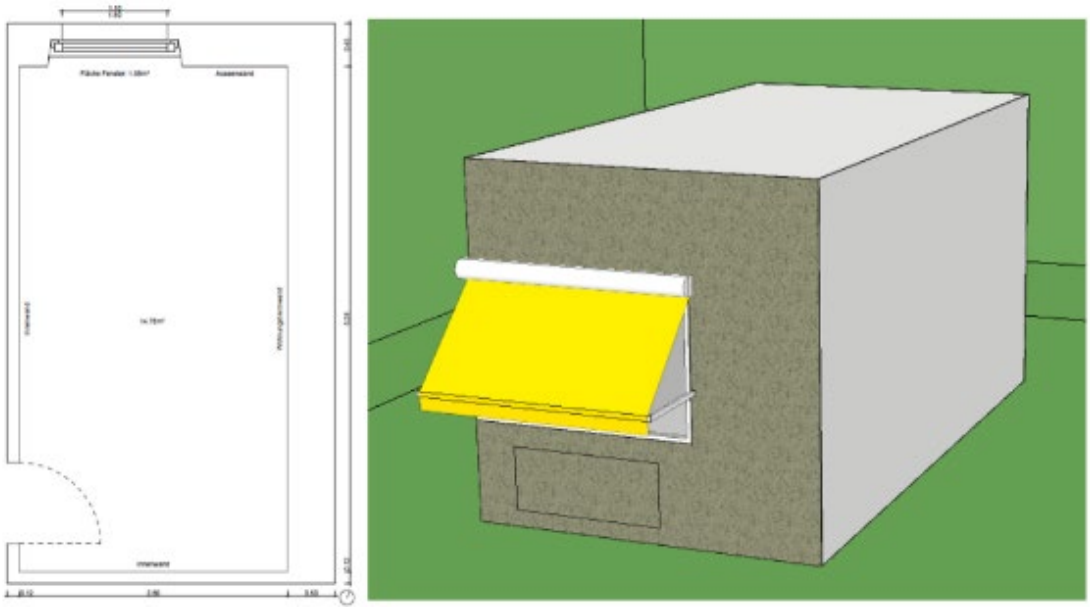


Abbildung 36: Raumplan (links) und 3D-Modell des Raums «Maulbeerstrasse» in Ida-Ice (rechts)

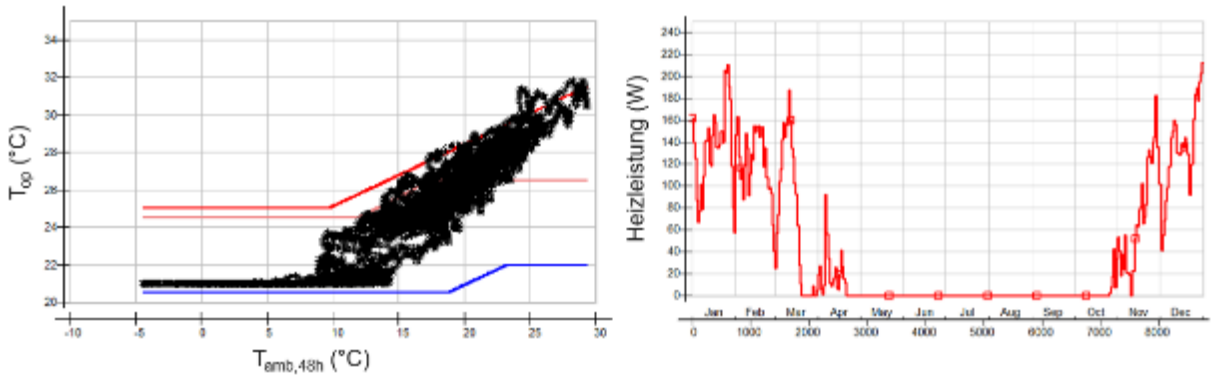


Abbildung 37: Thermische Behaglichkeit gemäss SIA 180 (links) und Tagesmittelwert der Heizleistung (rechts) des Raums «Maulbeerstrasse» (Klimadatensatz für das Jahr 2060 verwendet).

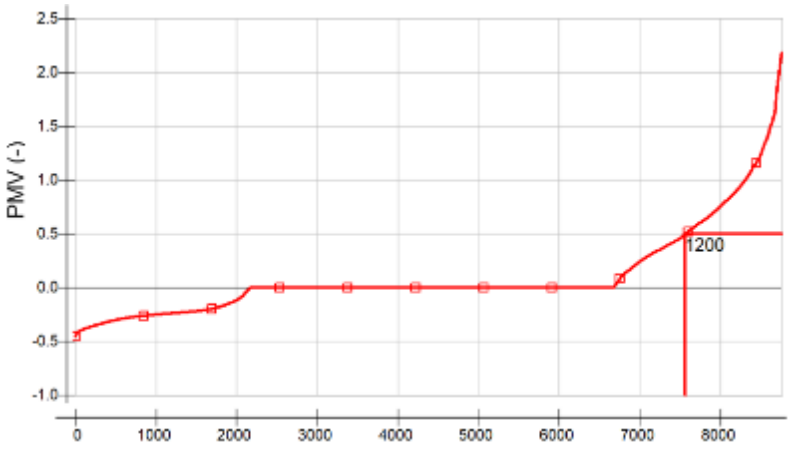


Abbildung 38: Dauerlinie des Predicted Mean Vote PMV auf Stundenbasis – 1200 Stunden (14 % der Zeit auf Jahresbasis) stellen die Anzahl der Stunden dar, in denen der PMV > +0.5 ist (Klimadatensatz für das Jahr 2060 verwendet).

Zusammenfassung

Die Simulationen der aktuellen Gebäude, resp. ihrer ausgewählten Modellzimmer, zeigen, dass eine aktive Klimatisierung besonders in Zukunft von Bedeutung sein kann.

Ein Überblick über die wichtigsten Ergebnisse der Simulationsstudie ist in Tabelle 14 für die beiden untersuchten Räume dargestellt.

Tabelle 14: Simulationsergebnisse für die beiden untersuchten Räume – Fall: vor der Sanierung.

	Farbhof	Maulbeerstrasse
Fläche (m^2)	13.9	14.8
Heizenergiebedarf (kWh/m^2a)	54	27
Maximale Heizleistung (W/m^2)	27	14
Maximale Raumtemperatur im Sommer (°C)	29	32

6.2.2. Farbhof nach der Sanierung

Innensanierung

Bei der Variante „Innensanierung" sind alle Konstruktionen wie bei der Variante „vor der Sanierung" gewählt, bis auf die Deckenkonstruktion (siehe Tabelle 24 in Anhang 11.1). Insbesondere enthält Tabelle 24 die beiden in der Simulationsstudie berücksichtigten Untervarianten der Deckenkonstruktion, nämlich die Variante mit Lehm-Klimaelement und die Variante mit Wärmeleitblech mit Lehmplatte.

In diesem Abschnitt werden ausschliesslich die Ergebnisse der Variante Lehm-Klimaelement aufgeführt (Variante 1.1.3 in Abbildung 25). Bei der Variante Lehm-Klimaelement (siehe Anhang, Tabelle 24) wird die Decke mit einer 20 mm dicken Schicht aus Steinwolle oder Holzweichfasermatte zum oberen Stockwerk hin wärmegedämmt. Das 25 mm dicke Lehm-Klimaelement wird durch die Zirkulation des Wärmeträgers in den Rohrleitungen thermisch aktiviert. Die ganze Deckenfläche (13.9 m^2) ist thermisch aktiviert.

Die Vorlauftemperatur der Wärmeverteilung variiert je nach Aussentemperatur anhand einer Heiz-/Kühlkurve (siehe Abbildung 39). Der Heiz-/Kühlkreislauf wird so betrieben, dass die Raumtemperatur auf einen Sollwert von 21 °C (Heizperiode) bzw. 26 °C (Kühlperiode) geregelt wird.

Der Einfluss einer Verringerung der thermisch aktivierten Deckenfläche und veränderter Sollwerte für die Kühlung im Sommer auf die Ergebnisse wird in Abschnitt 6.2.4 behandelt.

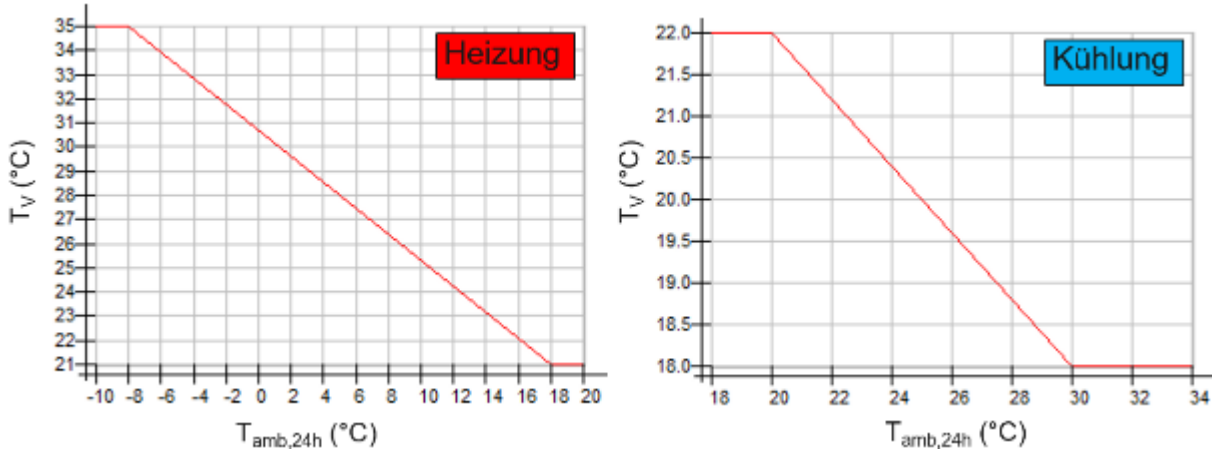


Abbildung 39: Heizkurve (links) und Kühlkurve (rechts) – «Farbhof» Innensanierung.

Die Ergebnisse der jährlichen dynamischen Simulation sind in Abbildung 40 und Abbildung 41 dargestellt (gemittelt auf Stundenwerte). Die Definition der Indikatoren für die thermische Behaglichkeit ist in 2.4.2 beschrieben. Für die Definition der Asymmetrie der Strahlungstemperatur wurde beschlossen, die Heiz-/Kühlungsdecke und die Aussenwand des Raums als die Oberflächen zu betrachten, die verglichen werden.
Der Energiebedarf für die Heizung liegt bei einem Wert von 60 kWh/(m^{2}a), was deutlich höher ist als der Bedarf für die Kühlung, der bei etwa 5 kWh/(m^{2}a) liegt. Im Allgemeinen ist die aktive Kühlung in der Lage, das ganze Sommerhalbjahr über für eine angenehme Raumtemperatur zu sorgen. Die Ergebnisse der verschiedenen Indikatoren für den thermischen Komfort zeigen keine kritischen Werte. In Abbildung 40 ist zu erkennen, dass der PMV-Wert 328 Stunden (4 % der Zeit auf Jahresbasis) lang über dem Grenzwert von +0.5 liegt, obwohl die stündlichen Temperaturwerte während des Sommers immer innerhalb der Komfortzone liegen. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass der thermische Komfort gemäss SIA 180 und der PMV unterschiedliche Obergrenzen für die Temperatur haben (26.5 °C und 26.0 °C). Die Stunden mit einem PMV von Null entsprechen den Stunden, in denen der Raum nicht belegt ist.

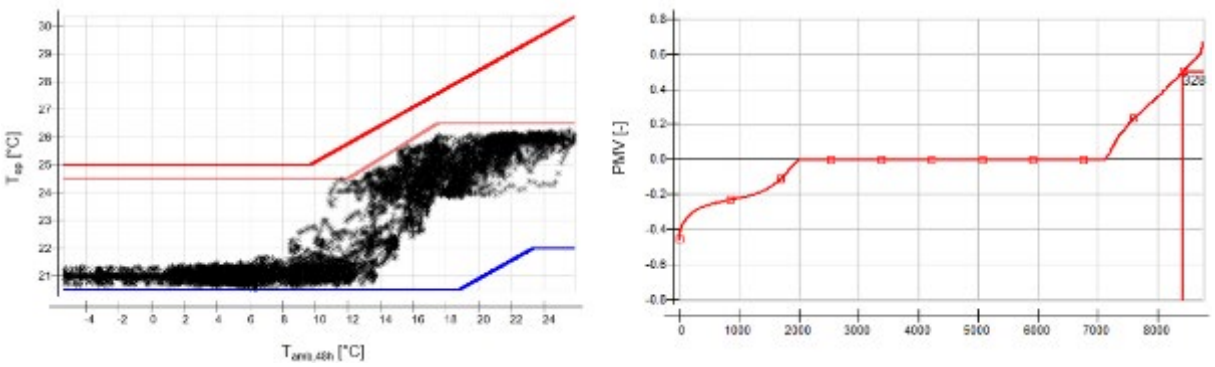


Abbildung 40: Thermische Behaglichkeit für den Farbhof nach der Innensanierung gemäss SIA 180 (links) und Dauerlinie des Predicted Mean Vote PMV (rechts) auf Stundenbasis – 328 Stunden (4 % der Zeit auf Jahresbasis) stellen die Anzahl der Stunden dar, in denen der PMV > +0.5 ist (Klimadatensatz für das Jahr 2060 verwendet).

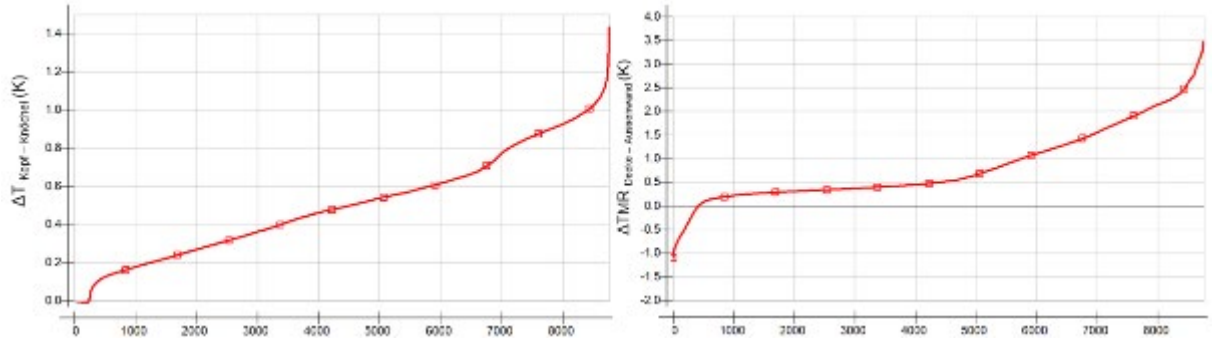


Abbildung 41: Dauerlinie von $\Delta T_{Kopf\text{-}Knöchel}$ (links) und ΔTMR (Asymmetrie der Strahlungstemperatur, rechts) auf Stundenbasis (Klimadatensatz für das Jahr 2060 verwendet).

Innen- und Aussensanierung

Tabelle 21 und Tabelle 23 im Anhang enthalten die Fenster- und Wanddaten für die Variante „Innen- und Aussensanierung". Im Vergleich zur Variante „Innensanierung" wird die Aussenwand thermisch gedämmt und das Fenster ersetzt (U-Werte neu 0.25 W/(m²K) bzw. 1.0 W/(m²K)). Die Heiz- und Kühlkurven wurden in mehreren Simulationsdurchgängen optimiert. Ausgehend von den Kurven des Fallbeispiels „Innensanierung" (Abbildung 39) wurden die Heiz- und Kühlkurve schrittweise abgesenkt resp. angehoben, um den thermischen Komfort im Raum aufrechtzuerhalten. Auf diese Weise konnte die Heizkurve auf eine Höchsttemperatur von 28 °C gesenkt und die Kühlkurve auf eine Mindesttemperatur von 22 °C angehoben werden (nur mit Innensanierung: 35 °C resp. 18 °C). Im Vergleich zum Fall „Innensanierung" wurden die maximale Leistung der Wärmepumpe und des Kühlers aufgrund des geringeren Energiebedarfs reduziert.

Abbildung 42 zeigt den monatlichen Energiebedarf für Heizung (10 kWh/m²a) und Kühlung (3 kWh/m²a) sowie die thermische Behaglichkeit gemäss der Norm SIA 180. Im Vergleich zur Variante „Innensanierung" ergibt sich eine deutliche Reduzierung des Heizbedarfs. Dies ist auf die Verringerung des U-Werts der einzigen Wärmeabgabeflächen des Raums, nämlich der Aussenwand und des Fensters, zurückzuführen. Der Vergleich zwischen den beiden simulierten Varianten (d. h. „Innensanierung" und „Innen- und Aussensanierung") ist in Abbildung 43 dargestellt. Sowohl der Indikator $\Delta T_{Kopf\text{-}Knöchel}$ als auch der Indikator ΔTMR sind bei der Variante „Innen- und Aussensanierung" niedriger, was einem erhöhten Komfort entspricht. Dies ist auf die Veränderung der Vorlauftemperatur und damit der Oberflächentemperatur der Decke zurückzuführen und auf die besseren U-Werte der Aussenwand.

Die wichtigsten Ergebnisse der Simulationsstudie für die beiden betrachteten Sanierungsvarianten sind in Tabelle 15 aufgeführt. Drei der vier Bedingungen für thermische Behaglichkeit sind in beiden Fällen erfüllt. Was die PMV-Komfortbedingung betrifft, so überschreitet der Wert den oberen Schwellenwert +0.5 nur für eine sehr begrenzte Anzahl von Stunden (ca. 3-4 % der Stunden im Jahr). Auch die vierte Komfortbedingung, PMV, kann daher in beiden Fällen als erfüllt angesehen werden. Die Überprüfung des Taupunkts war Gegenstand der Analyse in der Simulationsstudie. Wie in Tabelle 15 dargestellt, weisen die beiden untersuchten Fälle keine kritischen Werte auf.

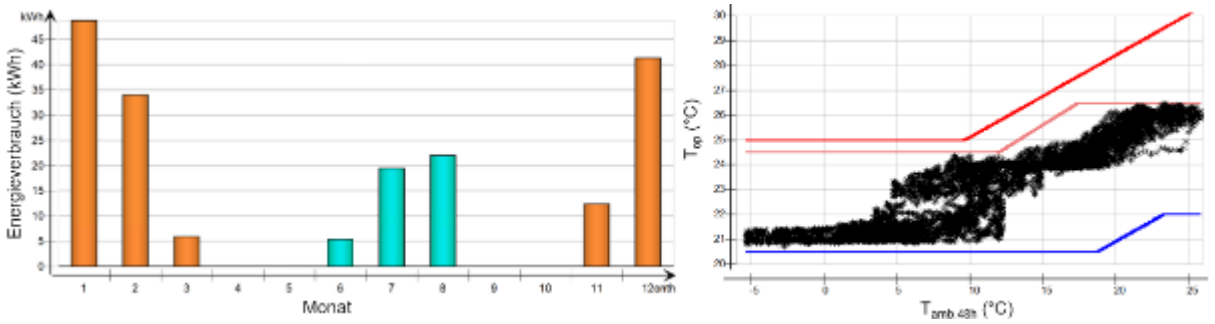


Abbildung 42: Monatlicher Energieverbrauch für Heizung (orange Balken) und Kühlung (lichtblaue Balken) (links) und thermische Behaglichkeit gemäss SIA 180 (rechts) – «Farbhof» Innen- und Aussensanierung (Klimadatensatz für das Jahr 2060 verwendet).

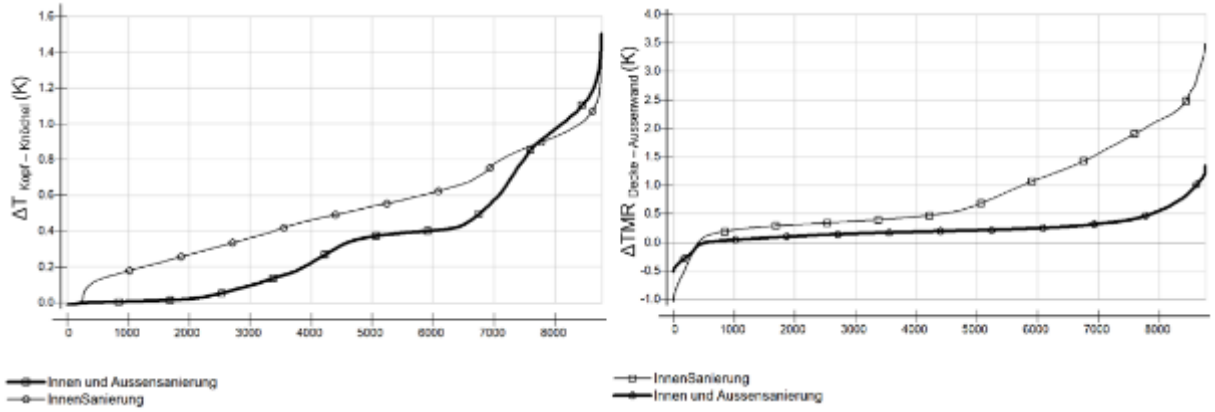


Abbildung 43: Dauerlinie von ΔT Kopf-Knöchel (links) und ΔTMR (Asymmetrie der Strahlungstemperatur, rechts) auf Stundenbasis – «Farbhof» Innensanierung (dünnere Linie), «Farbhof» Innen- und Aussensanierung (dickere Linie), (Klimadatensatz für das Jahr 2060 verwendet).

Tabelle 15: Zusammenfassung der Ergebnisse und Indikatoren der thermischen Behaglichkeit für die beiden Varianten „Innensanierung" und „Innen- und Aussensanierung" für das Gebäude „Farbhof" (mit Klimadaten für das Jahr 2060).

	Variante «Innensanierung»	**Variante «Innen- und Aussensanierung»**
Heizenergiebedarf (kWh/m²a)	59.5	10.2
Kühlenergiebedarf (kWh/m²a)	5.3	3.4
Thermische Behaglichkeit (SIA 180)	erfüllt	erfüllt
PMV > +0.5 PMV < -0.5	328 Std. (erfüllt) 0 Std. (erfüllt)	268 Std. (erfüllt) 0 Std. (erfüllt)
$\Delta T_{Kopf\text{-}Knöchel}$ > +3.3 K	0 Std. (erfüllt)	0 Std. (erfüllt)
ΔTMR > +4.5 K ΔTMR < -14 K	0 Std. (erfüllt) 0 Std. (erfüllt)	0 Std. (erfüllt) 0 Std. (erfüllt)
Taupunktunterschreitung	2 Std.	0 Std.

6.2.3. Maulbeerstrasse nach der Sanierung

Wie im Fall „Farbhof“ wurden auch für das Gebäude „Maulbeerstrasse“ zwei Sanierungsvarianten analysiert: „Innensanierung“ und „Innen- und Aussensanierung“. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Simulationsstudie für beide Varianten dargestellt.

Tabelle 21, Tabelle 23 und Tabelle 25 enthalten die Konstruktionsdaten des Fensters, Aussenwand und Decke. Im Vergleich zum Fall „vor der Sanierung” wird bei der Variante „Innensanierung” nur die Deckenkonstruktion saniert, während bei der Variante „Innen- und Aussensanierung” auch die Aussenwand gedämmt und das Fenster ersetzt werden.

Die gesamte Deckenfläche (14.8 m²) wird durch ein Heiz-/Kühlelement thermisch aktiviert, in dem Wasser mit einer von der Aussentemperatur abhängigen Vorlauftemperatur zirkuliert. Die Heizkurve hat eine maximale Temperatur von 35 °C (Variante „Innensanierung”) und 26 °C (Variante „Innen- und Aussensanierung”). Analog dazu wird die Kühlkurve bei der Variante „Innen- und Aussensanierung” (T_{min} = 22 °C) um 4 K gegenüber der Variante „Innensanierung” (T_{min} = 18 °C) angehoben. Der Durchfluss des in der Klimadecke zirkulierenden Wärmeträgers wird so geregelt, dass eine Operativtemperatur von 21 °C (Wintersaison) und 26 °C (Sommersaison) aufrechterhalten wird.

Abbildung 44 zeigt den Energiebedarf für Heizung und Kühlung für die beiden untersuchten Sanierungsvarianten. Es ist zu erkennen, dass der Heizbedarf bei der Variante „Innen- und Aussensanierung” drastisch sinkt (von einem Wert von 30 kWh/m²a auf einen Wert von 7 kWh/m²a), während der Energiebedarf für die Kühlung in beiden Fällen vergleichbar bleibt.

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass die Heiz-/Kühldecke in beiden Fällen die thermische Behaglichkeit gewährleisten kann (siehe Abbildung 45 für die Ergebnisse der Variante „Innen- und Aussensanierung”). Ähnlich wie beim Gebäude „Farbhof” zeigen die PMV-Ergebnisse kritische Werte über dem Schwellenwert +0.5 für 750 Stunden. Eine Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass eine Senkung des Sollwerts für die Kühlung von 26 °C auf 25 °C die PMV-Werte in den Komfortbereich bringen würde.

Die beiden anderen Indikatoren für den thermischen Komfort, d.h. ΔT Kopf-Knöchel und ΔTMR Asymmetrie der Strahlungstemperatur (siehe Abbildung 46), zeigen Ergebnisse, die mit denen für das Gebäude „Farbhof” vergleichbar sind. Auch in diesem Fall ist zu erkennen, dass die Änderung der Vorlauftemperatur in der Variante „Innen- und Aussensanierung” den thermischen Komfort merklich erhöht, obwohl die Werte der Indikatoren in beiden Varianten innerhalb des Komfortbereichs liegen (Komfortbereiche, siehe Kapitel 2.4.2).
Die Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse und die thermischen Komfortbedingungen ist in Tabelle 16 dargestellt. Wie beim Gebäude „Farbhof“ zeigt auch hier die Taupunktprüfung keine kritischen Werte für beide untersuchten Sanierungsvarianten.

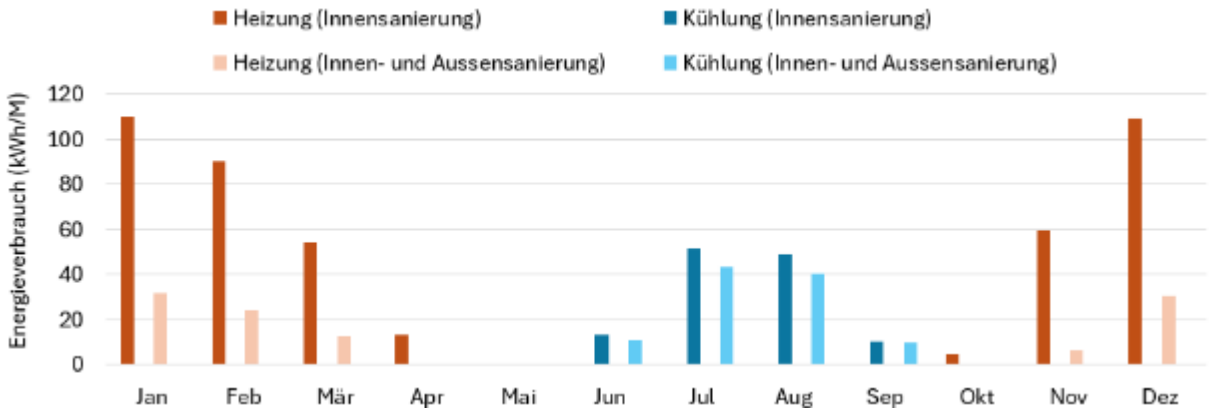


Abbildung 44: Monatlicher Energieverbrauch für Heizung und Kühlung für beide Varianten («Innensanierung» und «Innen- und Aussensanierung»)

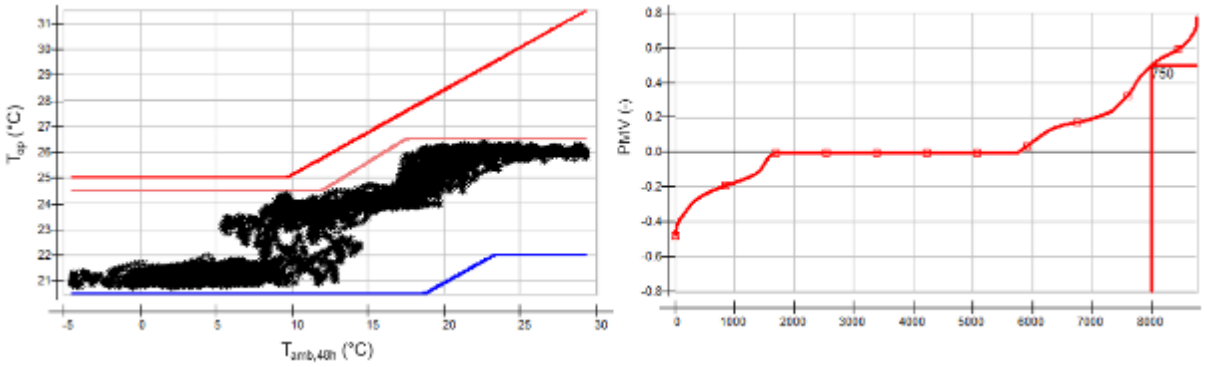


Abbildung 45: Thermische Behaglichkeit gemäss SIA 180 (links) und Dauerlinie des Predicted Mean Vote PMV (rechts) auf Stundenbasis für die Variante «Innen- und Aussensanierung» – 750 Stunden (9 % der Zeit auf Jahresbasis) stellen die Anzahl der Stunden dar, in denen der PMV > +0.5 ist (Klimadatensatz für das Jahr 2060 verwendet).

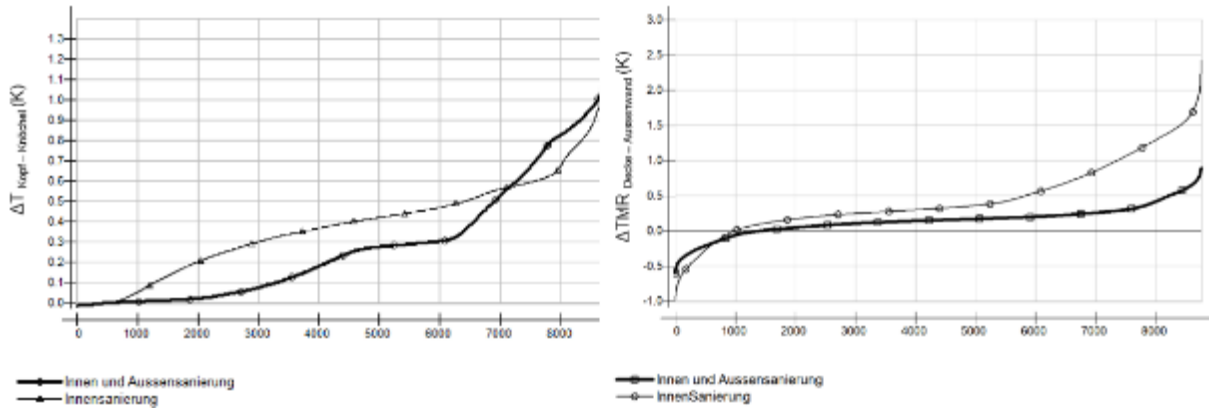


Abbildung 46: Dauerlinie von ΔT Kopf-Knöchel (links) und ΔTMR (Asymmetrie der Strahlungstemperatur, rechts) auf Stundenbasis – Innensanierung (dünnere Linie), Innen- und Aussensanierung (dickere Linie), (Klimadatensatz für das Jahr 2060 verwendet).

Tabelle 16: Zusammenfassung der Ergebnisse und Indikatoren der thermischen Behaglichkeit für die beiden Varianten „Innensanierung" und „Innen- und Aussensanierung" für das Gebäude „Maulbeerstrasse" für eine Klimadatensatz 2060.

	Variante «Innensanierung»	**Variante «Innen- und Aussensanierung»**
Heizenergiebedarf (kWh/m²a)	30	7
Kühlenergiebedarf (kWh/m²a)	9	7
Thermische Behaglichkeit (SIA 180)	erfüllt	erfüllt
PMV > +0.5 PMV < -0.5	672 Std. (erfüllt) 0 Std. (erfüllt)	750 Std. (erfüllt) 0 Std. (erfüllt)
$\Delta T_{Kopf\text{-}Knöchel}$ > +3.3 K	0 Std. (erfüllt)	0 Std. (erfüllt)
ΔTMR > +4.5 K ΔTMR < -14 K	0 Std. (erfüllt) 0 Std. (erfüllt)	0 Std. (erfüllt) 0 Std. (erfüllt)
Taupunktunterschreitung	3 Std.	0 Std.

6.2.4. Zusätzliche Simulationsstudien

Aktivierter Flächenanteil der Decke

Es wurde eine Sensitivitätsstudie durchgeführt, um den Einfluss der Grösse der aktivierten Heiz-/Kühlfläche auf den thermischen Komfort im Raum zu analysieren. Anders als beim Schallschutz, welcher sich über die gesamte Fläche der Geschossdecke erstrecken muss, kann die thermisch aktive Fläche kleiner sein. Entsprechend können Teilbereiche der Fläche für Zuleitungen zu den Heizelementen genutzt werden. Die Grösse der benötigten Heizfläche ist dabei abhängig von den thermischen Eigenschaften der Schichten, in denen die Heizungselemente (z.B. Rohre) eingebettet sind, sowie von der Vorlauftemperatur der Heizung und der benötigten Heizleistung.

Die Untersuchung bezieht sich auf das Farbhof-Gebäude (Variante „Innensanierung“). Es wurden drei Varianten definiert und verglichen: aktive Fläche von 13.9 m² (100 %), 9.8 m² (70 %) und 7.0 m² (50 %). Die Daten zu den drei Varianten und die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 17 aufgeführt.

Im Vergleich zur Standardkonfiguration (d. h. der gesamten thermisch aktivierten Deckenfläche) wurde die Heizkurve schrittweise erhöht, um die geringere thermische Fläche auszugleichen und die thermischen Komfortbedingungen im Raum aufrechtzuerhalten. Die Kühlkurve wurde hingegen nur im Falle einer Halbierung der thermischen Fläche leicht verringert. Die linke Grafik in Abbildung 47 zeigt, wie die Vorlauftemperatur mit abnehmender thermisch aktivierter Fläche ansteigt. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit der Veränderung der Heizkurve in den drei analysierten Fällen. Es scheint jedoch, dass diese Temperaturänderung keinen relevanten Einfluss auf die Oberflächentemperatur der Heizdecke hat (rechte Grafik in Abbildung 47).

Dies kann mit der Berechnung der durchschnittlichen Oberflächentemperatur durch das Simulationstool zusammenhängen. Tatsächlich muss einerseits der Anstieg der Temperatur der aktivierten Oberfläche und andererseits die Tatsache berücksichtigt werden, dass nur ein Teil der gesamten thermischen Oberfläche thermisch aktiviert wird.

Tabelle 17: Daten und Ergebnisse der Sensitivitätsstudie für drei verschiedene Heiz-/Kühlflächen.

	Aktive Fläche: 100 %	**Aktive Fläche: 70 %**	**Aktive Fläche: 50 %**
Heizkurve (Tmin/Tmax)	21/35 °C	22/36 °C	24/38 °C
Kühlkurve (Tmin/Tmax)	18/22 °C	18/22 °C	17/21 °C
Thermische Behaglichkeit (SIA 180)	erfüllt	erfüllt	erfüllt
$JAZ_{WP\text{-}Heizen}$ (für Modellzimmer)	3.8	3.8	3.7
$JAZ_{WP\text{-}Kühlen}$ (für Modellzimmer)	4.1	4.1	4.0
Taupunktunterschreitung	2 Std.	2 Std.	0 Std.

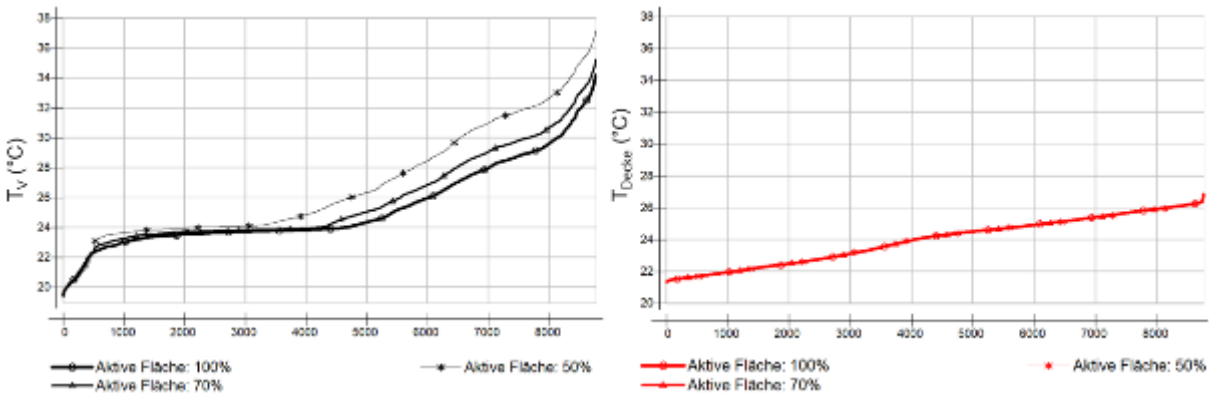


Abbildung 47: Vorlauftemperatur (links) und Oberflächentemperatur der Decke (rechts) bei Veränderung der thermisch aktivierten Fläche

Sollwert-Temperatur für Kühlung

Der Einfluss des Sollwerts der Kühlung auf die Unterschreitung des Taupunkts wurde in einer Simulationsstudie für das Gebäude „Farbhof" (Variante „Innensanierung") analysiert. Insbesondere wurde der Fall getestet, in dem der Sollwert für die Kühlung 23 °C (anstelle von 26 °C) beträgt. Um eine operative Temperatur im Raum von 23 °C aufrechtzuerhalten, musste die Kühlkurve um 2 K abgesenkt werden (im Vergleich zur in Abbildung 39 dargestellten Kurve).

Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 dargestellt. In beiden Fällen ist die thermische Behaglichkeit gemäss der Norm SIA 180 erfüllt. Bei einem Sollwert von 23 °C zeigen die Ergebnisse, dass auch der PMV stets innerhalb des Komfortbereichs liegt, d. h. -0.5 < PMV < +0.5 (Abbildung 48).
Die Überprüfung des Taupunkts zeigt hingegen, dass bei einem Sollwert von 23 °C die Gefahr von Oberflächenkondensation an der Decke besteht. In diesem Fall zeigen die Ergebnisse, dass die Oberflächentemperatur der Decke etwa 40 Stunden lang unter dem Taupunkt liegt. Wie in Abbildung 49 dargestellt, betreffen diese 40 Stunden jedoch etwa zehn Sommernächte, in denen der kontinuierliche Aufenthalt im Raum (und damit die hohe Feuchtigkeitsproduktion) und die „relativ" niedrige Oberflächentemperatur der Kühldecke zu einem möglichen Oberflächenkondensation für jeweils rund 4 Stunden führen. Falls im Anschluss dieser Taupunktunterschreitungen von rund 4 Stunden eine Abführung der angesammelten Feuchtigkeit in der Decke durch die (natürliche) Belüftung des Raumes gewährleistet wird, ist da von auszugehen, dass Feuchteschäden an der Decke vermieden werden können.

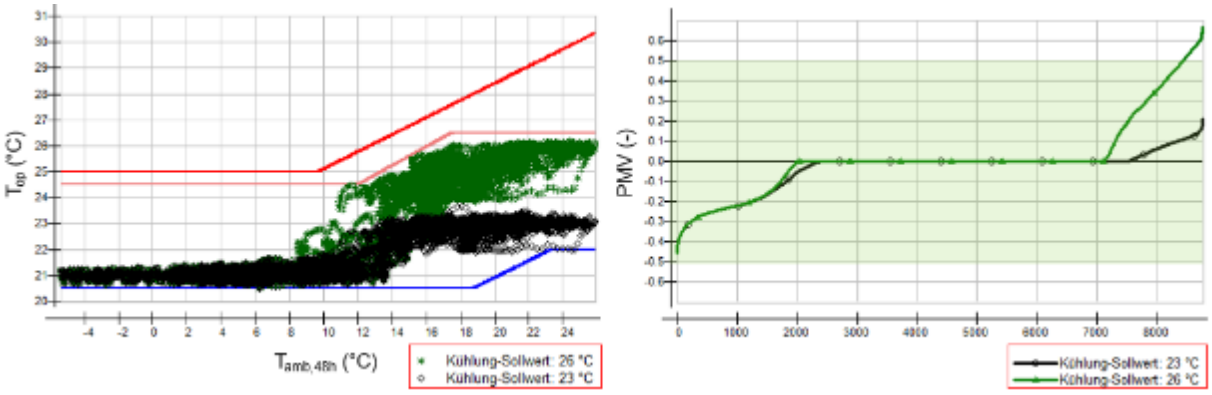


Abbildung 48: Thermische Behaglichkeit gemäss SIA 180 (links) und Predicted Mean Vote PMV (rechts) bei Änderung des Kühlungs-Sollwerts.

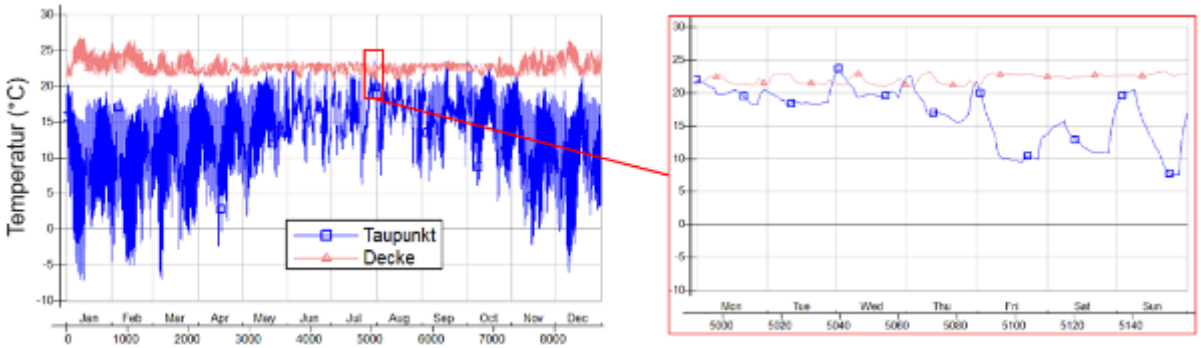


Abbildung 49: Taupunkt und Deckentemperatur – Kühlung-Sollwert: 23 °C. Rechts: Detail mit nächtlicher Unterschreitung des Taupunkts.

Tabelle 18: Zusammenfassung der Ergebnisse bei Änderung des Kühlungs-Sollwerts - Gebäude «Farbhof», Variante «Innensanierung».

	Sollwert: 26 °C	**Sollwert: 23 °C**
Kühlenergiebedarf (kWh/m²a)	5	22
Thermische Behaglichkeit (SIA 180)	erfüllt	erfüllt
PMV > +0.5	328 Std.	0 Std.
Taupunktunterschreitung	2 Std.	40 Std.

Auswirkung der thermischen Entkopplung der Decke ausserhalb der Kühlperiode

Der Raum „Farbhof“ mit Betondecke wurde verwendet, um ausserhalb der Kühlsaison die Auswirkungen der thermischen Entkopplung der Decke (durch Einbau der Abhangdecken mit Schallschutzfunktion) auf die Raumtemperaturen zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden die folgenden beiden Varianten verglichen: der Fall „vor der Sanierung“ und der Fall „Innensanierung“ ohne aktive Kühlung. Für Informationen über Wandaufbau und Randbedingungen der Simulationen siehe Abschnitten 6.2.1 („vor der Sanierung“) und 6.1.3 („Innensanierung“).
Abbildung 50 zeigt den thermischen Komfort gemäss der Norm SIA 180 für die beiden simulierten Fälle. Wenn die Raumluft thermisch an die Betondecke gekoppelt ist, mit ihr also in direktem Kontakt steht (Fall „vor der Sanierung“), liegen bis zu rund 1 K niedrigere Temperaturen vor, als im Fall der Entkopplung durch die Abhangdecke (Fall „Innensanierung“). Der Fokus dieser Untersuchung soll hier auf den Übergangsmonaten liegen – im Fall «Innensanierung» würde bei hohen Aussentemperaturen ($T_{amb,48h}$ > ca. 20 °C) eigentlich gekühlt werden.

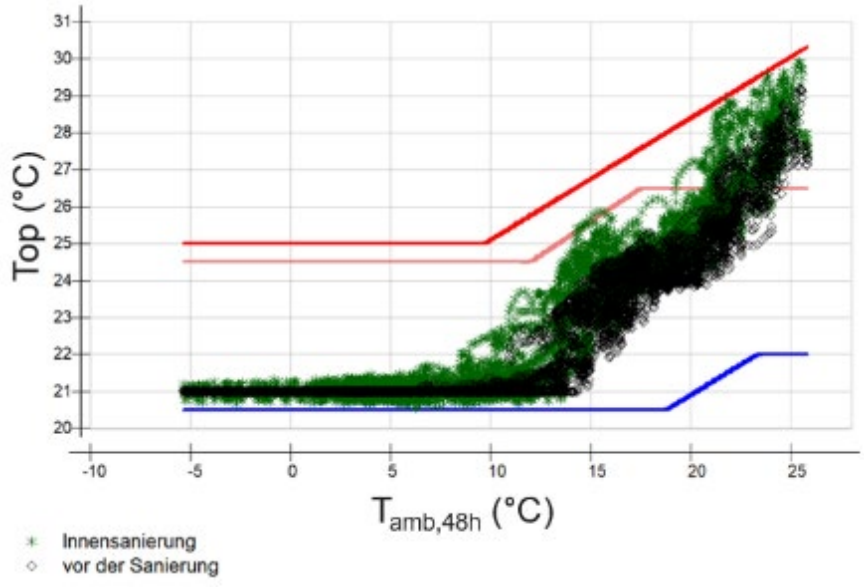


Abbildung 50: Thermische Behaglichkeit gemäss SIA 180 – «vor der Sanierung» (schwarze Rauten) und «Innensanierung» (grüne Sterne), (Klimadatensatz für das Jahr 2060 verwendet).

Der Einfluss der thermischen Entkopplung der Decke auf die Raumtemperatur ist auch in Abbildung 51 zu erkennen, die den Verlauf der operativen Raumtemperatur für die beiden Fälle während einer Woche im Mai zeigt. Beim Fall „vor der Sanierung“ zeigen sich etwas niedrigere Temperaturen (in der Grössenordnung von oft 0.5 bis maximal 1 K). Im Fall „vor der Sanierung“ steht die 14 cm dicke Betondecke im Kontakt mit der Raumluft, was somit eine stärkere Dämpfung der externen Wärmelasten ermöglicht.

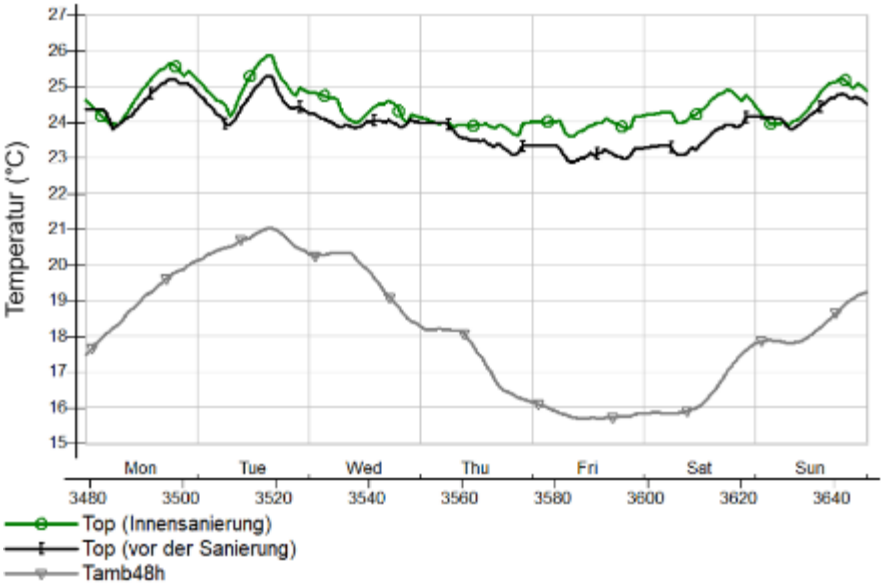


Abbildung 51: Operative Temperatur (T_{op}) für beide Fälle und durchschnittliche Aussenlufttemperatur für eine Woche im Mai.

6.2.5. Schlussfolgerungen zum thermischen Komfort

Sämtliche Gebäudesimulationen im Programm Ida-Ice wurden mit Klimadaten für das Jahr 2060 durchgeführt, um den Bedarf für eine thermische Sanierung der betrachteten Modell-Gebäude mit zukünftigem Klima am Standort zu zeigen. In sämtlichen Simulationen wurde angenommen, dass als sommerlicher Überhitzungsschutz bei Bedarf eine aussenliegende Verschattung des Fensters eingesetzt wird und, wenn möglich, eine Nachtauskühlung mittels gekipptem Fenster vorgenommen wird.

Vergleich der verschiedenen Sanierungsstufen der Gebäude

Im heutigen Zustand der Gebäude ist der sommerliche Komfort im Jahr 2060 klar nicht gegeben: sowohl beim Farbhof (Standort Zürich, mit Betondecke) als auch für die Maulbeerstrasse (Standort Basel, Holzbalkendecke) muss im Sommer mit häufiger Überschreitung des in der Studie angestrebten Zielwerts für die Raumtemperatur von 26.5 °C gerechnet werden (max. Raumtemperatur: 29.5 °C im Farbhof, 32 °C in der Maulbeerstrasse). Wegen der hohen Raumtemperaturen wird im Sommer auch der gewünschte PMV-Grenzwert von +0.5 deutlich übertroffen (bis max. +1.4 für den Farbhof, und +2.2 für die Maulbeerstrasse mit einer sehr häufigen Überschreitung von total 1'200 Stunden). Der spezifische Heizwärmebedarf der Zimmer liegt für das Jahr 2060 bei 54 kWh/m^{2}a für das Zimmer im Farbhof resp. 27 kWh/m^{2}a für das Zimmer in der Maulbeerstrasse. Der Heizwärmebedarf kann in der Studie nur für die Zimmer alleine angegeben werden, da die Gebäude als Gesamtes nicht simuliert wurden.

Mit der Innensanierung (Einbau Heiz- und Kühldecke) können die gewählten Grenztemperaturen für Winter und Sommer von 21 °C resp. 26 °C eingehalten werden. Auch die weiteren Komfortkriterien zur erwartbaren Zufriedenheit (PMV) und zu Temperatur- und Strahlungsunterschieden im Raum werden erfüllt. Die vorgängige Erwartung, dass sich im Winter durch relativ hohe Vorlauftemperaturen in der Deckenheizung eine unangenehme Situation einstellt («heisser Kopf wegen Deckenheizung») konnte nicht bestätigt werden, die beiden Komfortkriterien «Lufttemperatur Kopf-Knöchel» und «Asymmetrie der Strahlungstemperatur» (Kapitel 2.4.2) werden erfüllt. Da die Aussenhülle des Gebäudes in dieser Sanierungsstufe nicht geändert wird, bleibt der Heizenergiebedarf im Vergleich zum unsanierten Gebäude unverändert. Allerdings kann die Vorlauftemperatur der Heizung gegenüber dem unsanierten Zustand stark abgesenkt werden (nicht simuliert), was eine Voraussetzung für eine hohe Effizienz der Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen ist.

Mit zusätzlicher energetischen Aussensanierung kann die thermische Behaglichkeit, die mit der Innensanierung schon erreicht wurde, nochmals verbessert werden. Durch die Aussensanierung wird die Kühllast verringert (weniger Kühlbedarf, höhere Kühlkurve), wodurch gemäss Simulation die Taupunktunterschreitung für beide Modellzimmer komplett vermieden wird. Wir nur Innen saniert, ergibt sich mit den simulierten Rahmenbedingungen für wenige Stunden eine Unterschreitung des Taupunkts, was auf mögliche Feuchtigkeitsprobleme in der realen Umsetzung hinweisen kann.

Durch Aussensanierung können Heiz- und Kühlkurve deutlich moderater gewählt werden, was bessere Effizienzen der WP ermöglicht und im Sommer die Gefahr von Feuchteschäden durch die Kühlung verringert. Für beide simulierten Zimmer ergibt sich nach der Aussensanierung wegen der Ausrichtung der Zimmer Richtung Süden ein sehr geringer spezifischer Heizenergiebedarf im Jahr 2060 von 10 kWh/m^{2}a für den Farbhof resp. 7 kWh/m^{2}a für die Maulbeerstrasse (Kühlbedarf: 3.4 kWh/m^{2}a resp. 7 kWh/m^{2}a).

Thermisch aktiver Flächenanteil der Decke

Je geringer der Flächenanteil der Zimmerdecke ist, der mit Heizungsrohren thermisch aktiviert wird, desto ausgeprägter müssen Heiz- und Kühlkurve sein, was entsprechend zu höherem Stromverbrauch bei Wärmebereitstellung mit einer Wärmepumpe führt. Es wurde neben einer zu 100 % aktivierten Decke auch Aktivierungen von 70 % und 50 % für den Fall Farbhof simuliert. Der thermische Komfort kann auch mit 50 % Aktivierung erreicht werden, bei um 3 K erhöhter Heizkurve und 1 K abgesenkter Kühlkurve.

Sollwert Kühlsaison bei 23 °C statt 26 °C

Mit der untersuchten Klimatisierung via Decke kann auch ein erhöhter Komfort im Sommer mit 23 °C maximaler operativer Raum statt 26 °C erreicht werden. Die Kühlkurve muss entsprechend um 2 K gesenkt werden. Der Kühlenergiebedarf erhöht sich dadurch von 5 auf 22 kWh/m^{2}a (Variante Farbhof, Zürich) und die Stunden mit Taupunktunterschreitung der Deckenoberfläche erhöhen sich von 2 h auf 40 h. Da die Stunden nicht am Stück anfallen (maximale Dauer der Unterschreitung ca. 4 h), besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die Decke mittels Luftwechsel im Zimmer zwischen zwei Perioden mit Taupunktunterschreitung wieder zu trocknen. Feuchteschäden können bei erfolgreicher Trocknung verhindert werden. Allerdings erhöht sich mit dem niedrigen Kühl-Sollwert von 23 °C klar das Risiko für Feuchteschäden. Mit höher gewählter Solltemperatur im Raum und entsprechend mit höheren Vorlauftemperaturen kann dieses Risiko gesenkt werden.

Auswirkung der Abhangdecken auf den thermischen Komfort ausserhalb der Kühlsaison

Die Klimadecken verfügen wegen ihrer zusätzlichen Schallschutzfunktion über eine lockere Dämmschicht, welche die Geschossdecke thermisch von der Luft des darunterliegenden Raums getrennt. Dadurch kann die thermische Kapazität der Geschossdecke die Temperaturänderungen der Raumluft im Tagesverlauf nicht abmildern, was sich ansonsten i.d.R. positiv auf den thermischen Komfort auswirkt. Insbesondere Betondecken können hier eine grosse Wirkung entfalten (anders als Holzbalkendecken). Es wurde deswegen für den Farbhof, welcher eine Betondecke hat, untersucht, welche Unterschiede sich im Sommerhalbjahr ausserhalb der Kühlsaison für die Varianten «vor der Sanierung» und «mit Innensanierung» bei der Raumtemperatur ergeben. Die Simulation zeigt, dass mit sanierter Raumdecke teilweise bis zu 1 K höhere Raumtemperaturen entstehen. Die Auswirkung der thermischen «Abkopplung» der Decke kann also zeitweise fühlbar sein und hat eine leicht negative Auswirkung auf den thermischen Komfort in den Sommermonaten, zu Zeiten, in denen nicht aktiv gekühlt wird.

6.3 Umweltwirkungen

Für die Ökobilanzierung wurden weitestgehend Ökobilanzdaten im Baubereich (KBOB) auf Grundlage der ecobau-Hintergrunddaten verwendet. Es wurde mit der Version 8.02 vom 16.03.2026 gearbeitet. Die dargestellten Berechnungen beinhalten die Herstellungs- sowie die Entsorgungsphase. Im Anhang 11.2 ist die zugrunde liegende Massenermittlung abgelegt. In der KBOB-Liste besteht aktuell eine Informationslücke in Bezug auf einige Baustoffe. So gibt es beispielsweise für Baumaterialien auf Basis von Lehm bisher nur wenige Datensätze; Ökobilanzdaten für Lehmplatten sind bislang in der KBOB-Liste gar nicht enthalten. Für die ökologische Bewertung der Sanierungsmassnahmen im Projekt erscheint vor allem der Vergleich zwischen konventionellen Bekleidungsplatten (Gipskarton, Gipsfaser) und Lehmplatten interessant, da letztere aus Kostengründen oftmals nicht zum Einsatz kommen. Zu diesem Zweck wurden für einen sondierende Gegenüberstellung auch Daten aus der deutschen Ökobaudat (OBD) herangezogen, da hier Lehmplatten enthalten sind [51]. Hierbei wurde die Version 2024-I verwendet. Diese basiert auf Sphera MLC Hintergrunddaten. Es gibt eine weitere Version der OBD, die auf ecoinvent-Daten basiert, die allerdings auch keine für das Projekt dienlichen Datensätze enthält. Zusätzlich ist das Ergebnis einer Bachelor-Thesis, die am INEB durchgeführt wurde, als Datensatz in die Bilanzierungen mit eingeflossen. In der Arbeit wurde die Lehmbauplatte des Schweizer Herstellers Lehmwerk analysiert. Auch wenn ein direkter Vergleich der bilanzierten Ergebnisse aufgrund der unterschiedlichen Hintergrunddaten hinterfragt werden kann, so erscheint dieser dennoch hilfreich, um grundsätzliche Tendenzen in Bezug auf die Umweltwirkungen der Bekleidungsmaterialien identifizieren zu können.

Bilanzierung GWP der Bekleidungsmaterialien (KBOB / KBOB konform / OBD)

In einem ersten Schritt wurden unterschiedliche Baustoffe auf Basis von Gips und Lehm miteinander verglichen, die sich als Bekleidungsmaterialien für das konzipierte Sanierungssystem eignen. Diese unterscheiden sich im Grad der Vorfertigung (Plattenmaterialien, Putzmaterialien), der technischen Ausführung (mit / ohne Rohrleitungssystem) sowie der Herstellung (Art der Trocknung: konventionell, mittels Abwärme, solar). Es wurde 1 m^2 in 20 mm Materialstärke in Bezug auf die Herstellungs- (entspricht Modul A1 – A3) sowie die Entsorgungsphase (entspricht Modul C3+4) bilanziert.

In Abbildung 52 sind die Ergebnisse dieses Vergleichs mit Angabe der potenziellen Einsparung auf das höchste GWP dargestellt. Für die gesamtheitlichen Berechnungen wurde auch das Ergebnis aus der Bachelor-Thesis verwendet. Das GWP in kg CO_2-eq. lässt sich ersatzweise vergleichen. Insgesamt sind die Werte aus der OBD niedriger als die der KBOB. Das ist auf unterschiedliche Hintergrunddaten und Berechnungsmethoden zurückzuführen und wird bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt.

Grundsätzlich schneiden die Produkte auf Basis von Lehm besser ab als die gipsbasierten. Das liegt an dem energieintensiveren Herstellungsprozess von Gipsbaustoffen, da bei der Aufbereitung eine Calcinierung (Brennprozess) des Eingangsmaterials (Natur- oder REA-Gips) notwendig ist, um aus dem Eingangsmaterial Baustoffe herstellen zu können. Dass das Lehm-Klimaelement das zweithöchste GWP aufweist, liegt daran, dass es sich hierbei um ein vorgefertigtes System mit integrierten Heizrohren handelt, also bereits Komponenten der Wärme/Kälteverteilung in der Bilanz enthalten sind, die entsprechend zu Buche schlagen. Auch wenn ein direkter Vergleich zu den Produkten nach KBOB nicht regelkonform ist, ist es interessant zu sehen, dass diese Platte 31 % weniger GWP aufweist als eine Gipsfaserplatte ohne Rohrsystem.

Vergleicht man nur die Plattenmaterialien ohne Rohrsystem zeigt sich, dass die Gipsfaserplatte (KBOB / OBD) im Vergleich zur Gipskarton- und den Lehmplatten das höchste GWP aufweist. Das begründet sich zum einen in der höheren Masse im Vergleich zu Gipskartonplatten und des Anteils an Zellulosefasern, deren Herstellungsprozess sich negativ auf die Bilanz auswirkt. Die solar getrocknete Lehmplatte schneidet am besten ab. Im Vergleich zur Gipsfaserplatte (KBOB) ist das GWP um 99 %, im Vergleich zur Gipsfaserplatte (OBD) um 51 % niedriger. Auch im Vergleich zu den Gips- und Lehmputzen, die keinen Vorfertigungsgrad aufweisen, weist die solar getrocknete Lehmplatte ein deutlich niedrigeres GWP auf.

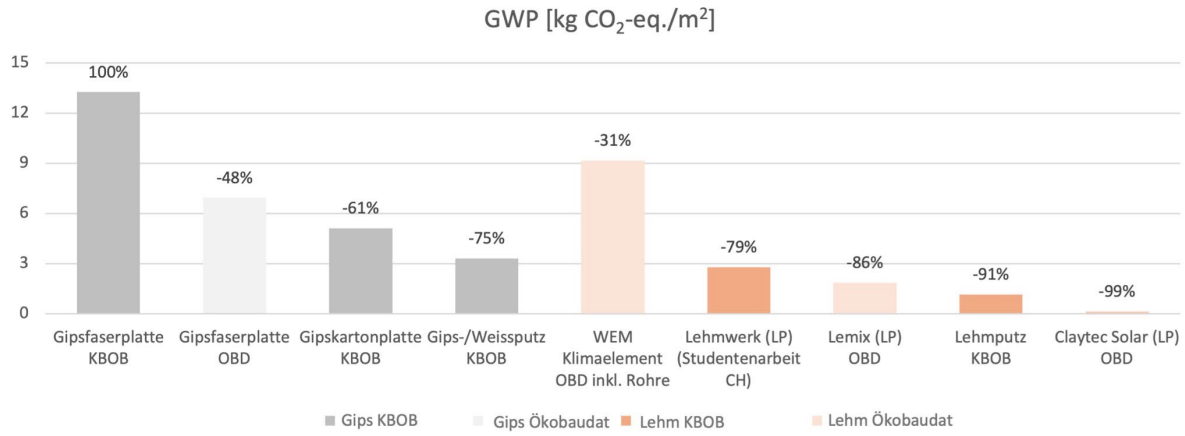


Abbildung 52: Vergleich GWP in kg CO2-eq./m^2 Baustoff in 20 mm Stärke. In der Gegenüberstellung sind Ergebnisse unterschiedlicher Datenbanken dargestellt.

Vergleicht man die Plattenwerkstoffe und die Putze, ist deren GWP, abgesehen von der solargetrockneten Lehmplatte, im Vergleich zu den Putzen deutlich höher, da der Vorfertigungsprozess mehr Energie benötigt. Dennoch lassen sich in etwa proportional gleiche Trends ableiten. Derselbe Trend zeichnet sich ab im Vergleich von Gips- zum Lehmputz (beide KBOB).

Die Ergebnisse zeigen, wie mit der Wahl der Grundmaterialien und einem regenerativ betriebenen Herstellungsprozess (in diesem Fall die Trocknung der Lehmplatten), das GWP von Bekleidungsmaterialien signifikant reduziert werden kann.

Für den sondierenden Materialvergleich wurde nur das GWP für die Datensätze der KBOB, KBOB konformen und OBD herangezogen und für die UBP nur die Datensätze der KBOB und des KBOB konformen, da die Umweltbelastungspunkte nur in der Schweiz ausgewiesen bzw. berechnet werden. Der nicht erneuerbare Energiebedarf wurde in den sondierenden Vergleichen nicht mitbetrachtet.

Bilanzierung UBP der Bekleidungsmaterialien (KBOB / KBOB konform)

Im nächsten Schritt werden die Umweltbelastungspunkte bilanziert, deren Ergebnisse in Abbildung 53 dargestellt sind. Bei der Betrachtung konnten nur die Daten der KBOB vergleichend herangezogen werden, weil der Indikator in den Daten der Ökobaudat nicht ausgewiesen wird.

In dem nun möglichen direkten Vergleich der Baustoffe wird deutlich, dass die Umweltwirkungen der Lehmbaustoffe signifikant unter denen der Gipsbaustoffe liegen. Die Lehmplatte (Schweizer Hersteller) weist ca. 75 % weniger Umweltbelastung auf als eine Gipsfaserplatte. Beim Vergleich der Putzmaterialien ist der Unterschied nicht ganz so ausgeprägt, aber auch hier schneidet der Lehmputz mit ca. 35 % weniger Umweltbelastung deutlich besser ab. Damit folgen die Ergebnisse der Tendenz, die sich bei der Bilanzierung des GWPs abgezeichnet hat.

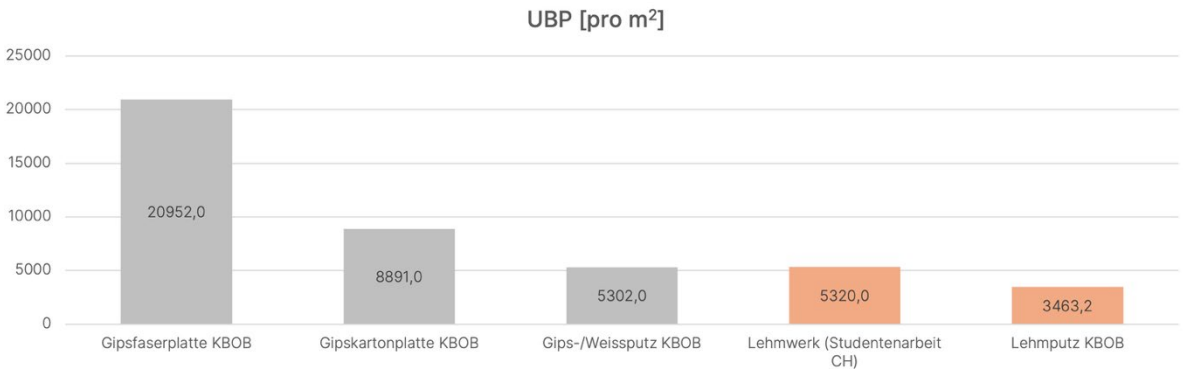


Abbildung 53: Vergleich UBP unterschiedlicher Bekleidungsmaterialien in 20 mm Materialstärke.

Bilanzierung GWP, UBP und PENRT der Sanierungsvarianten (KBOB)

In der folgenden Betrachtung wird das Gesamtsystem auf Basis der in Kapitel 5 dargestellten Varianten bilanziert. Die Datengrundlage sind die KBOB Daten der Version 8.02 vom 16.03.2026. Der Datensatz für die Lehmplatte wurde wie bereits erwähnt aus einer Studierenden Bachelorarbeit verwendet. In Anhang 11.2 ist die Mengenermittlung der jeweiligen Systeme mit einer differenzierten Darstellung der einzelnen Komponenten ausgewiesen. Es wurde zwischen dem in den Platten integriertem Rohrleitungssystem und dem System auf Basis des Wärmeleitblechs unterschieden. Bei dem integrierten System ist insgesamt weniger Rohrleitung innerhalb der Fläche verlegt, allerdings ist im Bereich der Randbereiche mehr Rohrleitung nötig. In etwa bleibt damit der Verbrauch an Rohrmaterial in beiden Varianten gleich. Dies wurde zeichnerisch in Ausführungsplänen ermittelt. Die Ergebnisse der Berechnungen wurden auf die funktionale Einheit von einem m^2 Bauteil, also der sanierten Fläche, bezogen. Weitere Qualitäten (z.B. Schall- oder Wärmeschutz) wurden nicht, wie sonst üblich, definiert, da diese sich aufgrund der vorgegebenen Plattenstärken unterscheiden. Die Bilanzierung bewertet somit die Umweltwirkungen der jeweiligen Sanierungsvariante, ermöglicht aber keine direkte Aussage darüber, wie der z.B. der absolute Schallschutz am umweltfreundlichsten realisiert werden kann.

In der Massenermittlung wurde zwischen dem Modellzimmer in der Maulbeerstrasse (ca. 15 m^2) und des Farbhofs (ca. 14 m^2) differenziert. Die Ergebnisse wurden jedoch in einer Graphik in Abbildung 54 dargestellt, da für die Maulbeerstrasse, wie in Kapitel 5 erläutert, nur zwei Varianten entwickelt wurden. So soll geschaut werden, ob sich für beide Gebäude dieselben Tendenzen ablesen lassen.

Abbildung 54 zeigt die Ergebnisse in Bezug auf das GWP für die jeweiligen Gesamtsysteme, die für den Farbhof sowie die Maulbeerstrasse entwickelt wurden. Auch wenn die absoluten Werte sich nicht so stark unterscheiden, wie bei der Betrachtung der Einzelmaterialien, so lässt sich für beide Gebäude dieselbe Tendenz ablesen. Grundsätzlich schneiden die Varianten auf Basis von Lehmplatten besser ab, als die auf Basis von Gipsfaserplatten. Zudem wird deutlich, dass die Varianten mit den Wärmeleitblechen in allen Fällen ein höheres GWP aufweisen, als die Variante auf Basis der Lehmplatte mit den integrierten Rohrleitungen. Auch die Federschiene wirkt sich negativ auf das GWP aus, da diese einen höheren Materialverbrauch im Vergleich zum Direktabhänger aufweist.

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass die Unterschiede in den Mengenermittlungen der beiden Gebäude, die sich aus Grundfläche und Geometrie ergeben, sehr gering ausgefallen. Die Ergebnisse von Farbhof sind die Varianten mit den Nummern 1. und die der Maulbeerstrasse die Varianten mit der Nummer 2. und sind grafisch durch eine gestrichelte Linie getrennt.

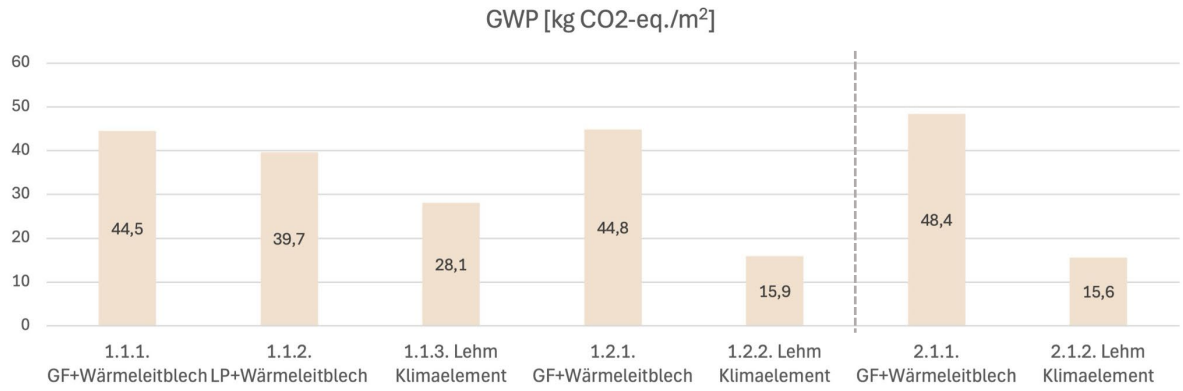


Abbildung 54: Ergebnisse GWP der unterschiedlichen Sanierungsvarianten.

Die Ergebnisse der UBPs (Abbildung 55) und des nicht-erneuerbaren Energiebedarfs gesamt (PENRT / Graue Energie) (Abbildung 56) korrelieren mit den Trends aus der Bewertung des GWPs.

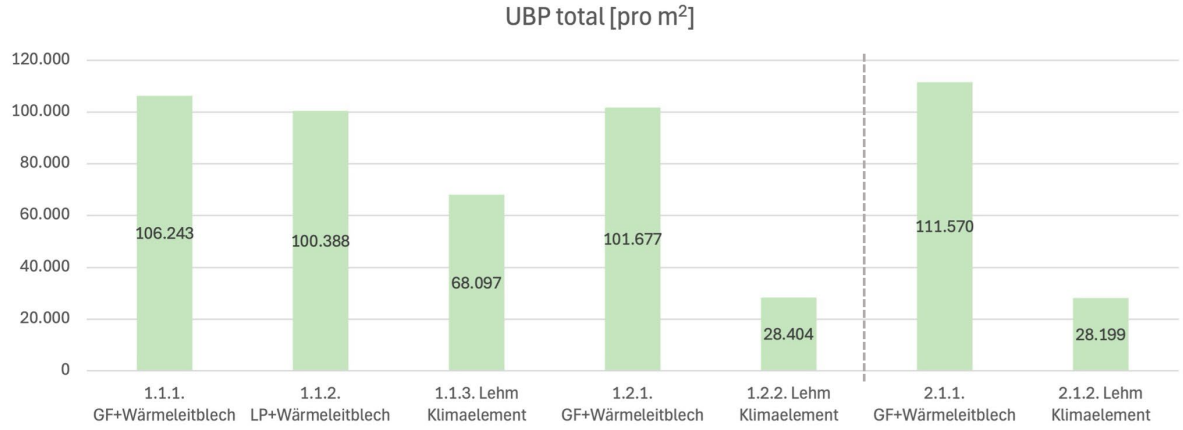


Abbildung 55: Ergebnisse UBP der unterschiedlichen Sanierungsvarianten.

Bei den drei betrachteten Indikatoren schneidet die Variante 1.2.2. (Farbhof) und 2.1.2. (Maulbeerstrasse) am besten ab. Beide Varianten basieren auf einer Lehmbauplatte mit einem integriertem Rohleitungssystem, dass mittels Direktabhänger von der Rohdecke abgehängt wird und auf Wärmeleitbleche verzichtet. Der Unterschied zwischen Variante 1.2.2. bzw. 2.1.2. und der Variante 1.1.3. besteht in der gewählten Unterkonstruktion. Alle drei Varianten sind mit dem Lehm Klimaelement ausgestattet, bei Variante 1.1.3. kommt allerdings eine Federschiene zum Einsatz, die aufgrund des Flächengewichts an vielen Befestigungspunkten eingesetzt werden muss. Daher ist der Stahlanteil in dieser Variante und somit die Umweltindikatoren im Vergleich erhöht.

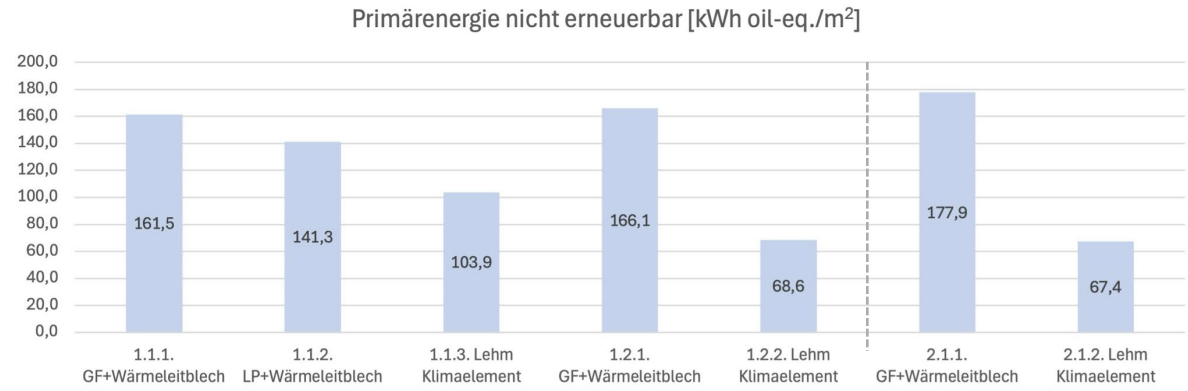


Abbildung 56: Ergebnisse nicht-erneuerbare Primärenergie der unterschiedlichen Sanierungsvarianten.

Bilanzierung GWP der Sanierungsvarianten mit Ausweisung der Einzelkomponenten (KBOB)

Für die betrachteten Sanierungsvarianten wurde für eine ganzheitliche Betrachtung die vollständige Konstruktion differenziert auf die einzelnen Komponenten dargestellt. Unterteilt ist die Berechnung in die jeweilige Bekleidungsplatte, die Rohrleitungen für das wassergeführte System, die Unterkonstruktion inklusive Abhängung sowie die Dämmung. Abbildung 57 zeigt die Ergebnisse der differenzierten Bilanzierung.

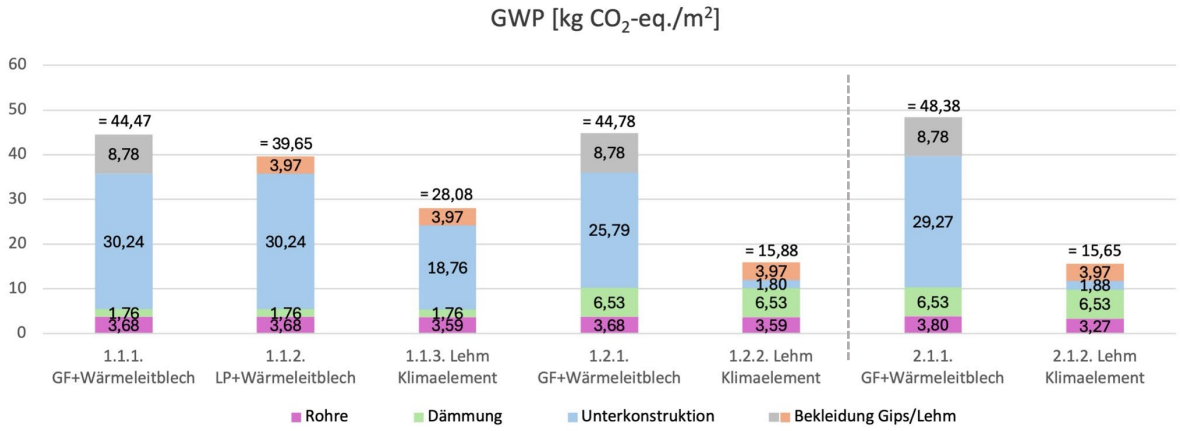


Abbildung 57: Darstellung der GWP Anteile an von Rohrleitung, UK + Dämmung und der Bekleidung der unterschiedlichen Sanierungsvarianten.

Bei der Betrachtung des GWP ist in der Gesamtsumme der Anteil des gewählten Plattenmaterials entsprechend gering. Die Lehmbauplatte liegt mit knapp 4 kg CO_2-eq. jedoch unter der Hälfte der Gipsplatte. Hierbei ist anzumerken, dass die Lehmbauplatte eine Stärke von 25 mm und die Gipsplatte eine Stärke von 12.5 mm aufweist. Das Einsparpotenzial wäre demnach bei gleicher Materialstärke nochmal höher. Aktuelle Entwicklungen am Markt lassen den Schluss zu, dass ein solches System zeitnah auch mit einer dünneren Lehmplatte von 12,5 mm Materialstärke ausgeführt werden kann. In beiden Varianten ist der Spachtel bzw. Feinputz mit eingerechnet. Ein Armierungsgewebe wurde in beiden Fällen aufgrund eines fehlenden Datensatzes nicht berücksichtigt. Die Unterkonstruktion macht vor allem bei den Varianten mit Wärmeleitblechen den grössten Anteil aus. Das Wärmeleitblech hat innerhalb der Unterkonstruktion einen Anteil am GWP von ca. 25-28 kg CO_2-eq./m². In der Variante 1.1.3. liegt der Wert der UK bei über 20 kg CO_2-eq. Dies liegt daran, dass für die Montage der Lehmelemente mehr Schienen angebracht werden müssen, was auch aus schalltechnischer Sicht ungünstig ist. Im Fall von der genannten Variante werden diese als Federschienen aus Blech ausgeführt. Die Varianten 1.2.2.

und 2.1.2. haben das niedrigste GWP, weil in diesen Varianten die grössten Teile der UK in Holz ausgeführt sind. Insgesamt sind die Varianten mit dem integrierten Rohrsystem in der Lehmbauplatte bezogen auf das GWP die besten Varianten.

6.4 Brandschutz

Die verwendeten Materialien müssen den Brandschutzvorschriften entsprechen. Insbesondere Systeme, die direkt unterhalb von tragenden Bauteilen ohne Brandschutz installiert werden, benötigen die Klassifizierungen RF1 (nicht brennbar, kein brennendes Abtropfen). Ist der Brandschutz der Decke jedoch bereits erfüllt, gelten keine weiteren Anforderungen an die Deckenheizung. Die in dem Projekt analysierten Produkte, die auf Lehm basieren, waren nach EU-Klassifizierung DIN EN 13501-1 zertifiziert und lagen in dem Bereich A1 bis A2, was sie in die Kategorien RF1 und RF2 einordnet. Andere Deckenheizsysteme verweisen auf das Deckenmaterial selbst als Brandschutz. Wenn dies nicht ausreicht, wird auf die Deckschicht einer Deckenheizung verwiesen, die beispielsweise aus RF1-zertifiziertem Gipskarton bestehen kann.

Für beide Gebäude gilt im Neubau, gem. VKF 6.3.1 «Brandschutzkonzept», eine Anforderung von REI 60 für die Geschossdecken. Im Farbhof ist dieses Schutzziel über die Stahlbetondecke bereits abgedeckt. Im Fall der Maulbeerstrasse muss die Holzbalkendecke zum Erreichen des Schutzziels entsprechend mit einem nichtbrennbaren Material bekleidet werden. Für Gipsplatten liegen genügend Nachweise vor. Das Brandverhalten von Lehmplatten ist noch nicht ausreichend erforscht. Es gibt jedoch bereits Produkte, zu denen es Prüfzeugnisse gibt, die eine ausreichende Schutzdauer nachweisen können.

6.5 Tragwerk

In 2.4.6 wurde eine Methodik beschrieben, mit der man nach exakter Bestandsaufnahme eine vereinfachte Berechnung durchführen kann, um zu prüfen, ob die bestehende Decke ausreichend Tragreserven für eine Sanierungsmassnahme aufweist. Die hier dargestellte Rechenweise sollte daher nur unter Einbeziehung eines Tragwerkplaners angewendet werden.

<u>Beispiel Farbhof (Betondecke):</u>

Bestand tragend: 0.14 m * 25 kN/m^3 Stahlbeton = ca. 350 kg/m^2

Bestand Ausbau: 0.002 m * 9.6 kN/m^3 Linoleum = ca. 2 kg/m^2

0.018 m * 10 kN/m^3 Ausgleich + Kleber = ca. 18 kg/m^2

0.02 m * 15 kN/m^3 Deckenputz = ca. 30 kg/m^2

Massnahmen Var. 1.1.1: 18.3 kg/m^2 Gipsfaserplatte

ca. 11.2 kg/m^2 UK + Dämmung

ca. 1.1 kg/m^2 Wasser

= 30.6 kg/m^2

Bezogen auf Tragwerk: 30.6/350 = 0.087 → 8.7 % Lasterhöhung durch Sanierung

Bezogen auf Gesamtaufbau: 30.6/400 = 0.077 → 7.7 % Lasterhöhung durch Sanierung

Das Rechenbeispiel zeigt, dass eine schwerere Decke eine höhere Lastreserve hat. In der vereinfachten Betrachtung kann man also ausschliesslich das Gewicht des Tragwerks ansetzen, um mehr Sicherheit zu haben. Im Beispiel des Farbhofs ist in beiden Fällen für die Variante 1.1.1. der vereinfachte

Nachweis erbracht, weil beide Massnahmen-Varianten einer Lasterhöhung durch die Sanierung von unter 15 % entsprechen.

Für die schweren Deckenkonstruktionen (Var. 1.1.2, Var. 1.1.3 und Var. 1.2.2.) kann ein Nachweis mit der vereinfachten Methode nicht erbracht werden, da die maximal zulässige Lasterhöhung durch die Sanierung überschritten wird. Für die schwerste Decke Var. 1.2.2 beträgt die Lasterhöhung durch die Sanierung bezogen auf das Tragwerk 21 % und bezogen auf den Gesamtaufbau 18 %. In diesem Fall muss die Situation detailliert untersucht werden.

Beispiel Maulbeerstrasse (Holzbalkendecke):

Bestand tragend: ca. 275 kg/m^2

Massnahme Var. 2.1.1:
- 18.3 kg/m^2 Gipsfaserplatte
- ca. 1.1 kg/m^2 Wasser
- ca. 18.1 kg/m^2 UK + Dämmung
- – ca. 24 kg/m^2 Abbruch Putzträger
- = 13.5 kg/m^2

Bezogen auf Tragwerk: 13.5/275 = 0.049 → 4.9 % Lasterhöhung durch Sanierung

Auch bei dem Beispiel der Maulbeerstrasse liegt die Sanierungsmassnahme Var. 2.1.1 mit 4.9 % Lasterhöhung unter dem maximalen Wert für den vereinfachten Nachweis. Eine Massnahme am Fussboden oben ist jedoch in der Rechnung noch nicht berücksichtigt. Mit dem vereinfachten Nachweis wäre jedoch eine maximale zusätzliche Last von 41.2 kg/m^2 nach Abzug des Abbruchs der Putzdecke möglich, welche auch durch die Massnahme am Fussbodenaufbau sicher nicht überschritten wird.

Für die Var. 2.1.2 mit der höheren Masse ist die für den vereinfachten Nachweis zulässige maximale Last mit 18 % knapp überschritten. In diesem Fall muss wieder eine detaillierte Tragwerksberechnung durchgeführt werden.

Wendet man diese Methodik in einem realen Szenarium an, ist es wichtig, dass umfangreiche Grundlagen des zu beurteilenden Projekts vorliegen. Es ist daher notwendig, dass man genaue Untersuchungen vor Ort anstellt und Planungsunterlagen vorhanden sind.

6.6 Kostenschätzung

6.6.1. Investitionskosten

Für die Investitionskosten wurden Einheitspreise einzelner Bauleistungen zusammengestellt, die von Kostenplanern im Raum Zürich eingeholt wurden. Die Kosten sind inklusive 8.1 % Mehrwertsteuer angegeben und beinhalten sämtliche Leistungen, um die Zimmer in einem Gebäude mit den konzipierten Abhangdecken auszustatten, welche eine erhöhte Schalldämmfunktion und eine Heiz- und Kühlschicht beinhalten (Abgrenzung der Investitionskosten: siehe Anhang 11.4). Die Planung ist pauschal mit einem Aufschlag von 23 % bezogen auf die Gesamtkosten für Material und Arbeit eingerechnet.

Problematisch beim Kostenvergleich ist, dass Gipsplatten und Lehmplatten bzw. -produkte eine sehr unterschiedliche Marktreife aufweisen: Gipsprodukte sind seit Jahrzehnten auf dem Markt und werden grossskalig produziert, während Lehmprodukte aktuell noch in geringen Mengen produziert werden und somit eher hochpreisig sind. Zudem haben Lehmprodukte gewisse Vorteile, die hier nicht monetär abgebildet werden (wie die Fähigkeit, viel Feuchtigkeit aufnehmen zu können, Gerüche zu neutralisieren, geringe THG-Emissionen zu verursachen, wiederverwertbar zu sein, etc.)

Abbildung 58 zeigt die Investitionskosten pro m2 sanierter Deckenfläche je Sanierungsvariante (Varianten siehe Abbildung 25, Kapitel 5). Nicht in den Kosten enthalten ist in der Abbildung die Wärmeverteilung ab Decke inkl. Verteiler, da diese in allen Varianten annähernd gleich ist. Im Anhang 11.5 sind die detaillierten Kosten sowie die angenommenen Mengen aufgeführt.

Für die Kostenermittlung wurde eine Fläche von 2'000 m^2 zu sanierender Decke als Bezugsgrösse gewählt[2]. Gemäss Auskunft von Planerfirmen sind die Preise der betrachteten Abhangdecken kaum abhängig von der Grösse der sanierten Fläche, die Skaleneffekte sind hier also vernachlässigbar.

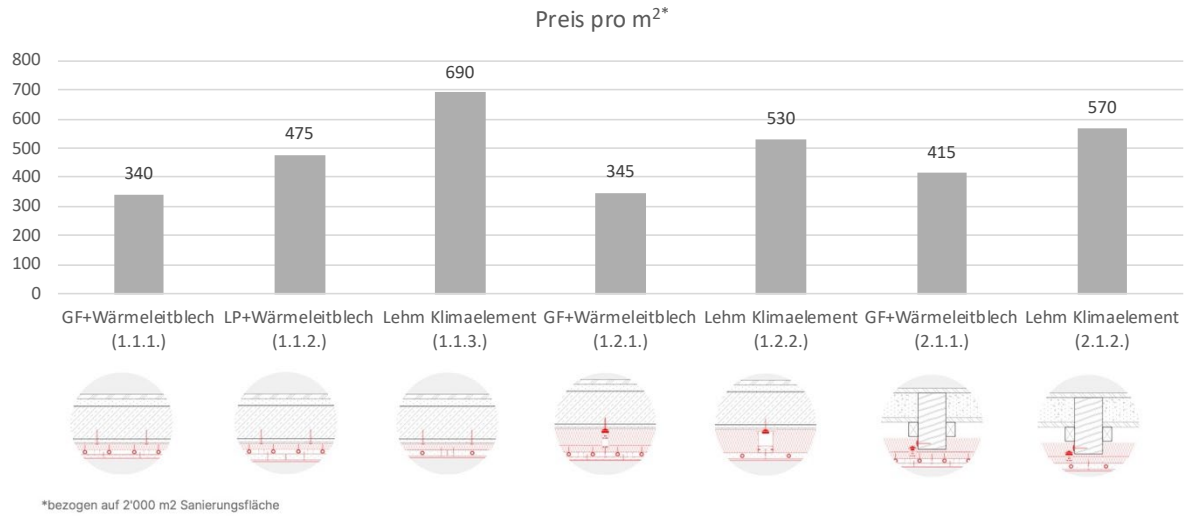


Abbildung 58: Kosten der Deckenvarianten gemäss Kapitel 5 pro Quadratmeter sanierter Deckenfläche (inkl. MwSt.).

Die Varianten mit Wärmeleitblech (1.1.1, 1.1.2 und 1.2.1 für die Betondecke, 2.1.1 für die Holzbalkendecke) schneiden mit Kosten zwischen 340 Fr./m^2 und 475 Fr./m^2 am günstigsten ab, wobei die niedrigsten Kosten mit Gipsfaserplatten(GF)-Beplankung erreicht werden. Eine Beplankung der Wärmeleitbleche mit Lehmplatten (V1.1.2) oder der Einsatz des hier betrachteten vorgefertigten Lehm-

[2] Was in etwa in der Mitte der Geschossflächen der untersuchten Gebäude liegt: Das Gebäude Farbhof in Zürich hat eine Energiebezugsfläche von 3'460 m^2, das Objekt Maulbeerstrasse 44-46 in 4058 Basel eine von 1'365 m^2.

Klimaelements führt zu höheren Kosten von 475 - 690 Fr./m^2. Dies liegt daran, dass die Lehmprodukte aufgrund des sehr viel geringeren Marktanteils einerseits teurer und andererseits im Aufbau aufwendiger sind. Bei der Lehmvariante gibt es zunächst eine Armierungslage und dann einen zusätzlichen Deckputz. Variante 1.1.3. liegt mit ca. 690 CHF/m^2 nochmals um 120 CHF über der zweitteuersten Variante. Das liegt vor allem daran, dass bei der Verwendung der Klimaelemente mehr laufende Meter der Unterkonstruktion eingesetzt werden müssen. In 1.1.3. ist dies die Federschiene. Der erhöhte Verbrauch sorgt für eine unverhältnismässige Kostensteigerung in Bezug auf die Investitionskosten. Bei einer Betrachtung der Lebenszykluskosten würde das Ergebnis jedoch anders ausfallen und sich eine positivere Bilanz für die Klimaelemente im Vergleich zu den Systemen auf Basis von Gipsfaserplatten ergeben. Da die vorgefertigten Lehm-Klimaelemente einfach und zerstörungsfrei demontierbar sind, ergibt sich ein Restwert, der sich aus dem Marktwert der Platte zum Zeitpunkt des Rückbaus abzüglich der Demontage-, Transport- und Aufbereitungskosten und abzüglich der Entsorgungskosten ergeben. Bei den Systemen auf Basis von Gipsfaser kann man zum aktuellen Zeitpunkt nicht von einer Wiederverwendung ausgehen, sodass sich hier ein negativer Wert ergeben würde, der die Demontage-, Transport- und Entsorgungskosten beinhaltet.

Zur Einordnung der Quadratmeterpreise aus Abbildung 58 können die Erstellungskosten einer typischen Fussbodenheizung herangezogen werden. Die Kosten, die ausschliesslich die Sanierung des Zimmerbodens beinhalten, setzen sich laut befragter Planer im Raum Zürich wie folgt zusammen:

- Abbruch und Entsorgung alter Belag und Aufbau = 50 Fr/m^2
- Bodenaufbau inkl. Dämmungen und Unterboden = 60 Fr./m^2
- Fussbodenheizung = 40 Fr./m^2
- Bodenbelag (Annahme Parkett) = 100 Fr./m^2
- Planungskosten: +23 % (gleiche Annahme wie bei Deckensanierung)

Gesamthaft ergeben sich somit inklusive 8.1 % Mehrwertsteuer 332 Fr./m^2 Investitionskosten für die Fussbodenheizung und somit ähnliche Kosten wie für die günstigsten Sanierungsvarianten aus Abbildung 58, wobei in Bestandsbauten bei Umstellung von Radiatoren auf eine Fussbodenheizung oft Zusatzkosten wegen einer Erhöhung des Fussbodenaufbaus noch hinzugerechnet werden müssen[3]. Beim Vergleich muss allerdings beachtet werden, dass bei der Deckensanierung keine zusätzlichen Schallschutzmassnahmen an Bodenbelag oder Seitenwänden eingerechnet wurden, die je nach Gebäude aber notwendig sein können (Kapitel 6.1).

6.6.2. Jahreskosten

Die Jahreskosten werden pro m^2 Energiebezugsfläche (EBF) abgeschätzt. Für die Umrechnung der Investitionskosten aus Kapitel 6.6.1 pro m^2 Deckenfläche in m^2 EBF wird angenommen, dass in typischen Wohnungen das Verhältnis sanierter Deckenfläche mit Heizfunktion zu EBF 0.8 beträgt (Decken von Gang, Bad etc. nicht inkl. Heizschicht saniert). Tabelle 19 zeigt eine Zusammenstellung der spezifischen Kosten für die Deckensanierung gemäss Variante 1.1.1 inkl. Wärmeerzeugung mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und Wärmeverteilung. Darauf aufbauend werden zudem die Jahreskosten nach der Annuitätenmethode mit Betrachtungszeitraum 40 Jahre gezeigt, welche auch Betriebskosten und eine WP-Erneuerung nach 20 Jahren enthalten[4]. Für eine typische 3-Zimmer-Wohnung mit 70 m^2 Energie-

[3] Allfällige Kosten für die Anpassung von Fensterbrüstungshöhen, Türhöhen und Treppenstufen, die bei Vergrösserung der Aufbauhöhe des Fussbodens durch Einbau einer Fussbodenheizung anfallen können, sind hier nicht berücksichtigt.

[4] Nicht berücksichtig wurden die Unterhaltskosten für die Wärmeabgabe (da sie gemäss Aussage der Firmen der Begleitgruppe vernachlässigbar sind) und die Entsorgung der Abhängdecke respektive Weiterverwendung von Komponenten nach dem Rückbau im Sinne der Kreislaufwirtschaft (da die Nutzungsdauer der Decke gross ist und zudem die Effekte positiver oder negativer Restwerte der Komponenten in den Jahreskosten voraussichtlich gering sind).

bezugsfläche ergeben sich Jahreskosten von 1970 Fr./a resp. von 165 Fr./Monat (ohne Wärmeerzeugung und ohne Betriebskosten: 1040 Fr./a bzw. 85 Fr./Monat).

Tabelle 19: Investitions- und Jahreskosten inkl. Betrieb für eine Deckensanierung gemäss günstigster Variante 1.1.1 (spezifische Werte pro m^2 Energiebezugsfläche (EBF); inkl. 8.1 % MwSt.).

Position	**Kosten (pro m^2 EBF)**	**Annahmen**
Investitionskosten:		
Wärmeabgabe	270 Fr./m^2	Deckensanierung gemäss Variante 1.1.1, mit Faktor 0.8 auf EBF umgerechnet
Wärmeverteilung	135 Fr./m^2	50 % der Kosten der Wärmeabgabe, gemäss Studie «EffiWag», [52]
Wärmeerzeugung	185 Fr./m^2	Durchschnittswert für Luft-Wasser-WP aus Fallstudien 1 & 2 in [53]
Total Investition	590 Fr./m^2	inkl. Wärmeerzeugung und -verteilung
Jahreskosten (Zins 2 %, Betrachtungsdauer 40 Jahre, Annuitätenfaktor 3.66 %):		
Kapitalkosten Wärmeabgabe	9.90 Fr./m^2a	Investitionskosten Wärmeabgabe * Annuitätenfaktor
Kapitalkosten Wärmeverteilung	4.95 Fr./m^2a	Investitionskosten Wärmeverteilung * Annuitätenfaktor
Kapitalkosten Wärmeerzeugung	6.76 Fr./m^2a	Investitionskosten Wärmeerzeugung * Annuitätenfaktor
Kapitalkosten Erneuerung WP nach 20 Jahren	1.35 Fr./m^2a	96'000 Fr. für 70 kW LW-WP gemäss [54], inkl. Verrohrung, Transport, Montage
Betriebskosten Strom WP für Wärme und Kälte	4.84 Fr./m^2a	Wärme 60 kWh/m^2, Kälte 5 kWh/m^2a (beides siehe Tabelle 15), COP 3.8, EER 3, Strompreis 27.7 Rp./kWh (Median ElCom)
Betriebskosten Wartungskosten WP	0.34 Fr./m^2a	Für 70 kW LW-WP gemäss [54]; 685 Fr./a, 2000 m^2 EBF
Total Jahreskosten	28.15 Fr./m^2a	Unterhalts- und Entsorgungskosten vernachlässigbar, siehe Text
Beispiel: 3-Zimmerwohnung, 70 m^2 EBF		
Jahreskosten inkl. Wärmeerzeugung	1970 Fr./a resp.165 Fr./Monat	28.15 Fr./m^2a * 70 m^2 EBF (pro Monat: * 1/12)
Jahreskosten ohne Wärmeerzeugung	1040 Fr./a resp. 85 Fr./Monat	nur Wärmeverteilung und -abgabe

7 Synthese

Die Eignung der Sanierungsvarianten aus Kapitel 5 wurden für die beiden Zimmer (Kapitel 4.2) mit Betondecke und mit Holzbalkendecke untersucht. Dafür wurden die sieben Planungskriterien gemäss Kapitel 2.4 verwendet und für jedes der Kriterien in Kapitel 6 eine Abschätzung vorgenommen. Nachstehend sollen die Sanierungsvarianten möglichst gesamthaft bewertet werden. Dabei eignen sich einige der verwendeten Kriterien nicht zur Unterscheidung der Sanierungsvarianten, sondern müssen für jede der Varianten in einem konkreten Umsetzungsfall erfüllt sein. Die Bewertungen mit den restlichen Kriterien werden in Tabelle 20 im Sinne einer Multikriterienanalyse aufgeführt.

In der Bearbeitung des Projekts ist es bei der Definition der Beplankungsmaterialien zu minimalen Differenzen bei der Wahl der Materialstärke und Rohdichte gekommen. Die Annahmen bewegen sich im üblichen Spektrum verfügbarer Marktmaterialien. Es wurden für den Betrachtungsbereich jeweils „Worst-Case“ Annahmen getroffen, so wurde z.B. bei der Betrachtung des Tragwerks eine möglichst hohe Rohdichte und bei der Betrachtung des Schalldämmwerts eine niedrigere gewählt. Die Ergebnisse geben eine grobe Einordnung, deren Machbarkeit im individuellen Fall geprüft werden sollte.

Die Untersuchung des thermischen Komforts mit Jahressimulationen (Kapitel 6.2) zeigt, dass mit einer thermischen Aktivierung der Decke die Komfortkriterien im betrachteten südausgerichteten Modellzimmer sowohl im Winter als auch im Sommer erfüllt sind. Dies ist auch schon der Fall, wenn nur die Decke saniert wird und die Aussenhülle des Gebäudes unsaniert bleibt.

Weitere Kriterien, die sich nicht zur Bewertung der Sanierungsvarianten eignen, sondern für jede der Varianten in einem konkreten Umsetzungsfall erfüllt sein müssen, sind das Tragwerk/Statik, der Brandschutz und die baurechtliche Genehmigungsfähigkeit.
Für die beiden Modellzimmer wurde mit einer vereinfachten Berechnungsmethode gezeigt, dass die neuen Decken die Lastreserven nicht überschreiten und das vorhandene Tragwerk somit geeignet ist, die zusätzlichen Lasten aus den vorgeschlagenen Massnahmen aufzunehmen. Hier zeigt sich der Vorteil der Schallschutzmassnahmen an der Decke, die dort nach dem Prinzip Masse-Feder-Masse gestaltet werden können und somit deutlich leichter ausfallen können als ausschliessliche Schallschutzmassnahmen am Fussboden, die wegen der nötigen Begehbarkeit stabiler ausgeführt werden müssen und dann möglicherweise vorhandene Traglastreserven überschreiten.
Je nach Bauweise ist der Brandschutz durch die tragende Decke bereits erfüllt, wie z.B. bei Betondecken. In der Holzbauweise muss ein entsprechender Nachweis erbracht werden. Die brennbare Konstruktion muss mittels einer nicht-brennbare Bekleidung geschützt werden, weshalb eine Abhangdecke in diesen Fällen meist die beste Lösung darstellt. Es gibt geprüfte Deckenaufbauten im Holzbau, die z.B. unter dataholz.eu einsehbar sind [55]. Als Bekleidungsmaterial kommen dort allerdings nur Gipsplatten vor. Bei Lehmplatten fehlen bisher noch produktabhängige Nachweise über das Brandverhalten im Gesamtsystem.
Die baurechtliche Genehmigungsfähigkeit hinsichtlich der Einhaltung der minimal notwendigen lichten Raumhöhe ist beim Modellzimmer Maulbeerstrasse (Stadt Basel) mit Holzbalkendecke für alle Varianten aufgrund der hohen Raumhöhe einfach zu erreichen. Bei der Variante Farbhof (Stadt Zürich) unterschreiten sämtliche Sanierungsvarianten die Vorgabe von mind. 2.40 m (Standort ausserhalb der Kernzone). Die Varianten mit Federschiene (Tabelle 20) haben die geringste Aufbauhöhe und Varianten 1.1.1 und 1.1.3 (Federschiene mit Wärmeleitblech resp. mit Lehm-Klimaelement) unterschreiten mit ursprünglicher Raumhöhe von 2.44 m die geforderte lichte Höhe um lediglich 20 resp. 23 mm. Hier könnte ggf. versucht werden, eine Ausnahmegenehmigung des Sanierungsvorhaben bei der Bewilligungsbehörde zu erreichen, damit diese Varianten für Fälle wie den Farbhof mit geringer Raumhöhe umgesetzt werden können.

Die weiteren Bewertungen sind in Tabelle 20 mit absoluten Einheiten aufgeführt und wurden durch die AutorInnen qualitativ bewertet. Die rechte Tabellenspalte enthält eine Gesamtbewertung. Dieser Durchschnittswert basiert auf einer gleichmässigen Gewichtung aller Kriterien. Am besten schneiden mit 2.25 Punkten die Varianten 1.2.2 und 2.1.2 ab, welche beide Lehm-Klimaelemente haben. Variante 1.1.1 (mit Federschiene, Wärmeleitblech und Gipsfaserplatte) wird insgesamt leicht schlechter bewertet (2 Punkte), hat aber die geringsten Kosten aller Varianten – erreicht beim Schallschutz aber nur eine

mässige Bewertung. Zudem schneidet diese Variante aufgrund der Verwendung des Wärmeleitbleches und der Gipsfaserplatte schlechter in der Ökobilanzierung ab. Die am besten bewerteten Varianten 1.2.2 und 2.1.2 sind mit 400 resp. 430 Fr./m^2 teurer, schneiden aber bei der Ökobilanz wegen der Verwendung von Lehmplatten und einer Holzunterkonstruktion sehr gut ab. Zusätzlich schneidet Variante 1.2.2 als einzige sehr gut beim Schallschutz ab, hat allerdings eine eher grosse Abhanghöhe.

Der Einsatz von schallentkoppelten Direktabhängern und einem Deckenhohlraum von mindestens 47 mm führt bei der Betondecke zum besten Schallschutz, allerdings verbunden mit einer relativ grossen Aufbauhöhe der neuen Decke. Die Direktabhänger sind bei der Holzbalkendecke grundsätzlich auch die beste Lösung, hier ist die Schallschutzwirkung aber stärker von der vorhandenen Decke abhängig und von der Abhanghöhe, die bei leichten Holzdecken grösser gewählt werden sollte. Es kann aber der freie Raum im Gefach als Deckenhohlraum angerechnet werden.

Tabelle 20: Bewertung der Sanierungsvarianten mit den Kriterien, die nicht eine eindeutige Entscheidung ermöglichen (weitere Kriterien, siehe Text). Qualitative Beurteilung: 1 = mässig gut, 3 = sehr gut).

		Variante	**Schallschutz**		**Kosten (Invest.)**		**Ökobilanz**		**Abhanghöhe**		**GESAMT**
			absolut [1)]	qualitativ	absolut	qualitativ	absolut	qualitativ	absolut	qualitativ	qualitativ
				[1…3]	CHF/m^2	[1…3]	kg CO2-eq /m^2	[1…3]	mm	[1…3]	**[1…3]**
Betondecke	**Federschiene**	**1.1.1 Gipsfaserplatte + Wärmeleitblech**	$\Delta R_w \geq 14$dB bzw. $\Delta L_w \geq 25$dB	1	340	3	44	1	63	3	**2**
		1.1.2 Lehmplatte + Wärmeleitblech	$\Delta R_w \geq 16$dB bzw. $\Delta L_w \geq 26$dB	2	475	2	40	1	80	2	**1.75**
		1.1.3 Lehm Klimaelement	$\Delta R_w \geq 14$dB bzw. $\Delta L_w \geq 25$dB [2)]	1	690	1	28	2	60	3	**1.75**
	Direktabhänger (schallentkoppelt)	**1.2.1 Gipsfaserplatte + Wärmeleitblech**	$\Delta R_w \geq 17$dB bzw. $\Delta L_w \geq 27$dB	2	345	3	45	1	136	1	**1.75**
		1.2.2 Lehm Klimaelement	$\Delta R_w \geq 19$dB bzw. $\Delta L_w \geq 28$dB	3	530	2	16	3	133	1	**2.25**
Holzbalkendecke		**2.1.1 Gipsfaserplatte + Wärmeleitblech**	[3)]	1 [4)]	415	3	48	1	76	2	**1.75**
		2.1.2 Lehm Klimaelement	[3)]	2 [4)]	570	2	16	3	73	2	**2.25**

[1)] abgeschätzt mit 20*lg(f/f_0) und bewertet nach EN ISO 717-1/-2

[2)] dünne Deckenhohlräume sind anfällig für Schallbrücken sowie Dröhnen auf Grund der Resonanzfrequenz f_0 > 50 Hz

[3)] Numerischer Wert der Verbesserung/Minderung ist stark von der Grunddecke abhängig.

[4)] Gute Entkopplung durch Entkopplungselementen, noch grössere Hohlraumhöhe wirkt sich akustisch vorteilhaft aus

Mit den Federschienen, die zusammen mit der Betondecke untersucht wurden, lassen sich die geringsten Abhanghöhen von 60 - 80 mm realisieren, was ein entscheidender Vorteil bei der Bewilligung einer

Sanierung sein kann. Allerdings ist bei der Verwendung von Federschienen die Schallschutzwirkung wegen der steiferen Verbindung und der geringen Hohlraumhöhe etwas reduziert. Das System in V1.1.3 – mit der Federschiene, ohne die zusätzliche Hohlraumhöhe durch das Wärmeleitblech – funktioniert wegen dem vergleichsweise grossen Flächengewicht der Beplankung mit Lehmklimaelementen. Zudem sind dünne Hohlräume grundsätzlich anfälliger für Körperschallbrücken, beispielsweise durch eingeklemmte Leitungen oder zu lange Befestigungsschrauben, welche die abgehängte Deckenbeplankung mit der Stahlbetondecke koppeln und dadurch den Schallschutz stark beeinträchtigen. Deshalb ist hier eine grosse Sorgfalt bei der Montage vorausgesetzt. Zudem wirken sich Federschienen aufgrund des höheren Materialeinsatzes negativ auf die Ökobilanz aus.

Sowohl für die Betondecke als auch für die Holzbalkendecke stehen Sanierungsvarianten mit sehr guter Bewertung zur Verfügung (Betondecke: 1.2.2, Holzbalkendecke: 2.1.2).

8 Diskussion

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass der Ansatz erfolgversprechend ist, Mehrfamilienhäuser mit verputzten Abhangdecken zu sanieren, welche gleichzeitig den Schallschutz zwischen Stockwerken verbessern und zur Raumklimatisierung eingesetzt werden können. Mit Integration der Schallschutzfunktion können Bestandsbauten heutige Mindestanforderungen für den Schallschutz potenziell erreichen. Mit den Rohrregistern in der Decke kann im Winter geheizt und im Sommer gekühlt werden. Der thermische Komfort kann damit selbst mit zukünftigem Klima auch im Sommer gewährleistet werden, wobei im Projekt eine Klimaprognose für das Jahr 2060 betrachtet. Eine zu lange Taupunktunterschreitung der Decke während der Kühlsaison muss jedoch vermieden werden, bspw., indem während Hitzeperioden eine moderate Kühlung auf Raumtemperaturen von 26 °C vorgenommen wird und indem regelmässig die Feuchtigkeit aus dem Raum abgeführt wird, z.B. durch geöffnete Kippfenster in der Nacht bei ausgeschalteter Kühlung. Mit Verwendung von Lehm für die Deckenkonstruktion kann das Risiko von Kondenswasser an der Decke reduziert und die Umweltwirkung minimiert werden, allerdings aktuell zu erhöhten Investitionskosten. Die Umsetzung von Schallschutzmassnahmen bei Sanierungen sind wegen vieler relevanter Randbedingungen anspruchsvoll und können bei ihrer Nichtbeachtung zu schlechter Umsetzung führen. Im Bericht sind deshalb die Grundlagen zum Schallschutz detailliert aufgeführt, damit ein Bewusstsein für die genaue und erfolgreiche Umsetzung von Schallschutzmassnahmen geschaffen wird.

Die Bewertung gemäss den einzelnen Kriterien stellt sich im Detail wie folgt dar:

Schallschutz: Abgehängte thermisch aktivierte Decken verbessern grundsätzlich die direkte vertikale Luft- und Trittschalldämmung zwischen übereinanderliegenden Räumen, wobei die Gesamtwirkung, das heisst die erreichbare Bau-Schalldämmung ab einem für die Bausituation spezifischen Schwellenwert durch Flankenübertragung begrenzt wird. Besonders beim Trittschall sind oft zusätzliche moderate Massnahmen an Bodenaufbau, wie zum Beispiel den Einbau von trittschallmindernden Fussbodenbelägen mit geringer Aufbauhöhe, oder alternativ an flankierenden Wänden erforderlich, während die Luftschallanforderungen meist ohne diese erreichbar bleiben.

Grundlage für eine Planung wirksamer Schallschutzmassnahmen bildet vor einer Sanierung stets eine genaue Bestandsaufnahme der Ausgangssituation, die die Analyse in Bezug auf potenzielle Schwachstellen und somit der Limitierung der Schalldämmwirkung der zusätzlich eingebrachten abgehängten thermischen Decke ermöglicht. Diese Bestandsaufnahme umfasst die Auswertung bestehender Planungsunterlagen sowie einen Abgleich der Konstruktionen und der verwendeten Materialien mit der tatsächlichen Bauausführung. Basierend auf diesen Angaben sind die Direktübertragung und insbesondere die Flankenübertragung der massgeblichen Übertragungswege in der Ausgangssituation, beispielsweise anhand der Berechnungsmodelle der SN EN ISO 12354, zu bestimmen. Die Berechnungsergebnisse sollten durch Luft- und Trittschallmessungen im Objekt verifiziert werden. Im Zweifelsfall können ergänzende Messungen nach SN EN ISO 10848 zur Ermittlung der (Körper-)Schallübertragung

der Nebenwege durchgeführt werden. Auf dieser Grundlage können gezielt schalltechnisch wirksame Massnahmen an den Bauteilen ausgelegt und geplant werden.

Die horizontale Übertragung zwischen nebeneinanderliegenden Räumen unterschiedlicher Wohnungen wurde in diesem Bericht nicht betrachtet, da sie beim Luftschall massgeblich durch die Direktübertragung der Trennwand, welche nicht Bestandteil dieser Untersuchung ist, bestimmt wird. Beim Trittschall ist sie ebenfalls als weniger kritisch einzuschätzen, da zwischen benachbarten Räumen lediglich eine Flankenübertragung über zwei Nebenwege relevant ist, die beide durch den Bodenbelag abgeschwächt werden. Durch die Massnahmen an der Decke sind keine Verschlechterungen, sondern nur Verbesserungen gegenüber der Ausgangssituation zu erwarten.

Die thermisch aktivierten Decken aus Lehmplatten sind schalltechnisch als positiv zu bewerten, da sie ein höheres Flächengewicht als vergleichbare Decken aus Gipsplatten aufweisen. Dies wirkt sich günstig auf die Masse-Feder-Masse-Resonanz aus, sodass diese bei gleicher Hohlraumtiefe tiefer liegt als bei Gipsplatten. Es erscheint daher möglich, die Hohlraumtiefe zu reduzieren, was bei begrenzten Raumhöhen von Vorteil ist. Allerdings liegen bislang keine belastbaren akustischen Messdaten zu diesen Deckensystemen vor, weshalb in diesem Bericht mit konservativen Annahmen gearbeitet wurde. Die Auswirkungen von Effekten auf den Schallschutz – etwa durch die erhöhte Biegesteifigkeit (Koinzidenzeinbruch, Plattenmoden infolge der grösseren Plattenstärke) oder durch die aufgrund des höheren Flächengewichts erforderliche Anzahl zusätzlicher Abhänger – sind derzeit nicht ausreichend bekannt. Hier wären verlässliche akustische Messdaten der Hersteller für eine zielgerichtete Planung wünschenswert.

Thermischer Komfort: Unter Verwendung eines Klimadatensatzes für das Jahr 2060 zeigen die Gebäudesimulationen eine starke sommerlich Überhitzung für die betrachteten Zimmer in Basel und Zürich, wenn keine Kühlmöglichkeit besteht (Raumtemperaturen bis 32 °C; >26.5 °C (SIA 180): 445 h Zimmer in Zürich, 1980 h Zimmer in Basel). Mit der thermischen Aktivierung der Decke durch Einbau einer Abhangdecke können die Zimmer erfolgreich mittels Wärmepumpe gekühlt werden. Auch das Beheizen im Winter ist mit den Klimadecken ohne Komforteinschränkungen möglich (kein "heisser Kopf" durch beheizte Decke). Werden zusätzlich die Aussenwand und das Fenster energetisch ertüchtigt, erhöht sich der thermische Komfort weiter und der Energieverbrauch für die Raumklimatisierung sinkt erwartungsgemäss deutlich. Die Simulationen zeigen, dass auch die thermische Aktivierung eines Teils der Zimmerdecke ausreicht (bis 50 % betrachtet), was die Integration von Zuleitungen und ggf. Verteilbalken in der Decke ermöglicht und zudem Investitionskosten reduziert. Die Aussagen im Bericht zum sommerlichen Wärmeschutz gelten für die Bedingung, dass der Kühlbedarf minimiert wird, indem ein aussenliegender Sonnenschutz vorhanden und aktiviert ist (wenn Einstrahlung in Fensterebene 200 W/m^2 überschreitet) und, wenn möglich, eine Nachtauskühlung mit gekippten Fenstern vorgenommen wird.

Beim Entscheid für eine **Deckenheizung als grossflächige Heizung** werden sehr gute Effizienzen bei der Wärme- und Kälteerzeugung mittels Wärmepumpen ermöglicht, da moderate Vorlauftemperaturen ausreichen. Im Vergleich zu einer Fussbodenheizung sind die Vorteile einer Deckenheizung:

- Erhalt des bestehenden Fussbodens möglich
- keine Anpassungen an Türen, Schwellen oder Brüstungen, da bei Sanierung die Fussbodenhöhe erhalten bleibt (bei Nachrüstung einer Fussbodenheizung oft nicht der Fall)
- keine Beeinträchtigung der Wärmeabgabe durch Möbel oder Teppiche
- schnelle Anpassung an Raumtemperaturen, da weniger thermische Masse als bei Fussbodenheizung, somit raschere Reaktion z.B. auf beginnende solare Gewinne durch die Fenster
- Kühlung über die Decke trägt zur Behaglichkeit und Wohlbefinden bei; Kühlung via Fussbodenheizung wird aus Erfahrung als unangenehm wahrgenommen

Bei einer Deckenheizung müssen jedoch Installationspunkte für Deckenlampen vorgesehen werden und es muss darauf hingewiesen werden, dass nicht an beliebigen Stellen in die Decke gebohrt werden darf, da sonst die Gefahr droht, dass wasserführende Heizungsrohre Schaden nehmen, was eine

aufwändige Reparatur nach sich ziehen würde. Deckenheizungen ermöglichen hohen thermischen Komfort, da die Raumbeheizung via Wärmestrahlung und ohne Konvektion erfolgt und Luftströmungen somit geringer sind (in Studie aber nicht simuliert).

Verhinderung von Feuchteschäden: Für die angenommene Nutzung (Schlafzimmer mit 2 Personen) und einem Sollwert für die Raumtemperatur im Sommer von 26 °C konnte gezeigt werden, dass der Taupunkt an der Deckenoberfläche während der Kühlsaison nur selten unterschritten wird. Jedoch können die Unterschreitung des Taupunkts und auch schon längere Betriebsphasen bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit (also nahe dem Taupunkt) grundsätzlich zu Feuchteschäden führen, wenn nicht baulich und betrieblich vorgesorgt wird:

- Gemäss Rückmeldung der Begleitgruppe können sich Gipsplatten (insbesondere Gipsfaserplatten) bei hohem Feuchtigkeitsgehalt zu stark ausdehnen, sodass Risse entstehen. Die Verwendung von Lehm ist hier vorteilhaft, da keine kritische Ausdehnung bei hoher Feuchtigkeit zu erwarten ist. Lehmbaustoffe verfügen über ein besonders hohes Wasserdampfabsorptionspotenzial im Vergleich zu gips- oder zementbasierten Bauprodukten. Sie können Luftfeuchtigkeit aufnehmen und zwischenspeichern und diese über die natürliche Lüftung wieder an die Raum- und über den Lüftungsvorgang an die Aussenluft abgeben. Zudem sorgen Lehmbaustoffe in der Regel ganzjährig für stabile Raumluftfeuchten von 40 % - 60 % und damit für ein gesundes Raumklima. Durch diesen Prozess ist es möglich in Gebäuden mit dampfdiffusionsoffenen Gebäudehüllen und einem angemessenen Glasanteil auf kosten- und wartungsintensive Lüftungsanlagen zu verzichten ([56], [57], [58]).
- Organische Zusätze in Lehmprodukten können wiederum als Substrat für Mikroorgansimen dienen, falls die Mikroorganismen zudem ausreichend Feuchtigkeit vorfinden. Lehmprodukte ohne organische Zusätze oder mit einem geringen Anteil geben beim Kühlbetrieb mehr Sicherheit vor Schimmelbildung.
- Ohne Entfeuchtung der Luft durch eine Lüftungsanlage sollten die Zieltemperaturen eher moderat gewählt werden. Für die in der Studie untersuchten Modellzimmer entstanden bei Absenkung des Sollwerts auf 23 °C längere Phasen von rund 4 h mit Taupunktunterschreitung, was vermieden werden sollte. Die Effekte sind objektspezifisch, da stark abhängig vom Nutzungstyp eines Raumes und vom Nutzerverhalten. Es ist davon auszugehen, dass mit einem Taupunktwächter (zur möglichen Sperrung der Kühlung) und einem regelmässigen Luftwechsel die zwischenzeitliche Trocknung der Decke gewährleisten werden kann, was mit Vorzug regelungstechnisch umgesetzt werden sollte und nicht durch die Nutzer.
- Weitere Massnahmen gegen Feuchteschäden sind eine kältetechnische Dämmung der Verteilleitungen und des Verteilbalkens und die Überwachung der Fensteröffnung mit Sperrung der Kühlung bei Fensteröffnung (Eintrag warmer feuchter Aussenluft vermeiden).

Die **Investitionskosten** der betrachten Ausführungsvarianten der Abhangdecken beginnen bei 340 Fr. pro Quadratmeter sanierte Decke (Variante 1.1.1 mit Gipsplatte, inkl. Planungskosten und MwSt.). In dieser günstigsten Ausprägung haben die thermisch aktiven Abhangdecken ähnliche Kosten wir Fussbodenheizungen, können aufgrund des geringen Flächengewichts jedoch bei Sanierungsprojekten potenziell einfacher umgesetzt werden.
Die spezifischen **Jahreskosten** für die günstigste Umsetzung (V 1.1.1) wurden pro m^2 Energiebezugsfläche (EBF) abgeschätzt und liegen inkl. Betrieb der WP und inkl. WP-Erneuerung bei 28 Fr./a und m^2 EBF (40 Jahre Nutzung, 2 % Zins, inkl. MwSt.). Für eine beispielhaft betrachtete 3-Zimmerwohnung mit 70 m^2 EBF liegen die Jahreskosten demnach bei 1970 Fr./a oder 165 Fr./Monat (ohne Wärmeerzeugung: 1040 Fr./a oder 85 Fr./Monat). Der betrachtete Fall einer Mietwohnung zeigt, dass die Deckensanierung also mit moderaten Steigerungen der Monatsmieten finanziert werden kann. Die Varianten mit Lehmprodukten sind mit heutigen Preisen teurer: die Variante 1.1.2 mit Lehmplatte verursacht bei der 3-Zimmerwohnung Jahreskosten von 2245 Fr. (+14 % im Vergleich zur Variante 1.1.1). Ein Grund für die hohen Kosten von Lehmprodukten ist mutmasslich, dass ihre Herstellung aufgrund des kleinen Marktanteils aktuell noch geringen industriellen Charakter hat. Es ist zu erwarten, dass bei den Lehmprodukten in Zukunft durch Skalierungseffekte deutliche Preissenkungen realisiert werden.

Die grundsätzliche Eignung der vorgeschlagenen Sanierungsmassnahmen wurde bezüglich behördlicher Bewilligungsfähigkeit für die Bereiche **Tragfähigkeit, lichte Raumhöhe und Brandschutz** für die untersuchten Gebäude abgeschätzt.
Die Beispielsberechnung basierend auf der vereinfachten Abschätzung der Tragfähigkeit der Geschossdecken der beiden Modellzimmer zeigt, dass die zusätzlichen Lasten durch die vorgeschlagenen Sanierungsmassnahmen in einem Bereich liegen, welche die Tragfähigkeit nicht beeinträchtigt. In jedem Fall muss aber Nachweis durch einen Tragwerksplaner geführt werden. Generell zeigt sich hier der Vorteil des Einbringens von Schallschutzschichten gemäss dem Masse-Feder-Masse-Prinzip: da bei dieser baulichen Massnahme leichte Materialien eingesetzt werden können, resultieren deutlich geringer Flächenlasten als bei Schallschutzmassnahmen am Fussboden, wo mit dem Einbringen hoher Massen gearbeitet wird, was schnell die Tragfähigkeit der Geschossdecke überschreiten kann.
Beim Gebäude mit Stahlbetondecke (Farbhof Zürich, Baujahr 1955) hat sich gezeigt, dass die lichten Raumhöhen gering sind und zu wenig Platz für die Massnahmen vorhanden ist, um sowohl die nötigen Schallschutzanforderungen nach einer Sanierung als auch die minimale vorgeschriebene Raumhöhe einzuhalten. Dies scheint eine relativ weit verbreitete und somit typische Situation für Gebäude aus dieser Bauperiode zu sein. Die Sanierungsvarianten mit geringster Aufbauhöhe unterschreiten die minimale lichte Höhe im Farbhof aber um lediglich 2 cm, wofür möglicherweise eine Ausnahmebewilligung erhalten werden kann. Die positiven Folgen der Sanierung wäre ein deutlich gesteigerter Wohnkomfort und, falls die Lärmproblematik vor der Sanierung andernfalls eine Motivation für die Erstellung eines Ersatzneubaus ist, der Erhalt des Bestandsbaus inkl. gebundener grauer Energie. Beim Gebäude mit Holzbalkendecke (Maulbeerstrasse Basel) kann die Abhangdecke die Funktion des Brandschutzes übernehmen. Eine Bekleidung mit nicht-brennbaren Materialien, wie sie auch in den Sanierungsvarianten eingesetzt wird, erfüllt dabei die Funktion. Allerdings muss im Fall der Verwendung von Lehmbauplatten ein gesonderter Nachweis erbracht werden, weil es noch keine allgemeinen zugelassenen Bauteilaufbauten gibt, die definierte Schutzziele nachweisen. Das Thema «Lehmplatten als Brandschutzbekleidung» wird derzeit in unterschiedlichen Forschungsprojekten untersucht.

Umweltwirkungen: Die detaillierten Betrachtungen der unterschiedlichen Lösungsvorschläge haben gezeigt, dass mit der Konzeption der Deckensysteme und der Wahl der Einzelmaterialien für beide Modellzimmer deutliche Unterschiede in Bezug auf die betrachteten Wirkungsindikatoren erzielt werden können. Mit dem Deckensystem auf Basis des Lehmklimaelementes (Lehmplatte mit integrierten Rohrleitungen), das über Direktabhänger an der Rohdecke befestigt wird, lassen sich die Umweltwirkungen am effektivsten reduzieren. Im Vergleich zu dem System mit den höchsten Umweltwirkungen (Gipsplatte mit Wärmeleitblech) lassen sich mit dem Lehmklimaelement beim globalen Erwärmungspotenzial Einsparungen von 65 % - 68 % (Farbhof / Maulbeerstrasse) in Bezug auf die CO_2-äquivalenten Emissionen erreichen. Bei der grauen Energie fallen diese mit 58 % - 62 % (Farbhof / Maulbeerstrasse) etwas geringer aus. Die höchste Reduzierung wird bei den Umweltbelastungspunkten erreicht: diese liegen zwischen 73 % - 75 % (Farbhof / Maulbeerstrasse).
Die höchste Umweltwirkung im Gesamtsystem haben die Wärmeleitbleche aufgrund ihrer Materialität (verzinktes Stahlblech) sowie die Federschienen aufgrund des höheren Materialeinsatzes im Vergleich zu den Direktabhängern. Aber auch die Wahl der Bekleidungsplatte wirkt sich positiv aus, wenn auch nicht ganz so signifikant wie die Unterkonstruktion. Nichtsdestotrotz kann durch den Einsatz einer Lehmplatte im Vergleich zu einer Gipsfaserplatte das GWP der bekleidenden Platte um ca. die Hälfte reduziert werden. In dieser Bilanzierung sind zukünftige Verbesserungspotenziale noch nicht reflektiert. Die erweiterte Betrachtung der aktuell verfügbaren Ökobilanzdaten (Ökobaudat) hat gezeigt, dass über den Herstellungsprozess (in diesem Fall durch eine solare Trocknung) signifikante Verbesserungen (99 %) des GWPs von Lehmplatten im Vergleich zu Gipsplatten erzielt werden können. Hinzu kommt, dass Lehm ein intrinsisch zirkulärer Baustoff ist. Das konnte in verschiedenen Untersuchungen nachgewiesen werden [59] [60]. Lehmbaustoffe erlangen ihre Festigkeit durch einen physikalischen Trocknungsprozess und nicht wie bei anderen Baustoffen durch einen chemischen Abbindeprozess. Dieser Prozess kann durch die Zugabe von Wasser unendlich oft wiederholt und das Material ohne Qualitätsverlust endlos replastifiziert werden. Vorgefertigte Lehmplatten können als Bauprodukt, so sie mit Lehmputzen verputzt oder mit Lehmmörteln vermauert wurden, zerstörungsfrei wiedergewonnen werden. Im Falle eines schadhaften Rückbaus kann das Material energiearm zu 100 % zu einem neuen Bauprodukt verarbeitet werden. Im betrachteten Fall des mit Lehm verputzten Lehm-Klimaelementes bietet dieses

durch einen selektiven Rückbau die Möglichkeit zur direkten Wiederverwendung. Das würde sich auch positiv auf die Lebenszykluskosten auswirken. Die nicht reversiblen Pressverbinder der Heizregister müssten dabei zerschnitten und durch neue ersetzt werden. Ein solches Vorgehen scheint prinzipiell technisch möglich, müsste jedoch in Bezug auf den Zeitaufwand überprüft werden. Zudem stellen neueste Marktentwicklungen sehr viel dünnere Lehmplatten bereit, sodass bei deren Eignung das GWP weiter reduziert werden kann.
Grundsätzlich zeigt die Betrachtung der Umweltwirkungen, dass diese sehr relevant für die Entscheidungsfindung von baulichen Lösungen sind. Wird ein starker Fokus auf die Betrachtung der Investitionskosten gelegt, führt dies auch bei den hier untersuchten baulichen Massnahmen zur Wahl einer eher unökologischen Lösung. Die Einführung von Grenzwerten in Bezug auf die Umweltwirkungen stellen eine wirkungsvolle Massnahme dar, um die angestrebten Reduktionen von CO_2-Emissionen und Abbruchabfällen im Bausektor zu erreichen. Da unter dem aktuellen Kostendruck im Bauwesen oftmals die Lösungen mit den geringsten Investitionskosten zur Ausführung kommen, wäre eine Betrachtung der Wiederverwendung in den Lebenszykluskosten vorteilhaft, was in der vorliegenden Studie aufgrund fehlender Kostendaten ausgespart wurde. Zudem würde eine Verpreisung von Umweltfolgekosten nach dem Verursacherprinzip zu mehr Kostentransparenz und nachhaltigeren Lösungen führen. Dieses Wissen wird aktuell nur vereinzelt in Bauprojekten umgesetzt und die Vorteile von Lehmbaustoffen während des Betriebs aufgrund einer nicht mehr zeitgemässen Fokussierung auf Investitionskosten nicht voll ausgeschöpft [61].

9 Ausblick

Da derzeit kaum Informationen zur Schallschutzwirkung von Lehmbauteilen vorliegen, sollten die hier berechneten Wirkungen der Schallschutzmassnahmen mit Messungen an Lehm-Vorsatzschalen im Schalllabor validiert werden. Wünschenswert wäre anschliessend eine Umsetzung der vorgeschlagenen Massnahme in einem Sanierungsprojekt, das wissenschaftlich begleitet wird und bei dem die Situation vor und nach der Sanierung dokumentiert wird. Ein Fokus in einem Umsetzungsprojekt sollte auch auf dem Feuchtehaushalt und Taupunktunterschreitung in der Vorsatzschale liegen, welche in den thermischen Simulationen nicht detailliert modelliert wurden.

Klärungsbedarf besteht auch bei der Eignung von Platten mit Gipsanteil für den Einsatz in Kühlflächen: auf dem Markt werden Kühlsysteme mit Gips- und Gipsfaserplatten angeboten, Installateure haben teils aber Bedenken ggü. diesen Platten wegen dem reduzierten Absorptionsvermögen von Wasserdampf aber auch wegen der Ausdehnung bei Feuchtezunahme. Der aktuelle Wissensstand in der Branche scheint hier nicht eindeutig.

Für die Bilanzierung der Umweltwirkungen von Lehmbaustoffen sind nur sehr wenige Daten verfügbar, was bei einer Einführung von verpflichteten Grenzwerten zu einer Benachteiligung dieser ökologisch vorteilhaften Baustoffe führen würde. Es wäre daher wünschenswert, wenn hier über Forschungsprojekte oder direkte Auftragsforschung aktuell bestehende Datenlücken geschlossen werden könnten.

Mit Firmen aus der Baubranche (Hersteller, Installateure) sollte besprochen werden, ob die modularen Deckensysteme hinsichtlich des Einsatzes für Sanierungen optimiert werden müssten.

10 Literaturverzeichnis

[1] W. Ott und A. Binz, «Neubauen statt Sanieren», econcept AG und FHNW im Auftrag von BFE, BWO und ARE, Zürich, März 2004. Zugegriffen: 17. Juli 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/8719

[2] «COST Action TU0901 – Building acoustics throughout Europe Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe», COST Association, Brussels, 2014. [Online]. Verfügbar unter: https://www.cost.eu/wp-content/uploads/2018/07/Part_I.pdf

[3] *SN EN ISO 12354-1: Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen (ISO 12354-1:2017)*, SN EN ISO 12354-1, Januar 2017.

[4] *SN EN ISO 12354-2: Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 2: Trittschalldämmung zwischen Räumen (ISO 12354-2:2017)*, SN EN ISO 12354-2:2017, Januar 2017.

[5] W. Fasold, E. Veres, und É. Veress, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis: Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen*, 2. Aufl. Berlin: Huss-Medien, Verl. Bauwesen, 2003.

[6] Grolimund + Partner, Hrsg., *Bauteildokumentation Schallschutz im Hochbau: Zusammenstellung gemessener Bauteile*, Ausg. 2005. in SIA-Dokumentation D, no. 189. Zürich: SIA, 2005.

[7] «Energiegerechtes Bauen und Modernisieren, Grundlagen und Beispiele für Architekten, Ingenieure und Bewohner», Birkhäuser Verlag, Berlin, 1996.

[8] «SIA 180:2014: Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden», Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2014.

[9] «SIA 380/2 (2022): Energetische Berechnungen von Gebäuden – Dynamisches Verfahren für Bedarfsabklärungen, Leistungs- und Energiebedarf», Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2022.

[10] *SIA 181 - Schallschutz im Hochbau*, 181, Januar 2020.

[11] Normenkommission SIA 181, «Schallschutz im Hochbau – Fragen und Antworten zur Norm SIA 181:2006». SIA, November 2015. [Online]. Verfügbar unter: http://shop.sia.ch/c6e3cc77-7285-4a99-b75a-a31d7284068c/D/DownloadAnhang

[12] *SN EN ISO 717-1: Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 1: Luftschalldämmung (ISO 717-1:2020)*, SN EN ISO 717-1:2020, Dezember 2020.

[13] *SN EN ISO 16283-1: Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil 1: Luftschalldämmung (ISO 16283-1:2014)*, SN EN ISO 16283-1:2014, Januar 2014.

[14] *SN EN ISO 717-2: Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 2: Trittschalldämmung (ISO 717-2:2020)*, SN EN ISO 717-2:2020, Dezember 2020.

[15] *SN EN ISO 16283-2: Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil 2: Trittschalldämmung (ISO 16283-2:2020)*, SN EN ISO 16283-2:2020, Januar 2020.

[16] Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren, KBOB, «Ökobilanzdaten im Baubereich, Version 9.0». Zugegriffen: 5. Juli 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kbob.admin.ch/de/oekobilanzdaten-im-baubereich

[17] *SIA 2032 Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden*.

[18] Bundesamt für Umwelt BAFU, «Bewertungsmethoden». Zugegriffen: 4. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaft-konsum/oekobilanzen/methode-der-oekologischen-knappheit.html

[19] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen, *Brandschutzrichtlinie*, Bd. 01.01.2017 / 13-15de.

[20] *DIN EN 13501-1:2019-05, Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten_- Teil_1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten; Deutsche Fassung EN_13501-1:2018*. doi: 10.31030/2870379.

[21] *DIN 18948:2024-03, Lehmplatten_- Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*. doi: 10.31030/3518014.
[22] *DIN 4102-4:2016-05, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen_- Teil_4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*. doi: 10.31030/2417223.
[23] «Lemix Lehmbauplatte». Zugegriffen: 20. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://lemix.eu/produkt/LemixLehmplatte
[24] J. Liblik, A. Baumberger, C. Löffler, und A. Just, «From tradition to future prospects: Clay as fire protection for timber», gehalten auf der LEHM 2024, Weimar: Eigenverlag Dachverband Lehm e.V., 2024.
[25] «Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise», DIBt. Zugegriffen: 14. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dibt.de/de/aktuelles/meldungen/nachricht-detail/meldung/muster-richtlinie-ueber-brandschutztechnische-anforderungen-an-bauteile-und-aussenwandbekleidungen-in-holzbauweise-mholzbaurl
[26] Kanton Basel-Stadt, *SG 730.100 - Bau- und Planungsgesetz (BPG)*. 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetzessammlung.bs.ch/app/de/texts_of_law/730.100/versions/6566
[27] Kanton Zürich, *Planungs- und Baugesetz (PBG)*. 2024.
[28] *SIA 260:2013 Grundlagen der Projektierung von Tragwerken*.
[29] *SIA 269/1-8 Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken*.
[30] «Wandheizung und Deckenheizung nachträglich einbauen | INTOFLOOR». Zugegriffen: 3. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.intofloor.de/services/wand-und-deckenheizung/
[31] «Trockenbau Wandheizung im Set», Quick Tec. Zugegriffen: 3. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://quick-tec.com/sparpaket-greenline-flaechenheizung-im-trockenbau/308600-10
[32] «wandheizung naturbo - Wandheizung». Zugegriffen: 3. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.naturbo-wandheizung.de
[33] «Kapillarrohrmatten», Hennlich. Zugegriffen: 3. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hennlich.cz/de/g-term/kapillarrohrmatten/
[34] «Wikipedia Eintrag über Eduard Pfrunder». Zugegriffen: 21. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Eduard_Pfrunder
[35] R. M. Schulz-Rehberg, *Architekten des Fin de Siècle: Bauen in Basel um 1900*. Basel: C. Merian, 2012.
[36] Kanton Basel-Stadt, *Zonenplan Basel-Stadt (Stand: 22.08.2024)*.
[37] s. n, «Städtische Wohnkolonie ‹Farbhof› in Zürich Altstetten», Jan. 1959, doi: 10.5169/SEALS-35923.
[38] «Wikipedia Eintrag Farbhof». Zugegriffen: 21. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Wohnsiedlung_Farbhof
[39] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen, *Brandschutznorm*.
[40] W. Fasold und E. Veres, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis: Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen*, 1. Aufl. Berlin: Verl. für Bauwesen, 1998.
[41] Grolimund + Partner, Hrsg., *Bauteildokumentation Schallschutz im Hochbau: Zusammenstellung gemessener Bauteile*, Ausg. 2005. in SIA-Dokumentation D, no. 189. Zürich: SIA, 2005.
[42] L. Cremer und M. Heckl, «Körperschall : physikalische Grundlagen und technische Anwendungen», in *Körperschall physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*, Berlin [etc: Springer, 1967.
[43] P. Burkhalter, J. Glanzmann, und Verband Schweizerische Ziegelindustrie, Hrsg., *Schallschutz im Hochbau*, 1. Aufl. in Element, no. 30. Zürich: Faktor-Verl, 2011.
[44] A. Rabold, S. Bacher, U. Schanda, A. Mayr, und F. Schöpfer, «Schallschutz von Holzbalkendecken – Planungshilfen für die Altbausanierung, Teil 1: Direktschalldämmung», *Bauphysik*, Bd. 35, Nr. 4, S. 280–285, Aug. 2013, doi: 10.1002/bapi.201310074.

[45] U. Schanda, A. Mayr, F. Schöpfer, A. Rabold, und S. Bacher, «Schallschutz von Holzbalkendecken – Planungshilfen für die Altbausanierung Teil 2: Flankenschalldämmung», *Bauphysik*, Bd. 35, Nr. 6, S. 392–398, Dez. 2013, doi: 10.1002/bapi.201310080.
[46] Rabold, A., Bacher, S., Hessinger, J.:, «Holzbalkendecken in der Altbausanierung, Teil 1: Direktschalldämmung.», ift Rosenheim, ift Forschungsbericht 760108, Jan. 2008.
[47] Mayr, A., Schanda, U., Rabold, A., Bacher, S., Hessinger, J., Schramm M., «Holzbalkendecken in der Altbausanierung, Teil 2: Flankenübertragung.», ift Rosenheim, ift Forschungsbericht 760120, Juni 2012.
[48] M. Neusser und P. Wegerer, «Optimierung des Trittschallschutzes von Holzbalkendecken in Gründerzeithäusern – Teil 1: Problemstellung und Sanierungsmöglichkeiten», *Bauphysik*, Bd. 46, Nr. 4, S. 197–204, Aug. 2024, doi: 10.1002/bapi.202400022.
[49] M. Neusser und P. Wegerer, «Optimierung des Trittschallschutzes von Holzbalkendecken in Gründerzeithäusern – Teil 2: Deckenaufbau und Flankenübertragung», *Bauphysik*, Bd. 46, Nr. 5, S. 286–297, Okt. 2024, doi: 10.1002/bapi.202400023.
[50] K. Gösele, «Verfahren zur Vorausbestimmung des Trittschallschutzes von Holzbalkendecken», *Holz als Roh-und Werkstoff*, Bd. 37, Nr. 6, S. 213–220, Juni 1979, doi: 10.1007/BF02608189.
[51] «Ökobaudat». Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. [Online]. Verfügbar unter: https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche.html
[52] «EffiWag, Effizienzpotenzial eines Ersatzes des Wärmeabgabesystems», Lemon Consult und ZHAW im Auftrag des BFE, Zürich, 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=73608
[53] T. Calabrese, D. Philippen, und R. Löhrer, «Wärmepumpenlösungen für die Dekarbonisierung bestehender Gebäude – 5 Fallstudien», Renowave, Innosuisse Flagship-Projekt, SPF-OST und Scheco AG, 2026. Zugegriffen: 17. Juli 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.renowave.ch/ficheResultat.php?idResultat=170719
[54] HSLU, *Heizkostenvergleichsrechner, Version V013*. (2026). Hochschule Luzern. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hslu.ch/de-ch/technik-architektur/ueber-uns/organisation/kompetenzzentren-und-forschungsgruppen/bau/gebaeudetechnik-und-energie/software-tools/
[55] «Dataholz», https://www.dataholz.eu/index.htm.
[56] «Handbuch Lehmbau», ökobuch Verlag GmbH. Zugegriffen: 11. Oktober 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://oekobuch.de/buecher/handbuch-lehmbau/
[57] «Lehmbau-Praxis – Planung und Ausführung». Zugegriffen: 11. Oktober 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lehmbau-praxis.de/
[58] Klinge, A.*, Roswag-Klinge, E., Fontana, P., Hoppe, J., Richter, M., Sjöström, C., «Reduktion von Lüftungstechnik durch den Einsatz klimasteuernder Naturbaustoffe – Ergebnisse aus dem EU-Forschungsvorhaben [H]house und der Baupraxis», gehalten auf der DVL 2016: Tagungsbeiträge der 7. Internationalen Fachtagung für Lehmbau, Weimar, Deutschland, 12.- 14. November, 2016.
[59] F. Zohlen und K. Pistol, Hrsg., *Baustoffrecycling & Lehmbaustoffe: Perspektiven für eine Kreislaufwirtschaft im Bauwesen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2025. doi: 10.1007/978-3-658-45640-5.
[60] Klinge, A., Roswag-Klinge, E., Radeljić, l.; Bojic, D., «Lehmbaustoffe als Chance zur Reduktion von Mineralischen Bau- und Abbruchabfällen (CDW)», gehalten auf der DVL 2020: Tagungsbeiträge der 8. Internationalen Fachtagung für Lehmbau, Weimar, Deutschland, 30. Oktober – 1. November 2020, 2020.
[61] *Weniger Technik – mehr Gesundheit. Die Natur macht's!*, 1. Auflage., Bd. S. 82 – 97. in Zukunft Bauen, Lowtech im Gebäudebereich, vol. S. 82 – 97. BBSR im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.

11 Anhang

11.1 Thermische Simulationen: Randbedingungen

Wetterdaten

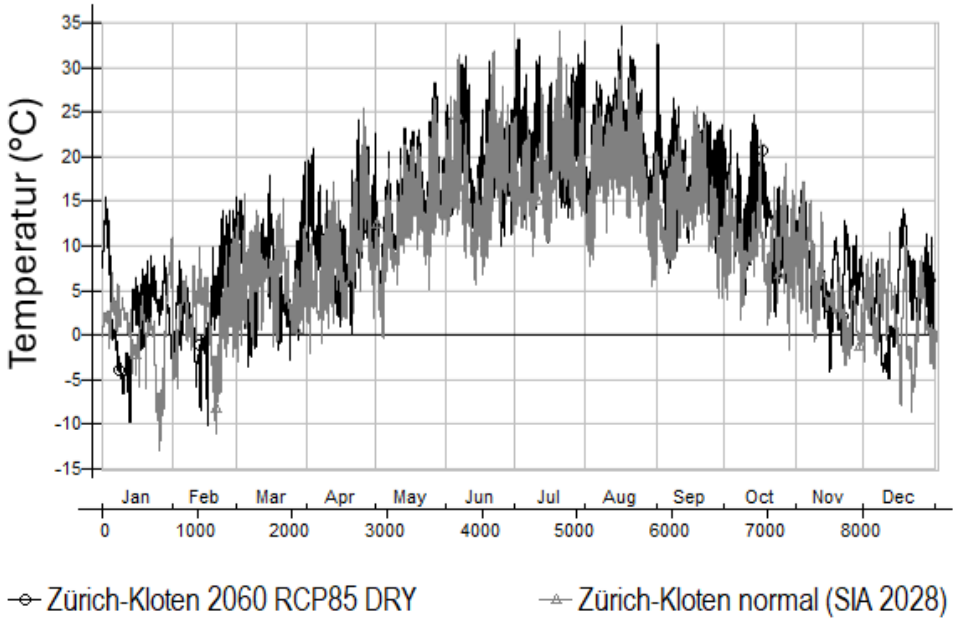


Abbildung 59: Stündliche Aussen-Temperaturwerte für die Standort Zürich: «Zürich-Kloten 2060 RCP85 DRY» (schwarze Kurve, Jährliche Mittelwert = 11.6 °C) und «Zürich-Kloten normal (SIA 2028)» (graue Kurve, Jährliche Mittelwert = 9.5 °C).

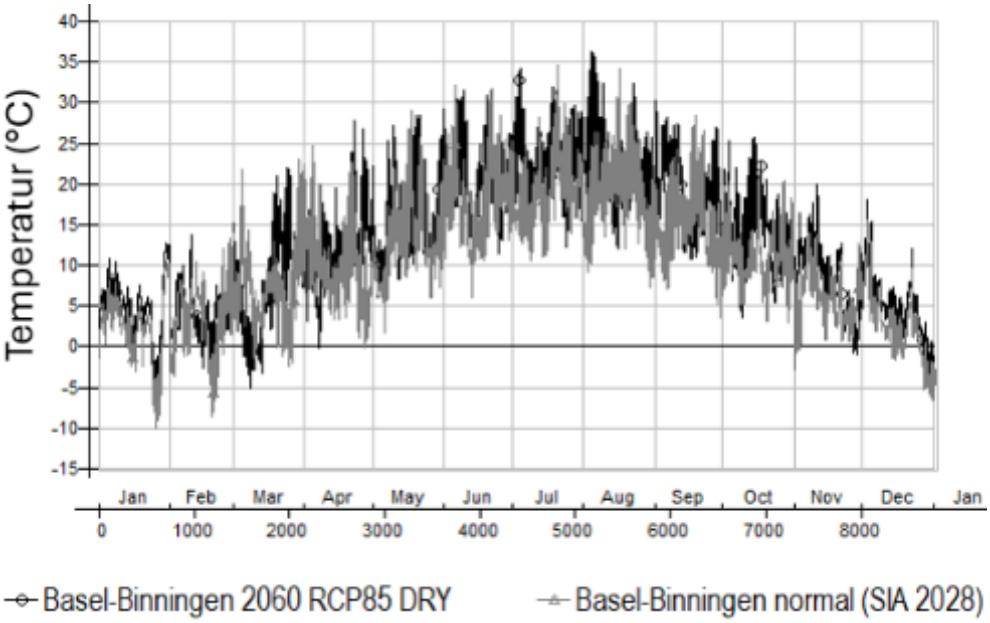


Abbildung 60: Stündliche Aussen-Temperaturwerte für die Standort Basel: «Basel-Binningen 2060 RCP85 DRY» (schwarze Kurve, Jährliche Mittelwert = 12.9 °C) und «Basel-Binningen normal (SIA 2028)» (graue Kurve, Jährliche Mittelwert = 10.5 °C).

Wand- und Fensterdaten

Tabelle 21: Fensterdaten

	Farbhof / Maulbeerstrasse	
	Vor der Sanierung / Innensanierung	**Innen- und Aussensanierung**
Typ	2-IV (12 mm Luft)	2-IV (16 mm Argon)
Ug (W/m²K)	2.9	0.9
g (-)	0.8	0.5
Uf (W/m²K)	2.0	1.5
Rahmenanteil (%)	10	10
Uw (W/m²K)	2.8	1.0

Tabelle 22: Innenwand- und Wohnungstrennwanddaten

	Vor der Sanierung / Innensanierung / Innen- und Aussensanierung			
	Farbhof		**Maulbeerstrasse**	
	Dicke (mm)	U-Wert (W/m²K)	Dicke (mm)	U-Wert (W/m²K)
Innenwand	120	2.3	120	2.3
Wohnungstrenn-wand	150	2.0	500	0.67

Tabelle 23: Aussenwanddaten

	Farbhof		**Maulbeerstrasse**	
	Vor der Sanie-rung / Innensa-nierung	**Innen- und Aus-sensanierung**	**Vor der Sanie-rung / Innensa-nierung**	**Innen- und Aus-sensanierung**
Dicke (mm)	320	430	500	590
U-Wert (W/m²K)	1.1	0.25	0.7	0.25

Tabelle 24: Deckenaufbau des Modellzimmers im "Farbhof" wie in Ida-Ice simuliert (weicht teils von Plänen für reale Umsetzung ab).

Vor der Sanierung		**Innensanierung / Innen- und Aussensanierung**			
		Variante Lehm-Klimaelement		**Variante Wärmeleitblech**	
Schicht	**Dicke (mm)**	**Schicht**	**Dicke (mm)**	**Schicht**	**Dicke (mm)**
Linoleum	2	Linoleum	2	Linoleum	2
Zementmörtel	18	Zementmörtel	18	Zementmörtel	18
Stahlbeton	140	Stahlbeton	140	Stahlbeton	140
Putz	20	Steinwolle	20	Steinwolle	20
-	-	Lehm-Klima-element	25	Luftschicht	20
-	-	Putz	8	Heizrohre	-
-	-	-	-	Lehmplatte	16
-	-	-	-	Putz	8
U = 3.4 W/m^{2}K		U = 1.1 W/m^{2}K		U = 0.6 W/m^{2}K	

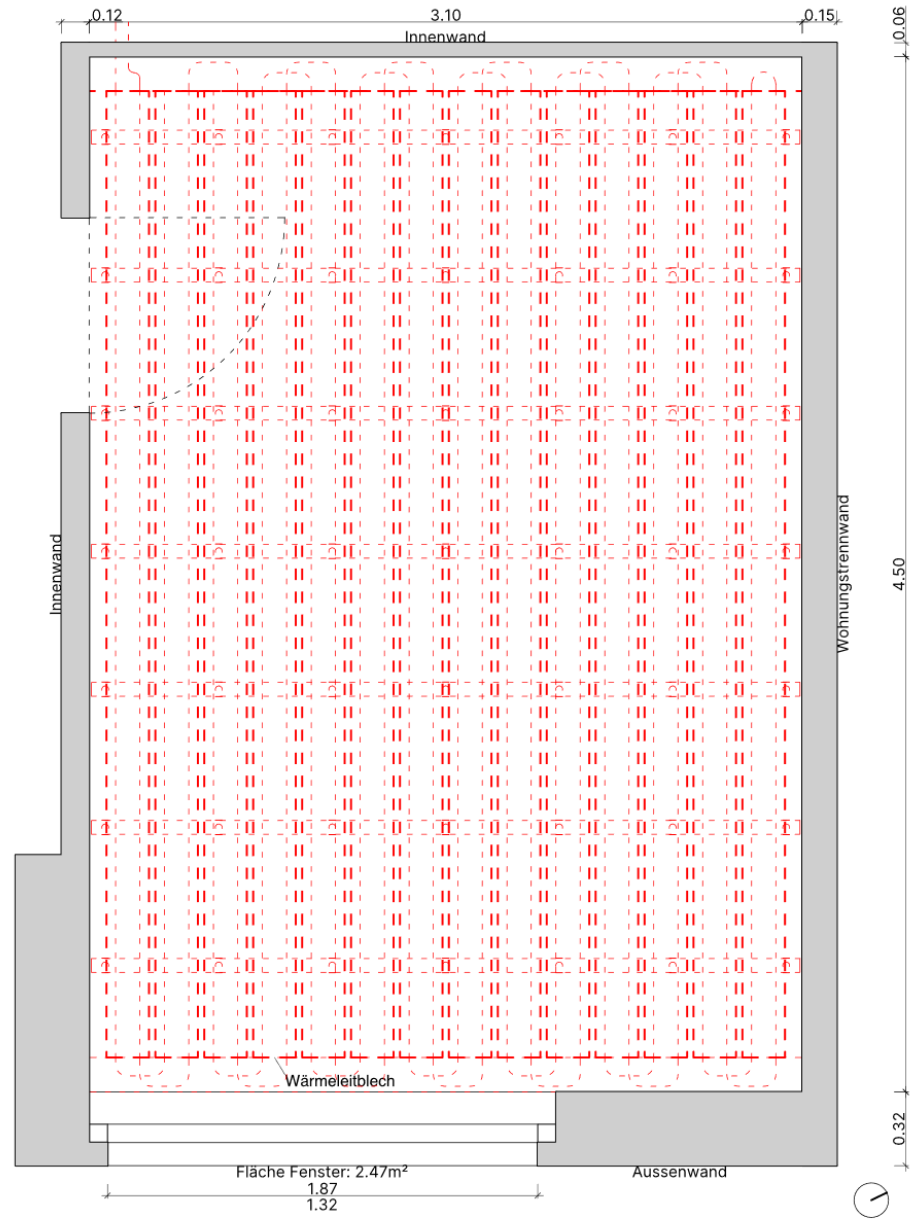
Tabelle 25: Deckenaufbau des Modellzimmers "Maulbeerstrasse" wie in Ida-Ice simuliert (weicht teils von Plänen für reale Umsetzung ab).

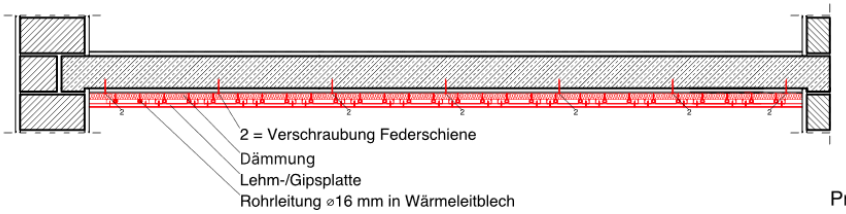
Vor der Sanierung		**Innensanierung / Innen- und Aussensanierung**	
Schicht	**Dicke (mm)**	**Schicht**	**Dicke (mm)**
Parkett	20	Parkett	20
Dielung	20	Dielung	20
Schüttung / Balken (70% / 30%)	160	Schüttung / Balken (70% / 30%)	160
Stakung	20	Stakung	20
Luft / Deckenbalken (70% / 30%)	80	Luft / Steinwolle / Deckenbalken (35% / 35% / 30%)	80
Abhangdecke	20	Lehmplatte mit Heizelement	16
-	-	Putz	8
U = 0.4 W/m^{2}K		U = 0.4 W/m^{2}K	

11.2 Massenermittlungen

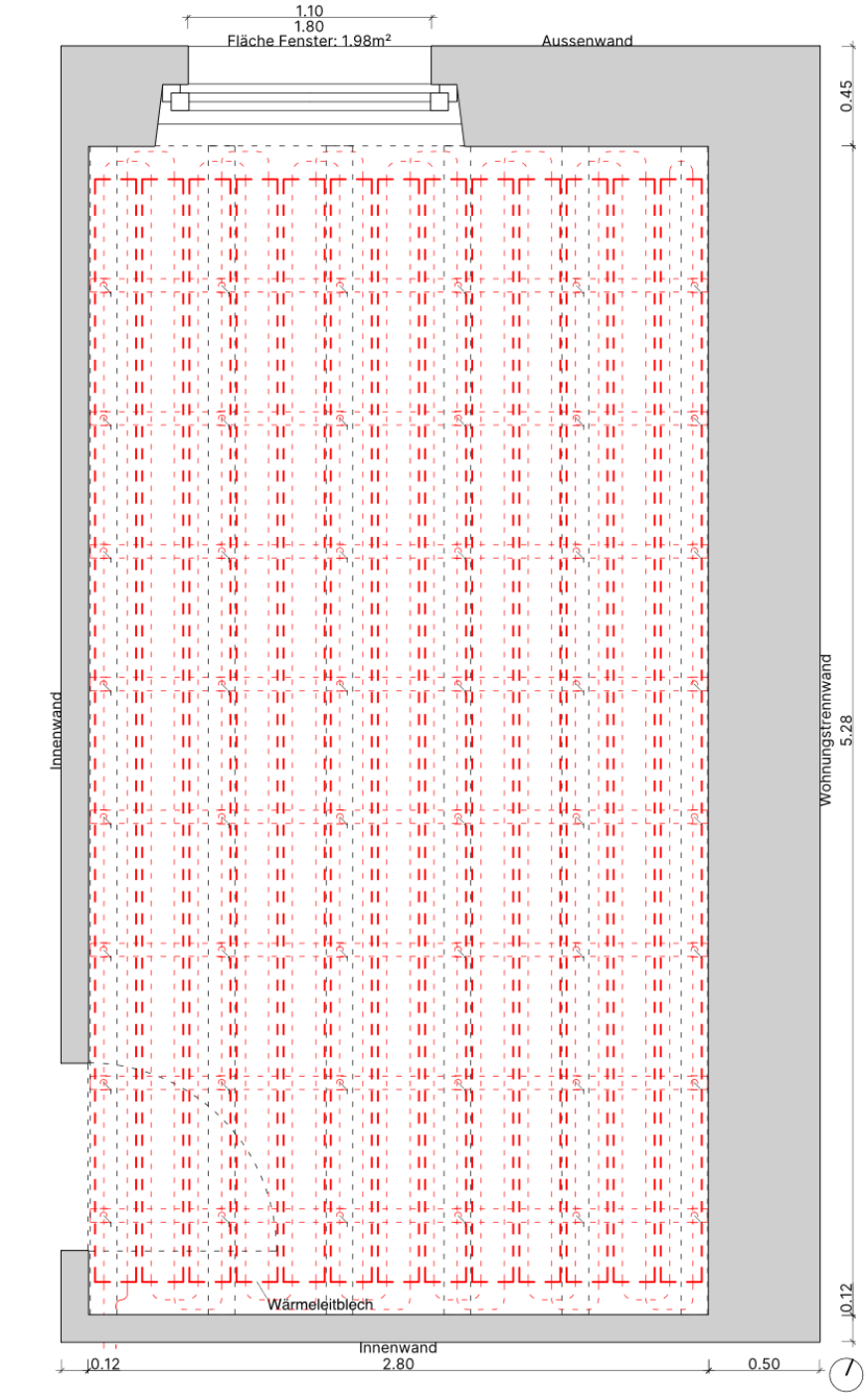
						Rohdichte	Stärke	Länge	Breite [m]	Höhe	Fläche [m2]	Stück	Masse	Gesamt lfm	Gesamt m3	Gesamt kg	Datensatz KBOB	kg/m2	UBP/m2	PENRT/m2	GWP/m2	GWP/m2a
						[kg/m3]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m2]		[kg]									30 Jahre
					Maulbeerstrasse																	
Variante					GR Fläche Maulbeerstr			2.80	5.28		14.78											
				2.1.2.	Holzlattung für WEM	485		2.78	0.06	0.03		26.00	63.100	72.28		63.10	07.009.01 Massivholz Fi/Ta	4.27	1306	2.04	0.51	
			2.1.1.		Holzlattung für Dennert	485		2.78	0.06	0.03		8.00	19.416			19.42	07.009.01 Massivholz Fi/Ta	1.31	402	0.63	0.16	
			2.1.1.	2.1.2.	Direktabhänger	7850						156	0.036			5.55	06.011 Stahlblech, verzinkt	0.38	3827	4.39	1.37	
			2.1.1.		Wärmeleitblech	7850	0.0007	5.28	0.30			13.00			1.44E-02	112.70	06.011 Stahlblech, verzinkt	7.62	77759	89.19	27.75	
				2.1.2.	PU-Rohre in Platte WEM	960					8.796E-05			96.90	8.52E-03	8.18	13.008 Polyethylen	0.55	3332	12.84	2.63	
				2.1.2.	PU-Rohre Verbinder WEM	960					8.796E-05			23.79	2.09E-03	2.01	13.008 Polyethylen	0.14	818	3.15	0.65	
			2.1.1.		PU-Rohre Dennert	960					8.796E-05			129.48	1.14E-02	10.93	13.008 Polyethylen	0.74	4452	17.16	3.51	
			2.1.1.		PU-Rohre Verbinder Dennert	960					8.796E-05			10.46	9.20E-04	0.88	13.008 Polyethylen	0.06	360	1.39	0.28	
			2.1.1.	2.1.2.	Steinwolle 100 mm	80	0.1								1.10E+00	87.87	10.008 Steinwolle	8.00	10880	25.84	6.53	
				2.1.2.	Lehmplatte	1750	0.025								3.70E-01	646.80	Lehmwerk Student	43.75	6650	16.63	3.50	
				2.1.2.	Armierungsputz Lehm 5 mm	1800	0.005									133.06	04.004 Lehmputz	9.00	866	1.55	0.29	
				2.1.2.	Deckputz Lehm 3 mm	1800	0.003									79.83	04.004 Lehmputz	5.40	519	0.93	0.17	
			2.1.1.		Gipsfaserplatte 12.5 mm	1200	0.0125									221.76	03.007 Gipsfaserplatte	15.00	13095	37.05	8.28	
			2.1.1.		Gipsspachtel 3 mm	1100	0.003									48.79	04.001 Gips-/Weissputz	3.30	795	2.24	0.50	
																	Summe 2.1.1.	**36.4**	**111'570**	**177.89**	**48.38**	**1.61**
																	Summe 2.1.2.	**71.5**	**28'199**	**67.36**	**15.65**	**0.52**
					Farbhof																	
Variante					GR Fläche Farbhof			4.50	3.10		13.95											
		1.1.3.			Federschiene für WEM	7850	0.0007	3.10	0.16			26		80.6	9.16E-03	71.90	06.011 Stahlblech, verzinkt	5.15	52575	60.31	18.76	
1.1.1.	1.1.2.				Federschiene für Dennert	7850	0.0007	3.10	0.16			7		21.7	2.47E-03	19.36	06.011 Stahlblech, verzinkt	1.39	14155	16.24	5.05	
				1.2.2.	Direktabhänger für WEM	7850						147	0.036			5.23	06.011 Stahlblech, verzinkt	0.37	3822	4.38	1.36	
			1.2.1.		Direktabhänger für Dennert	7850						49	0.036			1.74	06.011 Stahlblech, verzinkt	0.12	1274	1.46	0.45	
				1.2.2.	Holzlattung für WEM	485		2.78	0.06	0.03		21	50.966			50.97	07.009.01 Massivholz Fi/Ta	3.65	1118	1.75	0.44	
			1.2.1.		Holzlattung für Dennert	485		2.78	0.06	0.03		7	16.989			16.99	07.009.01 Massivholz Fi/Ta	1.22	373	0.58	0.15	
1.1.1.	1.1.2.		1.2.1.		Wärmeleitblech	7850	0.0007	4.20	0.30			14.00			1.23E-02	96.55	06.011 Stahlblech, verzinkt	6.92	70594	80.98	25.19	
		1.1.3.		1.2.2.	PU-Rohre WEM	960					8.796E-05			105	9.24E-03	8.87	13.008 Polyethylen	0.64	3826	14.75	3.02	
		1.1.3.		1.2.2.	PU-Rohre Verbinder WEM	960					8.796E-05			19.82	1.74E-03	1.67	13.008 Polyethylen	0.12	722	2.78	0.57	
1.1.1.	1.1.2.		1.2.1.		PU-Rohre Dennert	960		4.20			8.796E-05	28		117.6	1.03E-02	9.93	13.008 Polyethylen	0.71	4285	16.51	3.38	
1.1.1.	1.1.2.		1.2.1.		PU-Rohre Verbinder Dennert	960					8.796E-05			10.46	9.20E-04	0.88	13.008 Polyethylen	0.06	381	1.47	0.30	
1.1.1.	1.1.2.	1.1.3.			Steinwolle 27 mm	80	0.027								2.59E-01	20.70	10.008 Steinwolle	2.16	2938	6.98	1.76	
			1.2.1.	1.2.2.	Steinwolle 100 mm	80	0.1							8.9605735	9.58E-01	76.66	10.008 Steinwolle	8.00	10880	25.84	6.53	
1.1.1.			1.2.1.		Gipsfaserplatte 12.5 mm	1200	0.0125									209.25	03.007 Gipsfaserplatte	15.00	13095	37.05	8.28	
1.1.1.			1.2.1.		Gipsspachtel 3 mm	1100	0.003									46.04	04.001 Gips-/Weissputz	3.30	795	2.24	0.50	
	1.1.2.	1.1.3.		1.2.2.	Lehmplatte	1750	0.025								3.49E-01	610.31	Lehmwerk Student	43.75	6650	16.63	3.50	
	1.1.2.	1.1.3.		1.2.2.	Armierungsputz Lehm 5 mm	1800	0.005									125.55	04.004 Lehmputz	9.00	866	1.55	0.29	
	1.1.2.	1.1.3.		1.2.2.	Deckputz Lehm 3 mm	1800	0.003									75.33	04.004 Lehmputz	5.40	519	0.93	0.17	
																	Summe 1.1.1.	**29.5**	**106'243**	**161.47**	**44.47**	**1.48**
																	Summe 1.1.2.	**69.4**	**100'388**	**141.27**	**39.65**	**1.32**
																	Summe 1.1.3.	**66.2**	**68'097**	**103.91**	**28.08**	**0.94**
																	Summe 1.2.1.	**35.3**	**101'677**	**166.14**	**44.78**	**1.49**
																	Summe 1.2.2.	**70.9**	**28'404**	**68.60**	**15.88**	**0.53**

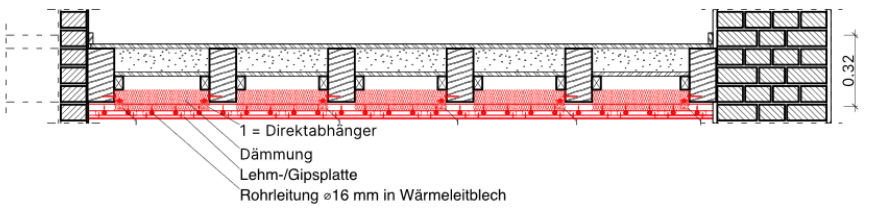
11.3 Planung Sanierungsmassnahme



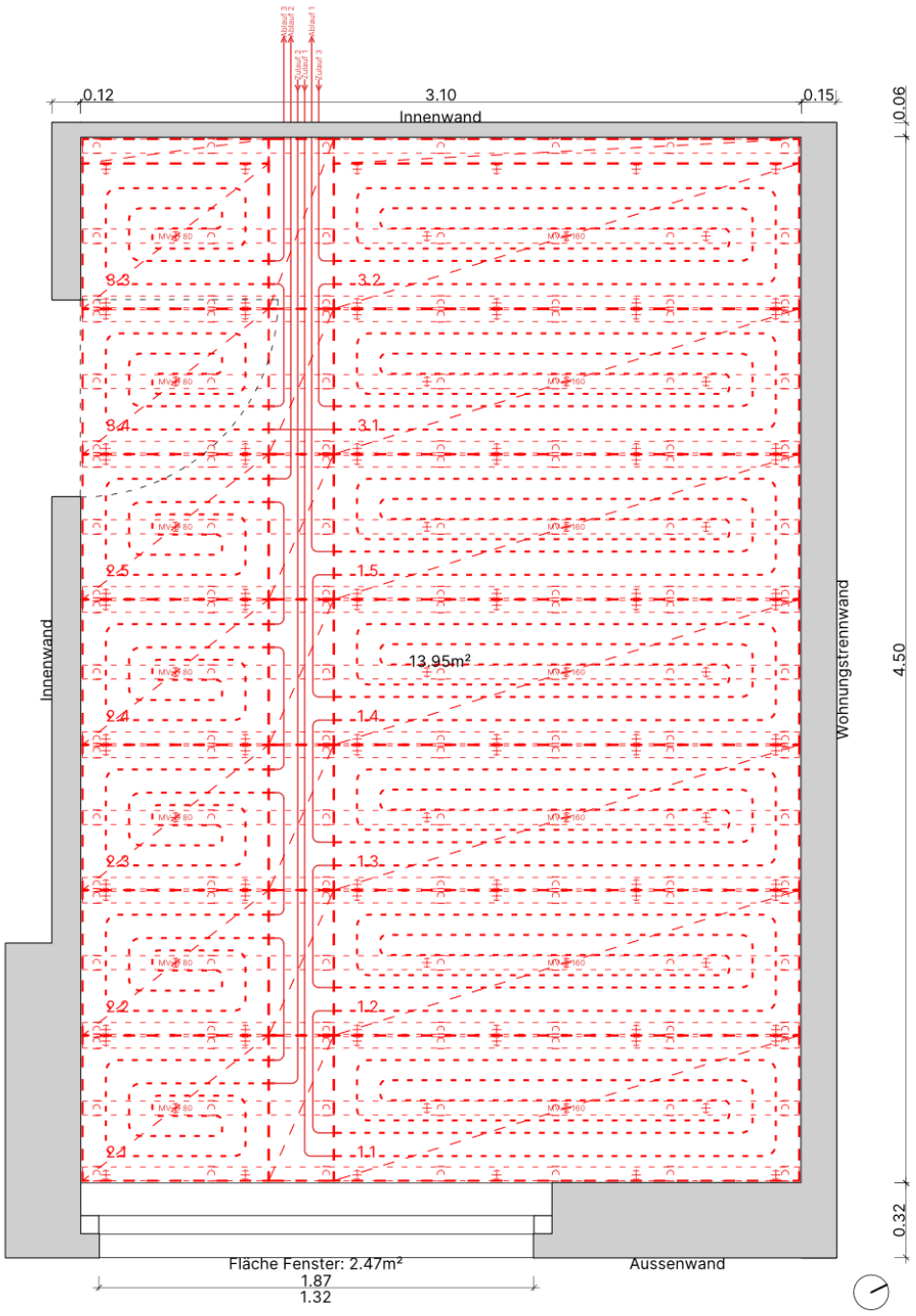


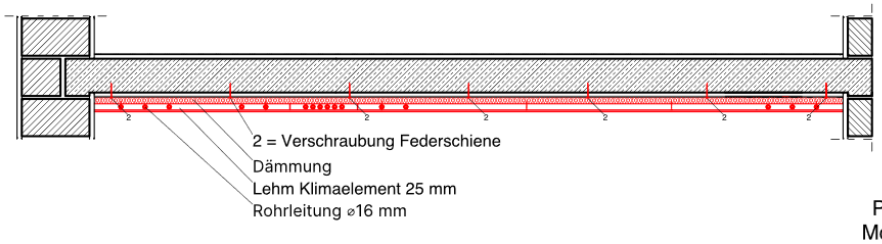
Projekt: CombiSound
Modellzimmer Farbhof
Variante 1.1.1.
M 1:25
Stand: 28.04.2026



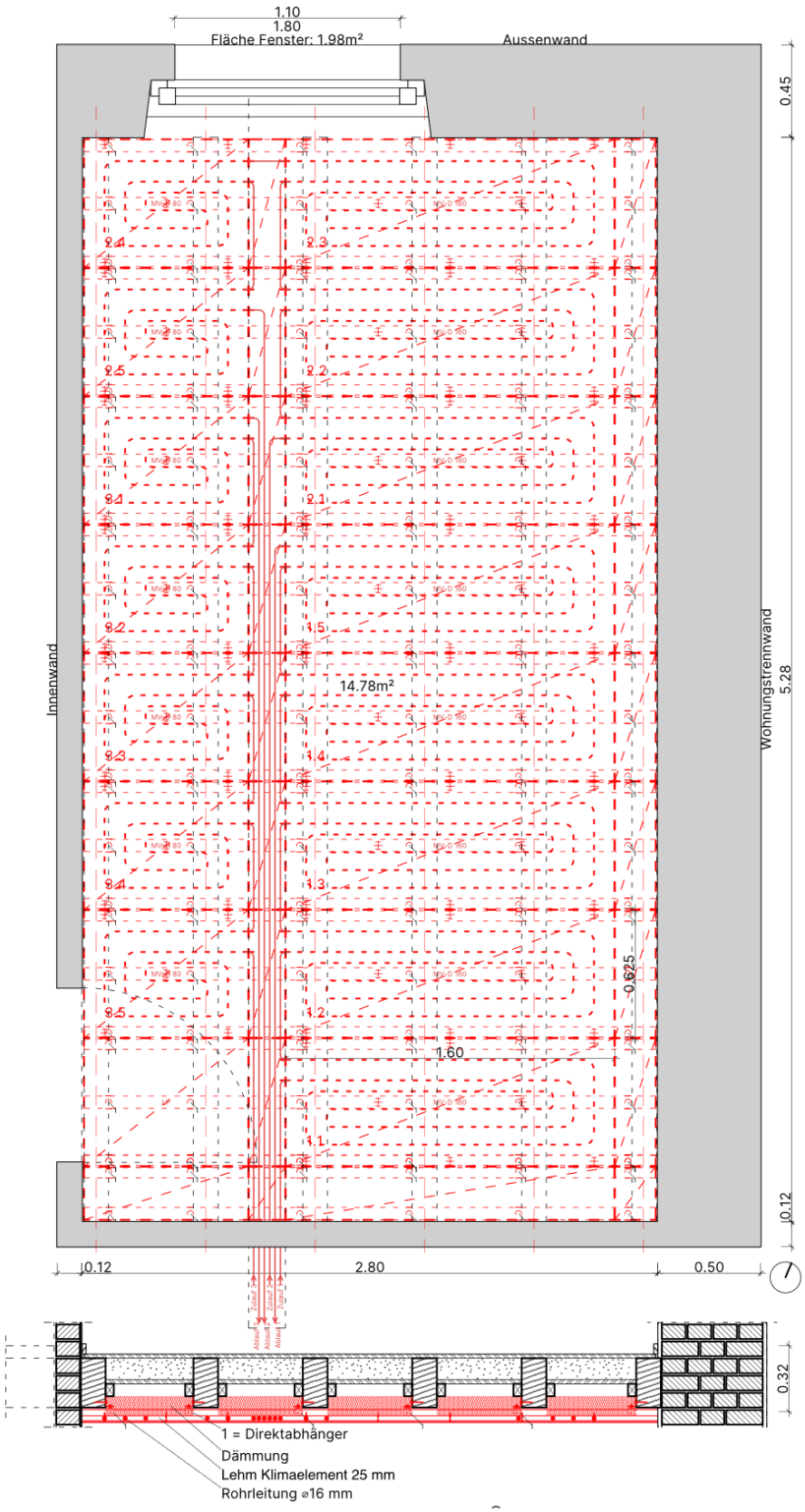


Projekt: CombiSound
Modellzimmer
Maulbeerstrasse
Variante 2.1.1.
M 1:25
Stand: 28.04.2026





Projekt: CombiSound
Modellzimmer Farbhof
Variante 1.1.3.
M 1:25
Stand: 28.04.2026



Projekt: CombiSound
Modellzimmer
Maulbeerstrasse
Variante 2.1.2.
M 1:25
Stand: 28.04.2026

11.4 Abgrenzung der Investitionskosten

In den Investitionskosten der Abhangdecke sind folgende Positionen *nicht* enthalten:

- Grundstück
    - Grundstück- / Landerwerb / Finanzierungskosten
    - Kosten ausserhalb des Bearbeitungsperimeters
- Vorbereitung
    - Allgemeine Bauplatzinstallation ist vorhanden, da ein Umbau in der gleichen Bauetappe realistisch ist. Diese Umbaumassnahme mit den Combisound-Elementen ist als isolierte Massnahme unplausibel.
    - Rückbau von Gebäudeschadstoffen
- Bauwerk
    - Instandstellungsmassnahmen und statische Ertüchtigungen des Tragwerkes.
    - Erdbebensicherung Bauwerksklasse II und grösser
    - Brandschutzmassnahmen an angrenzende Bauteile (keine Brandschutzertüchtigung)
    - Eine allgemeine Baureinigung wird im Rahmen der Umbauten durchgeführt und nicht gerechnet.
    - Sämtliche Haustechniksysteme und Zuleitungen, welche für den Betrieb des Combi-Sound Elements benötigt werden, sind nicht eingerechnet.
- Nebenkosten zu Erstellung
    - Subventionen
    - Miete von Rochadeflächen
    - Umzugskosten bei Mieter-Rochade
    - Entschädigung von Mietern
    - Sämtliche für den Bau relevante Versicherungen
- Reserve, Teuerung
    - Teuerung ab Kostenstand
    - Reserve

11.5 Detaillierte Kosten der Sanierungsmassnahmen

Kostenschätzung für den Einbau der Deckenvarianten (siehe Tabellenende oder Abbildung 25) für eine Projektgrösse von 2'000 m² Deckenfläche. Einheitspreise (EP) gemäss Angabe von Kostenplanern im Raum Zürich.

Kategorie	Pos.	Leistung	Einheit	Menge	Einheitspreis (CHF)	Gesamtpreis (CHF)	Variante						
Vorbereitung	1a	oberflächliche Augenscheinprüfung	m²	2’000	2.00	4’000	1.1.1.	1.1.2.	1.1.3.	1.2.1.	1.2.2.	2.1.1.	2.1.2.
	1b	Detaillierte Zustandsanalyse	m²	2’000	5.00	10’000	1.1.1.	1.1.2.	1.1.3.	1.2.1.	1.2.2.	2.1.1.	2.1.2.
	1d	Gerüst (Roll-/Bockgerüste)	m²	2’000	8.00	16’000	1.1.1.	1.1.2.	1.1.3.	1.2.1.	1.2.2.	2.1.1.	2.1.2.
	2a	Reinigung Bestandsdecke Beton, Entfernen loser Bestandteile, Entfernen von störenden Bauteilen wie Nägeln o.ä., Spachteln von Rissen oder Löchern, Staubfrei	m²	2’000	3.00	6’000	1.1.1.	1.1.2.	1.1.3.	1.2.1.	1.2.2.		
	2b	Rückbau Abhangdecke Bestand, bestehend aus Putzträger (Schilf) und mineralischem Putz	m²	2’000	15.00	30’000						2.1.1.	2.1.2.
Unterkonstruktion	3a	Direktabhänger, Stahl verzinkt, schallentkoppelt, Federweg 100 mm, Verschraubung in Beton, für Dennert	stk	8’000	3.80	30’400				1.2.1.			
	3a2	Direktabhänger, Stahl verzinkt, schallentkoppelt, Federweg 100 mm, Verschraubung in Beton, für Klimaelement	stk	20’000	3.80	76’000					1.2.2.		
	3b	Direktabhänger, Stahl verzinkt, schallentkoppelt, Federweg 100 mm Montage an Winkel seitlich an Deckenbalken	stk	20’000	5.50	110’000						2.1.1.	2.1.2.
	3c	Federschiene, Stahl verzinkt, 27 mm, Verschraubung in Betondecke, für Dennert	lfm	3’100	35.00	108’500	1.1.1.	1.1.2.					
	3d	Federschiene, Stahl verzinkt, 27 mm, Verschraubung in Betondecke, für Klimaelement	lfm	11’540	35.00	403’900			1.1.3.				
	4	Unterkonstruktion, Holzlatte 30/50 mm, Befestigung an Federschiene	lfm	9’780	8.00	78’240				1.2.1.	1.2.2.	2.1.1.	2.1.2.

Kategorie	Pos.	Leistung	Einheit	Menge	Einheitspreis (CHF)	Gesamtpreis (CHF)	Variante						
	5a	Dämmung zwischen Unterkonstruktion, 30 mm, Steinwolle	m²	2'000	13.00	26'000	1.1.1.	1.1.2.	1.1.3.				
	5b	Dämmung zwischen Unterkonstruktion, 100 mm, Steinwolle	m²	2'000	19.00	38'000				1.2.1.	1.2.2.	2.1.1.	2.1.2.
Abhangdecke	6a	Dennert Klimaprofil Twin, CA. 185/20/0.7 mm, liefern	lfm	9'000	15.56	140'040	1.1.1.	1.1.2.		1.2.1.		2.1.1.	
	7	Alu-Verbundrohr 16x2 mm, liefern	lfm	19'200	0.96	18'432	1.1.1.	1.1.2.		1.2.1.		2.1.1.	
	8a	Gipsfaserplatte, 12.5 mm Stumpf stossen und mit Fugenkleber verkleben	m²	2'000	68.00	136'000	1.1.1.			1.2.1.		2.1.1.	
	9a	Gipsspachtel, 3 mm, Oberfläche: Q2	m²	2'000	21.00	42'000	1.1.1.			1.2.1.		2.1.1.	
	8b	Lehmplatte 25 mm	m²	2'000	105.00	210'000		1.1.2.					
	9b	Lehmputz: Armierungsputz Lehm, 5 mm, inkl. Armierungsgewebe Glasfaser Deckputz Lehm, 3 mm	m²	2'000	85.03	170'065		1.1.2.	1.1.3.		1.2.2.		2.1.2.
	10a	Randdämmstreifen, Ausführung ohne starre Verbindung	lfm	1'200	2.00	2'400	1.1.1.	1.1.2.	1.1.3.	1.2.1.	1.2.2.	2.1.1.	2.1.2.
	6b	WEM Klimaelement (Lehm)	m²	2'000	200.00	400'000			1.1.3.		1.2.2.		2.1.2.
		Planung	-		23 % Zuschlag auf Summe der obigen Leistungen								

Zusammenstellung													
	Gesamt Variante Beton 1.1.1. GF+Wärmeleitblech					677'276	339 CHF/m²						
	Gesamt Variante Beton 1.1.2. LP+Wärmeleitblech					945'948	473 CHF/m²						
	Gesamt Variante Beton 1.1.3. Lehm Klimaelement					1'380'641	690 CHF/m²						
	Gesamt Variante Beton 1.2.1. GF+Wärmeleitblech					693'418	347 CHF/m²						
	Gesamt Variante Beton 1.2.2. Lehm Klimaelement					1'064'641	532 CHF/m²						
	Gesamt Variante Holz 2.1.1. GF+Wärmeleitblech					831'168	416 CHF/m²						
	Gesamt Variante Holz 2.1.2. Lehm Klimaelement					1'141'760	571 CHF/m²						