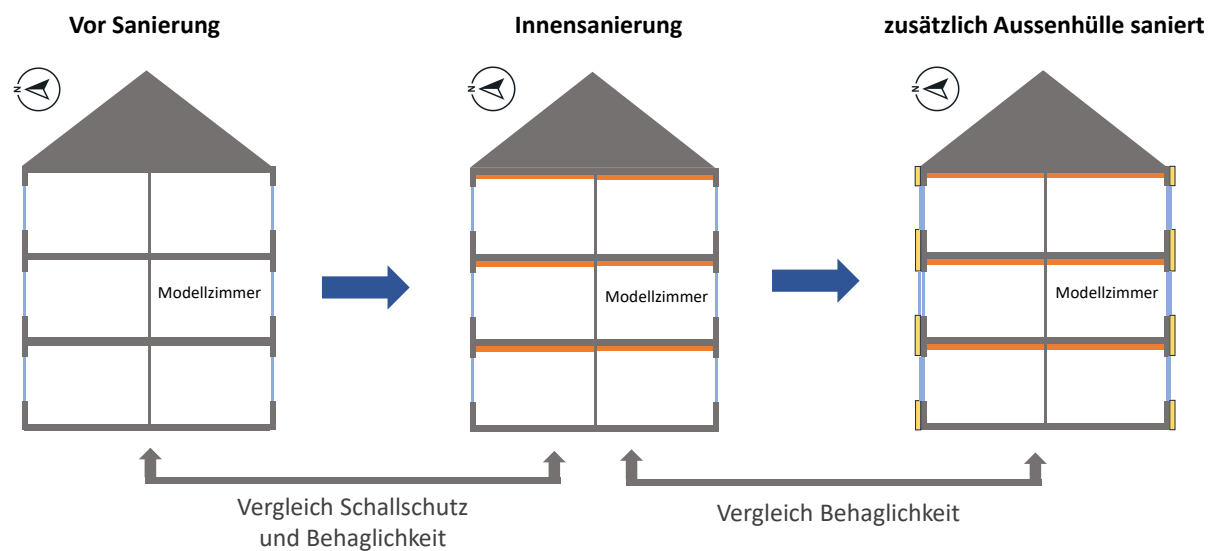




Zwischenbericht vom 4. Juni 2025

CombiSound

Kombinierte Sanierungsmassnahmen für Schallschutz und Behaglichkeit in Wohngebäuden



Quelle: CombiSound, 2025



Fachhochschule
Nordwestschweiz



Subventionsgeberin:

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

Ko-Finanzierung:

Kanton Zürich
AWEL, Abteilung Energie
8090 Zürich

Kanton Basel
Fachstelle UPB
4051 Basel

Stadt Zürich
Amt für Hochbauten
8010 Zürich

Stadt St.Gallen
Umwelt und Energie
9001 St.Gallen

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
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

Bei der Entscheidung, ältere Mehrfamilienhäuser zu ersetzen, ist mangelnder Schallschutz zwischen Wohneinheiten oft ein wichtiges Argument. Durch Sanierungen, mit denen der Schallschutz im Gebäude erhöht wird, kann der Bedarf für Ersatzneubauten reduziert werden. Mit dem gleichzeitigen Einbringen von Flächenheizsystemen können Synergien genutzt werden, die sich ökonomisch auszahlen. Das Projekt zielt darauf ab, über einen integrierten Planungsansatz effektive Kombinationen von Schallschutzmaßnahmen und Flächenheizung in verschiedenen Mehrfamilienhaus-Typen zu identifizieren und wirtschaftliche, kreislaufgerechte und ökologische Lösungen zu entwickeln. Der Fokus wird auf Unterputz-Deckenpaneele mit Schallschutz und hohem Vorfertigungsgrad gelegt. Eine quantitative Bewertung von Schallschutz, thermischem Komfort, Kosten und Umweltwirkung ist Teil des Projekts.

Im vorliegenden Zwischenbericht werden relevante Grundlagen zum Schallschutz zwischen Nutzungseinheiten in Gebäuden dargestellt und prinzipielle Strategien aufgezeigt. Anders als verbreitet angenommen, kann eine gute Schalldämmung nicht allein mit mehr verbauter Masse erreicht werden, sondern auch mit Einbauten, welche als Feder-Masse-System wirken, was Lösungen mit geringer Aufbauhöhe ermöglicht. Neben Schallschutzanforderungen wurden weitere Planungskriterien aufbereitet, welche bei Innensanierungen und bei der Konzeption von Massnahmen an Decke oder Fussboden berücksichtigt werden müssen. Aus realen Gebäuden mit Holzbalkendecke bzw. Stahlbetondecke wurden Modellzimmer ausgewählt, für die nun unter Berücksichtigung der Planungskriterien kombinierte Massnahmen für Schallschutz und Raumklimatisierung entworfen werden.

Résumé

Lorsqu'il s'agit de remplacer des immeubles âgés, l'insuffisance d'isolation acoustique entre les logements est souvent un point saillant. Les rénovations visant améliorer l'isolation acoustique des bâtiments permettent toutefois de les préserver. L'installation jumelée de systèmes de chauffage par surface permet d'exploiter des synergies qui sont rentables sur le plan économique. Ce projet vise à identifier, grâce à une approche de planification intégrée, des combinaisons efficaces de mesures d'isolation acoustique et de chauffage par surface dans différents types d'immeubles et à développer des solutions étant à la fois économiques, circulaires et écologiques. L'accent est mis sur les panneaux de plafond encastrés avec isolation acoustique et un haut degré de préfabrication. D'abord, le projet comprend une évaluation quantitative d'isolation acoustique, confort thermique, coûts et impact environnemental.

Ce rapport intermédiaire présente les principes de base pertinents pour l'isolation acoustique entre les appartements d'un bâtiment ainsi que les stratégies fondamentales. Contrairement à l'avis populaire, une bonne isolation acoustique ne peut être obtenue uniquement par l'ajout de masse d'isolement, mais aussi par des éléments qui agissent comme un système masse-ressort, permettant des solutions ayant besoin la moindre hauteur de construction. Outre les exigences en matière d'isolation acoustique, d'autres critères de planification ont été élaborés, qui doivent être pris en compte lors de la rénovation intérieure et de la conception de mesures au niveau du plafond ou du plancher. Des salles modèles ont été sélectionnées dans des bâtiments réels avec des plafonds à poutres en bois ou en béton armé, pour lesquelles des mesures combinées d'isolation acoustique et de climatisation des pièces sont désormais conçues en tenant compte des critères de planification.

Summary

When deciding to replace older apartment buildings, inadequate sound insulation between residential units is often an important factor for the decision. Renovations that improve sound insulation in buildings can reduce the need to replace buildings. The simultaneous installation of surface heating systems allows synergies to be exploited that pay off economically. The project aims to use an integrated



planning approach to identify effective combinations of sound insulation measures and surface heating in various types of apartment buildings and to develop economical, circular and ecological solutions. The focus is on flush-mounted ceiling panels with sound insulation and a high degree of prefabrication. A quantitative assessment of sound insulation, thermal comfort, costs and environmental impact is part of the project.

This interim report presents relevant principles of sound insulation between units in buildings and outlines basic strategies. Contrary to popular belief, good sound insulation cannot be achieved solely with more installed mass, but also with a spring-mass system, enabling solutions with low installation heights. In addition to sound insulation requirements, other planning criteria were prepared that must be taken into account in interior renovations and in the design of measures for ceilings or floors. Model rooms were selected from real buildings with wooden beam ceilings or reinforced concrete ceilings, for which combined measures for sound insulation and room air conditioning are now being designed, taking into account the planning criteria.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Summary	3
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung	7
1.1 Kontext und Motivation	7
1.2 Projektziele.....	8
2 Methodik.....	8
2.1 Geschossdeckentypen und Sanierungsschritte.....	8
2.2 Schallschutz	10
2.3 Thermische Behaglichkeit.....	12
2.4 Planungskriterien	13
2.4.1. Schallschutz.....	13
2.4.2. Thermische Behaglichkeit.....	14
2.4.1. Umweltwirkungen	15
2.4.2. Brandschutz.....	17
2.4.3. Baurechtliche Belange	18
2.4.4. Statische Anforderungen	18
2.4.5. Kosten.....	19
2.4.6. Weitere Anforderungen.....	19
3 Produktanalyse für Deckenheizsysteme	19
4 Gebäudeauswahl und Modellzimmer	22
4.1 Gebäudeauswahl	22
4.1.1. Maulbeerstrasse 46-48, Basel (Holzbalkendecke).....	23
4.1.2. Herbstweg 96, Zürich (Stahlbetondecke)	24
4.1.3. Unteraffoltern III, Zürich (Stahlbetondecke).....	26
4.1.4. Farbhof Zürich (Stahlbetondecke)	27
4.2 Modellzimmer.....	30
4.2.1. Zimmer mit Holzbalkendecke (Maulbeerstrasse)	30
4.2.2. Zimmer mit Stahlbetondecke (Farbhof)	32
5 Massnahmen / Varianten	34
5.1 Verbesserung des Schallschutzes.....	34
5.2 Integration der Heiz- und KÜhlschicht in die Geschossdecke	37
6 Ergebnisse und Diskussion	38
7 Ausblick	39
8 Literaturverzeichnis	40



Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
BPG	Bauplanungsgesetz (Basel-Stadt)
MFH	Mehrfamilienhaus
PBG	Planungsbaugesetz (Zürich)
PMV	Predicted Mean Vote (durchschnittliche Bewertung der thermischen Behaglichkeit)
LSV	Lärmschutzverordnung



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. Mit gestiegenen Komfortexpectationen 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 festhalten werden, dass die gebäudeinterne Schallproblematik oft ein relevantes Argument für den Abriss ist – neben anderen Faktoren wie Ausnutzungsziffer, Wohnungszuschnitt sowie veralteter Gebäudetechnik. Insbesondere tieffrequenter Trittschall – i. w. Poltern und Rumpeln, verursacht durch gehende Personen in der darüberliegenden Wohnung – wird als besonders störend empfunden [1]. Er 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, könnte 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 möglichst hohem Vorfertigungsgrad kombiniert, können möglicherweise Planungs- und Baukosten gesenkt werden bei gleichzeitiger Optimierung der schalltechnischen und energetischen Wirkung.

Mit dem Projekt wird untersucht, in welchen Bautypen von Mehrfamilienhäusern sich auf welche Weise Massnahmen zum Luft- und Trittschallschutz mit Flächenheizung (Fussboden- oder Deckenheizung) mit Vorteil kombinieren lassen. Die Erwartung ist dabei, dass Unterputz-Deckenheizpaneele mit Schallschutzfunktion und hohem Vorfertigungsgrad vorteilhaft wären, da sie rasch montiert werden können und mit ihnen in Zukunft bei potenziell steigenden Temperaturen im Sommer auch Raumkühlung effizient vorgenommen werden kann. Abhangdecken 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 Taupunktunterschreitung während Kühlung). Bei Bedarf können zudem die Fussbodenaufbauten erhalten bleiben, was ein relevanter Kostenvorteil sein kann.

Im Projekt soll eine quantitative Bewertung sowohl des Schallschutzes als auch des thermischen Komforts im Gebäude vor und nach der Sanierung erfolgen. Zudem werden ökonomische und ökologische Indikatoren verwendet, um die Sanierungsmassnahmen zu bewerten. Über statische Berechnungen wird sichergestellt, dass die entwickelten Massnahmen die Lastreserven der Decke nicht überschreiten bzw. geringfügige Ertüchtigungsmassnahmen umgesetzt werden können.

Bei der Untersuchung der Vor- und Nachteile von Fussbodenheizungen (FBH) und Heiz- und Kühldecken (HKD) wird neben dem Heizfall auch der Kühlfall im Sommer untersucht. Es besteht hier ein Bedarf für eine Untersuchung, da auf dem Markt zwar viele Produkte mit unterschiedlichen Versprechen angeboten werden, es in der wissenschaftlichen Literatur aber nur wenige systematische Vergleiche gibt. Die verschiedenen Herstelleraussagen lassen sich entsprechend nur schwer beurteilen. Gemäss Aussagen von Schweizer Experten aus dem Heizungsmarkt waren Deckenheizungen in Wohngebäuden nach einer gewissen Verbreitung in Neubauten der 1970/80er Jahren wieder weitgehend vom Markt verschwunden, da dazumal die Heizungsvorlauftemperaturen wegen schwach gedämmter Aussenhüllen hoch gewählt werden mussten, was sich wegen der merklichen Abstrahlung negativ auf den Wohnkomfort ausgewirkt hatte.



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 Behaglichkeit deutlich erhöht werden kann. Neben Fussbodenheizungen wird mit Deckenheiz- bzw. kühelementen ein System zur Raumtemperierung in die Untersuchungen einbezogen, mit dem potenziell besser auf in Zukunft gehäuft auftretende Hitzetage reagiert werden kann. Untersucht werden verschiedene Schallschutzsysteme und der Einbau flächiger Wärme-/Kälteabgabesysteme im Fussboden und in der Geschossdecke. Die funktionellen Schichten sollen möglichst kombiniert werden, 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 Bauteilverbindungen 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?
- Mit welcher Art der Heizkreisintegration und welchem Einbauort der Massnahme lassen sich die Gebäude «zukunftsicher und robust» machen, 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 Methodik

2.1 Geschossdeckentypen und Sanierungsschritte

Die Studie fokussiert auf Geschossdeckenkonstruktionen, welche typisch sind für Schweizer Wohngebäude älterer Bauperioden, bei denen der Schallschutz üblicherweise gering ist: die Holzbalken- und die Stahlbetondecke (Abbildung 1). Für zwei typische Ausführungen in realen Gebäuden (Kapitel 3) werden Untersuchungen des Aufbaus und der Statik durchgeführt und der Bereich maximal zulässiger Flächenlast und geeignete Ankerpunkte definiert. Materialwahl, Gewicht und Montagepunkte der Sanierungsmassnahmen werden entsprechend gewählt.

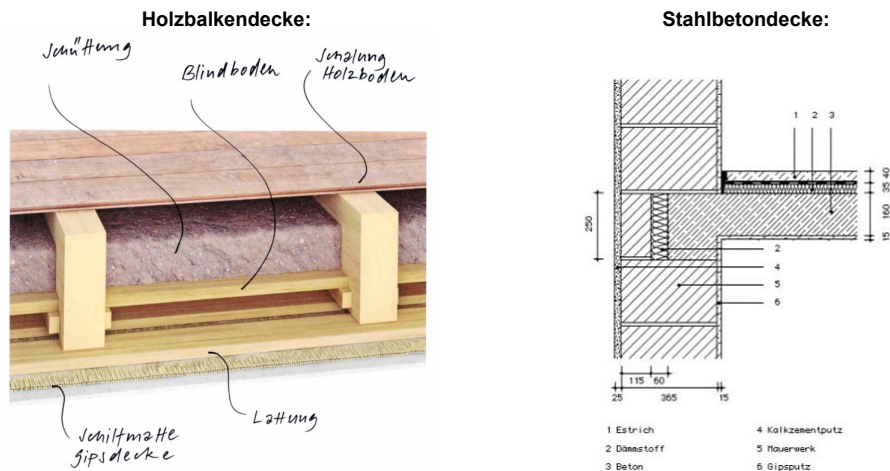


Abbildung 1: Holzbalken- und Stahlbetondecke als typische Geschossdecken in älteren Bestandsbauten, für die geeignete Massnahmen zur Erhöhung von Schallschutz und thermischer Behaglichkeit vorgeschlagen werden (Quellen: Architektur H. Baumann, www.baunetzwissen.de).

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 2).

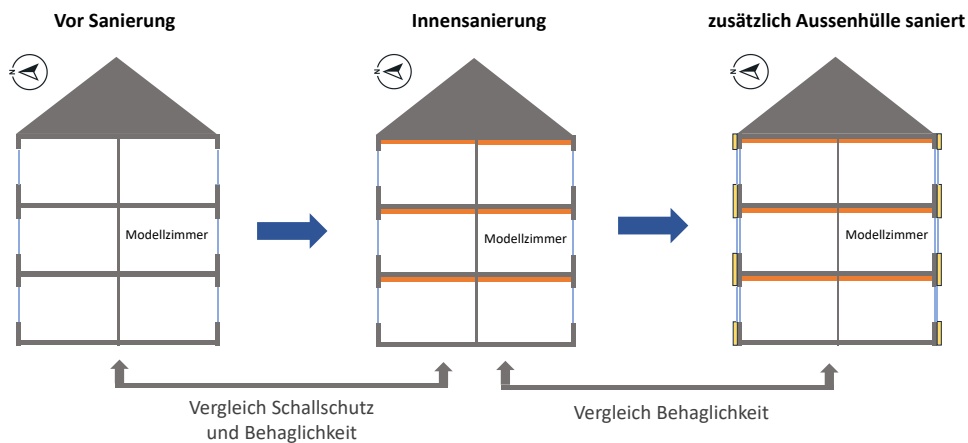


Abbildung 2: Gebäudezustände, für die der Schallschutz und die thermische Behaglichkeit verglichen werden, hier beispielhaft mit Massnahmen an den Geschossdecken (in orange).

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 Kühlfall für ein thermisch stark betroffenes Zimmer abgebildet werden kann. Für den Heizfall ist die Ausrichtung des Zimmers nicht relevant, da er ohne solare Gewinne untersucht wird (kalte, sonnenarme Winterperiode). Für die Untersuchung des thermischen Komforts werden voraussichtlich die sechs in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Fälle untersucht.



Tabelle 1: Sanierungsschritte und Heizungsarten, die untersucht werden sollen.

Gebäude	Radiator	Deckenheizung	Fussbodenheizung
Unsaniert	✓		
Aussen saniert (thermisch)	✓		
Innen saniert		✓	✓
Innen und aussen saniert (th.)		✓	✓

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 erkennen zu können. Für die thermischen Berechnungen werden aktuelle Klimadatensätze für das Schweizer Mittelland (Stadt Zürich) und ein prognostiziertes Klima 2050 für den gleichen Standort verwendet.

2.2 Schallschutz

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) vormessen. 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. In einem zweiten Schritt erfolgt die Auswahl geeigneter Materialien und Systeme auf Basis dieser Eigenschaften und unter Berücksichtigung weiterer Entscheidungskriterien (Brandschutz, thermische Aspekte, Ökologie, Kreislauffähigkeit, Wirtschaftlichkeit).

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. Trittschall umfasst Geräusche, die durch mechanische Einwirkungen auf den Boden entstehen, wie gehende Personen oder fallende Gegenstände. 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.

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 Senderraum angeregten Bauteilen und den abstrahlenden Bauteilen im Empfangsraum über deren Bauteilverbindung (Stossstelle). Der Übertragungsweg mit der geringsten Schalldämmung begrenzt die maximal erreichbare Bauschalldämmung. Bei Luftschall gibt es je Verbindung 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)

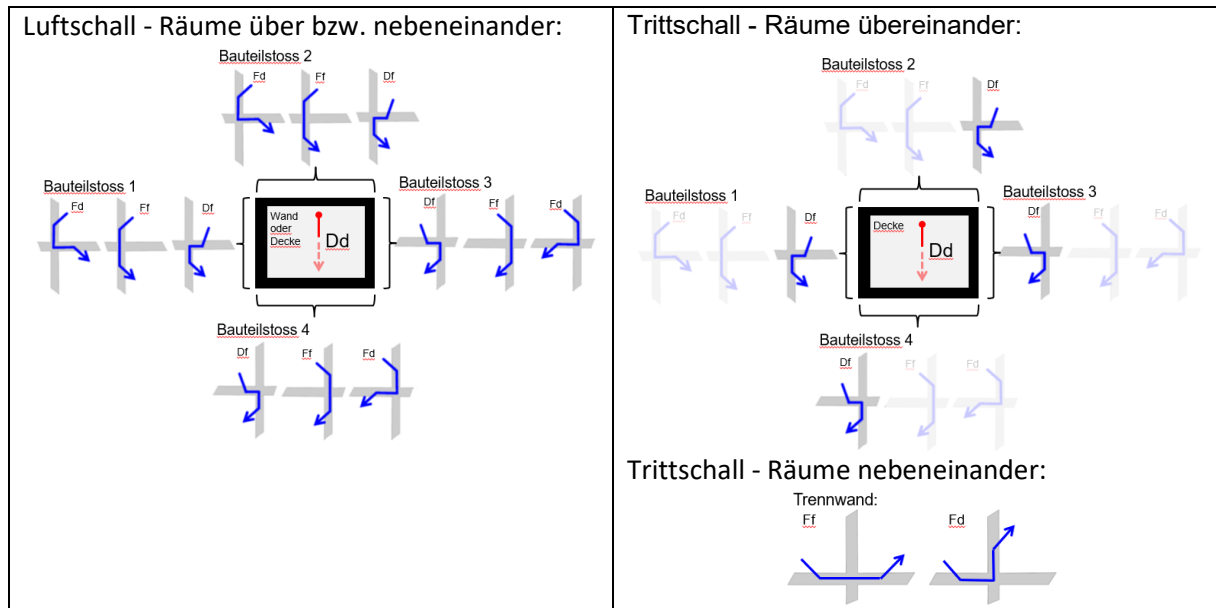


Abbildung 3: Bauschalldämmung zwischen zwei aneinandergrenzenden Räumen im Gebäude mit Darstellung der zu berücksichtigenden Übertragungswege und deren Bezeichnung. Links für Luftschallanregung und rechts für Trittschallanregung

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

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

Beispiel: Boden-Wand-Weg

Flankenübertragung (R_{Df} , $L_{n,Df}$)

Direktschalldämmung der Bauteile (R , L_n)

Verbesserung durch zusätzliche Lagen (ΔR , ΔL_n)

Körperschalldämmung der Verbindung (K_{ij})

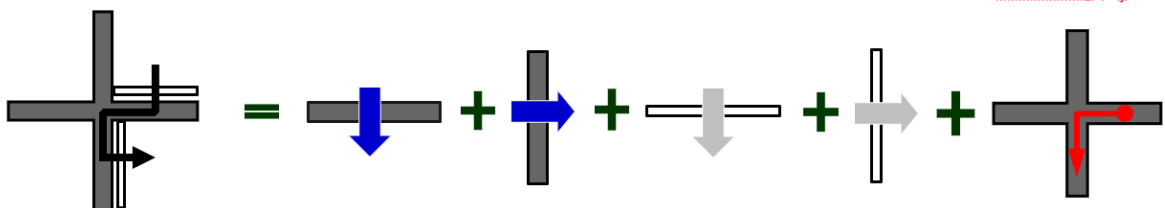


Abbildung 4: Rechenschema der EN ISO 12354-1 und -2 zur Ermittlung der Flankenübertragung am Beispiel des Boden(D)-Wand(f)-Übertragungswegs, sowie die benötigten Eingangsdaten der Bauteile und Verbindung.

Die Berechnung erfolgt frequenzabhängig in einem einfachen Rechenschema. Die Herausforderung bei der Anwendung besteht in der Ermittlung der geeigneten Eingangsdaten. Für die Grundbauteile und betrachteten Verbindungen, bei denen es sich in der Gebäudeauswahl um traditionelle Bauweisen handelt, gibt es dazu Angaben in den Normanhängen, Literatur [4] oder in Tabellenwerken [5]. Die



Verbesserungswirkung zusätzlicher Massnahmen wird zunächst durch einfache analytische oder empirische Ansätze ermittelt und dann mit Herstellerangaben abgeglichen, falls diese verfügbar sind.

2.3 Thermische 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 5).

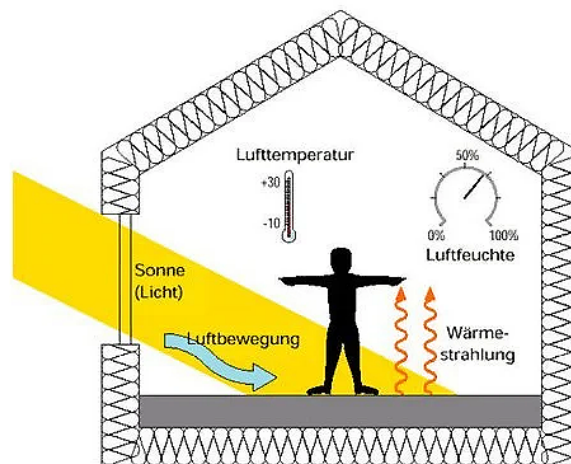


Abbildung 5: Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit [6].

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» [7] 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 zu Bewertung der thermischen Behaglichkeit verwendet wird. Für kleine Räume mit geringer Luftzirkulation entspricht sie dem arithmetischen Mittel aus Luft- 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. 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 wird ein Wetterdatensatz für die Stadt Zürich für die Jahre 2025 und 2050 (gemäss Prognosen) verwendet. Die Modellierung der Gebäude mit Modellzimmern wird an SIA 380-2 (Energetische Berechnungen von Gebäuden – Dynamisches Verfahren für Bedarfsabklärungen, Leistungs- und Energiebedarf, [8]) angelehnt.

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 angestrebt, welche sicher die Mindestanforderungen für Umbauten nach SIA 181 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 in einem breiten Bereich gültig, was ihre praktische Relevanz und breite Anwendbarkeit erhöht.

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 [9]. Die Anforderungen gelten nur zwischen Räumen in unterschiedlichen Nutzungsbereichen, das heisst zum Beispiel zwischen zwei unterschiedlichen Wohnungen oder von allgemeinen Bereichen in eine Wohnung. Die SIA 181 gibt verschiedene Anforderungsniveaus vor. Die Mindestanforderungen gelten für Mietwohnungen und die um 4 dB strenger erhöhten Anforderungen bei Reihen- oder Doppelhäusern, sowie Stockwerkseigentum. Bei Umbauten gelten beim Trittschallschutz um 2 dB geringere Anforderungen gegenüber Neubauten. Diese Anforderung hängt jedoch von der Eingriffstiefe ab. Wird zum Beispiel ein Gebäude entkernt und die Trenndecke komplett ersetzt, gelten die Anforderungen für den Neubau [10].

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 $R'_w + C \geq D_i - 5\text{dB}$

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 [11] aus den frequenzabhängigen Ergebnissen der Luftschallmessung nach EN ISO 16283-1 [12] und die Werte $L'_{nT,w}$ und C_i sind Einzahlangaben, welche gemäss EN ISO 717-2 [13] aus den frequenzabhängigen Ergebnissen der Trittschallmessung nach EN ISO 16283-2 [14] ermittelt werden. Hierbei wird der Frequenzbereich 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) [7] «Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden» beschreibt die Anforderungen zur thermischen Behaglichkeit (Kapitel 2.3), 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 (letzteres, siehe Abbildung 6). Für die vorliegende Studie wird der in der Abbildung gezeigte Bereich verwendet, allerdings mit einer Anpassung. 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 werden in Wohnungen im Winter eher Raumtemperaturen zwischen 21 und 24 °C erwartet (Lufttemperatur), darunter ist mit Reklamationen zu rechnen. Als Zielwert wird in der vorliegenden Studie deshalb 21 °C verwendet, also ein leicht erhöhter im Vergleich zur SIA 180. Mit den zu untersuchenden Heizflächen könnten mit erhöhten Vorlauftemperaturen aber auch höhere Raumtemperaturen über 21 °C erreicht werden.

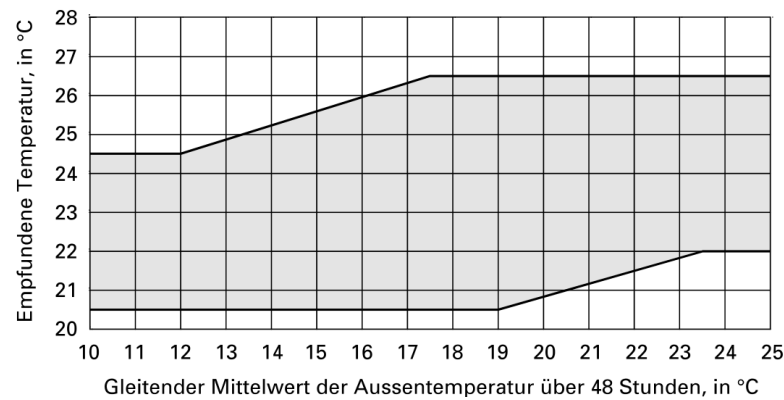


Abbildung 6: Zulässiger Bereich (grau schraffiert) der empfundenen Temperatur in Räumen, während diese beheizt, gekühlt oder mechanisch belüftet werden (SIA 180, Fig. 4).

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

- PMV (siehe Kapitel 2.3): das Modellzimmer soll eine PMV zwischen -0.5 und +0.5 erreichen.
- 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 siehe nachstehende Abbildung.

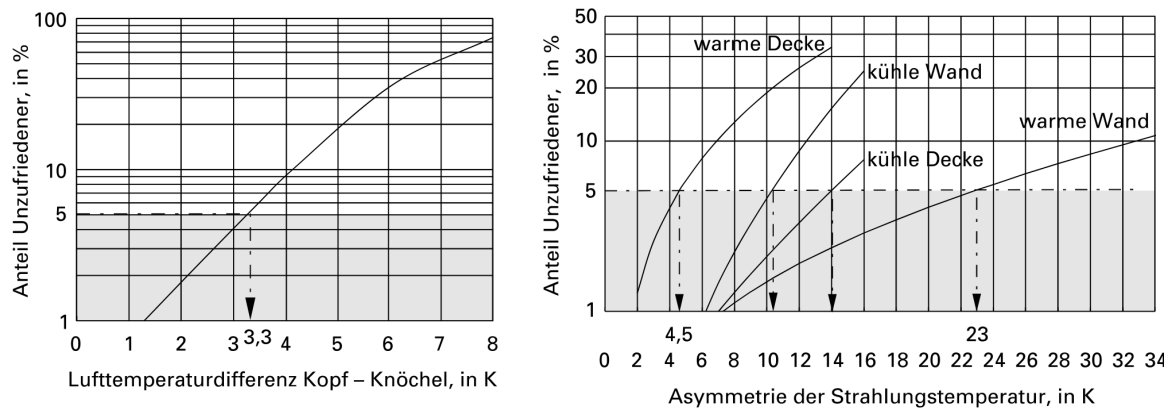


Abbildung 7: Planungskriterien zur Differenz der Lufttemperatur Kopf-Knöchel (links) und zur Asymmetrie der Strahlungstemperatur im Raum (rechts), zulässiger Bereich grau schraffiert (aus SIA 180, Fig. 9 und 11).

2.4.1. 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 CO₂-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 überarbeitet werden. Dieser Prozess wird iterativ gestaltet, damit gewährleistet werden kann, dass im Projekt klimafreundliche Lösungen erarbeitet werden. Die Berechnung erfolgt über die KBOB-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich und wird für die Produktphase (A1 – A3) erstellt, die die Rohstoffgewinnung, den Transport sowie die Herstellung beinhaltet. Die Berechnung bezieht sich auf die baulich konstruktiven Massnahmen und beinhaltet keine technischen Komponenten jenseits der Heiz-/Kühlflächen samt Verteilungen. Zudem ist geplant das Modul D (potenzielle Wiederverwendung) auszuweisen. Als Wirkungsindikatoren wurden das globale Erwärmungspotenzial, die nicht erneuerbare Primärenergie sowie die Umweltbelastungspunkte ausgewählt.

Graue Treibhausgasemissionen

Graue Treibhausgasemissionen sind die kumulierte Menge der Treibhausgase (CO₂, 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. [15]

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. [15]

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). [16]

Um möglichen Unterschieden in der Nutzungsdauer von Bauteilen Rechnung zu tragen, werden die im Merkblatt aufgeführten Standardwerte der Nutzungsdauer von Bauteilen respektive einzelner Schichten verwendet. Sollten nicht trennbare Schichten mit unterschiedlicher Nutzungsdauer angedacht werden, ist die Schicht mit der kürzesten Dauer die ausschlaggebende.

Um eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Lösungsansätze gewährleisten zu können, wird zudem als funktionelle Einheit 1 m² Decke definiert. Sollte sich aufgrund der energetischen Massnahmen die gewählte Einheit als nicht zielführend erweisen, wird diese im weiteren Projektverlauf entsprechend angepasst.

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 Rückbau Abbruchabfälle entstehen und die CO₂-Emissionen, die durch die Herstellung des Bauteils oder der Bauteilschicht bereits emittiert wurden, zerstört werden. 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 < 8 cm) ermöglichen. Verklebte, geschweisste oder geklammerte Konstruktionen sollten vermieden werden. Wenn sich ein System wieder in Einzelkomponenten zerlegen lässt, ist entscheidend ob und wie diese wieder eingesetzt werden können. Kann Plattenmaterial z.B. erneut eingesetzt werden? Lassen sich mineralische Baustoffe wieder mit wenig Energieaufwand aufbereiten? Lassen sich fossile Anteile der Systeme (z.B. Rohrsysteme aus Flächenheizungen) recyceln oder ebenso wiederverwenden?

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.

2.4.2. 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 [17].

Einige der im Projekt betrachteten Systeme (Kapitel 3) sind Bauprodukte aus Deutschland. Deren Prüfungen in Bezug auf das Brandverhalten unterliegen der DIN EN 13501 [18]. 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 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 maximal 1 Masse-% organischer Anteile können grundsätzlich in die Baustoffklasse A1 eingestuft werden [19], [20]. Bei Plattenwerkstoffen wird oftmals ein hoher Faseranteil angesetzt. Allerdings gibt es einige Hersteller denen Prüfzeugnisse über eine A2-s1, d0 Klassierung vorliegen [21].



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 sein

Der Feuerwiderstand, der mittels Lehmbaustoffe in Verbundkonstruktionen erreicht werden kann, ist noch nicht vollständig erforscht. Laut Liblik et al. [22] 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 [23].

2.4.3. 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 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.

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) [24]. 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 [25]. 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 des Baurechts 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.

2.4.4. Statische Anforderungen

Für das Vorhaben sind insbesondere die Lastreserven 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. Zum Zeitpunkt des Zwischenberichts ist diese noch nicht erfolgt. Aus den Bestandsunterlagen der Modellprojekte gehen teilweise statische Informationen hervor, die überprüft werden müssen. Insbesondere in den Fällen, wo die Berechnungen vor den gültigen Bemessungsgrundlagen angefertigt worden sind.

Zunächst muss geprüft werden, welche Tragfähigkeit die Bestandsaufbauten haben. Diese muss dann mit den üblich anzusetzenden Lasten gem. SN 505 261/1:2020 SIA 261/1 [26] abgeglichen werden. Aus der Gebäudenutzung ergeben sich die entsprechenden Nutzlasten und Trennwandzuschläge. Nach Abzug aller relevanten Lasten kann die Lastreserve bestimmt werden, die Grundlage für die Wahl der Sanierungsmassnahme ist.



2.4.5. Kosten

Die Investitionskosten der vorgeschlagenen Massnahmen werden abgeschätzt, um die Wirtschaftlichkeit der Massnahmen untereinander vergleichen zu können. Die Kosten werden soweit möglich von den Firmen der Begleitgruppe zur Verfügung gestellt.

2.4.6. 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, da sie sofort weiterbearbeitet werden können. Nasssysteme, bei denen die Heizrohre in Putz eingebettet werden, bieten 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 8 zu sehen, ausreichend Raum für die Unterbringung der Rohrleitungen und ermöglichen einen einfachen Zugang für Wartungsarbeiten [27].

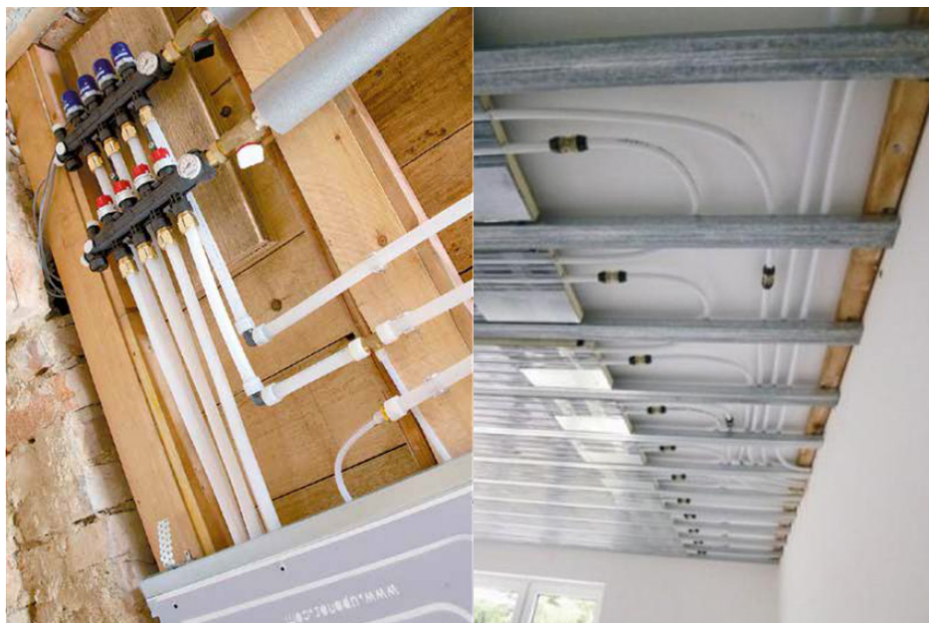


Abbildung 8: Bei abgehängten Deckenheizsystemen lassen sich die Zuleitungen und Verteilbalken gut im Zwischenraum installieren [28].

Im Rahmen des Projektes wurden marktverfügbare Produkte für Deckenheizsysteme recherchiert und miteinander verglichen. Ziel dieser Produktübersicht ist es, relevante technische und praktische Aspekte herauszuarbeiten, die bei der Integration solcher Systeme in Sanierungsprojekte entscheidend sind. Dabei wirken sich die in Kapitel 2 beschriebenen Anforderungen wie folgt aus:



Mindestaufbauhöhe: Die minimale Aufbauhöhe der Systeme ist ein entscheidendes Kriterium, da die lichte Raumhöhe häufig begrenzt ist, insbesondere in älteren Gebäuden. Die Aufbauhöhe und Montageart haben direkten Einfluss auf den Schallschutz (vgl. Kapitel 2.2). Je nach Ausgangslage muss entschieden werden, ob ein abgehängtes System oder ein flacheres System, das direkt mit der Decke verbunden ist und den Schallschutz vor allem durch seine Masse gewährleistet, gewählt wird.

Brandschutz: Die verwendeten Materialien müssen gegebenenfalls strengen Brandschutzvorschriften entsprechen. Insbesondere Systeme, die direkt unterhalb von tragenden Bauteilen ohne Brandschutz installiert werden, benötigen die Klassifizierungen RF1 (nicht brennbar, kein Abtropfen). Ist der Brandschutz der Decke jedoch bereits erfüllt, gelten keine weiteren Anforderungen an die Deckenheizung. Die in dem Projekt analysierten Produkte weisen keine Zertifizierung nach Schweizer Brandschutznorm auf. Die Produkte, die auf Lehm basieren, waren jedoch 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.

Gewicht und statische Anforderungen: Das zulässige Gewicht eines Deckenheizsystems muss anhand der Tragfähigkeit der vorhandenen Geschossdecken abgeleitet werden. Je nach Bauweise und Materialstärke weisen Decken unterschiedliche Tragfähigkeiten auf. Die Tragfähigkeit einer Decke ist in der SIA-Norm 261:2014 geregelt, welche eine Nutzlast von $2,0 \text{ kN/m}^2$ (200 kg/m^2) vorschreibt [26]. Altbauten, die nicht nach der Norm gebaut sind, weisen erfahrungsgemäss geringere Traglasten auf. Als Richtwert kann hier mit 150 kg/m^2 – 200 kg/m^2 eine erste Abschätzung durchgeführt werden. Bei einem schweren Deckenheizsystem sollte daher immer mit einem Statiker abgeklärt werden, welche zusätzliche Belastung möglich ist. Das Gewicht der hier untersuchten Systeme liegt im gefüllten Zustand zwischen 14 kg/m^2 und 84 kg/m^2 .

Materialien und Ökologie: Die Materialwahl spielt sowohl in Bezug auf den thermischen Komfort als auch hinsichtlich ökologischer Nachhaltigkeit eine wichtige Rolle. Vorzugsweise sollten Materialien eingesetzt werden, die recyclebar und kreislauffähig sind. Gängige Trägermaterialien für Deckenheizungen sind Gipskarton, mineralische Bauplatten und Lehmplatten. Letztere zeichnen sich durch eine sehr gute Fähigkeit zur Regulierung der Raumluftfeuchtigkeit aus und verbessern dadurch das Raumklima. Zudem können sich Lehmsysteme besonders gut für den Kühlbetrieb eignen, wenn sie die Kondensationsgefahr durch ihre hygroskopischen Eigenschaften reduzieren und somit auch Temperaturen unterhalb des Taupunktes gefahren werden können. Die Rohrleitungen sind bei allen gängigen Produkten aus Verbundmaterial (Alu-PEX), bei welchem typischerweise Polyethylen und Aluminiumschichten verwendet wird, oder reinen Kunststoffen. Verbundrohre gelten heute als nicht rezyklierbar und werden in der Schweiz nach dem Rückbau in der Regel via Kehrrichtverbrennungsanlage 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. Tabelle 2 dient dazu, eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die Auswahl geeigneter Systeme in den Modellzimmern zu schaffen.



Tabelle 2: Übersicht verschiedener Deckenheizsysteme.

	Kapillarrohrmatten	Heizungsrohrsystem	Lehmbauelemente
Produktbild (Beispiel)	 [29]	 [30]	 [31]
Mögliche Hersteller	Beka Klima, Clina	Frigoma, MFH-Systeme, Quick-Tec	ArgillaTherm, Naturbo, WEM
Installationsart	Trocken / Nass	Trocken	Trocken / Nass
Max. Gewicht (gefüllt) [kg/m ²]	14	25	Variiert stark, bis zu 85
Min. Aufbauhöhe [mm]	12.5	32.5	55 – 70 (je nach Stärke der Lehm-schicht)
Materialien	Polypropylen, kann als vorgefertigtes Element mit Styropor und Gipskartonplatte erworben werden	PEX-Aluminium-Verbundrohr, ökologische Trägermaterialien oder Styropor, Wärmeleitblech, Gipskartonplatte oder OSB als Deckschicht	Lehm, z.T. in Kombination mit Holzfaserplatte, Lehmputz als Deckschicht
Vorteile	Geringe Aufbauhöhe, Anpassbar an Raumgeometrie (vertikal), hohe Homogenität der Wärme- und Kälteverteilung, günstiges System	Einfache Montage, Vielseitigkeit (wird auch für Bodenheizungen verwendet), gute Recycelbarkeit der Trägermaterialien, hohe Flexibilität was Verlegung betrifft, da viele Freiheitsgrade	Trägt zur Regulierung der Luftfeuchtigkeit und zu einem angenehmen Raumklima bei, Schallschutz durch hohe Masse, Nachhaltige Baumaterialien, Vorgefertigte Lehmbauplatten mit und ohne Heizungsrohr erhältlich
Nachteile	Empfindlichkeit durch dünne Rohre, vorgegebene Geometrie (horizontal), Rohre nicht sauerstoffdiffusionsdicht	Geringster Vorfabrikationsgrad	Hohes Gewicht, hoher Installationsaufwand, i.d.R. hohe Kosten



4 Gebäudeauswahl und Modellzimmer

Für das Projekt wurden durch die Stadt Zürich und den Kanton Basel-Stadt insgesamt vier Projekte zur Auswahl gestellt, die im Folgenden beschrieben 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 mit 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.



Abbildung 9: Strassenansicht Maulbeerstrasse.



4.1.1. Maulbeerstrasse 46-48, Basel (Holzbalkendecke)

Das Gebäude in der Maulbeerstrasse (Abbildung 9) 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 [32]. Die 18 Wohneinheiten in der Maulbeerstrasse 46-48 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.

Eckdaten:

Baujahr: 1906

Lichte Raumhöhe: 280 cm

Minimum nach BPG [24]: 250 cm

Kanton: Basel-Stadt

Adresse: Maulbeerstrasse 46-48, 4058 Basel, Schweiz

Zone [34]: 5a: Erleichterung für Industrie- & Gewerbebauten möglich

Aufbauten:

Decke	mm	Aussenwand	mm	Wohnungstrennwand	mm	Innenwand	mm	Raumfläche	m ²
Belag	?	Mauerwerk	?	Mauerwerk	250	Holzstütze	120	Schlafzi. (2.77x5.23m)	14.5
Dielung	?	Luftschicht	?	Luftschicht	?			Wohnzi. (4.03x5.10m)	20.5
Schüttung	?	Mauerwerk	?	Mauerwerk	250				
Balken	?								
Stakung	?								
Abhangd.	?								
Gesamt	320	Gesamt	450	Gesamt	500	Gesamt			

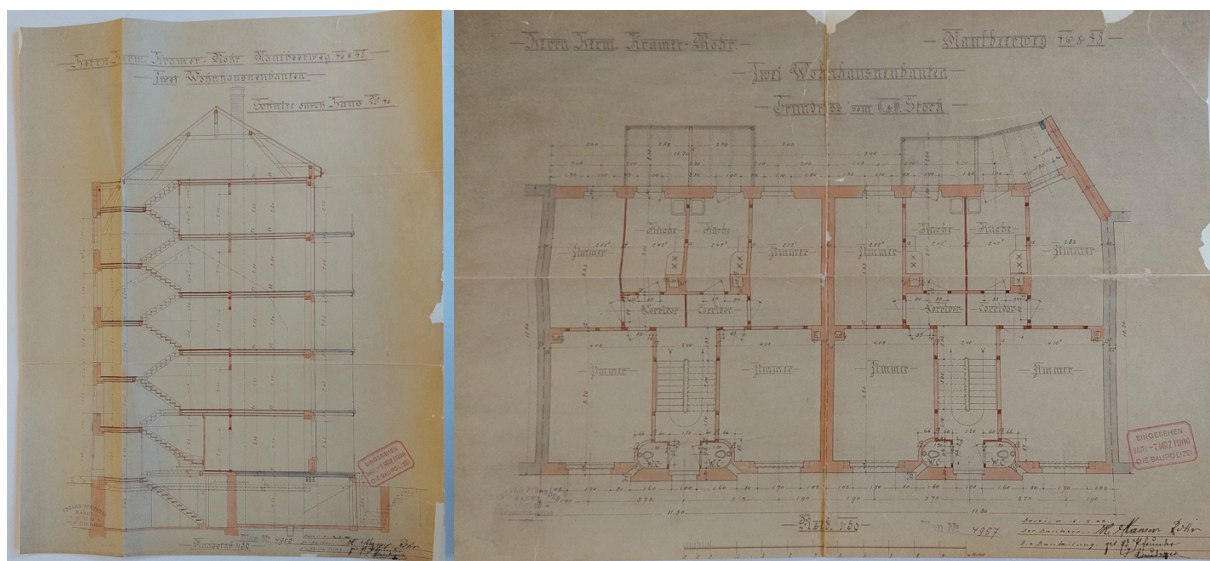


Abbildung 10: Schnitt- und Grundrisszeichnung, Quelle: Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt.



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 vorerst Annahmen aus historischen Aufbauten vergleichbarer Gebäude getroffen. Im späteren Verlauf des Projekts sollen diese Annahme ggf. über Bauteilöffnungen im Bestand überprüft werden. Im Fall der Maulbeerstrasse ist dies u.U. möglich, da das Projekt kernsaniert wird. Voraussichtlicher Baubeginn der Arbeiten ist für Februar/März 2026 geplant. Prinzipiell ist das Projekt für eine Betrachtung im Forschungsprojekt geeignet, da sich bisher keine Einschränkungen identifiziert wurden, die einer Sanierungsmassnahme entgegenstehen.

4.1.2. Herbstweg 96, Zürich (Stahlbetondecke)

Die kommunale Siedlung wurde in der Zeit von 1946-1947 von dem Architekten Ernst Göhner umgesetzt. Sie liegt in der Stadt Zürich im Saatlenquartier von Schwamendingen. Die 52 Wohnungen verteilen sich auf drei Zeilen mit drei Geschossen und Satteldach und sind in konventioneller Mauerwerkskonstruktion mit vorfabrizierten Holzelementen für den Innenausbau errichtet [35].



Abbildung 11: Zwei der drei Zeilen der Überbauung Herbstweg 96 in Zürich, Quelle: Baugeschichtliches Archiv Zürich (BAZ), © Thomas Hüssel.

Eckdaten:

Baujahr: 1946-1947

Sanierung: 1988 (wahrscheinlich)

Lichte Raumhöhe: 243-247 cm -> Unterschiedliche Plangrundlagen

Minimum nach PBG: 240 cm

Kanton: Zürich



Stadt: Zürich
Stadtkreis: Schwamendingen (Kreis 12)
Quartier: Saatlén
Adresse: Herbstweg 96, 8050 Zürich
Kernzone: Nein

Aufbauten:

Decke	mm	Aussenwand	mm	Wohnungstrennwand	mm	Innenwand	mm	Raumfläche	m ²
Linoleum	?	Pavatex HHH	5	Pavatex	5	Pavatex	5	Schlafzi.	13.3
Fliessmörtel	?	Lattung (alt)	40	Kalksandstein	?	Beton	120	Wohnzi.	16.3
STB-Decke	?		?						
Lattenrost	?								
Novopan	19								
Anstrich	?								
Gesamt	180	Gesamt	?	Gesamt	?	Gesamt	?		

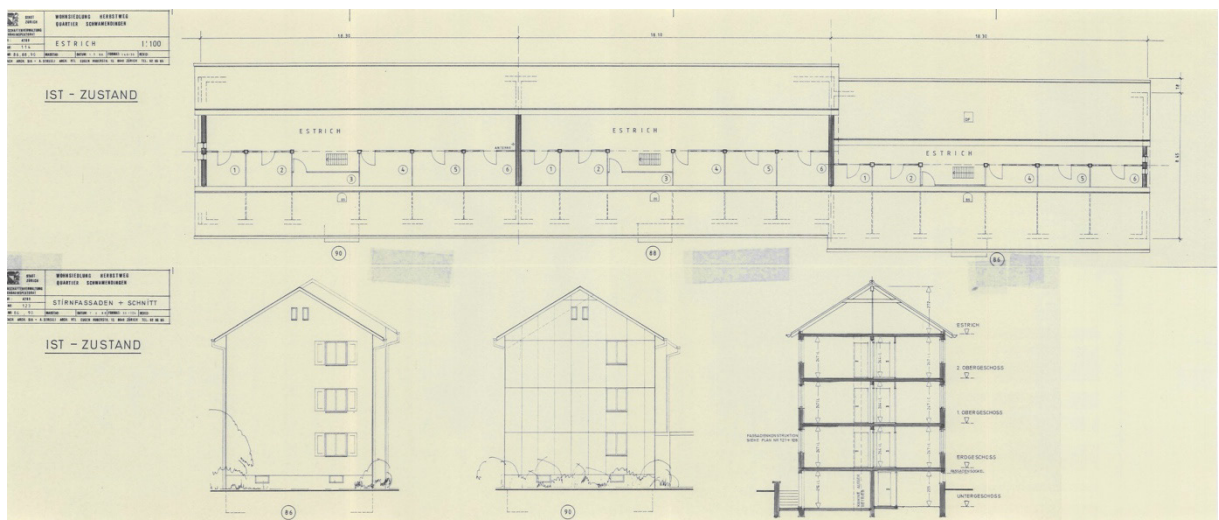


Abbildung 12: Grundriss und Schnitte der Überbauung Herbstweg 96, Quelle: Stadt Zürich, AHB.

Bewertung:

Aus den Bestandsunterlagen gehen keine Informationen über das Tragwerk hervor. Die Bauteilaufbauten sind teilweise textlich erwähnt, jedoch nur lückenhaft und ohne die konkrete Angabe von Belagsstärken. Je nach Aufbau beträgt die lichte Raumhöhe 243-247 cm. Da das Gebäude ausserhalb einer Kernzone errichtet ist, beträgt die minimale lichte Höhe 240 cm. Aufgrund dessen kann eine Sanierungsmassnahme nur in sehr «schlanker» Ausführung erfolgen. Dennoch ist die Bauweise beispielhaft für viele Wohnbauten dieser Zeit und wäre prinzipiell interessant. Da die Grundlagen bei anderen Projekten umfangreicher sind, ist das Beispielgebäude für das Projekt nicht ausgewählt worden.



4.1.3. Unteraffoltern III, Zürich (Stahlbetondecke)

Die zwei gegenüber angeordneten Zeilen wurden vom Büro Zweifel+Strickler Partner geplant. Die insgesamt sieben Mehrfamilienhäuser werden über den Zwischenraum der Baukörper erschlossen. Das Projekt wurde von der Stadt Zürich im Quartier Unteraffoltern in Auftrag gegeben. Die 62 Wohnungen sind über drei Passerellen und freistehende Treppentürme verbunden [36]. Das Projekt soll saniert und ergänzt werden [37]. Für die Projektierung wurde ein Budget von 7,1 Mio. CHF bewilligt [38].



Abbildung 13: Siedlung Unteraffoltern III in Zürich, Quelle: Baugeschichtliches Archiv Zürich (BAZ), © Juliet Haller

Eckdaten:

Baujahr: 1980-1981

Lichte Raumhöhe: 241cm

Minimum nach PBG: 240cm

Adresse: Stöckenackerstrasse 20/26, 8046 Zürich, Schweiz

Stadtkreis: Unteraffoltern (Kreis 11)

Kernzone: nein

Aufbauten:

Decke	mm	Aussenwand	mm	Wohnungstrennwand	mm	Innenwand	mm	Raumfläche	m ²
Kunststoffbelag	?	Mauerwerk	120	Backstein	150	Mauerwerk	150	Schlafzi. (4.5x3.78m)	16
Estrich	70	Putz	10	Luftschicht	30			Wohnzi. (5.34x6.32m)	30-32
STB-Decke	220	Luftschicht (?)	50	Alba	80				
Spachtel	?	Beton	150						
Anstrich	?								
Gesamt	290	Gesamt	?	Gesamt	?	Gesamt	?		

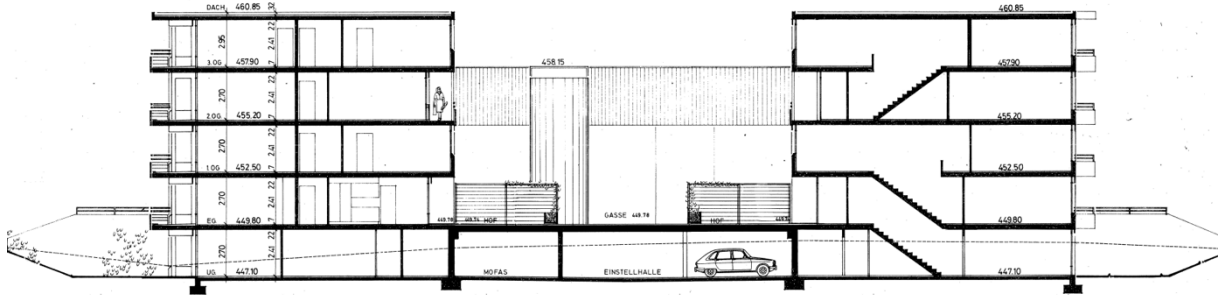


Abbildung 14: Schnittzeichnung der Siedlung Unteraffoltern III, Quelle: Stadt Zürich, AHB.

Bewertung:

Die Bestandsunterlagen für das Projekt zeigen nur wenige Informationen auf, weshalb Belagsstärken unbekannt bleiben. Aufgrund der niedrigen Deckenhöhe von 241 cm ist eine Eignung für eine Sanierungsmassnahme nur unter der Voraussetzung möglich, dass von der Anforderung der minimalen lichten Höhe abgewichen werden kann. Das Gebäude wurde für die weitere Betrachtung nicht ausgewählt.

4.1.4. 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 [39], [40].



Abbildung 15: 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	Aussenwand	mm	Wohnungstrennwand	mm	Innenwand	mm	Raumfläche	m ²
Tonplatten (Bad/Küche)	30	Mauerwerk	320	Mauerwerk	150	Mauerwerk	120	Schlafzi. (2.6x4.2m)	11
Mörtelbett (Bad/Küche)	20							Wohnzi. (3.75x4.2m)	15.7
Linoleum (Zimmer)	2								
Ausgleich (Zimmer)	18								
STB-Decke PC 300	140								
Putz	20								
Anstrich	?								
Gesamt	210 (180)	Gesamt	?	Gesamt	?	Gesamt	?		

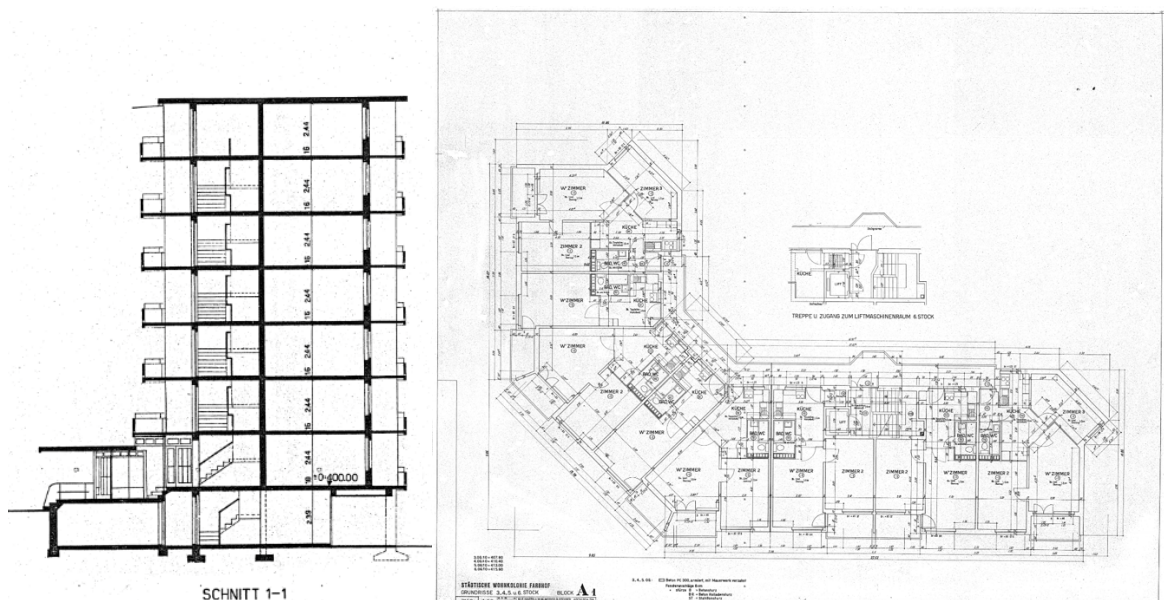


Abbildung 16: Schnitt und Grundriss eines der fünf Baukörper des Farbhofs, Quelle: Stadt Zürich, AHB.



Abbildung 17: 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 der Projektlaufzeit werden Begehungen angestrebt, bei denen ggf. weitere Erkenntnisse gesammelt werden können, die in die Modellierung einfließen sollen. 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 [41]). 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 Lastreserven angesetzt.

Die Wände bestehen wahrscheinlich aus tragendem Ziegelmauerwerk. Es wird davon ausgegangen, dass die Aussenwand als zweischaliges Mauerwerk mit stehender Luftschicht ausgebildet wurde. Bei den Innenwänden sind in den historischen Grundrissen tragende Stützen angedeutet. Hier ist im weiteren Verlauf zu prüfen, ob dies so ausgeführt ist. Zunächst wird davon ausgegangen, dass es sich um entsprechende Wände aus Holzstielen mit Ziegelsteinfüllung handelt. Die Decken sind voraussichtlich 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 und aus Zweifach-Isolierglas und einem Rahmen üblicher thermischer Qualität besteht.

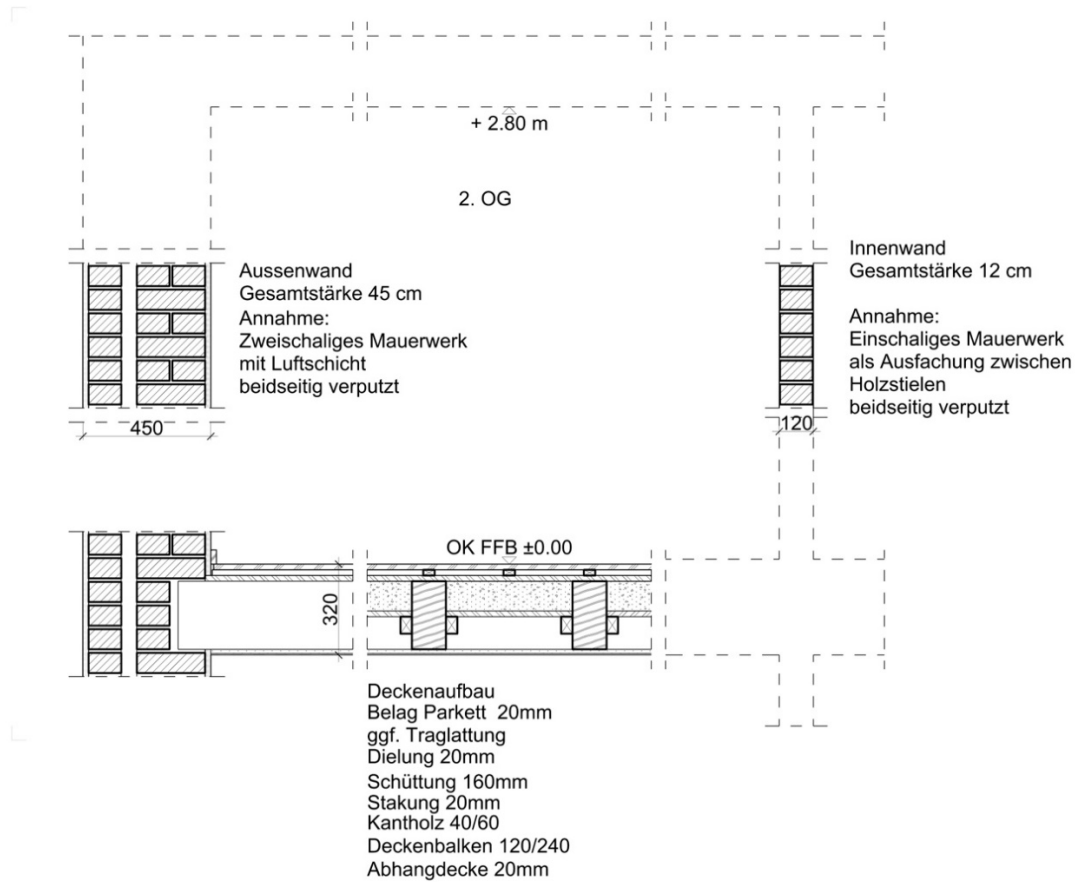


Abbildung 18: Detailzeichnung des Modellzimmers mit Holzbalkendecke.

Das Modellzimmer ist zum Innenhof nach Süden orientiert. Das Zimmer hat eine Fläche von 16.5 m². Es schliesst über tragende Innenwände an die restliche Wohnung und mit einer Wohnungstrennwand zum benachbarten Gebäude an. Es wurde das 2. OG angesetzt, damit die angrenzenden Nutzungen gleichwertig (Wohnen) angesetzt werden können. Ausserdem kann somit von den gleichen Bauteilaufbauten ausgegangen werden.

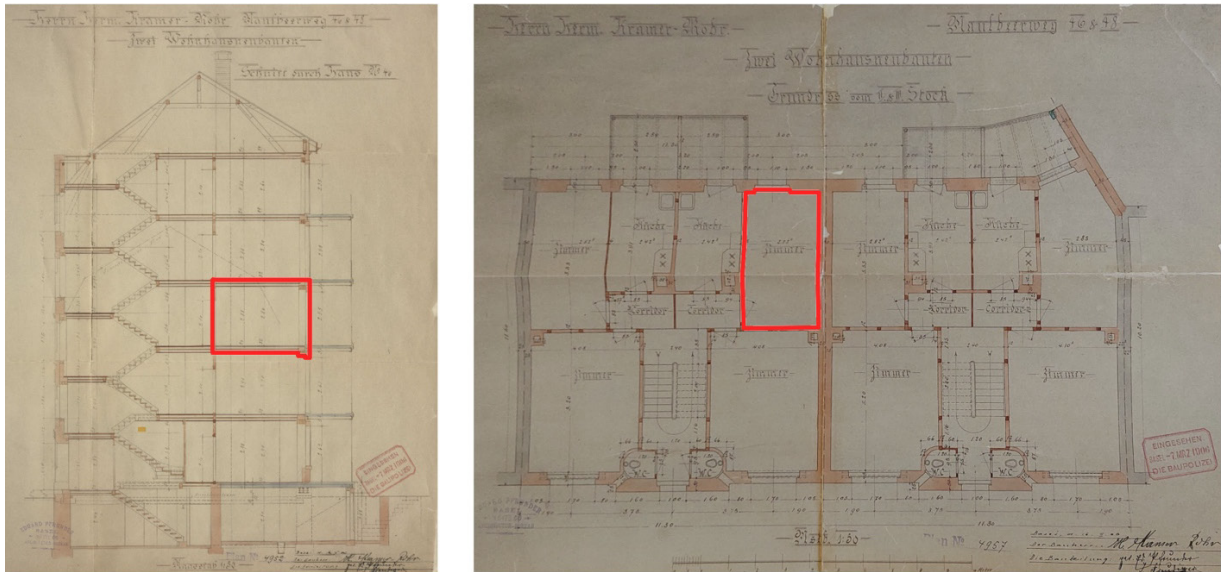


Abbildung 19: Verortung Modellzimmer mit Holzbalkendecke.

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. 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.

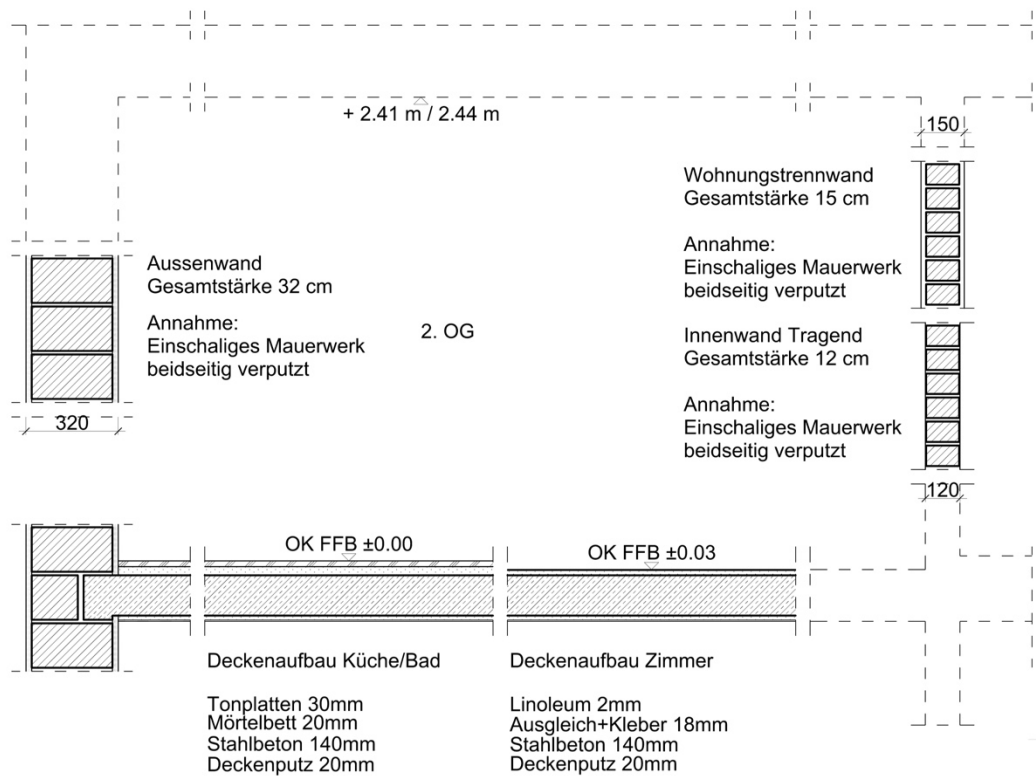


Abbildung 20: Detailzeichnung des Modellzimmers mit Stahlbetondecke, Quelle: Zeichnung INEB nach Informationen aus Bestandsunterlagen

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 m². 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 m² (1.87 m * 1.32 m).

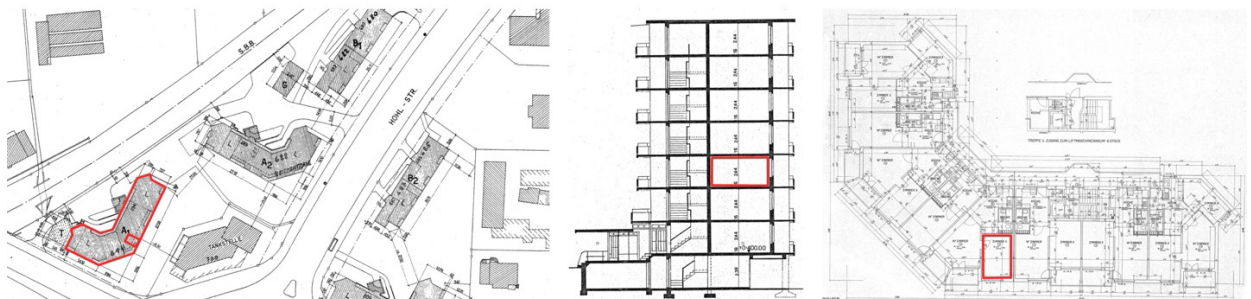


Abbildung 21: Verortung Modellzimmer mit Stahlbetondecke, Quelle: Stadt Zürich, AHB.



5 Massnahmen / Varianten

5.1 Verbesserung des Schallschutzes

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 CO₂-Emissionen und schränkt das Kreislaufpotenzial und zukünftige Wiederverwendung oder -verwertung der Deckenaufbauten stark ein.

Daher wird in diesem Projekt untersucht, ob bei Umbauten alternativ mit einer minimalen 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.

Im Folgenden wird die Wirkungsweise verschiedener Massnahmen zur Verbesserung des Schallschutzes kurz erläutert und deren Anwendung auf die Realisierbarkeit und auf erreichbare Wirkung untersucht.

Massenerhöhung:

Bei einschaligen Bauteilen kann eine Verbesserung der Schalldämmung durch direkt aufgebrachte zusätzliche schwere Schichten erreicht werden. Der Effekt ist breitbandig und verbessert die Schalldämmung im gesamten Frequenzbereich, wenn die Biegesteifigkeit der Grundkonstruktion dadurch nicht erhöht wird. Diese Massnahme ist jedoch nur bei leichten Bauteilen sinnvoll, da nach dem sogenannten Massengesetz nur eine Verbesserung von 6 dB, also nicht einmal eine Halbierung der wahrgenommenen Lautstärke, je Verdopplung der Masse erreicht wird.

Biegeeweiche entkoppelte Schale:

Als alternative konstruktive Massnahme kann eine zusätzliche biegeeweiche Schale auf einer weich federnden Unterlage oder mit einem Hohlraum vor der Grundkonstruktion angebracht werden. In diesem Fall verhält sie sich als Feder-Masse-System, wobei die Schalen die Masse darstellen, während die Zwischenschicht, also z.B. auch die Luft des Hohlraums, als Feder wirkt. Die erreichbare Verbesserung ist beispielhaft für eine herkömmliche abgehängte Decke in Abbildung 24 als blaue Linie dargestellt. Die Entkopplung der Schalen führt oberhalb der Resonanzfrequenz bei 63 Hz zu einer Verbesserung des Schallschutzes. Allerdings kommt es in den Frequenzbändern um die Resonanzfrequenz zu einem Einbruch und einer Verschlechterung der Schalldämmwirkung. Unterhalb dieser Frequenz sind beide Schichten gekoppelt, was nur zu einer geringen Verbesserung durch die zusätzliche Masse führt. Damit die Schalldämmung in dem baurechtlich relevanten Frequenzbereich ab 100 Hz nicht negativ beeinflusst wird, muss wegen der Breite des Resonanzeinbruchs die Resonanzfrequenz der Massnahme auf ≤ 80 Hz abgestimmt sein. Für eine Tieftonoptimierung sollte sie ≤ 50 Hz sein.

Die Resonanzfrequenz kann durch eine Erhöhung der Masse der aufgebrachten Schale oder eine Verringerung der Steifigkeit der weich federnden Unterlage bzw. des Hohlraums zu tiefen Frequenzen verschoben werden. Die Masse der Schale setzt 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.

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 $\frac{2}{3}$ 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 Verbindung (Schallbrücke) zwischen der Schale und der Grundkonstruktion bilden. Sie müssen daher sorgfältig geplant und ausgeführt werden.

In Abbildung 22 und Abbildung 23 ist die berechnete Resonanzfrequenz f_0 als Funktion der flächenbezogenen Masse der Schale m' und der dynamischen Steifigkeit s'_{dyn} von üblichen Trittschalldämmung bei schwimmenden Fussbodenaufbauten bzw. der Hohlraumtiefe d_{Hohlraum} von abgehängten Decken dargestellt. Die flächenbezogene Masse ist in beiden Abbildungen gleich und liegt in einem für Plattenmaterialien üblichen Bereich von 5 kg/m^2 bis 30 kg/m^2 . Geeignete Kombinationen von Materialeigenschaften ergeben Resonanzfrequenzen unterhalb der zusätzlich eingezeichneten Ebene mit dem 80 Hz -Zielwert. Bei Fussbodenaufbauten in Abbildung 22 lässt sich dies nur mit einer sehr weichen Trittschalldämmung erreichen. Diese Dämmungen sind aber für die dünnen Estrichplatten nicht gebrauchstauglich. Bei den abgehängten Decken in Abbildung 23 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 Bedämpfung ausgeglichen, die erreichte Verbesserung liegt aber weit unter der der abgehängten Decke.

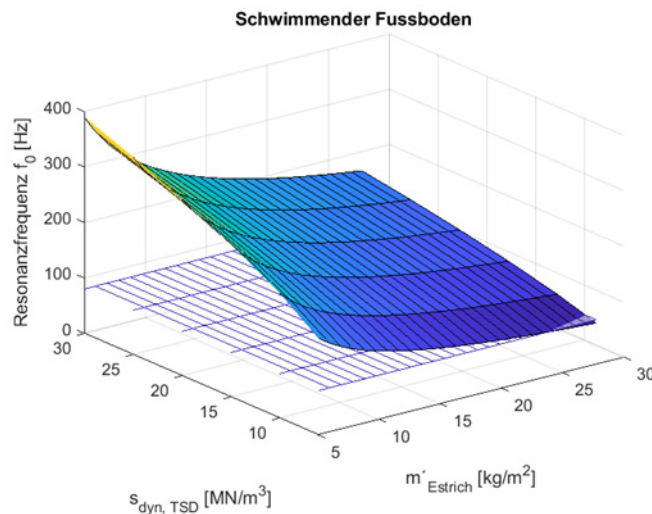


Abbildung 22: Berechnete Feder-Masse-Resonanzfrequenz f_0 eines schwimmenden Fussbodenaufbaus als Funktion der flächenbezogenen Masse m'_{Estrich} des Belags und der dynamischen Steifigkeit $s'_{\text{dyn, TSD}}$ von üblichen Trittschalldämmungen. Die Gitterebene zeigt das Planungsziel $f_0 \leq 80 \text{ Hz}$ an.

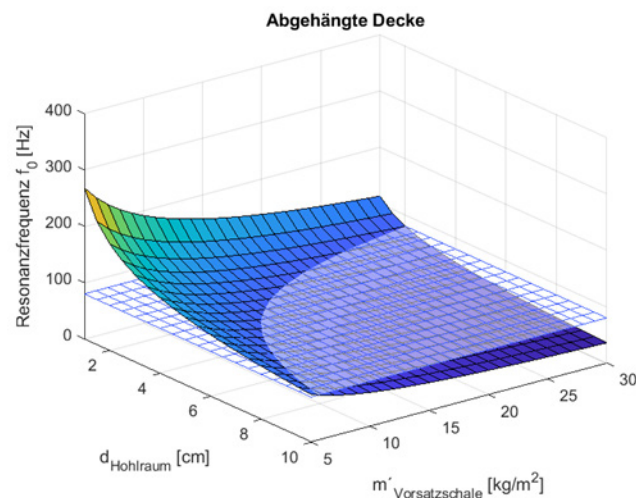


Abbildung 23: Berechnete Feder-Masse-Resonanzfrequenz f_0 einer abgehängten Decke als Funktion der flächenbezogenen Masse $m'_{\text{Vorsatzschale}}$ der Deckenschale und der Tiefe d_{Hohlraum} des bedämpften Hohlraums. Die Gitterebene zeigt das Planungsziel $f_0 \leq 80$ Hz an.

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 wirksam. Beim Schallschutznachweis von Neubauten werden sie oft nicht angerechnet, da sie austauschbar sind und unter Umständen gegen harte Beläge ersetzt werden. Es wird überprüft, ob sie jedoch als zusätzliche Kompensationsmassnahme bei Umbauten eingesetzt und angerechnet werden können.

Massnahmen im Referenzgebäude "Maulbeerstrasse, Basel" (Holzbalkendecke):

In dem Referenzgebäude "Maulbeerstrasse, Basel" mit der Holzbalkendecke ist das Einbringen der zusätzlichen Masse sinnvoll. Durch zusätzliche Schichten kann die Masse der Grundkonstruktion, in diesem Fall leicht vervielfacht werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die Biegesteifigkeit der zusätzlichen Schichten geringer als die der Grundschicht sein sollte, um eine Verschiebung des Einbruchs der Schalldämmung bei der Koinzidenzfrequenz in den mittleren gut hörbaren Frequenzbereich zu vermeiden. Diese Massnahme ist bereits im Bestand in Form der im Plan eingezeichneten Schüttung auf der Stakung angewandt und es ist sinnvoll diese weiterhin beizubehalten und zu optimieren.

Zusätzlich ist angedacht, die Schalldämmung der Trenndecke mit einer entkoppelten abgehängten Decke, welche unterhalb der Deckenbalken angeordnet ist und die bestehende Putzdecke ersetzt, zu verbessern. Da in diesem Fall der Hohlraum zwischen den Deckenbalken "akustisch aktiviert" ist (und somit als Federelement wirken kann), ist eine ausreichende Hohlraumtiefe gegeben, sodass allenfalls eine Verbesserung im Tieftonbereich erzielt werden kann.

Eine detaillierte Betrachtung mit Berechnung erfolgt im weiteren Projektverlauf. Es wird überprüft, welche zusätzliche Massnahmen auf der Deckenoberseite und bei der Flankenübertragung der schweren Bestandswände möglich und zusätzlich erforderlich sind. Ebenso wird für die Materialisierung der Schichten die weiteren Planungskriterien, in diesem Fall insbesondere Aspekte des Brandschutzes und der Statik, berücksichtigt.

Massnahmen im Referenzgebäude "Farbhof Zürich" (Stahlbetondecke):

Die Decke in dem Referenzgebäude besteht aus 14 cm Stahlbeton mit einer 2 cm Putzschicht und die maximal mögliche Aufbauhöhe ist ebenfalls sehr eingeschränkt.

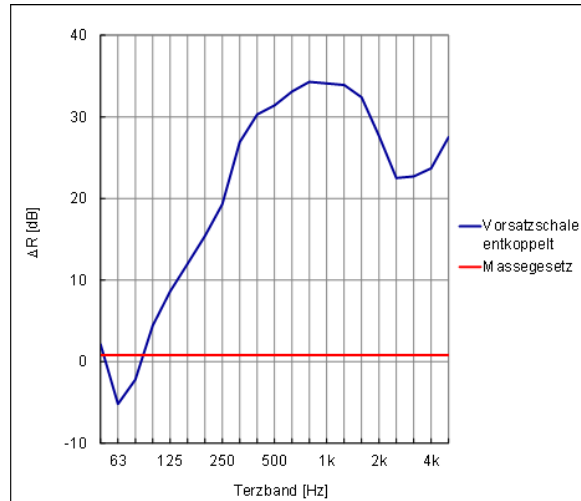


Abbildung 24: Beispiel der erreichbaren Verbesserung der Luft- und Trittschalldämmung durch eine direkt an der 16 cm Stahlbetondecke aufgetragenen 2 cm Putzschicht nach dem Massegesetz (rot) und einer abgehängten Decke bestehend aus 15 mm Gipsfaserplatten auf 50 mm bedämpften Hohlraum mit entkoppelter Unterkonstruktion (blau).

In Abbildung 24 ist die mit den beiden Massnahmen "Massenerhöhung" und "abgehängte Decke" erreichbare schalltechnische Verbesserung beispielhaft für die Stahlbetondecke (2.300 kg/m^3 , $m' \approx 368 \text{ kg/m}^2$) dargestellt. Die rote Linie ist die theoretische Verbesserung durch einen zusätzlichen 20 mm starken Glattnstrich mit einer flächenbezogenen Masse von 30 kg/m^2 . Eine Erhöhung der Masse ist hier also nicht zielführend. Im Gegensatz dazu, zeigt die blaue Linie die im Labor gemessene Verbesserung, welche mit einer leichteren abgehängten Decke 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 Glaswolle gedämmt. Deutlich ist hier der Resonanzeinbruch bei ca. 63 Hz zu erkennen, danach steigt die Verbesserung der Schalldämmung sehr stark an. Das zweite lokale Minimum bei 2.5 kHz ist der Koinzidenzeinbruch durch die Biegesteifigkeit. Durch eine abgehängte Decke mit einer erforderlichen Aufbauhöhe von ca. 75 mm erscheint es als plausibel, dass sich in dem baurechtlich relevanten Frequenzbereich eine deutliche Verbesserung der Schalldämmung erreichen. Problematisch ist hier jedoch unter Umständen der Einbruch der Verbesserung unterhalb 100 Hz, der das als oft störend empfundene "Poltern" verstärkt.

Diese ersten Abschätzungen, lassen eine Verbesserung des Schallschutzes auch im Objekt "Farbhof" als plausibel erscheinen, wenn die maximal zulässigen Raumhöhen etwas unterschritten werden. Im weiteren Projektverlauf werden die möglichen Lösungen auch in Hinsicht der Verringerung der Schalldämmung im Tieftonbereich und Flankenübertragung, sowie alternative Lösungen mit Materialien unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeitsaspekte detailliert untersucht.

5.2 Integration der Heiz- und Kühlschicht in die Geschossdecke

In die im Rahmen einer Sanierung an den Geschossdecken anzubringenden Schichten zur Verbesserung des Schallschutzes sollen Heizelemente integriert werden. 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 Heizelemente (z.B. Rohre) eingebettet sind, sowie von der Vorlauftemperatur der Heizung und der benötigten Heizleistung. Letztere ist wiederum von der



thermischen Güte der Aussenhülle des Gebäudes abhängig. Die Einflüsse werden im Simulationsmodell abgebildet werden und somit in die Auslegung der Paneele eingehen.

Abbildung 25 zeigt einen Schnitt durch die Geschossdecke inkl. Abhangdecke mit integrierten Heizelementen. Die gezeigten Parameter sind Teil der Optimierungen bzgl. thermischer Leistung und Kosten, welche mittels Simulationen durchgeführt werden.

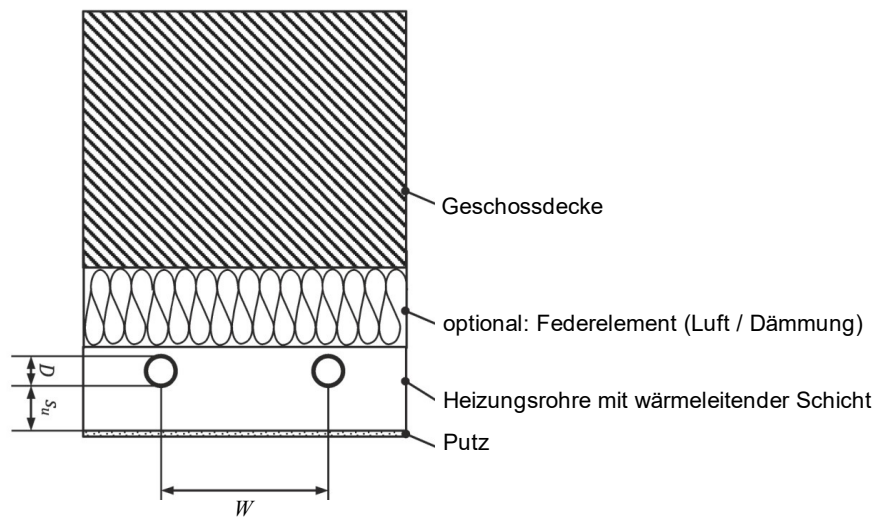


Abbildung 25: Schnitt mit Geschossdecke und Schichten für den Schallschutz und Wärme-/Kälteabgabe (angepasst aus [42]). Der Einfluss von Parametern wie Rohrquerschnitt (D), -abstand (W) und Überdeckung (s_u) auf die thermische Leistung der Abhangdecke wird mittels Simulationen untersucht.

6 Ergebnisse und Diskussion

Der vorliegende Zwischenbericht gibt Auskunft über den Projektstand nach 8 Monaten Projektlaufzeit. Die folgenden Schritte konnten weitgehend abgeschlossen werden:

- Die Planungskriterien wurden festgelegt, mit welchen die Massnahmen ausgelegt und bewertet werden können
- Die vom Kanton Basel-Stadt und von der Stadt Zürich zur Verfügung gestellten Gebäudepläne wurden analysiert und jeweils ein Modellzimmer mit Holzbalkendecke und Stahlbetondecke ausgewählt, für das Massnahmen entworfen und analysiert werden
- Die Modellzimmer wurden mit Bauteilmassen und Materialisierung charakterisiert
- Die Massnahmen für Schallschutz und Raumklimatisierung wurden in den Grundzügen entworfen

Beim Gebäude mit Stahlbetondecke (Farbhof Zürich aus den 1950ern) hat sich gezeigt, dass die lichten Raumhöhen gering sind und voraussichtlich 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. Im Projekt soll deswegen die minimal benötigte Aufbauhöhe für einen ausreichenden Schallschutz gezeigt werden und auch die Effekte auf den Schallschutz, wenn zur Einhaltung der minimalen lichten Raumhöhe die Aufbauhöhe reduziert wird.



7 Ausblick

Nach Klärung der Grundlagen wie der geltenden Normen und weiterer Planungskriterien sowie der Auswahl zweier realer Modellzimmer, für die kombinierte Massnahmen für Schallschutz und Raumklimatisierung entworfen werden sollen, wird nun mit der rechnerischen Analyse der skizzierten Massnahmen begonnen. Massnahmen werden dahingehend untersucht, ob sie unter Einhaltung sämtlicher Planungskriterien für die vorgegebene Situation in den Beispiel-Gebäuden umgesetzt werden können.

Beim Schallschutz wird zudem untersucht, ob dieser bei alleiniger Anbringung an der Geschossdecke eine ausreichende Wirkung zeigt oder ob auch Massnahmen an den Wänden zur Verringerung der Flankenübertragung notwendig erscheinen.

Die Entwürfe der Massnahmen (z.B. Abhangdecke mit benötigter Wirkung) werden bei Bedarf wiederkehrend mit den Firmen aus der Begleitgruppe diskutiert, um frühzeitig ihre Einschätzung zu Machbarkeit, Materialität, Kosten und weiteren Kriterien berücksichtigen zu können.



8 Literaturverzeichnis

- [1] "COST Action TU0901 – Building acoustics throughout Europe Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe," COST Association, Brussels, 2014. [Online]. Available: https://www.cost.eu/wp-content/uploads/2018/07/Part_I.pdf
- [2] 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, Jan. 2017.
- [3] 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, Jan. 2017.
- [4] W. Fasold, E. Veres, and É. Veress, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis: Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen*, 2. Aufl. Berlin: Huss-Medien, Verl. Bauwesen, 2003.
- [5] Grolimund + Partner, Ed., *Bauteildokumentation Schallschutz im Hochbau: Zusammenstellung gemessener Bauteile*, Ausg. 2005. in SIA-Dokumentation D, no. 189. Zürich: SIA, 2005.
- [6] "Energiegerechtes Bauen und Modernisieren, Grundlagen und Beispiele für Architekten, Ingenieure und Bewohner," Birkhäuser Verlag, Berlin, 1996.
- [7] "SIA 180:2014: Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden," Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2014.
- [8] "SIA 380/2 (2022): Energetische Berechnungen von Gebäuden – Dynamisches Verfahren für Bedarfsabklärungen, Leistungs- und Energiebedarf," Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2022.
- [9] SIA 181 - *Schallschutz im Hochbau*, 181, Jan. 2020.
- [10] Normenkommission SIA 181, "Schallschutz im Hochbau – Fragen und Antworten zur Norm SIA 181:2006." SIA, Nov. 2015. [Online]. Available: <http://shop.sia.ch/c6e3cc77-7285-4a99-b75a-a31d7284068c/D/DownloadAnhang>
- [11] 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, Dec. 2020.
- [12] 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, Jan. 2014.
- [13] 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, Dec. 2020.
- [14] 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, Jan. 2020.
- [15] SIA 2032 *Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden*.
- [16] Bundesamt für Umwelt BAFU, "Bewertungsmethoden." Accessed: Jun. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaft-konsum/oekobilanzen/methode-der-oekologischen-knappheit.html>
- [17] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen, *Brandschutzrichtlinie*, vol. 01.01.2017 / 13-15de.
- [18] 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.
- [19] DIN 18948:2024-03, *Lehmplatten - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*. doi: 10.31030/3518014.
- [20] DIN 4102-4:2016-05, *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*. doi: 10.31030/2417223.
- [21] "Lemix Lehmbauplatte." Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://lemix.eu/produkt/LemixLehmplatte>
- [22] J. Liblik, A. Baumberger, C. Löffler, and A. Just, "From tradition to future prospects: Clay as fire protection for timber," presented at the LEHM 2024, Weimar: Eigenverlag Dachverband Lehm e.V., 2024.
- [23] "Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise," DIBt. Accessed: Nov. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.dibt.de/de/aktuelles/meldungen/nachricht-detail/meldung/muster-richtlinie-ueber-brandschutztechnische-anforderungen-an-bauteile-und-aussenwandbekleidungen-in-holzbauweise-mholzbaurl>



- [24] Kanton Basel-Stadt, *SG 730.100 - Bau- und Planungsgesetz (BPG)*. 2025. [Online]. Available: https://www.gesetzessammlung.bs.ch/app/de/texts_of_law/730.100/versions/6566
- [25] Kanton Zürich, *Planungs- und Baugesetz (PBG)*. 2024.
- [26] *SIA 261/1:2020 Einwirkungen auf Tragwerke – Ergänzende Festlegungen*.
- [27] "Wandheizung und Deckenheizung nachträglich einbauen | INTOFLOOR." Accessed: Jun. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.intofloor.de/services/wand-und-deckenheizung/>
- [28] "Deckenheizung und -kühlung von oben | Uponor." Accessed: Jun. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.uponor.com/de-de/produkte/deckeninstallation>
- [29] "Kapillarrohrmatten," Hennlich. Accessed: Jun. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.hennlich.cz/de/g-term/kapillarrohrmatten/>
- [30] "Trockenbau Wandheizung im Set," Quick Tec. Accessed: Jun. 03, 2025. [Online]. Available: <https://quick-tec.com/sparpaket-greenline-flaechenheizung-im-trockenbau/308600-10>
- [31] "wandheizung naturbo - Wandheizung." Accessed: Jun. 03, 2025. [Online]. Available: https://www.naturbo-wandheizung.de/?gad_source=1&gad_campaignid=263371957&gbraid=0AAAAADiBvJvspRPoZEb3QCXegIQ0GW-Ax&gclid=Cj0KCQjwuvrBBhDcARIsAKRrkjfK9WB6IRJsPSen0MMwP0TMe-zlowPmPvPB81Sl2mNu0z6oADQAP6wMaAnZtEALw_wcB
- [32] "Wikipedia Eintrag über Eduard Pfrunder." Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Eduard_Pfrunder
- [33] R. M. Schulz-Rehberg, *Architekten des Fin de Siècle: Bauen in Basel um 1900*. Basel: C. Merian, 2012.
- [34] Kanton Basel-Stadt, *Zonenplan Basel-Stadt (Stand: 22.08.2024)*.
- [35] "Wikipedia Eintrag Herbstweg 96." Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Wohnsiedlung_Herbstweg
- [36] "Wikipedia Eintrag Wohnsiedlung Unteraffoltern III." Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Wohnsiedlung_Unteraffoltern_III
- [37] Stadt Zürich, "Medienmitteilung: Instandsetzung und Erweiterung der Wohnsiedlung Unteraffoltern III." Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.stadt-zuerich.ch/de/aktuell/medienmitteilungen/2024/07/instandsetzung-und-erweiterung-der-wohnsiedlung-unteraffoltern.html>
- [38] Stadt Zürich, "Amtliche Mitteilung: Weisung 2024/332 vom 03.07.2024: Liegenschaften Stadt Zürich, Wohnsiedlung Unteraffoltern III, Gesamtinstandsetzung und Nachverdichtung, Projektierungskredit." [Online]. Available: https://www.stadt-zuerich.ch/de/politik-und-verwaltung/politik-und-recht/amtsblatt/einzelmitteilung.2024_0925.html
- [39] s. n, "Städtische Wohnkolonie 'Farbhof' in Zürich Altstetten," Jan. 1959, doi: 10.5169/SEALS-35923.
- [40] "Wikipedia Eintrag Farbhof." Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Wohnsiedlung_Farbhof
- [41] Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen, *Brandschutznorm*.
- [42] "Umweltgerechte Gebäudeplanung - Flächenintegrierte Strahlheizungs- und -kühlsysteme - Teil 2: Bestimmung der Auslegungs-, Heiz- bzw. Kühlleistung (ISO 11855-2:2021)," Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2022.