Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
www.empa.ch

Empa
Materials Science and Technology

Cercle Bruit
c/o Kanton Solothurn Amt für Umwelt
Werkhofstrasse 5
4509 Solothurn

Untersuchungsbericht 5214.027540

Akustische Wirkung von schallabsorbierenden Fassaden in Hinterhofsituationen

Auftraggeber:	Cercle Bruit
Ihr Auftrag vom:	16. Juni 2021
Anzahl Seiten:	116

Autoren: Kurt Eggenschwiler (pensioniert seit 1. Mai 2022), Dr. Beat Schäffer
auf der Basis der Bachelorarbeit von Tilljan Janson

Empa, Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Dübendorf, 31. August 2022

Projektleiter:

Beat Schaeffer
Digital unterschrieben von Beat Schaeffer
Datum: 2022.08.31 14:15:48 +02'00'

Dr. Beat Schäffer

Abteilungsleiter:

Jean-Marc Wunderli
Digital unterschrieben von Jean-Marc Wunderli
Datum: 2022.08.31 12:16:11 +02'00'

Dr. Jean Marc Wunderli

Hinweise: Gutachten und Unterlagen werden zehn (10) Jahre aufbewahrt.

Inhalt

Zusammenfassung 4
1. Projektidee, Projektziele 6
1.1. Ausgangslage 6
1.2. Projektidee 6
1.3. Ziele / Forschungsfragen 6
2. Stand des Wissens 8
2.1. Stand des Wissens und Projekte in der Schweiz 8
2.2. Stand des Wissens international 9
2.3. Schallabsorbierende Materialien 10
3. Durchgeführte Untersuchungen im Überblick 11
3.1. Verwendete Raumakustische Parameter 12
3.2. Raumakustischer Simulation 14
3.3. Untersuchte Innenhofmodelle 18
3.4. Statistische Auswertung 25
4. Ergebnisse Bachelorarbeit 27
4.1. Einleitung 27
4.2. Materialisierungsvarianten reflektierende/absorbierende Fassaden – reflektierende/absorbierende Innenhofböden – reflektierende Balkonuntersichten 27
4.3. Materialisierungsvarianten reflektierende/absorbierende Fassaden – reflektierende Innenhofböden – reflektierende/absorbierende Balkonuntersichten 32
4.4. Materialisierungsvarianten reflektierende/absorbierende Fassaden – absorbierende Innenhofböden – reflektierende/absorbierende Balkonuntersichten 38
4.5. Materialisierungsvarianten teilweise absorbierende Fassaden – reflektierende Innenhofböden – reflektierende Balkonuntersichten 41
4.6. Einfluss von Grundfläche und Stockwerkanzahl bei vollständig absorbierenden Fassaden. 47
5. Diskussion Bachelorarbeit 50
5.1. Einleitung 50
5.2. Einzelmassnahmen 50
5.3. Kombinierte Massnahmen 53
5.4. Zwischenfazit "Bachelorarbeit" 54

6. Zusatzauswertungen 56
6.1. Einleitung 56
6.2. Ergebnisse der Zusatzauswertung 56
6.3. Diskussion und Zwischenfazit Zusatzauswertungen 57
7. Diskussion Schlussfolgerungen 65
8. Literatur 67
9. Anhang: Ergebnisse Zusatzauswertungen 71
9.1. Ergebnisse T_{20} 72
9.2. Early Decay Time *EDT* 81
9.3. Verminderung Stärkemass *G* 90
9.4. Sprachübertragungsindex *STI* 99
9.5. Prozentualer Anteil Echostörungen *EK%* 108

Zusammenfassung

Beim Bauen in lärmbelasteten Gebieten wird fast ausschliesslich auf eine Blockrandbebauung gesetzt. Es werden damit lärmabgewandte Innenhöfe geschaffen, wo auf die Aufenthaltsqualität ein besonderes Augenmerk zu richten ist. Im Auftrag des Cercle Bruit (CB) wurden Untersuchungen zur Wirkung von absorbierenden Fassaden und Balkonuntersichten in solchen Innenhofsituationen durchgeführt. Bei den Untersuchungen ging es um folgende Frage:

> Wie kann mit schallabsorbierenden Fassadenflächen und Balkonuntersichten
> die Aufenthaltsqualität in Innenhöfen wahrnehmbar verbessert werden?

Absorbierende Fassaden und Balkonuntersichten sind bekannt im Zusammenhang mit dem Schutz vor Lärmimmissionen, z.B. vor Verkehrslärm. Bei dieser Untersuchung geht es aber nicht um Lärmimmissionen oder Lärmbelästigung, sondern um die akustische Aufenthaltsqualität.

Es sollten Massnahmen zur Verbesserung der akustischen Aufenthaltsqualität in *simulierten* Innenhöfen untersucht werden, und zwar u.a.

- im Hinblick auf raumakustische Parameter bezüglich Nachhallzeit, Schalldruckpegel, Sprachverständlichkeit und Echostörungen,
- ohne Festlegung auf spezielle Geräuschquellen, aber im Hinblick auf Geräusche, welche in typischen Innenhofsituationen zu erwarten sind,
- unter Berücksichtigung möglichst vieler Quellen- und Empfangspositionen.

Aus den Ergebnissen der Simulationen sollen u.a. Hinweise resultieren,

- wie gross die Anteile schallabsorbierender Flächen bei Fassaden inkl. Balkonuntersichten sein müssen, um die Aufenthaltsqualität in Innenhöfen wahrnehmbar zu verbessern;
- in welchen Situationen es ausreichend ist, nur die Balkonuntersichten schallabsorbierend zu gestalten, um die Aufenthaltsqualität in Innenhöfen wahrnehmbar zu verbessern;
- was der Einfluss der geometrischen Form der Innenhöfe auf die benötigte absorbierende Fläche ist.

Es wurden an der Empa – zu einem grossen Teil im Rahmen eines Praktikums und einer Bachelorarbeit eines Studenten – aufwändigen Simulationen mit der Raumakustik-Software ODEON nach der Matrix-Methode und Auswertungen zu zehn Innenhof-Geometrien durchgeführt. Dabei wurde die Materialisierung wie folgt variiert:

- Fassaden: reflektierend → absorbierend von unten nach oben immer ein zusätzliches Stockwerk
- Balkonuntersichten: reflektierend → absorbierend
- Boden Innenhof: reflektierend → absorbierend (Rasen, Wiese)

Für die schallabsorbierenden Balkonuntersichten und Fassaden wurde dabei ein plausibler Verlauf des Schallabsorptionsgrads abhängig von der Frequenz verwendet. Der bewerteter Schallabsorptionsgrad α_w beträgt 0.80). Obige Materialisierungsvarianten wurden danach in verschiedenen Modellen kombiniert.

Als Indikatoren für die akustische Aufenthaltsqualität wurden in Übereinstimmung mit von der Empa früher durchgeführten Untersuchungen folgende raumakustischen Parameter verwendet: Early Decay Time *EDT*, Nachhallzeit T_{20}, (Verminderung) Stärkemass *G*, Sprachverständlichkeit *STI* und Echokriterium *EK*. Bezüglich *EK* muss eingeräumt werden, dass dieser raumakustische Parameter zwar noch kaum validiert ist, dass es aber trotzdem sinnvoll sein kann, diesen Indikator vorsichtig zu benutzen.

In der Hauptuntersuchung (Bachelorarbeit) wurde tausende von Übertragungstrecken ausgewertet, nämlich von allen Punkten zu allen Punkten im Hof und auf den Balkonen. In einer Zusatzauswertung wurden die Übertragungsstrecken von Hof zu Balkonen, von den Balkonen im Erdgeschoss zu den Balkonen im Erdgeschoss, von Balkonen zu Balkonen und von Hof zu Hof gesondert ausgewertet.

Nach der Auswertung sowohl der Haupt- als auch der Zusatzuntersuchung konnte gezeigt werden:

- Vollständig schallabsorbierende Fassaden sind ein wirkungsvolles Mittel, um die akustische Aufenthaltsqualität in Innenhöfen zur verbessern.
- Teilweise schallabsorbierende Fassaden bringen deutlich weniger starke Verbesserungen.
  - Der Beitrag zu einer Verbesserung der Aufenthaltsqualität ist sehr klein, wenn nur im Erdgeschoss die Fassaden schallabsorbierend realisiert werden.
  - Jedes Stockwerk, welches zusätzlich schallabsorbierend gestaltet wird, bringt einen wahrnehmbaren Gewinn.
- Wenn bei nicht-schallabsorbierenden Fassaden nur der Boden im Innenhof schallabsorbierend ist (Rasen) oder nur die Balkonuntersichten absorbierend verkleidet werden, ist der Gewinn für die Aufenthaltsqualität fraglich, weil vermehrt Störungen durch Echos auftreten können und der Nachhall und die Schallpegel nur wenig vermindert werden.
- Ob zusätzlich zu den schallabsorbierenden Fassaden ein absorbierender Boden (Rasen) und/oder absorbierende Balkonuntersichten sinnvoll sind, muss im Einzelfall abgeklärt werden. Abgesehen davon, dass die Verbesserung der raumakustischen Parameter gering ist, resultieren allenfalls mit solchen Massnahmen erhöhte Echostörungen.

Die gruppenweise Auswertung ergab zum Teil leicht unterschiedliche Ergebnisse für die einzelnen Gruppen. Die obigen Schlussfolgerungen gelten aber trotzdem.

Diese Aussagen, welche auf der Basis der untersuchten Innenhöfe gewonnen wurden, können auf die allgemeine Situation von Innenhöfen übertragen werden. Sinnvoll ist es bei neuen Projekten, durch einfache zeichnerische Verfahren der geometrischen Akustik und/oder mit Computersimulation abzuklären, ob die Form des Innenhofs Echos und Flatterechos fördert und wo (z.B. an Balkonuntersichten) allenfalls das Anbringen von Schallabsorption entgegen den Erwartungen zu einer Erhöhung von Echostörungen führen könnte. Eine Begleitung durch akustische Fachexpertise ist sicher sinnvoll. Weitere Faustregeln können aus der Raumakustik abgeleitet werden. Dies war aber nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

Die Frage der akustischen Aufenthaltsqualität für die Bewohner auf dem eigenen Balkon, wenn sie selber *alleine* die Schallquelle sind und über ihnen ein Balkon vorhanden ist, konnte hier nicht abschliessend geklärt werden. Es ist aber plausibel, dass absorbierende Balkonuntersichten günstiger sind als reflektierende.

1. Projektidee, Projektziele

(leicht modifiziert aus dem Projektantrag vom 30.04.2021)

1.1. Ausgangslage

Fassadenelemente von Gebäuden können je nach Standort Einfluss auf die Schallausbreitung nehmen und die Lärmimmissionen und das Klangbild beeinflussen. Dies trifft insbesondere auf Situationen zu, bei denen die Schallimmissionen einen hohen Reflexionsanteil aufweisen, wie dies in dichten Überbauungen üblich ist. Typische Hinterhofsituationen sind daher hallig und bieten somit eine geringe Aufenthaltsqualität. Grund hierfür ist, dass sich bereits geringe Schallimmissionen durch Mehrfachreflexionen an den umliegenden Hausfassaden verstärken und sich damit negativ auf die Klangqualität des Aussenraums wie auch auf die akustische Situation an den offenen, lärmabgewandten Fenstern auswirken.

Gerade beim Bauen in lärmbelasteten Gebieten (Kapitel 5 LSV [1]) wird fast ausschliesslich auf eine Blockrandbebauung gesetzt. Damit werden lärmabgewandte Hinterhöfe geschaffen, auf deren Aufenthaltsqualität ein besonderes Augenmerk zu richten ist.

1.2. Projektidee

Den durch verdichtetes Bauen verstärkt störenden Reflexionen an Hausfassaden soll durch schallabsorbierende Fassaden und schallabsorbierende Balkonunterseiten begegnet werden. Durch den deutlich höheren Absorptionsgrad der Fassadenelemente gegenüber herkömmlichen Fassaden könnten die Reflexionen reduziert und der Halleffekt vermindert werden, auch wenn weiterhin ein grosser Teil der Fassadenflächen als Fensterflächen schallhart und somit reflektierend ausgeführt sein wird. Die Frage ist, wie gross der Anteil der schallabsorbierenden Fassade sein muss, um eine sinnvolle Wirkung zu erreichen, und wo diese Flächen sein müssen.

Selbstverständlich ist es auch wesentlich, architektonisch gut gestaltete schallabsorbierende Fassaden und Balkonuntersichten zur Verfügung zu haben. Diese Frage kann in einem separaten Projekt bearbeitet werden. Die Projektidee kann auch im Zusammenhang mit Hitzeinseln interessant sein, auch wenn dies in diesem Projekt nicht vertieft werden soll.

1.3. Ziele / Forschungsfragen

Übergeordnete Forschungsfragen sind:

1. Wie kann mit schallabsorbierenden Fassadenflächen und Balkonuntersichten die Aufenthaltsqualität in Innenhöfen wahrnehmbar verbessert werden?
2. Welche Materialien und Aufbauten sind geeignet, um eine ausreichende Schallabsorption zu gewährleisten?

Innerhalb dieses Projektantrags wird nur der erste Punkt behandelt. Damit ergeben sich die folgenden detaillierteren Punkte, welche in Bezug auf zeitgenössische Architektur von Innenhöfen untersucht werden sollen:

- Es sollen Massnahmen zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität in *simulierten* Innenhöfen untersucht werden, und zwar
    - im Hinblick auf raumakustische Parameter bezüglich Nachhallzeit, Schalldruckpegel, Sprachverständlichkeit und Echo,
    - ev. auch für die Situation auf dem Balkon selber (Wirkung absorbierenden Untersichten),
    - in vereinzelten, sehr einfachen Hörversuchen,
    - ohne Festlegung auf spezielle Geräuschquellen, aber im Hinblick auf die Geräusche, welche in typischen Innenhofsituationen zu erwarten sind,
    - unter Berücksichtigung möglichst vieler Quellen- und Empfangspositionen.
- Es soll soweit aus den Ergebnissen der Simulationen möglich
    - eine Richtlinie erarbeitet werden, wie gross die Anteile schallabsorbierender Flächen bei Fassaden inkl. Balkonuntersichten sein müssen, um die Aufenthaltsqualität in Innenhöfen wahrnehmbar zu verbessern,
    - geklärt werden, in welchen Situationen es ausreichend ist, nur die Balkonuntersichten schallabsorbierend zu gestalten, um die Aufenthaltsqualität in Innenhöfen wahrnehmbar zu verbessern,
    - der Einfluss der geometrischen Form der Innenhöfe auf die benötigte absorbierende Fläche abgeschätzt werden.
- Es soll damit bezüglich architektonischem Entwurf Hinweise gewonnen werden, wann mit einfachen Regeln gearbeitet werden kann, wann eine vertiefte akustische Beratung und wann zusätzlich eine raumakustische Computersimulation sinnvoll wären.
- Die Erkenntnisse sollen in eine einfache Planungshilfe des Cercle Bruit (CB) einfliessen.

Die Ergebnisse des Projekts sollen für den architektonischen Entwurf möglichst einfache Regeln bezüglich Gestaltung von Fassaden zur Verfügung stellen, um in Innenhöfen eine gute akustische Aufenthaltsqualität zu erreichen. Damit wird es im Entwurf einfacher und effizienter, die Klangraumqualität mitzugestalten. Für Behörden ergeben sich Angaben über mindestens benötigten schallabsorbierenden Flächenanteile und deren geometrische Verteilung.

2. Stand des Wissens

Die akustische Umgebung in urbanen Räumen wird einerseits geprägt durch *Lärmimmissionen*, welche in der Lärmbekämpfung meistens mit einem Beurteilungspegel *Lr* bewertet werden, um die negativen Wirkungen von Lärm wie Lärmbelästigung zu minimieren oder zumindest zu begrenzen.

Andrerseits kann in einem urbanen Raum auch die *(raum-)akustische Aufenthaltsqualität* erlebt werden. Sie kann qualitativ beschrieben werden – was sinnvoll und nützlich ist. Eine messtechnische Beschreibung ist heute erst in Ansätzen möglich.

2.1. Stand des Wissens und Projekte in der Schweiz

Hintergründe und Anregungen zur Gestaltung der akustischen Umwelt findet sich auf klanglandschaften.ch. Hier finden sich Hinweise auf Links & Literatur: klanglandschaften.ch/linkx-literatur/, insbesondere die folgenden Publikationen: [2], [3], [4], [5], [6].

Beim Cercle Bruit beschäftigt sich die Fachgruppe "Klangraumgestaltung" mit dem Thema. Aus dieser Arbeit sind bisher die Publikationen zur Klangraumgestaltung [7], [8] und zur Beurteilung der Klangqualität [9] entstanden. Es findet sich in diesen Publikationen im Hinblick auf eine gute akustische Aufenthaltsqualität diverse Hinweise zur Gestaltung von Fassaden. Was jedoch fehlt, sind konkrete Angaben zu schallabsorbierenden Fassadenkonstruktionen, zur Frage, wo Fassaden schallabsorbierend sein sollten, wie gross der Anteil der schallabsorbierenden Fassaden sein soll, sowie was schallabsorbierende Balkonuntersichten und was Begrünung leisten können.

Weiter sei auf Schweizer Forschungsprojekte letzten Jahre hingewiesen, welche im Zusammenhang zum Thema stehen:

- Stadtklang HSLU (2013 - 2018), Publikationen: [10], [11], [12].

  https://www.hslu.ch/de-ch/hochschule-luzern/forschung/projekte/detail/?pid=3523

  Im Projekt ging es "um die Aktivierung und Entwicklung von akustischen Potenzialen in urbanen Aussenräumen. Anhand von Fallbeispielen wurden im Projekt Grundlagen für die Entwicklung von neuen akustisch wirksamen Bauteilen sowie ein Instrumentarium zur Klangraumgestaltung für Planende und die öffentliche Hand erarbeitet" [12]. Auch wenn viele Hinweise zur Klangraumgestaltung systematisch dargestellt sind, fehlen konkrete Produktentwicklungen oder Regeln für die akustische Gestaltung von Fassaden.

- Empa: Akustische Aufenthaltsqualität von Innenhöfen (2017-2019), Publikationen: [13], [14], [15], [16].

  Es wurden Innenhöfe mit reflektierenden, absorbierenden und streuenden Fassaden mit der Software ODEON simuliert und auralisiert. Damit wurden Hörversuche durchgeführt, in denen nach der akustischen Aufenthaltsqualität für verschiede Geräusche wie Sprache, Kinder oder Ballprellen gefragt wurde. Es zeigte sich, dass Innenhöfe mit moderat schallabsorbierenden Fassaden als angenehmer empfunden wurden [13], [14]. Schliesslich wurde ein Zusammenhang zu bekannten raumakustischen Parametern gezeigt, welche üblicherweise für Sprache oder Musik, z.B. in Klassenzimmern, Theatern,

Opernhäusern und Konzertsälen, angewendet werden [15], [16]. Hier zeigte sich, dass schallabsorbierende Fassaden die Aufenthaltsqualität verbessern. Allerdings wurden nur Versuche in einem einzigen Innenhof und nur für wenige Übertragungsstrecken Quelle – Empfänger durchgeführt.

- Empa: OSCAr (2019-2021), Publikationen: [17], [18].
  Ähnlich wie beim obigen Projekt zur akustischen Aufenthaltsqualität von Innenhöfen wurden Hörversuche von auralisierten Situationen gemacht. Hier wurden erstmals bewegte Quellen (ein Auto) simuliert und Hörversuche für verschiedene Fahrwege, Fassadentypen und Gebäudestellungen durchgeführt. Es wurde nicht nach der Aufenthaltsqualität, sondern nach der Lästigkeit gefragt.
- Integrativer Lebensraum trotz Lärm, ZHAW Winterthur
  https://www.zhaw.ch/de/forschung/forschungsdatenbank/projektdetail/projektid/2959/
  Das Projekt beschäftigte sich auch mit der akustischen Fassadengestaltung, und es wurden u.a. raumakustische Simulationen in Strassen durchgeführt.

2.2. Stand des Wissens international

Die Schallausbreitung innerhalb der städtischen Umgebung wird unter anderem durch Schallreflexion an Oberflächen, Beugung an Kanten, Streuung an strukturierten Oberflächen und Schallabsorption der Materialien beeinflusst [19], [20]. Diese Entwurfsparameter werden bei der akustischen Gestaltung von Räumen (Raumakustik) heute weitgehend berücksichtigt. Der Einfluss dieser Parameter auf die urbane akustische Umgebung im Hinblick auf die Lärmimmissionen oder die akustische Wahrnehmung von Aussenräumen, z.B. im Hinblick auf die akustische Aufenthaltsqualität, wird aber erst seit kurzem untersucht.

Hier zeigte sich, dass schallabsorbierende Oberflächen in urbanen Räumen wie Strassenschluchten [22], [23] und Plätzen [24], [25] den Schalldruckpegel vermindern. Auch für andere Geräuschquellen als Strassenverkehr zeigen Untersuchungen Pegelreduktionen durch schallabsorbierende Fassaden [23]. Schallstreuende Fassaden führen in Strassenschluchten unter bestimmten Umständen entweder zu einer Abnahme des Schalldruckpegels [26] oder haben keinen nennenswerten Effekt auf den Pegel [23], [27]. Weiter kann sowohl Streuung als auch Absorption von Fassaden auf einem städtischen Platz die akustische Qualität des Raumes beeinflussen [23].

Ein Projekt der Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP widmet sich der akustischen Gestaltung von Innenhöfen [28], [29], [30]. Allerdings steht die Pegelreduktion in dB(A) durch verschiedene Massnahmen im Vordergrund, und dies meistens von Verkehrslärm. Andere Geräuschquellen werden aufgezählt, aber es wird nur beispielhaft eine raumakustische Berechnung für allgemeine Quellen durchgeführt. Auswertungen bezüglich Nachhallzeit, Sprachverständlichkeit und Echostörungen werden nicht dokumentiert.

Im August 2022, während der Fertigstellung dieses Untersuchungsberichts erscheinen zwei Review-Publikationen, welche hier nicht mehr besprochen werden können, der Vollständigkeit halber aber zitiert werden: [31], [32].

2.3. Schallabsorbierende Materialien

Während es für Balkonuntersichten Lösungen auf dem Markt gibt, fehlen sie für Fassaden weitgehend. Es gibt zwar da und dort schallabsorbierende Fassaden, welche in speziellen Situationen realisiert wurden. Auf dem Markt sind aber Produkte, welche architektonisch überzeugen, selten. Es ist z.B. kaum sinnvoll, dass man schallabsorbierende Lärmschutzwände direkt als Fassaden verwendet. Hinweise zum möglichen Aufbau von absorbierenden Fassaden findet man in [33], [34], [35]. In der Industrie werden z.B. von Erne und Stahlton schallabsorbierende Fassaden entwickelt [36]. An der Empa Abt. Akustik/Lärmminderung wird an einem Innosuisse-Antrag gearbeitet: Es sollen Schallabsorber aus perforierten, geschlossenporigen Mineralschäumen entwickelt werden, welche sich auch für schallabsorbierende Fassaden eignen. Vereinzelt sind auch Publikationen greifbar, die untersuchen, welcher Beitrag von begrünten Fassaden geleistet werden kann [37], [38], [39].

3. Durchgeführte Untersuchungen im Überblick

Das vorliegende Projekt wurde von der Empa im Austausch mit der Fachgruppe Klangraumgestaltung des Cercle Bruit (CB) durchgeführt. An der Empa wurde die Arbeit im Rahmen eines Praktikums in Kombination mit einer Bachelorarbeit unter Betreuung der Empa geleistet, die seit dem 8. März 2022 vorliegt [40], und von der einzelne Textpassagen im Folgenden mehr oder weniger geändert übernommen. Zudem wurden danach Zusatzauswertungen durchgeführt. Es wurden vom Sommer 2021 bis im Sommer 2022 folgende Arbeiten ausgeführt:

1. Zusammenstellen von geometrischen Parametern, welche aus architektonischer Sicht sinnvoll variiert werden können. Abklären, was sich von den bisher von Empa, FALS, HSLU Modellen verwenden lässt. Abschätzen, wie viele Untersuchungen im Rahmen des Projekts durchgeführt werden können.
2. Aufarbeitung einiger 3D-Architekturmodelle von zeitgemässen Innenhöfen derart, dass verschiedene unter Punkt 1 identifizierte Parameter auf sinnvolle Weise variiert werden können.
3. Zusammenstellung der raumakustischen Kriterien, welche mit der Simulation ermittelt werden sollen. Vertiefung zur Frage der Anwendbarkeit des Echo-Kriteriums nach Dietsch [45].
4. Erarbeiten eines Konzepts für die Simulation:
    - Variation der Geometrien
    - Grosse Anzahl von Quellen- und Empfangspunkte (Matrix-Methode)
    - Datenstruktur für Auswertung
5. Durchführung der raumakustischen Simulationen mit der Software ODEON.
6. Validierungssimulationen: Schallabsorptionsgrad, Streugrad, Sender-/Empfängerpositionen
7. Validierungsmessungen
8. Auswertung und Darstellung der Ergebnisse.
9. Zusatzauswertungen nach der Bachelorarbeit zu einzelnen Gruppen von Übertragungsstrecken
10. Schlussfolgerungen aus den Erkenntnissen: Lassen sich Regeln entwickeln, braucht es weitere Arbeiten, …?
11. Dokumentation

BEMERKUNG zu ursprünglich geplanten Hörversuchen: Es wurde (mit Gewinn!) eine viel grössere Anzahl von Innenhofsituationen simuliert und ausgewertet als vorgesehen, und es wurden in Übereinstimmung mit dem Auftraggeber Zusatzauswertungen (ebenfalls mit Gewinn) durchgeführt (siehe oben Punkt 9). Schliesslich zeigte sich, dass Auralisation von einzelnen Situationen in Kontext der Simulationen mit der Matrix-Methode nicht einfach "abgerufen" werden konnten, sondern aufwändig einzeln simuliert werden müssten. Wie einzelne Versuche in Vorgängerprojekten zeigten (vgl. Empa-Projekte in Abschnitt 2.1), würden diese Arbeiten auch für stichprobenartige Hörversuche den Rahmen des Projekts völlig sprengen.

3.1. Verwendete Raumakustische Parameter

Es wurden in Übereinstimmung mit einer vorhergehenden Empa-Untersuchung [16] die folgenden raumakustischen Parameter ausgewählt. Alle Parameter können aus der mittels ODEON simulierten Energie-Raumimpulsantwort ermittelt werden.

3.1.1. Nachhallzeit *T* und *EDT*

Die Nachhallzeit T_{20} und die Early Decay Time *EDT* sind in EN ISO 3382-1 [41] definiert. T_{20} wird statt aus dem Dynamikbereich der Abklingkurve von 60 dB aus einem kürzeren, nämlich 20 dB von –5 bis –25 dB ermittelt und auf eine Abklingzeit von 60 dB extrapoliert. Die *EDT* wird aus einem Bereich von 0 bis –10 dB berechnet. Wenn die Abklingkurve gleichmässig verläuft, sind T_{20} und *EDT* identisch. Unterschiedliche Werte geben einen Hinweis auf z.B. das Vorhandensein von gekoppelten Räumen oder von starken frühen Reflexionen. *EDT* korreliert gut mit der wahrgenommenen Nachhalldauer. In dieser Untersuchung wird mit dem Mittelwert der beiden Oktavbänder 500 Hz und 1000 Hz gearbeitet. Die Unterscheidungsschwelle (just noticeable difference, JND) der *EDT* und der Nachhallzeit T_{20} liegen bei 5% [41].

3.1.2. Stärkemass *G*

Das Stärkemass *G*, definiert in EN ISO 3382-1 [41], misst den Schalldruckpegel L_{pE} an der Empfangsposition im Verhältnis zum Schalldruckpegel $L_{pE,10}$ der gleichen omnidirektional abstrahlenden Quelle in einem Freifeld in 10 m Entfernung:

$G = L_{pE} - L_{pE,10}$

G ist ein Mass für den Anteil des Raums an dem durch eine Schallquelle am Hörerplatz hervorgerufenen Schallpegel [42]. Das Stärkemass eignet sich in diesem Kontext zur Beurteilung des Schalldruckpegels, weil es unabhängig von der Leistung und dem Spektrum der Schallquelle ist. Wesentlich wird die Verminderung von *G* in den verschiedenen Varianten sein. In dieser Untersuchung wird mit dem Mittelwert der beiden Oktavbänder 500 Hz und 1000 Hz gearbeitet. Die Unterscheidungsschwelle JND für *G* liegt bei 1 dB [41].

3.1.3. Sprachübertragungsindex *STI*

Der Sprachübertragungsindex *STI* (Speech Transmission Index) ist ein raumakustischer Parameter zur für die Sprachverständlichkeit, welcher in der EN 60268-16 [43] definiert ist. Die Unterscheidungsschwelle JND für den *STI* liegt bei 0.03 [44]. Um die Sprachverständlichkeit deutlich zu verbessern, ist eine Erhöhung des *STI* um rund 0.10 notwendig.

3.1.4. Echokriterium nach Dietsch und Kraak *EK*

Als Versuch, das Vorhandensein von Echos zu überprüfen, wurde das sogenannte Echokriterium *EK* nach Dietsch und Kraak verwendet [45], welches ebenfalls in der verwendeten Software ODEON implementiert ist. In der Kontext-Hilfe von ODEON findet sich zum Echokriterium folgendes:

> Dietsch echo criterion can help detect if there is an echo present in a predicted impulse response according to the echo criteria proposes by Dietsch & Kraak.
>
> To evaluate if there is an echo, the max. value of the part of the curves after 50 millisecond is found.
>
> If the value is above 0.9 then 10 % of subjects are annoyed by echo.
>
> If the value is above 1.0 then 50 % of subjects are annoyed by echo.
>
> If the value is above 1.5 then 90 % of subjects are annoyed by echo.
>
> It seems that flutter echoes are not always detected when present (false negative). The method is not bullet proof there may be cases over as well as under detection. The detected values are also available in the Multi as well as the Grid responses.

Das Echokriterium ist schon älter, aber immer noch nicht etabliert. Verbesserungen wurden nur selten vorgeschlagen ([46], [47]). Der Parameter taucht zwar in etlichen Fachbüchern auf, nicht aber in Normen wie z.B. in ISO 3382-1 [41]. Er ist auch kaum in Messgeräten umgesetzt, findet sich aber in der ODEON-Software. Ein anders Echokriterium ist nicht implementiert.

Es wurde schliesslich relativ willkürlich beschlossen, die Schwelle bei *EK* = 1.5 zu setzen, wo 90% der Menschen ein Echo hören. Damit ist die Schwelle relativ hoch. In Anbetracht dessen, dass das Echokriterium nicht so etabliert ist und es nicht um Musik- oder Sprachdarbietungen handelt, erscheint dies aber sinnvoll.

Da schliesslich der der Anteil der Übertragungsstrecken mit Überschreitung von *EK* = 1.5 ermittelt wurde, ist keine Statistik/Verteilung wie bei den anderen Parametern denkbar.

3.1.5. Überlegungen zu Zielwerten von raumakustischen Parametern für Innenhöfe

Es gibt nur Hinweise bezüglich Zielwerten der verwendeten raumakustischen Parameter für Innenhöfe, weil es dazu nur eine einzige Untersuchung gibt [16]. So zeigt sich dort, dass eine Verminderung von *EDT*, *G* und *STI* mit einer Verbesserung der Aufenthaltsqualität verbunden ist. Wenn die Fassaden allerdings sehr stark absorbierend sind kann sich die Aufenthaltsqualität wieder leicht verschlechtern [14]. Für das Echokriterium *EK* wurden in [16] keine Korrelation zur Aufenthaltsqualität gefunden. Diesem Ergebnis darf aber im Kontext unserer Untersuchung keine zu grosse Bedeutung zugmessen werden, weil in [16] die Werte von EK relativ tief liegen.

Jansohn machte in seiner im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Bachelorarbeit [40] Überlegungen zur Richtwerten für die Nachhallzeit, indem er auf Empfehlungen der Norm DIN 18041 [48] und von Fasold et al. [49] zurückgriff, wo sich für grosse Räume Angaben für Sprache finden. Er kommt damit schliesslich zu einem anzustrebenden Bereich von 1.2–1.5 s, was plausibel erscheint, aber auch noch überprüft werden müsste. Anzumerken ist, dass sowieso nicht beliebig tiefe Nachallzeiten erreichbar sind, denn die Fensterflächen und andere Strukturen werden immer schallreflektierend bleiben.

Bezüglich Stärkemass *G* interessiert vor allem, wie stark sich *G* im Vergleich zu anderen berechneten Varianten vermindert.

Für das Echokriterium *EK* erscheint es plausibel, dass eine minimale Anzahl von Überschreitungen von *EK* = 1.5 angestrebt werden.

Bezüglich Sprachübertragungsindex *STI* ist zu erwähnen, dass unsere eigenen Untersuchungen [16] zeigten, dass die akustische Aufenthaltsqualität mit dem Sprachübertragungsindex *STI* steigt. Das ist damit zu erklären, dass der *STI* stark mit *EDT* und auch mit gut mit T_{20} korreliert. Wenn man aber effektiv nach der Sprachverständlichkeit und nicht nach der Aufenthaltsqualität fragt, dann sollte auf der einen Seite die Sprachverständlichkeit zwischen Balkonen schlecht sein, um die Vertraulichkeit von Gesprächen zu wahren. Die Zielsetzung für diese Übertragungsstrecken ist deshalb, einen *STI* < 0.2 zu erreichen [50], [51]. Auf der anderen Seite sollen Gespräche auf dem gleichen Balkon bzw. für nahe Sender und Empfänger im Innenhof gut zu verstehen sein, weshalb für diese Übertragungsstrecken ein *STI* > 0.6 angestrebt werden kann [51]. Da jedoch bei den Innenhofmodellen auf jedem Balkon nur ein Sender/Empfänger platziert und im Innenhof diese jeweils einen Mindestabstand von 6.5 m haben (s.u.), ergibt sich für alle bei der Simulation betrachteten Übertragungsstrecken die Forderung nach einem möglichst geringen STI, um die Privatsphäre der Gespräche zu erhöhen.

Bemerkung

Wichtige Begriffe für die Situation auf den Balkonen sind "Privatsphäre" und "Vertraulichkeit" In der Literatur wurden dazu folgendes gefunden, was hier kurz diskutiert werden soll:

> *Dabei wird deutlich, dass der simulierte Schallimmissionspegel auf den Balkonen sowie ab der dritten Geschosshöhe um bis zu 15 dB(A) reduziert werden kann. Durch diese Verringerung der Lärmbelastung kann also die Aufenthaltsqualität und die Privatsphäre auf den Balkonen gesteigert werden.* Gleiche Formulierungen finden sich in [29] und [30].
>
> *Ein Beispiel: Montiert man schallabsorbierende Materialien an der Untersicht von Balkonen, reduziert dies nicht nur den Lärmpegel im Innenhof, sondern erhöht auch die Vertraulichkeit von Gesprächen auf dem Balkon – und das auf einfach umsetzbare und kostengünstige Weise.* [51]

Es wird nicht klar, welche Untersuchungen zu den zitierten Schlüssen bezüglich Privatsphäre und Vertraulichkeit geführt haben. Bei sinkenden Schallimmissionspegeln auf den Balkonen wird dort die Aufenthaltsqualität verbessert. Allerdings wird auch die Sprachverständlichkeit verbessert, weil die Sprache nicht mehr maskiert ist und die Privatsphäre wird damit verschlechtert. Das gleiche gilt im Prinzip für den Fall von absorbierenden Balkonuntersichten. Die Absorption führt tendenziell zu einer verbesserten Sprachverständlichkeit und damit zu einer niedrigeren Vertraulichkeit, sicher aber nicht umgekehrt.

3.2. Raumakustischer Simulation

3.2.1. Software

Für die raumakustische Simulation wurde die auf dem Stand der Technik stehende Software ODEON Version 16.11 (www.odeon.dk) verwendet [53]. Die Software wurde schon früher für die Simulation von Innenhöfen eingesetzt (siehe Abschnitt 2.1). ODEON basiert auf der geometrischen Akustik und arbeitet mit Spiegelquellen und mit Ray Tracing. Damit wird der Wellencharakter des Schalls vernachlässigt, was aber in Kauf genommen werden muss, wenn man nicht mit aufwändigen und damit kostspieligen physikalischen Modellen arbeiten will, welche z.B. bei der akustischen Planung von Konzertsäle immer noch mit Gewinn

im Einsatz sind. Software auf der Basis von wellentheoretischen Ansätzen ist noch nicht verfügbar, resp. die erwarteten Rechenzeiten sprengen noch den Rahmen für solch umfangreiche Untersuchungen, wie sie hier durchgeführt werden.

Mit der Software können alle gängigen raumakustischen Parameter berechnet werden. Zudem ist es möglich, in den Raum hinein zu hören (Auralisation).

3.2.2. Die Matrix-Methode

Da es in Innenhöfen sehr viele Möglichkeiten von Quellen-/Empfangspunkt-Kombinationen gibt, erschien die Anwendung der von Probst beschriebenen [51] und seit der Version 16 in ODEON implementierte Matrix-Methode sinnvoll. Abbildung 1 und Abbildung 2 veranschaulichen die grosse Anzahl von Berechnungsergebnissen. Es wurden auf allen Balkonen und an vielen Positionen im Innenhof kombinierte Quellen-/Empfangspunkte positioniert und *von allen zu allen* die Übertragung berechnet. Nicht ausgewertet wurden dabei die Übertragungen von den Quellen zu sich selber.

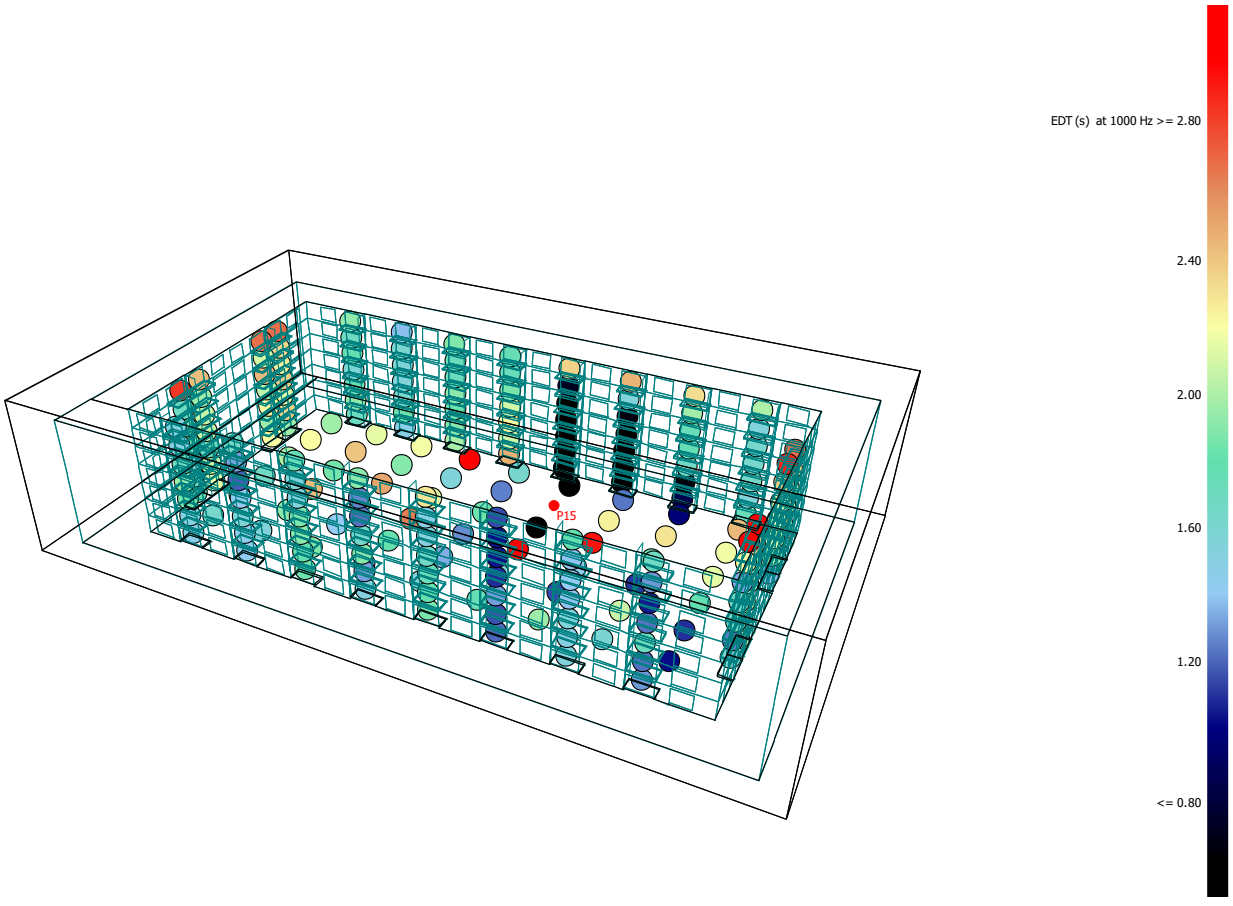

Abbildung 1 Beispielhafte Darstellung der Berechnungsergebnisse für einen raumakustischen Parameter (*EDT* bei 1 kHz) im Innenhof Gross (7) für die Quellenposition P15 im Hof.

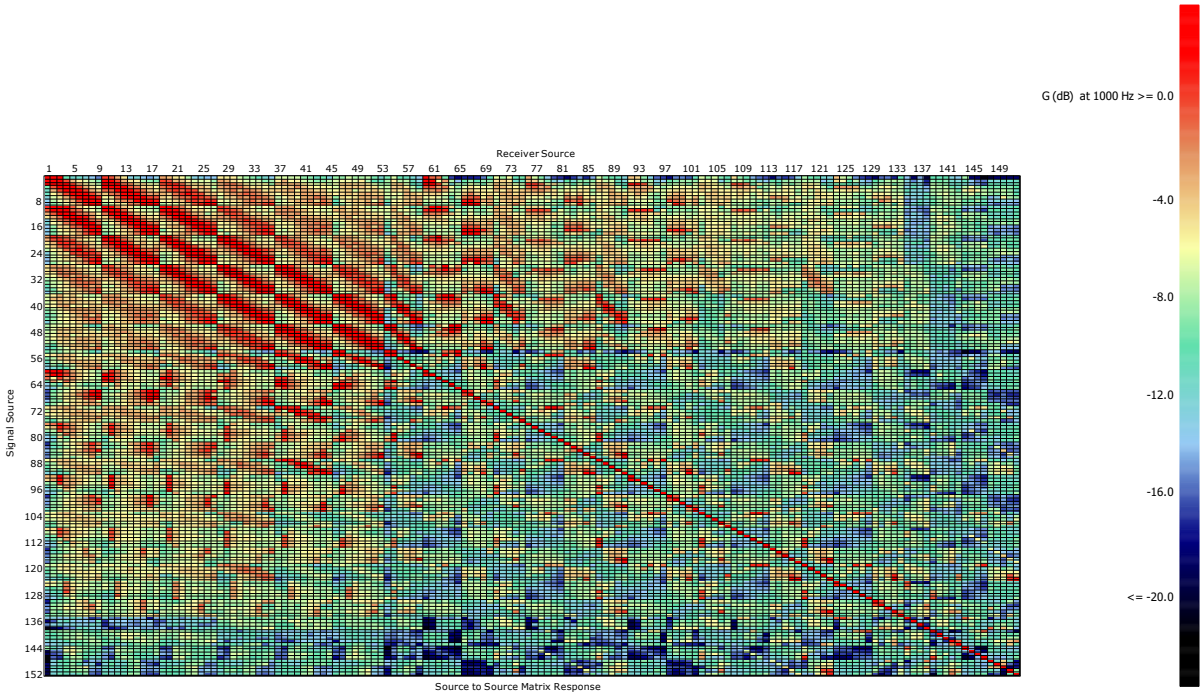

Abbildung 2 Beispielhafte Darstellung der Matrix aller Berechnungsergebnisse für einen raumakustischen Parameter (*G* bei 1 kHz) im Innenhof Gross (7).

3.2.3. Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung der Anzahl Schallstrahlen

Eine wichtige Einstellung der Software ODEON bezüglich Berechnungszeit und Unsicherheit der Ergebnisse ist die Anzahl der verwendeten Schallstrahlen.

Auf der einen Seite ergibt die Matrix-Methode eine grosse Anzahl von "Durchläufen", so dass die Anzahl Schallstrahlen nicht zu Gunsten einer geringen Berechnungsunsicherheit vorsichtshalber sehr hoch gesetzt werden kann. Die Software ODEON gibt zwar Hinweise auf die optimale Anzahl Schallstrahlen. Die Hinweise gelten aber eher für Räume, welche nicht einseitig vollständig absorbierend sind wie ein Innenhof.

Aus diesem Grund wurden jeweils vor dem Start der Berechnungen für eine Gruppe von ähnlichen Simulationen Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Es wurde dabei die minimale Anzahl Schallstrahlen bestimmt, mit den noch zuverlässigen Ergebnissen erreicht werden konnten. Im Prinzip wurde für die Unterschiede zwischen den Berechnungsvarianten die gerade wahrnehmbare Differenz JND (siehe Abschnitt 3.1) zugezogen. Es resultierten schliesslich immer noch zum Teil lange Berechnungszeit von bis zu 24 Stunden pro Variante.

3.2.4. Untersuchungen zur Validierung der Simulationen

Im Rahmen der in diesem Projekt durgeführten Bachelorarbeit [40] wurden Untersuchungen zur Validierung der Simulationen durchgeführt, welche hier nur zusammenfassend beschrieben werden.

Randomisierung der Sender-/Empfängerpositionen

Die Sender-/Empfängerpositionen bei allen Modellen immer auf die gleiche Weise verteilt. Mit separaten Simulationen wurde überprüft, wie welche Grössenordnung die Abweichungen durch eine in einem gewissen Rahmen (max. ±0.9 m im Hof, max. ±0.5 m auf dem Balkon) zufällige Platzierung der Sender/Empfänger sind. Dabei zeigte sich, dass die Abweichungen gering sind.

Variation des Streugrades

Weiter wurden Simulation mit einer Variation des Streugrads ±40% durchgeführt. Sie zeigten ebenfalls einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse.

Variation des Absorptionsgrades

Schliesslich wurde in den beiden Modellen der Absorptionsgrad der absorbierenden Fassaden und Balkonuntersichten variiert (±0.1). Im Vergleich zur Variation des Streugrades ändern sich die raumakustischen Parameter geringfügig stärker. Die aus den Ergebnissen der Untersuchung gezogenen Schlussfolgerungen ändern sich aber nicht.

Raumakustische Messungen im Innenhof Müller-Martini

Mit raumakustischen Messungen im Innenhof Müller-Martini (siehe Abbildung 7) wurde ein Vergleich von gemessenen mit simulierten Werten möglich. Zusammenfassend kann ausgesagt werden, dass die Simulation nur für die Nachhallzeit T_{20} und das Echokriterium eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten ergibt. Bei den Parametern Early Decay Time *EDT*, Stärkemass *G* und Sprachübertragungsmass *STI* weichen die simulierten Werte teilweise deutlicher von den gemessenen ab. Die Abweichung zeigen immerhin systematisch in eine Richtung. Es lässt sich daraus allerdings nicht ableiten, dass die Vergleiche von Varianten - um die es hier geht - nicht auf eine aussagekräftige Weise möglich wären. Die Absolutwerte sind jedoch mit einer gewissen Vorsicht zu geniessen.

3.2.5. Prognoseunsicherheit

Zur Prognoseunsicherheit der Software ODEON finden sich im Manual Abschnitt 11.2 [53] die folgenden Angaben:

> There are many sources of error in a room acoustical simulation, leading to results which are less than perfect (within one subjective limen). Sometimes this is quite acceptable because we are just interested in rough results, at other times we are interested in results as good as possible. In any case, being aware of the sources of error may help getting the best possible results out of ODEON.
>
> The sources of error (or at least some of them) are:
>
> • The approximations made in the ODEON calculation algorithms.
> • Inappropriate calculation parameters (e.g. number of late rays).
> • Imprecise material absorption coefficients.
> • Imprecise material scattering coefficients.
> • Not accurate or optimal geometry definition for use in ODEON (e.g. too detailed).
> • Not accurate measured reference data to which simulations are compared.

In sehr speziellen Situationen, wo z.B. die Beugung eine Rolle spielt, kann der Fehler gross werden. Vorländer [54] hat gezeigt, dass die Vorhersage der Nachhallzeit bei präzisen Daten bezüglich Absorptionsgrad

besser sein können als der gerade wahrnehmbare Unterschied von 5%. Für das Stärkemass ist eine Vorhersage im Rahmen des geraden wahrnehmbaren Unterschieds von 1 dB möglich.

Für die vorliegende Studie wurden eigens Untersuchungen zur Frage der notwendigen Anzahl Schallstrahlen durchgeführt (siehe Abschnitt 3.2.3), welche helfen, die Prognoseunsicherheit zu begrenzen. Zur Einschätzung helfen auch die Arbeiten zur Validierung der Simulationen (siehe Abschnitt 3.2.4).

Da das Ziel der vorliegenden Untersuchung Vergleiche von verschiedenen auf gleiche Art bei gleicher Geometrie berechneten Situationen ist, fallen viele Fehlerquellen weg. Es ist damit anzunehmen, dass die Unsicherheit der Mittelwerte im Bereich der gerade wahrnehmbaren Unterschiede liegt. Damit erweist sich die Simulation als taugliches Mittel für diese Untersuchung.

3.3. Untersuchte Innenhofmodelle

Der Hauptteil der Untersuchungen wurde mit sogenannten generischen Modellen durchgeführt. Sie sind plausible Innenhöfe ohne konkretes gebautes oder geplantes Vorbild. Weiter wurden zwei Modelle auf der auf der Basis von existierenden Innenhöfen geschaffen. Alle 3D-Modelle wurden mit SketchUp (2021) erstellt und mit Hilfe des ODEON-Plugins SU2Odeon 2.03 in ODEON importiert. Ein Überblick zur Fläche der Grundrisse, Volumen und Anzahl Stockwerke finde sich in Abbildung 3.

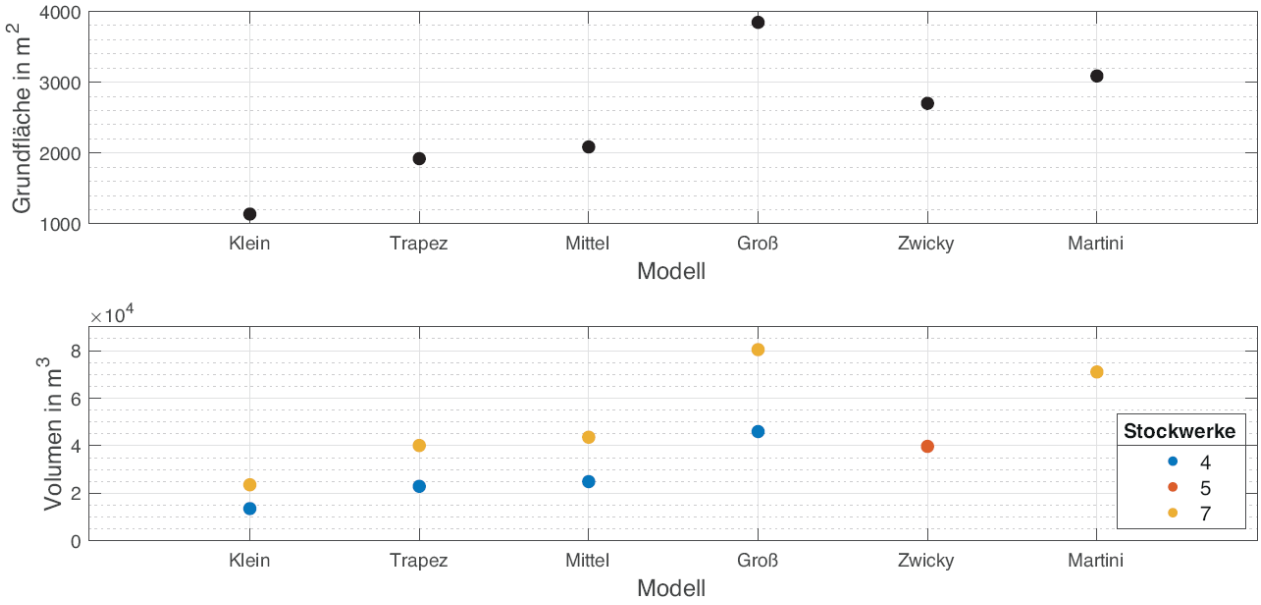

Abbildung 3 Überblick zur Fläche der Grundrisse, Volumen und Anzahl Stockwerke der simulierten Innenhöfe (Bezeichnungen siehe Abschnitte 3.3.1 und 3.3.2. Bild aus [40] (Abbildung 3.3).

3.3.1. Generische Modelle

Basierend auf einem Fassaden-Element mit Balkon und Sichtschutz (Abbildung 4) wurden acht generische Innenhöfe mit unterschiedlicher Grundfläche und Stockwerkanzahl erstellt. Für die Balkone wurden keine feste Brüstung, sondern ein Geländer vorgesehen. Brüstungen (kombiniert mit absorbierenden Balkonuntersichten) sind günstig bei Fassaden, die gegen eine Strasse gerichtet sind, wenn es darum geht, den Schall von der Strasse etwas abzuschirmen. In Innenhöfen werden in der Regel Geländer realisiert, welche für den Schall praktisch durchlässig sind.

Die Modellierung wurde gemäss den Grundsätzen der Simulation mit ODEON stark vereinfacht, womit – um nur ein Beispiel zu nennen – z.B. das Geländer des Balkons nicht modelliert wurde, weil es nur bei sehr hohen Frequenzen Schallstreuung verursacht.

Es wurden vier verschiedene Grundrisse (Abbildung 5) erzeugt. Die entsprechenden Innenhöfe sind jeweils vier und sieben Stockwerken hoch. Die Bezeichnung der Modelle setzt sich zusammen aus der Bezeichnung für den Grundriss und der Anzahl Stockwerke in Klammern (siehe Tabelle 1).

Insgesamt macht diejenige Fassadenfläche, welche mit dem absorbierenden Material versehen werden konnte, je nach Modell maximal zwischen 46–49% der gesamten Fassade aus. Daraus lässt sich der grosse Anteil der Fensterfläche erkennen.

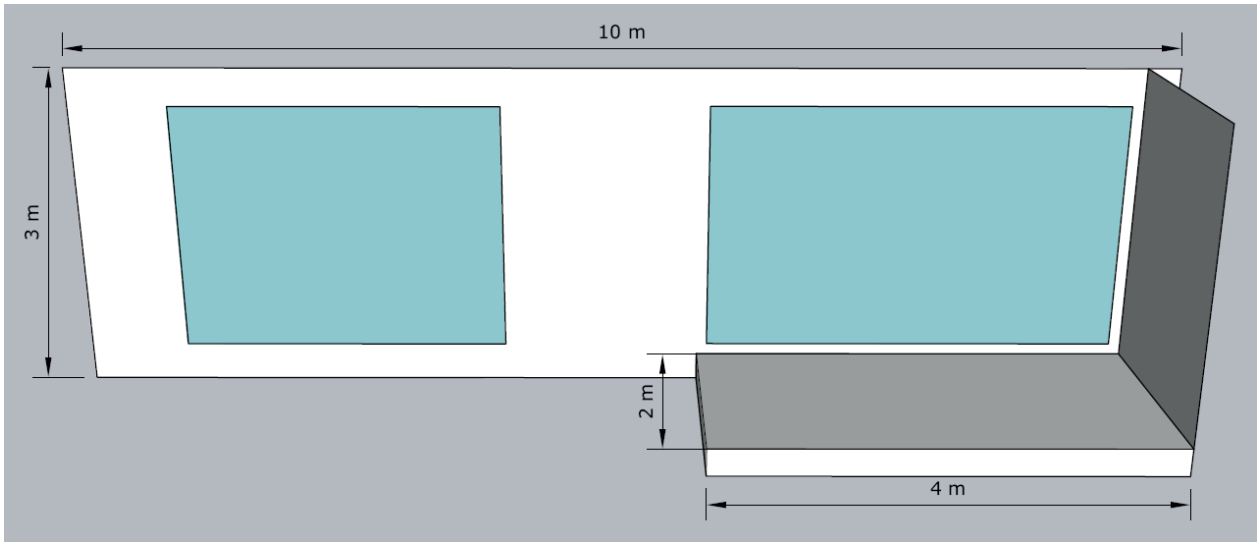

Abbildung 4 Fassaden-Element erstellt mit SketchUp. Bild aus [40] (Abbildung 3.1)

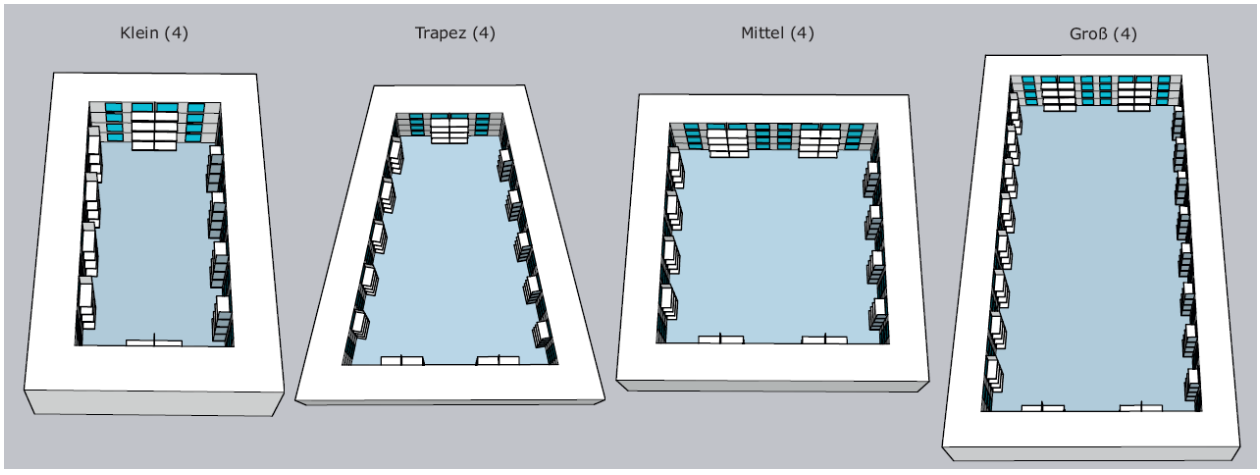

Abbildung 5 Die vier generischen Modelle. Dargestellt ist jeweils die Variante mit vier Stockwerken. Bild aus [40] (Abbildung 3.2).

Tabelle 1 Generische Modelle der Innenhöfe

	Grundriss	Abmessungen	Stockwerke
Klein (4)	Rechteck	4 Elemente (47.4 m) x 2 Elemente (24 m)	4 (12 m)
Klein (7)	Rechteck	4 Elemente (47.4 m) x 2 Elemente (24 m)	7 (21 m)
Trapez (4)	Trapez	5 Elemente (56.5 m) x 4/2 (vorne/hinten) Elemente (44 m/24 m)	4 (12 m)
Trapez (7)	Trapez	5 Elemente (56.5 m) x 4/2 (vorne/hinten) Elemente (44 m/24 m)	7 (21 m)
Mittel (4)	Rechteck	4 Elemente (47.4 m) x 4 Elemente (44 m)	4 (12 m)
Mittel (7)	Rechteck	4 Elemente (47.4 m) x 4 Elemente (44 m)	7 (21 m)
Gross (4)	Rechteck	8 Elemente (87.4 m); 4 Elemente (44 m)	4 (12 m)
Gross (7)	Rechteck	8 Elemente (87.4 m); 4 Elemente (44 m)	7 (21 m)

3.3.2. Modelle auf der Basis von existierenden Innenhöfen: Zwicky und Müller-Martini

Zwei Modelle wurden auf der auf der Basis von existierenden Innenhöfen erstellt. Sie wurden so detailliert wie möglich nachgebildet. Es wurden z.B. Sitzbänke und unterschiedliche Materialisierung des Bodens im Innenhof modelliert. Ausgewählt wurden in Absprache mit der Fachgruppe Klangraumgestaltung ein Innenhof im Zwicky-Areal in Wallisellen und ein weiterer im Müller-Martini-Areal in Zürich. Beide Innenhöfe unterscheiden sich beabsichtigt von den generischen Modellen. Beide haben an mindestens einer Fassadenseite keine Balkone, wobei die Balkone eigentlich Loggien sind. Zur Vereinfachung wird der Begriff "Balkon" im Folgenden für beide Varianten benutzt.

Zwicky

Der Innenhof wurde bereits stark abstrahiert für eine Bachelorarbeit an der Empa und anschliessenden Arbeiten an der Empa ([13], [14], [15]) verwendet. Für dieses Projekt wurde der Innenhof nochmals geometrisch ausgemessen und ein neues Modell erstellt (Abbildung 6). Auch im neuen Modell wurde von dem gebauten Innenhof abgewichen. Auf der eine Seite des Innenhofes steht – den Innenhof begrenzend – ein Gebäude mit Satteldach, welches im Modell durch eine Verlängerung des Wohnblocks ersetzt wird. Darüber hinaus sind die Aufbauten auf der anderen Seite im Modell nicht nachgebildet.

Der Innenhof hat eine Länge von 109.3 m sowie eine Breite von 30.9 m beim breiteren Ende und 23.0 m beim schmaleren. Mit den unterschiedlich hohen fünf Stockwerken ist die Höhe des Innenhofs 14.7 m.

Müller-Martini

Es wurde mit wenigen Veränderungen ein SketchUp-Modell von Benjamin Vetsch, einem Praktikanten der Fachstelle Lärmschutz des Kantons Zürich, von Juni 2019 verwendet (siehe Abbildung 7). Der Innenhof hat eine Länge von 70.4 m, eine Breite von 42.0 m und eine Höhe von rund 23.0 m (Dachaufbauten nicht mitberechnet). Das unterste und oberste Stockwerk haben eine Höhe von 3.8 m und 4.2 m, die fünf mittleren Stockwerke 3.0 m.

Abbildung 6 Innenhof im Zwicky-Areal in Wallisellen, links Foto, rechts SketchUp-Modell. Bild aus [40]. (Abbildung 3.5)

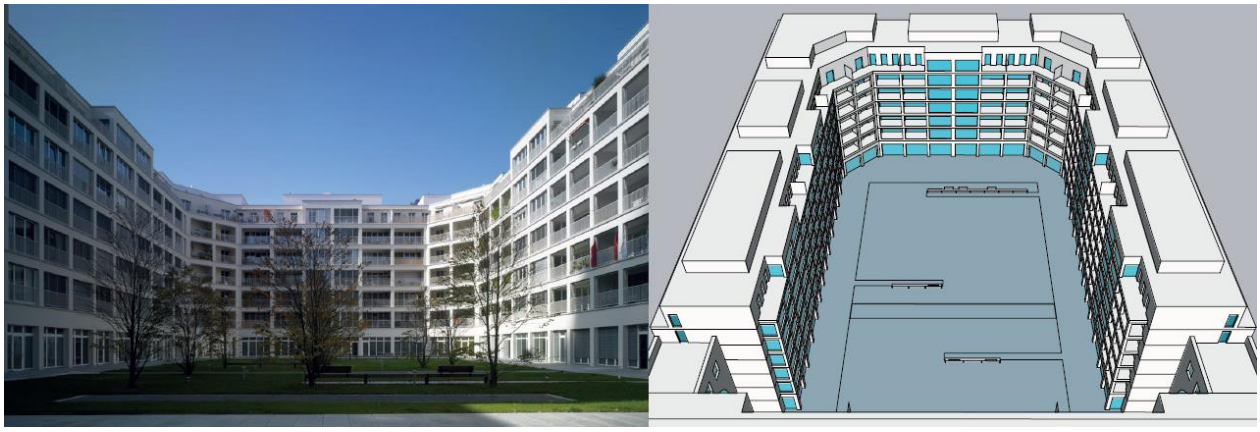

Abbildung 7 Innenhof "Müller-Martini" in Zürich, links Foto (Dozio, V. https://www.arassociati.it/en/progetto/muller-Müller-Martini-allreal/), rechts SketchUp-Modell. Bild aus [40]. (Abbildung 3.6)

3.3.3. Platzierung der Sende- und Empfangspositionen

Sende- resp. Empfangspositionen (jede Position ist gleichzeitig Sender und Empfänger; siehe Absatz 3.2.2) wurden in allen Modellen nach dem gleichen System platziert. Auf jedem Balkon wurde genau mittig ein Sender/Empfänger in einer Höhe von 1.2 m über dem Balkon positioniert (Ohrhöhe einer sitzenden Person). Im Innenhof sind die Sender/Empfänger in einem Raster 1.6 m über dem Boden angeordnet (Ohrhöhe einer stehenden Person). Der Abstand zwischen den Positionen beträgt in Längsrichtung 9 m und in Querrichtung 6.5 m (Bespiel siehe Abbildung 8). In Tabelle 2 sind für alle Modelle die Anzahl von Sende-/Empfangspositionen und die daraus resultierende Anzahl an Übertragungsstrecken angegeben.

Die Platzierung der Sende-/Empfangspositionen erfolgte bei dem Innenhöfen Zwicky und Müller-Martini nach dem gleichen System. Bei Zwicky wurde allerdings der Rasterabstand im Innenhof in Querrichtung um 1 m kürzer gewählt. Bei Müller-Martini sind manche Balkone deutlich breiter und mit einer eine Säule

in der Mitte. Sende-/Empfangspositionen wurden deshalb auf diesen Balkonen von Stockwerk zu Stockwerk abwechselnd links und rechts von der Säule platziert. Der Rasterabstand im Innenhof wurde auf 7.7 m in Längsrichtung und 7.2 m in Querrichtung gesetzt.

Tabelle 2 Anzahl Sende- und Empfangspositionen und resultierende Übertragungsstrecken in den verschiedenen Innenhöfen

Modell	Anzahl Sende-/Empfangspositionen		Anzahl Übertragungsstrecken	
	4 Stockwerke	7 Stockwerke	4 Stockwerke	7 Stockwerke
Klein	63	99	3'906	9'702
Trapez	90	138	8'010	18'906
Mittel	94	142	8'742	20'022
Gross	150	222	22'350	49'062
Zwicky	140		19'460	
Müller-Martini	152		22'952	

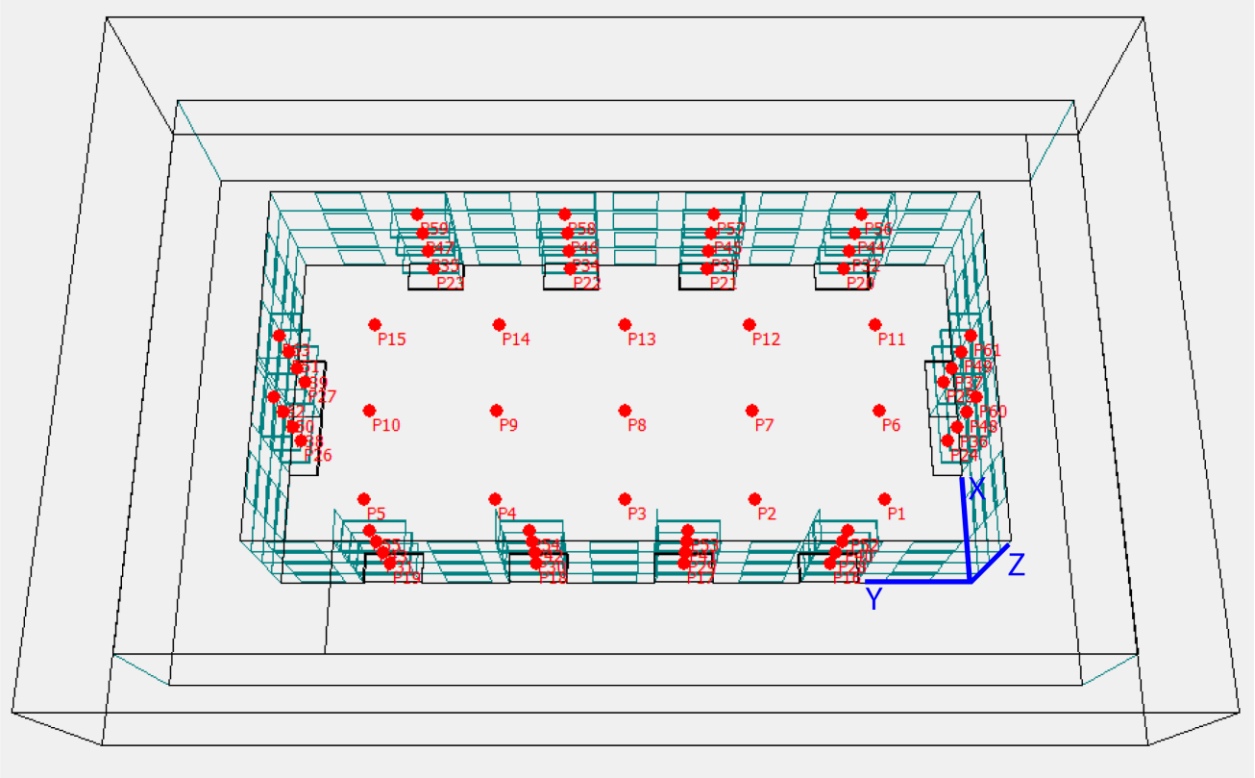

Abbildung 8 Perspektivische Betrachtung des generisches Modells Klein (4) in ODEON mit allen 63 Sende-/Empfangspositionen. Bild aus [40] (Abbildung 3.4).

Tabelle 3 Schallabsorptionsgrade für die verschiedenen Modelle der Innenhöfe

Material	Frequenz in Hz								Modell
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
Ziegelwand	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07	0.07	G/Z
Absorbierende Fassade/Balkonuntersicht	0.25	0.25	0.55	0.85	0.90	0.80	0.75	0.75	G/Z/M
Fenster	0.18	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	G/Z/M
glatter Beton (Balkone & Sichtschutz)	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	G/Z/M
rauer Beton (reflektierender Boden)	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07	0.07	G/Z/M
Rasen	0.15	0.15	0.25	0.40	0.55	0.60	0.60	0.60	G/Z/M
verputzte Ziegelwand	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	M
Kiesboden	0.07	0.07	0.12	0.20	0.27	0.30	0.30	0.30	Z
Steinplatten	0.01	0.01	0.01	0.015	0.02	0.02	0.02	0.02	M
Holz (Sitzbänke)	0.05	0.05	0.08	0.10	0.12	0.12	0.12	0.12	Z/M

Legende G: Generische Modelle, Z: Innenhof Zwicky, M: Innenhof Müller-Martini

3.3.4. Schallabsorptionsgrade

Bei der Simulation wurden die in Tabelle 3 aufgeführten Schallabsorptionsgrade verwendet.

Für die Wahl des Schallabsorptionsgrads der absorbierenden Fassaden und Balkonuntersichten (siehe Tabelle 3, zweite Zeile und Abbildung 9) wurde eine plausible Annahme getroffen, welche sich auf reale Produkte von absorbierenden Balkonuntersichten und schallabsorbierenden Lärmschutzwänden stützt. Der bewertete Schallabsorptionsgrad α_w gemäss ISO 11654 [55] beträgt 0.80.

Selbstverständlich wirkt sich der Absorptionsgrad auf das Schallfeld und die berechneten raumakustischen Parameter aus. In Abschnitt 3.2.4 werden Validierungen beschrieben, in denen bei den Simulationen der Absorptionsgrad der absorbierenden Fassaden und Balkonuntersichten um ±0.1 variiert wurde. Dies beeinflusste die Untersuchungsergebnisse nicht unzulässig. Es erscheint zudem wenig sinnvoll, Materialien mit deutlich geringerem Absorptionsgrad einzusetzen, und es ist anzunehmen, dass Fassadenkonstruktionen mit deutlich höherem Absorptionsgrad wesentlich schwieriger zu realisieren sind. Der gewählte Verlauf des Schallabsorptionsgrad kann deshalb als für die Untersuchung geeignet bezeichnet werden.

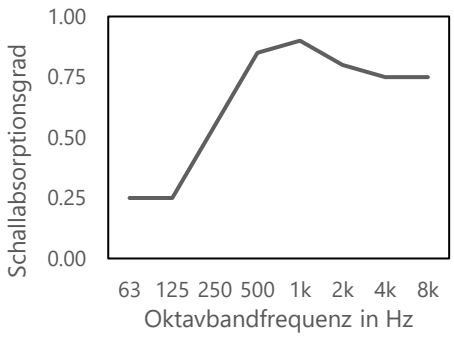

Abbildung 9 Der für die Simulationen verwendete Schallabsorptionsgrad der absorbierenden Fassaden und Balkonuntersichten (siehe auch Tabelle 8).

3.3.5. Streugrade

Für die Zuordnung von *Streugraden* wurden grundsätzlich die Regeln der Simulationssoftware ODEON befolgt. Bei den generischen Modellen wurden für Fassade und Innenhofböden ein Streugrad von 0.1 eingesetzt, für die Balkone und Sichtschutze 0.05 und die Fenster 0.005. Beim Innenhof Zwicky wurden zudem für die Sitzbänke und ein kleines Podest 0.05 eigesetzt, für die dichten Büsche 0.30. Schliesslich wurden für den Innenhof Zwicky zusätzlich für die Sitzbänke 0.20 und für die Steinplatten 0.05 verwendet. Die Werte wurden unabhängig von der Materialisierungsvariation beibehalten.

3.3.6. Materialisierungsvarianten

Die insgesamt simulierten Materialisierungsvarianten für die generischen Modelle finde sich in Tabelle 4 und Tabelle 5, jene für Zwicky in Tabelle 6 und schliesslich in Tabelle 7 die Varianten für Müller-Martini. Bei Zwicky und Müller-Martini wurden die Böden des Innenhofs auf der Basis des realen Baus modelliert und deshalb nicht variiert.

Tabelle 4 Elf Materialisierungsvarianten der generischen Modelle (Klein, Trapez, Mittel, Gross) mit *vier Stockwerken* (F = Fassade; 1, 2, 3, 4 = Stockwerk; Ba = Balkonuntersicht; Bo = Boden; r = reflektierend; α = absorbierend)

Var.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F4	r	r	r	r	r	r	r	α	α	α	α
F3	r	r	r	r	r	r	α	α	α	α	α
F3	r	r	r	r	r	α	α	α	α	α	α
F1	r	r	r	r	α	α	α	α	α	α	α
Bo	r	r	α	α	r	r	r	r	r	α	α
Ba	r	α	r	α	r	r	r	r	α	r	α

Tabelle 5 14 Materialisierungsvarianten der generischen Modelle (Klein, Trapez, Mittel, Gross) mit *sieben Stockwerken* (Var. = Materialisierungsvariante, F = Fassade; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 = Stockwerk; Ba = Balkonuntersicht; Bo= Boden; r = reflektierend; α = absorbierend)

Var.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
F7	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	α	α	α	α
F6	r	r	r	r	r	r	r	r	r	α	α	α	α	α
F5	r	r	r	r	r	r	r	r	α	α	α	α	α	α
F4	r	r	r	r	r	r	r	α	α	α	α	α	α	α
F3	r	r	r	r	r	r	α	α	α	α	α	α	α	α
F3	r	r	r	r	r	α	α	α	α	α	α	α	α	α
F1	r	r	r	r	α	α	α	α	α	α	α	α	α	α
Bo	r	r	α	α	r	r	r	r	r	r	r	r	α	α
Ba	r	α	r	α	r	r	r	r	r	r	r	α	r	α

Tabelle 6 Acht Materialisierungsvarianten Zwicky (Var. = Materialisierungsvariante, F = Fassade; 1, 2, 3, 4, 5= Stockwerk; Ba = Balkonuntersicht; Bo = Boden; r = reflektierend; α = absorbierend). Für den Boden des Innenhofs wurden keine Varianten berechnet, sondern der reale Boden modelliert.

Var.	1	2	3	4	5	6	7	8
F5	r	r	r	r	r	r	α	α
F4	r	r	r	r	r	α	α	α
F3	r	r	r	r	α	α	α	α
F3	r	r	r	α	α	α	α	α
F1	r	r	α	α	α	α	α	α
U	r	α	r	r	r	r	r	α

Tabelle 7 Zehn Materialisierungsvarianten Müller-Martini (Var. = Materialisierungsvariante, F = Fassade; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 = Stockwerk; Ba = Balkonuntersicht; Bo = Boden; r = reflektierend; α = absorbierend). Für den Boden des Innenhofs wurden keine Varianten berechnet, sondern der reale Boden modelliert.

Var.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F7	r	r	r	r	r	r	r	r	α	α
F6	r	r	r	r	r	r	r	α	α	α
F5	r	r	r	r	r	r	α	α	α	α
F4	r	r	r	r	r	α	α	α	α	α
F3	r	r	r	r	α	α	α	α	α	α
F3	r	r	r	α	α	α	α	α	α	α
F1	r	r	α	α	α	α	α	α	α	α
U	r	α	r	r	r	r	r	r	r	α

3.4. Statistische Auswertung

Für die Auswertungen innerhalb der Bachelorarbeit [40] wurden statistische Analysen durchgeführt, welche dort wie folgt beschrieben sind:

Zu Beginn der Auswertung wurden die Daten visualisiert und statistisch ausgewertet. Dazu wurden sie sowohl analytisch als auch grafisch auf Normalverteilung geprüft. Dabei zeigten weder die analytischen Tests (Kolmogorov-Smirnov und Shapiro-Wilk) noch die grafische Überprüfung der Residuen anhand der Q-Q-Plots, dass die Daten aus einer Normalverteilung stammen. Aus diesem Grund wurden nichtparametrische statistische Auswerteverfahren verwendet, welche im Gegensatz zu ihren parametrischen Äquivalenten keine Normalverteilung der Daten voraussetzen.

Die statistische Auswertung gliedert sich in zwei Teile. Erst wurde separat für jedes der zehn Modelle der Einfluss der Materialisierung auf die raumakustischen Parameter mit dem Friedman-Test und den darauffolgenden Nemenyi-Post-Hoc-Analysen ausgewertet. Dann wurden für die acht generischen Modelle der Einfluss der beiden Parameter Stockwerkanzahl und Grundfläche auf die raumakustischen Parameter mittels des Kruskal-Wallis-Tests und anschliessenden Paarvergleichen mit Dunns Test analysiert.

Da bei der Untersuchung des Parameters „Materialisierung" immer die gleichen Übertragungsstrecken betrachtet werden, sind die Beobachtungen voneinander abhängig. Aus diesem Grund wurde der Friedman-Test angewendet, welcher das nichtparametrische Gegenstück zur Varianzanalyse mit Messwiederholung darstellt [56]. Anhand des Friedman-Tests wurde untersucht, ob der Faktor „Materialisierung" grundsätzlich einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse ausübt. Er gibt aber nicht an, zwischen welchen Materialisierungen die signifikanten Unterschiede auftreten. Zeigt sich beim Friedman-Test ein signifikanter Unterschied, wird mittels Post-Hoc-Tests untersucht, wo dieser Effekt liegt [57]. Dies ist bei allen Modellen und untersuchten Parametern mit $p < 0.01$ der Fall, sodass immer Post-Hoc-Analysen mit Nemeyi-Paarvergleichen durchgeführt wurden. Der Nemeyi-Test enthält bereits eine α-Fehlerkorrektur, um der α-Fehlerkommulierung durch mehrfaches Testen innerhalb derselben Stichprobe entgegenzuwirken [58]. Eine zusätzliche α-Fehlerkorrektur ist deshalb nicht notwendig. Zu bedenken ist, dass aufgrund der sehr hohen Anzahl an Übertragungsstrecken bereits sehr kleine Veränderungen des Medians zu signifikanten Unterschieden bei den Paarvergleichen führen. Der Fokus der Auswertung in Abschnitt 4 liegt deshalb stärker auf der Relevanz (d.h. Stärke) der Unterschiede, anstatt auf deren Signifikanz.

Die statistische Auswertung der Modelleffekte basiert, anders als bei der Untersuchung der Materialisierungeffekte, nicht auf den Werten jeder einzelnen Übertragungsstrecke, sondern es werden durchschnittliche Änderungen der raumakustischen Parameter durch die absorbierende Fassade oder Balkonuntersichten als Datengrundlage genommen. Da die Übertragungsstrecken zwischen den Modellen in keinem Zusammenhang stehen, sind die Stichproben voneinander unabhängig. Deshalb wird der Kruskal-Wallis-Test benutzt, welcher zwei oder mehr unabhängige Stichproben auf Gleichheit der zentralen Tendenz, hier der Median, prüft [56]. Beim Parameter Stockwerkanzahl werden für jeden Innenhof die Übertragungsstrecken nach deren Empfängerpositionen pro Stockwerk gruppiert, d. h. gemittelt. Die Empfänger im Innenhof bilden dabei auch eine Gruppe. Für die statistische Auswertung gibt es dadurch je nach Stockwerkanzahl des Modells fünf oder acht gemittelte Werte. Beim Parameter Grundfläche gibt es vier unterschiedliche Gruppen. Da der Kruskal-Wallis-Test (wie auch der Friedman-Test) nur allgemein aussagen kann, ob es signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen gibt, wurde die Auswertung noch um Post-Hoc-Analysen mit Dunns Test ergänzt, wenn der Kruskal-Wallis-Test signifikant war. Um die α-Fehlerkommulierung auszugleichen, wurde eine Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Für alle beschriebenen statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von 1%, also $p = 0.01$ gewählt. Ist ein Test signifikant, sind die damit festgestellten Effekte mit einer Wahrscheinlichkeit von 99% nicht per Zufall entstanden. Dieses geringe Signifikanzniveau wurde gewählt, da aufgrund der sehr grossen Anzahl an betrachteten Übertragungsstrecken fast alle Materialisierungs-variationen signifikante Unterschiede bewirken. Die statistische Auswertung der Daten wurde mithilfe der Software MATLAB (R2021b) durchgeführt. Dabei basierten die Post-Hoc-Analysen mit dem Nemenyi-Test auf der Implementierung von Kourentzes [59].

4. Ergebnisse Bachelorarbeit

4.1. Einleitung

Aus den raumakustischen Simulationen ergab sich ein riesiger Datensatz. Die Bachelorarbeit [40] fokussierte sich auf die Ergebnisdarstellung jeweils *von allen Positionen zu allen Positionen*, d.h. alle Empfangspositionen auf den Balkonen und im Innenhof wurden insgesamt ausgewertet. Weggelassen wurden die Übertragungsstrecken von den Sendepositionen zu sich selbst. Im Anschluss an die Bachelorarbeit wurden für einige Gruppen von Positionen (z.B. Hof zu Hof) weitere Auswertungen durchgeführt (siehe Abschnitt 6).

Die extrem grosse Anzahl von simulierten Übertragungsstrecken führt bei einer überwiegenden Mehrzahl der Materialisierungsvarianten zu statistisch signifikanten Änderungen mit $p < 0.01$. Deshalb wird im Folgenden in der Regel nur auf Fälle mit nicht signifikanten Änderungen hingewiesen.

In den Abschnitten 4.2–4.4 werden jeweils die Ergebnisse von vier Materialisierungsvarianten einander gegenübergestellt. In Abschnitt 4.5 folgen die Ergebnisse der Simulationen für teilweise absorbierende Fassaden. Schliesslich werden in 4.6 Ergebnisse zum Einfluss von der Grundfläche des Innenhofs und der Stockwerkanzahl der Gebäude bei vollständig absorbierenden Fassaden dargestellt.

4.2. Materialisierungsvarianten reflektierende/absorbierende Fassaden – reflektierende/absorbierende Innenhofböden – reflektierende Balkonuntersichten

Es werden im Folgenden für alle Innenhof-Modelle die Ergebnisse der in Tabelle 8 dargestellten Simulationen verglichen.

Tabelle 8 Übersicht zu den Materialisierungsvarianten reflektierende/absorbierende Fassaden – reflektierende/absorbierende Innenhofböden – reflektierende Balkonuntersichten der generischen Modelle (Klein, Trapez, Mittel, Gross) sowie Zwicky und Müller-Martini.
(F = Fassaden; Ba = Balkonuntersicht; Bo = Boden; r = reflektierend; α = absorbierend)

	für alle Modelle			
F	r	r	α	α
Bo[1]	r	α	r	α
Ba	r	r	r	r

[1]Bei Zwicky und Müller-Martini wurden die Böden des Innenhofs auf der Basis des realen Innenhofs modelliert (teilweise absorbierend) und nicht variiert.

Die Ergebnisse für die Wirkung vollständig absorbierender Fassaden bei reflektierenden Balkonuntersichten auf die Early Decay Time *EDT* finden sich in Abbildung 10. Die über alle Übertragungsstrecken gemittelten *EDT*, mit reflektierenden Böden und Fassadenflächen, liegen bei den generischen Modellen mit vier Stockwerken bei 1.5–1.6 s und bei jenen mit sieben Stockwerken bei 2.5–2.7 s, Müller-Martini und Zwicky liegen dazwischen. Wenn die gesamte Fassade absorbierend gestaltet ist, vermindert sich im Fall von re-

flektierendem Boden die mittlere *EDT* im Mittel über alle generischen Modelle um 0.88±0.41 s. Mit absorbierendem Boden beträgt die Verminderung 0.67±0.32 s. Bei Zwicky und Müller Martini vermindert sich die mittlere *EDT* um 0.82 s resp. 0.79 s.

Die Wirkung der schallabsorbierenden Fassade ist gross, die zusätzliche Wirkung eines schallabsorbierenden Bodens im Innenhof (Rasen) Fall von absorbierenden Fassaden ist gering.

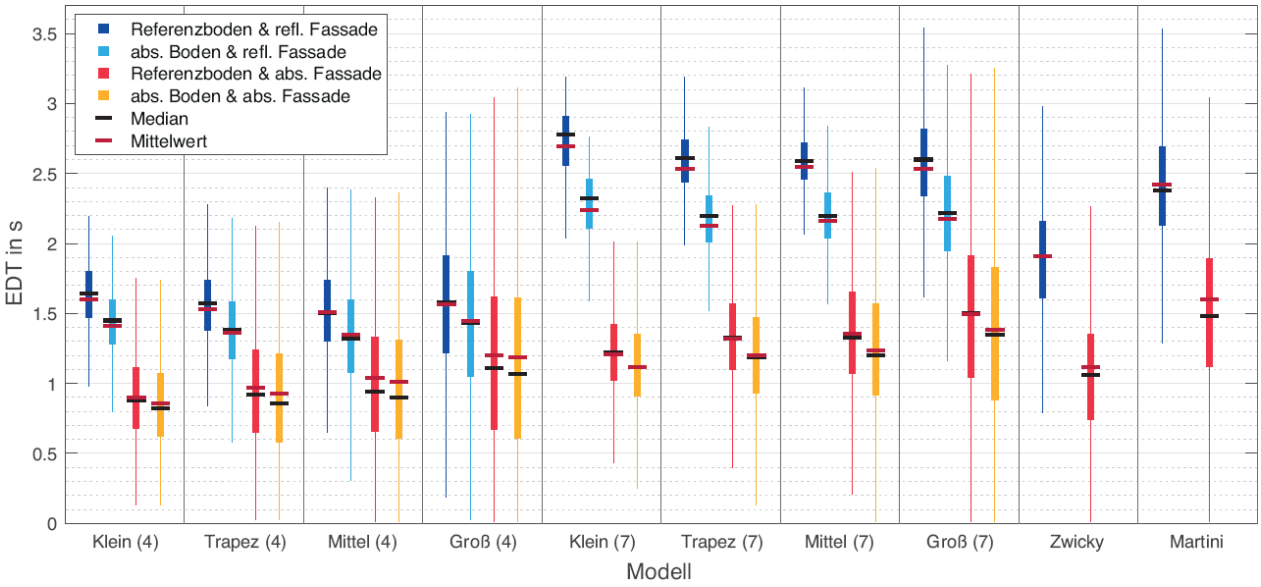

Abbildung 10 Wirkung vollständig absorbierender Fassadenflächen auf die *EDT* für alle Innenhofmodelle bei reflektierendem und absorbierendem Boden, dargestellt als Boxplots und Mittelwerte. Der Innenhofboden ist bei den generischen Modellen (Klein, Trapez, Mittel, Gross) reflektierend und bei Zwicky und Müller Martini wie im realen Innenhof. Die Balkonuntersichten sind immer reflektierend. In jedem Modell sind alle sechs möglichen Differenzen zwischen den Materialisierungsvarianten signifikant ($p < 0.01$). Bild aus [40] (Abbildung 4.1).

Auffällig ist, dass die *EDT* bei allen Modellen stark um den Mittelwert streut, wobei die Streuung bei absorbierender Fassade grösser ist. Die Verminderung wirkt sich also nicht gleichermassen auf alle Übertragungsstrecken aus.

In Abbildung 11 ist eine die gleiche Auswertung für die Nachhallzeit T_{20} dargestellt. Ein erster Blick zeigt, dass die Diagramme für *EDT* und T_{20} sehr ähnlich sind. Ein Auswertung zeigt, dass *EDT* und T_{20} mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0.992$ tatsächlich stark korrelieren (Abbildung 12). In der Folge dieses Berichts wird deshalb der Übersichtlichkeit halber darauf verzichtet, alle Ergebnisse für *EDT* zu diskutieren. Die T_{20} hat für unsere Betrachtung den Vorteil, dass sie sie ortsunabhängiger ist und die raumakustischen Simulationen die T_{20} eventuell etwas genauer vorhersagen können als die *EDT*, wie die Ergebnisse der Messungen im Müller-Martini-Innenhof (Abschnitt 3.2.4) zeigen.

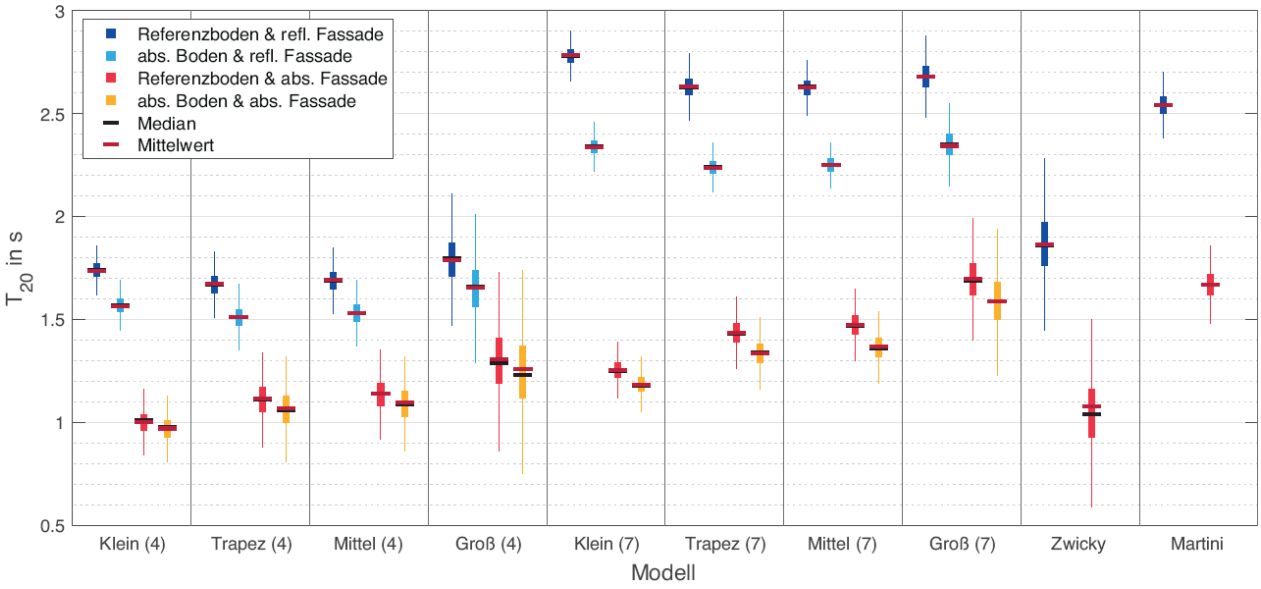

Abbildung 11 Wirkung vollständig absorbierender Fassadenflächen auf die T_{20} für alle Innenhofmodelle bei reflektierendem und absorbierendem Boden, dargestellt als Boxplots und Mittelwerte. Der Innenhofboden ist bei den generischen Modellen (Klein, Trapez, Mittel, Gross) reflektierend und bei Zwicky und Müller Martini wie im realen Innenhof. Die Balkonuntersichten sind immer reflektierend. In jedem Modell sind alle sechs möglichen Differenzen zwischen den Materialisierungsvarianten signifikant (p < 0.01). Bild aus [40] (Abbildung 4.2).

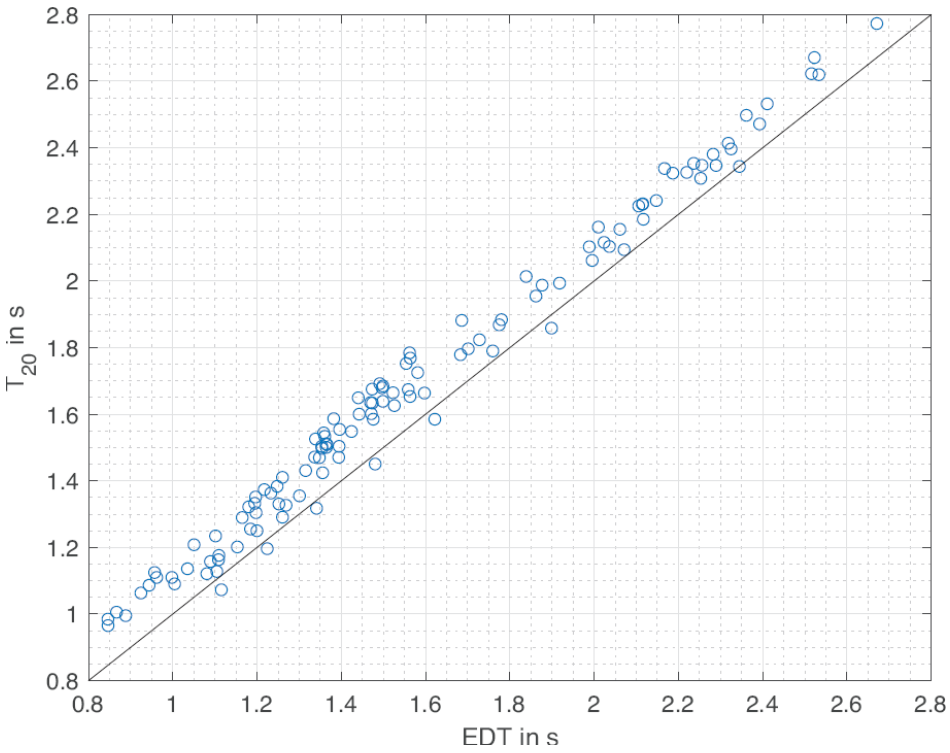

Abbildung 12 Korrelation zwischen Mittelwerten von *EDT* und T_{20} aller Materialisierungen für alle untersuchten Innenhofmodelle (r = 0.992). Im Mittel liegen die Werte für T_{20} um 0,11±0,06 s über denen der *EDT*. Bild aus [40] (Abbildung 4.3).

Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse der Auswertung für das Stärkemass *G*. Es zeigt sich, dass bei Modellen mit grösseren Grundflächen und damit mehr Übertragungsstrecken mit grösser Distanz zwischen Sender und Empfänger das Stärkemass *G* erwartungsgemäss geringer ist. Wesentlich für unsere Betrachtung ist die Verminderung des Stärkemasses. Es wird im Mittel über alle generischen Modelle durch absorbierende Böden um 1.1±0.1 dB verringert. Mit einer vollständig absorbierenden Fassade wird *G* im Mittel um 2.6±0.6 dB verringert, wenn der Boden reflektierend ist, und um 2.4±0.5 dB, wenn der Boden schon absorbierend ist. Die Verringerung ist für Müller Martini ähnlich gross. Auffällig ist, dass bei Zwicky die Verringerung des Stärkemasses mit 5.6 dB ungefähr doppelt so gross ausfällt wie bei den generischen Modellen. Zudem ist die Streuung bei Zwicky grösser, was auf die stark langgezogene Form des Innenhofes mit entsprechend breiter Verteilung von Übertragungsdistanzen zurückzuführen ist. Sowohl die schallabsorbierenden Fassaden als auch der schallabsorbierende Boden im Innenhof (Rasen) tragen zur Verminderung von *G* bei.

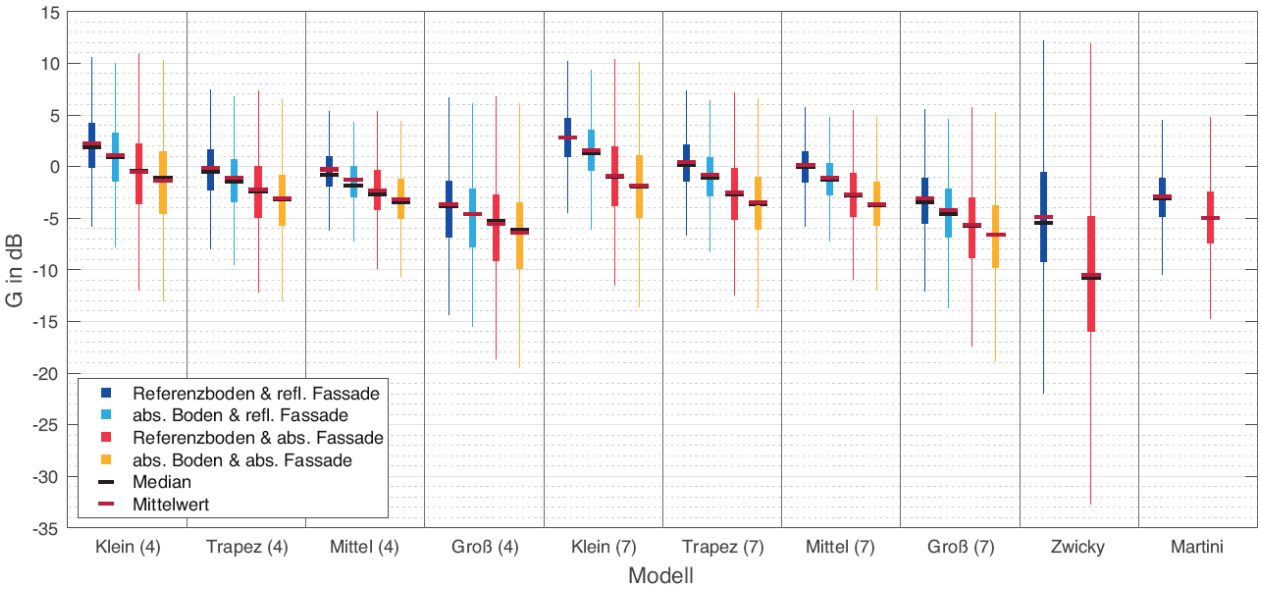

Abbildung 13 Wirkung von vollständig absorbierender Fassadenflächen auf *G* für alle Innenhofmodelle bei reflektierendem und absorbierendem Boden, dargestellt als Boxplots und Mittelwerte. Der Innenhofboden ist bei den generischen Modellen (Klein, Trapez, Mittel, Gross) reflektierend und bei Zwicky und Müller Martini wie im realen Innenhof. Die Balkonuntersichten sind immer reflektierend. In jedem Modell sind alle sechs möglichen Differenzen zwischen den Materialisierungsvarianten signifikant ($p < 0{,}01$). Bild aus [40] (Abbildung 4.4).

Die Auswertung für den Sprachübertragungsindex *STI* findet sich in Abbildung 14. Die über alle Übertragungsstrecken gemittelten *STI*, mit reflektierenden Böden und Fassadenflächen, liegen bei den generischen Modellen mit vier Stockwerken bei rund 0.60 und bei jenen mit sieben Stockwerken bei rund 0.50. Müller-Martini und Zwicky liegen etwas über 0.50. Im Mittel über alle generischen Modelle erhöht sich der mittlere *STI* vollständig absorbierende Fassaden um 0.08±0.02, bei Zwicky um 0.11, bei Martini um 0.06. Absorbierende Böden bei vollständig absorbierende Fassadenflächen erhöhen den *STI* lediglich um 0,02±0,01.

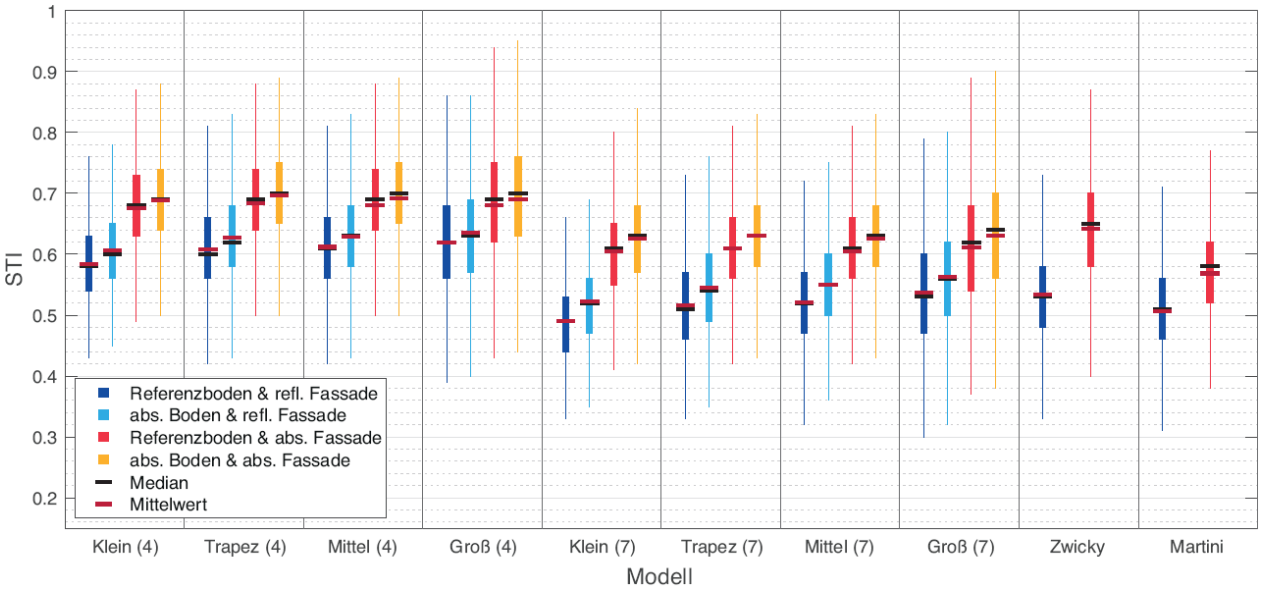

Abbildung 14 Wirkung vollständig absorbierender Fassadenflächen auf *STI* für alle Innenhofmodelle bei reflektierendem und absorbierendem Boden, dargestellt als Boxplots und Mittelwerte. Der Innenhofboden ist bei den generischen Modellen (Klein, Trapez, Mittel, Gross) reflektierend und bei Zwicky und Müller Martini wie im realen Innenhof. Die Balkonuntersichten sind immer reflektierend. In jedem Modell sind alle sechs möglichen Differenzen zwischen den Materialisierungsvarianten signifikant ($p < 0.01$). Bild aus [40] (Abbildung 4.5).

Schliesslich zeigt Abbildung 15 die Auswertung für das Echokriterium *EK*. Dabei wurden diejenigen Übertragungsstrecken gezählt, bei denen das Echokriterium ≥ 1.5 ist, also dort wo erwartet wird, dass mehr als 90% der Betroffenen ein Echo wahrnehmen. Ausgewiesen wurde der prozentuale Anteil solcher Überschreitungen bezogen auf alle Übertragungsstrecken. Weil damit nicht die kontinuierlichen Werte des Echokriteriums betrachtet werden, fand für diesen Parameter keine statistische Auswertung statt.

Der Anteil an Übertragungsstrecken mit der auf diese Weise definierten Echostörung liegt bei fast allen Modellen im einstelligen Prozentbereich. Nur beim Modell Gross (7) ist der Anteil knapp über 10%. Die vollständig absorbierende Fassade bewirkt im Mittel eine Reduktion um 0.9±0.9% bei reflektierendem Boden und um 0.9±1.0% bei absorbierendem. Bei Zwicky und Müller-Martini zeigt sich ein gegenteiliger Effekt. Schliesslich bewirkt bei den generischen Modellen ein absorbierender Boden eine geringe Erhöhung von 0.4±0.3%.

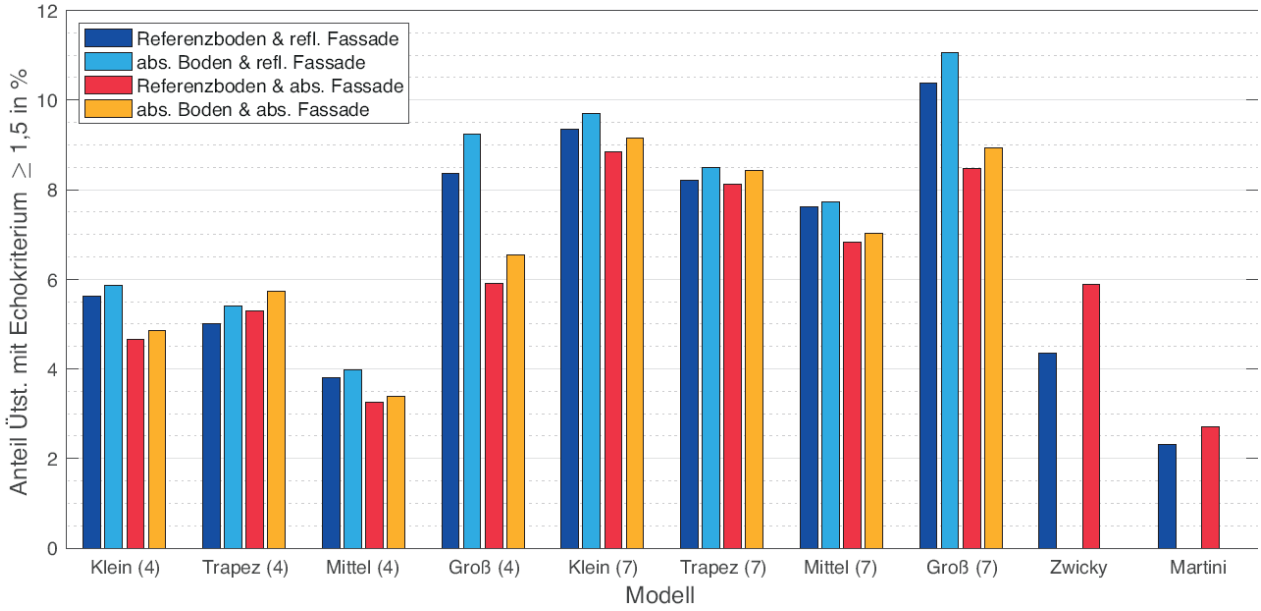

Abbildung 15 Wirkung vollständig absorbierender Fassadenflächen auf das Echokriterium für alle Innenhofmodelle bei reflektierendem und absorbierendem Boden, dargestellt als Anteil an Übertragungsstrecken mit Echokriterium ≥ 1.5. Der Innenhofboden ist bei den generischen Modellen (Klein, Trapez, Mittel, Gross) reflektierend und bei Zwicky und Müller Martini wie im realen Innenhof. Die Balkonuntersichten sind immer reflektierend. Bild aus [40] (Abbildung 4.5).

4.3. Materialisierungsvarianten reflektierende/absorbierende Fassaden – reflektierende Innenhofböden – reflektierende/absorbierende Balkonuntersichten

In diesem Abschnitt werde die Ergebnisse der Simulationen für die in Tabelle 9 dargestellten Kombinationen verglichen.

Tabelle 9 Übersicht zu den Materialisierungsvarianten reflektierende/absorbierende Fassaden – reflektierende Innenhofböden – reflektierende/absorbierende Balkonuntersichten
(F = Fassade, Ba = Balkonuntersicht, Bo = Boden, r = reflektierend, α = absorbierend)

	für alle Modelle			
F	r	r	α	α
Bo[1]	r	r	r	r
Ba	r	α	r	α

[1]Bei Zwicky und Müller-Martini wurden die Böden des Innenhofs auf der Basis des realen Innenhofs modelliert (teilweise absorbierend) und nicht variiert.

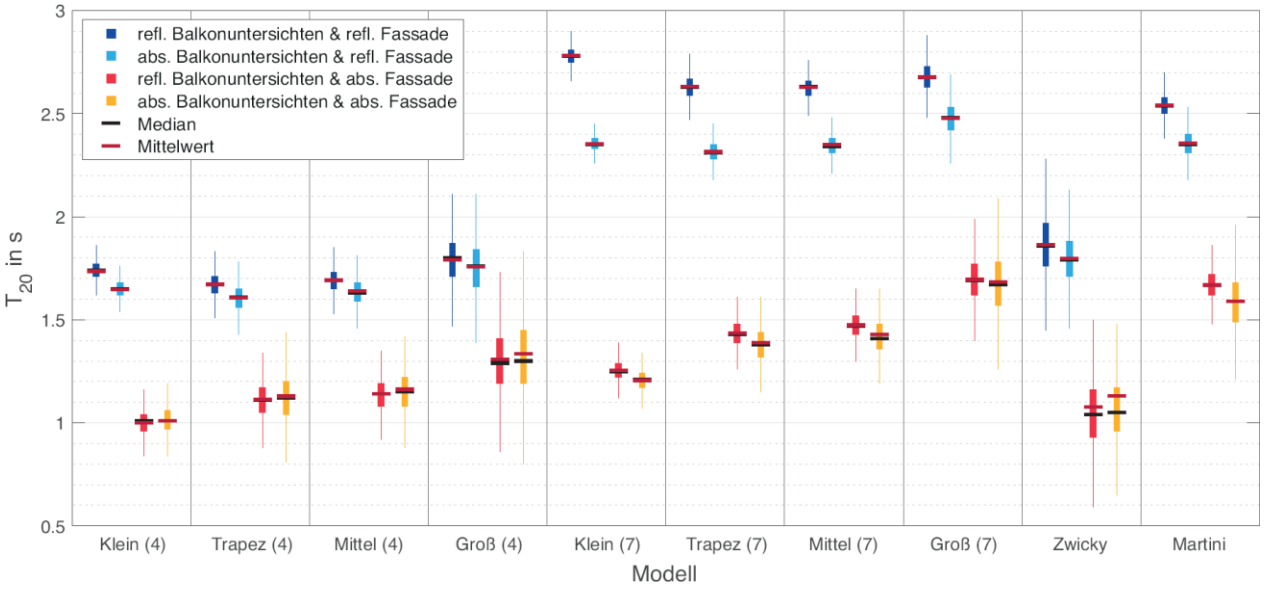

Abbildung 16 Wirkung absorbierender Balkonuntersichten auf T_{20}, dargestellt als Boxplots und Mittelwerte für alle Innenhofmodelle bei reflektierendem Boden, bei sowohl vollständig reflektierender als auch absorbierender Fassade. Der Innenhofboden ist bei den generischen Modellen (Klein, Trapez, Mittel, Gross) reflektierend und bei Zwicky und Müller Martini wie im realen Innenhof. In jedem Modell sind alle sechs möglichen Differenzen zwischen den Materialisierungsvarianten signifikant ($p < 0.01$). Bild aus [40] (Abbildung 4.9).

Abbildung 16 zeigt, dass sich die Nachhallzeit T_{20} bei reflektierenden und absorbierenden Fassaden durch das Hinzufügen von absorbierenden Balkonuntersichten nur gering vermindert wird. Im Mittel über die generischen Modelle sind es im Fall von reflektierenden Fassaden 0.18±0,15 s, für die Zwicky und Müller-Martini 0.07 s und 0.18 s. Bei vollständig absorbierender Fassaden sind es bei den generischen Modellen im Mittel 0.01±0.03 s wobei sich bei den niedrigen Modellen die T_{20} geringfügig verlängert. Der Vollständigkeit halber sind zusätzlich die Ergebnisse von *EDT* in Abbildung 17 dargestellt, welche denjenigen von T_{20} entsprechen.

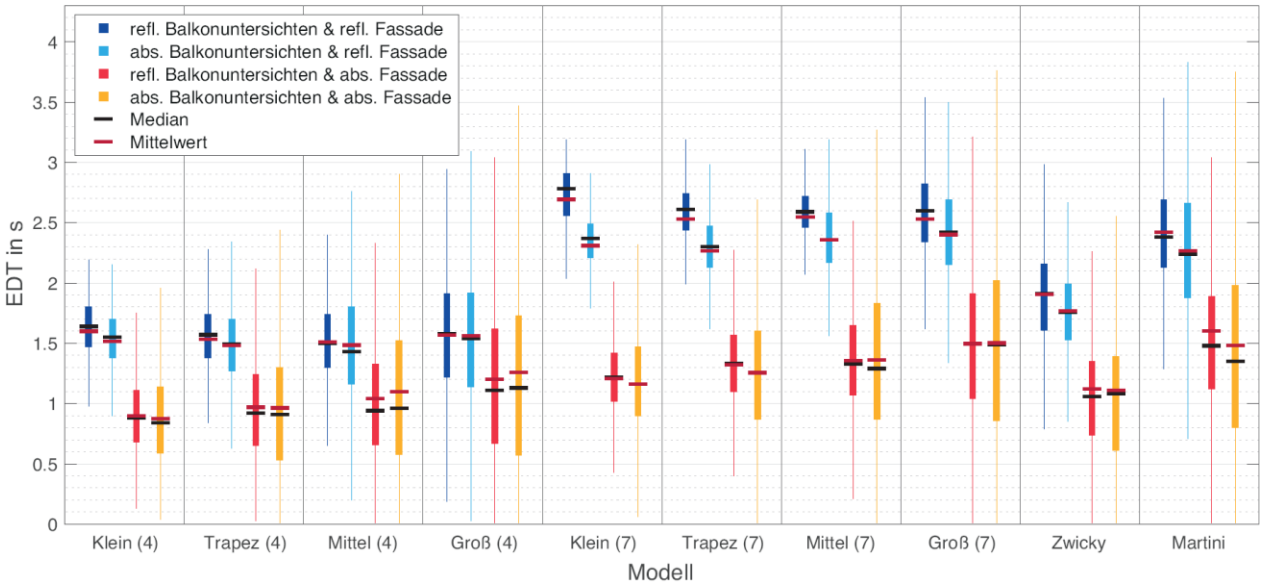

Abbildung 17 Wirkung absorbierender Balkonuntersichten auf *EDT*, dargestellt als Boxplots und Mittelwerte für alle Innenhofmodelle bei reflektierendem Boden, bei sowohl vollständig reflektierender als auch absorbierender Fassade. Der Innenhofboden ist bei den generischen Modellen (Klein, Trapez, Mittel, Gross) reflektierend und bei Zwicky und Müller Martini wie im realen Innenhof. In jedem Modell sind alle sechs möglichen Differenzen zwischen den Materialisierungsvarianten signifikant ($p < 0.01$). Bild aus [40] (Abbildung B.1).

Beim Stärkemass *G* (Abbildung 18) bewirken die absorbierenden Balkonuntersichten bei reflektierender Fassade im Mittel über die generischen Modelle eine Verringerung von *G* um 1.7±0.6 dB, resp. 2.6 dB bei Zwicky und 2.5 dB bei Müller-Martini. Bei schallabsorbierenden Fassaden ist der verringernde Effekt schallabsorbierender Balkonuntersichten bei den generischen Modellen im Mittel 1.5±0.5 dB, bei Zwicky 2.2 dB und bei Müller-Martini und 2.6 dB. Bei letztem erhöht sich im Gegensatz zu den generischen Modellen und dem Zwicky-Modell die Wirkung sogar geringfügig.

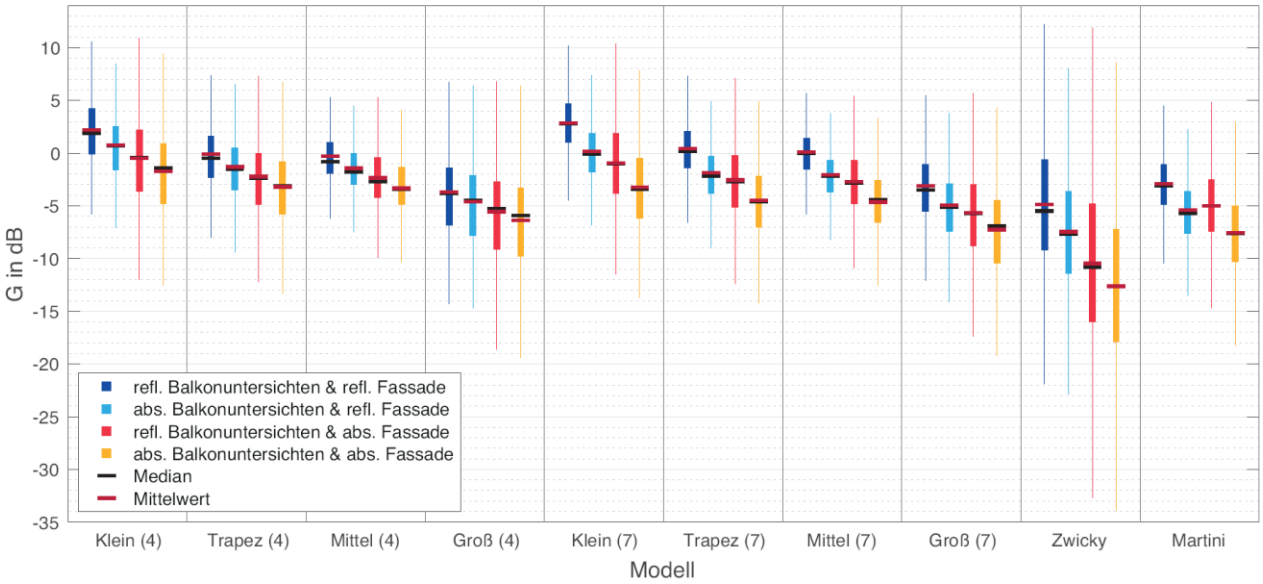

Abbildung 18 Wirkung absorbierender Balkonuntersichten auf *G*, dargestellt als Boxplots und Mittelwerte für alle Innenhofmodelle bei reflektierendem Boden, bei sowohl vollständig reflektierender als auch absorbierender Fassade. Der Innenhofboden ist bei den generischen Modellen (Klein, Trapez, Mittel, Gross) reflektierend und bei Zwicky und Müller Martini wie im realen Innenhof. In jedem Modell sind alle sechs möglichen Differenzen zwischen den Materialisierungsvarianten signifikant ($p < 0.01$). Bild aus [40] (Abbildung 4.10).

Beim Sprachübertragungsindex *STI* (Abbildung 19) bewirken die absorbierenden Balkonuntersichten bei reflektierender wie auch absorbierender Fassade einen leichten Anstieg. Bei den absorbierenden Fassaden ist beträgt die Erhöhung 0.03±0.01, bei Zwicky 0.04 und bei Müller-Martini 0.06.

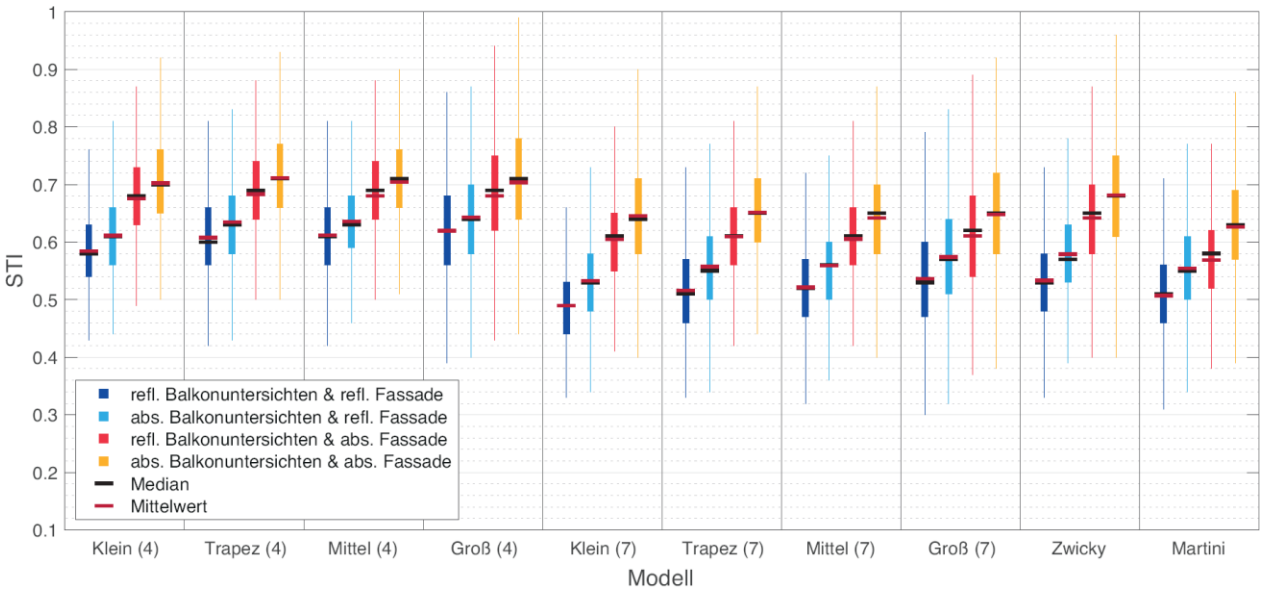

Abbildung 19 Wirkung absorbierender Balkonuntersichten auf *STI*, dargestellt als Boxplots und Mittelwerte für alle Innenhofmodelle bei reflektierendem Boden, bei sowohl vollständig reflektierender als auch absorbierender Fassade. Der Innenhofboden ist bei den generischen Modellen (Klein, Trapez, Mittel, Gross) reflektierend und bei Zwicky und Müller Martini wie im realen Innenhof. In jedem Modell sind alle sechs möglichen Differenzen zwischen den Materialisierungsvarianten signifikant ($p < 0.01$). Bild aus [40] (Abbildung 4.11).

In Abbildung 20 sind schliesslich die Ergebnisse für das Echokriterium dargestellt. Bei allen Modellen steigt der Anteil der Übertragungsstrecken mit Echostörungen an, wenn die Balkonuntersichten absorbierend sind. Dies gilt sowohl bei reflektierender als auch absorbierender Fassade. Bei absorbierender Fassade steigt im Mittel über die generischen Modelle der Anteil der Echostörungen um 2.8±1.0%. Bei Zwicky ist der Anstieg mit 5.8% fast doppelt so gross, bei Müller-Martini hingegen mit 1.9% deutlich geringer.

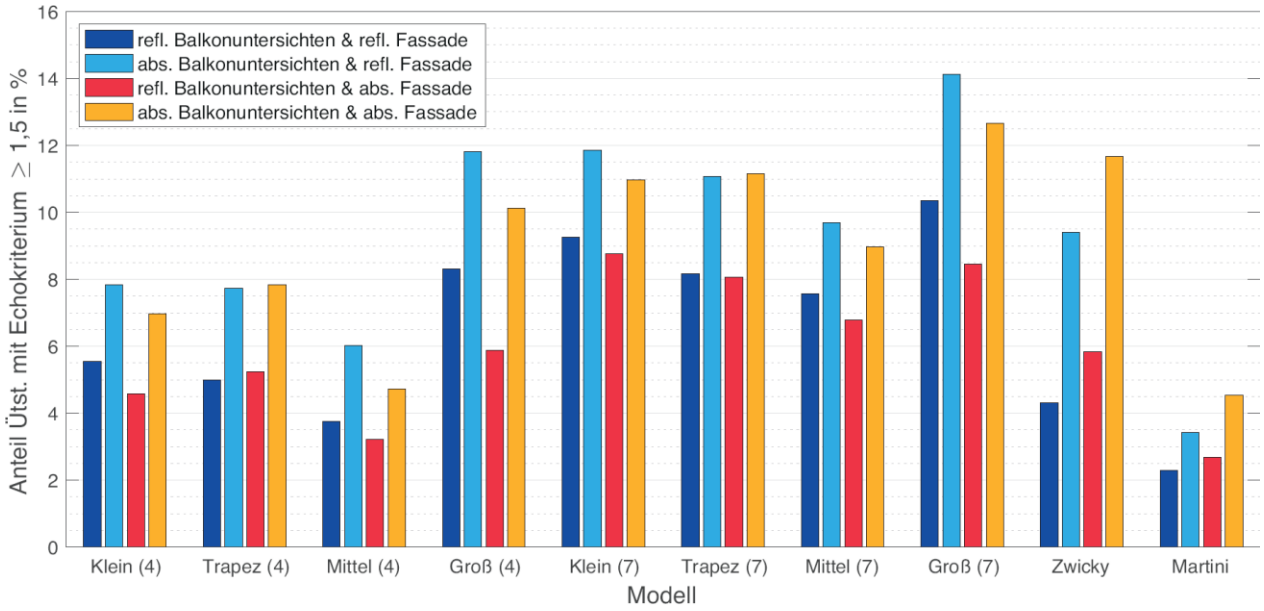

Abbildung 20 Wirkung absorbierender Balkonuntersichten auf das Echokriterium für alle Innenhofmodelle bei reflektierendem Boden, bei sowohl vollständig reflektierender als auch absorbierender Fassade, dargestellt als Anteil an Übertragungsstrecken mit Echokriterium ≥ 1.5. Der Innenhofboden ist bei den generischen Modellen (Klein, Trapez, Mittel, Gross) reflektierend und bei Zwicky und Müller Martini wie im realen Innenhof. Bild aus [40] (Abbildung 4.12).

Für einen Fall (generischen Modells Gross (7)) wurde die Betrachtung der Verteilung des Echokriteriums *EK* untersucht. Wie Abbildung 21 für den Fall vollständig absorbierender Fassadenfläche und reflektierendem Boden dargestellt, ergeben zusätzlich absorbierende Balkonuntersichten einens erhöhter Anteil an Übertragungsstrecken mit *EK* oberhalb des Schwellenwertes 1.5. Das Histogramm zeigt, dass in diesem Fall auch viel mehr Übertragungsstrecken Bereich zwischen 0.9 und 1.5 liegen, also der Bereich, in dem bereits ein gewisser Anteil an Betroffenen ein Echo wahrnimmt. Daraus lässt sich schliessen, dass die negative Wirkung deutlich stärker ist, als es sich anhand der einfachen Schwellwertbetrachtung ergibt.

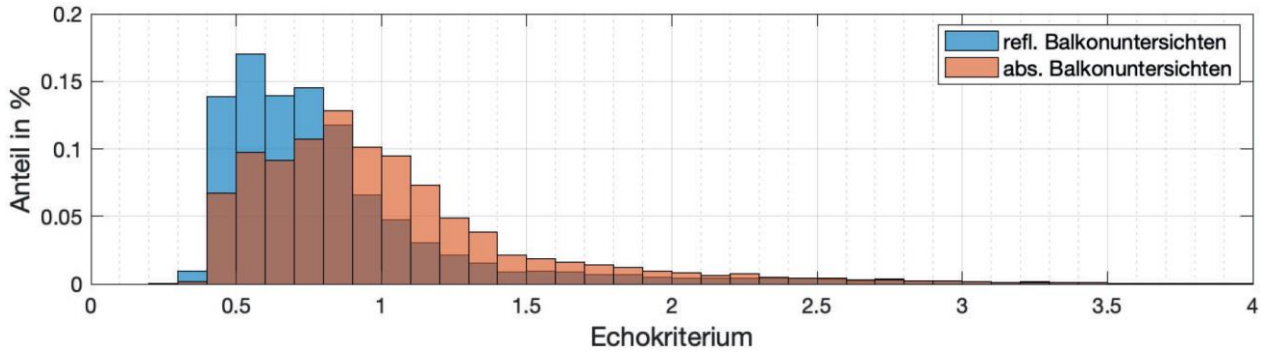

Abbildung 21 Histogramm des Echokriteriums für die beiden Materialisierungen der Balkonuntersichten: reflektierend & absorbierend. Die gesamte Fassadenfläche ist jeweils absorbierend und der Boden reflektierend gestaltet. Bild aus [40] (Abbildung 4.13).

4.4. Materialisierungsvarianten reflektierende/absorbierende Fassaden – absorbierende Innenhofböden – reflektierende/absorbierende Balkonuntersichten

In diesem Abschnitt werden ohne Kommentar der Vollständigkeit halber die Ergebnisse der Simulationen für die in Tabelle 10 dargestellten Kombinationen verglichen. Da der Boden für die Innenhöfe Zwicky und Müller Martini nicht variiert wurde, sind die entsprechenden Ergebnisse nicht dargestellt; sie finden sich in den entsprechenden Abbildungen von Abschnitt 4.3. Generell sind die Ergebnisse mit reflektierendem (Abschnitt 4.3) und absorbierendem Innenhofboden sehr ähnlich; die Diskussion der Parameter in Abschnitt 4.3 gelten deshalb sinngemäss auch für diesen Abschnitt.

Tabelle 10 Übersicht zu den Materialisierungsvarianten reflektierende/absorbierende Fassaden – absorbierende Innenhofböden – reflektierende/absorbierende Balkonuntersichten
(F = Fassade, Ba = Balkonuntersicht, Bo = Boden, r = reflektierend, α = absorbierend)

	für alle Modelle			
F	r	r	α	α
Bo[1]	α	α	α	α
Ba	r	α	r	α

[1]Bei Zwicky und Müller-Martini wurden die Böden es Innenhofs auf der Basis des realen Innenhofs modelliert (teilweise absorbierend) und nicht variiert.

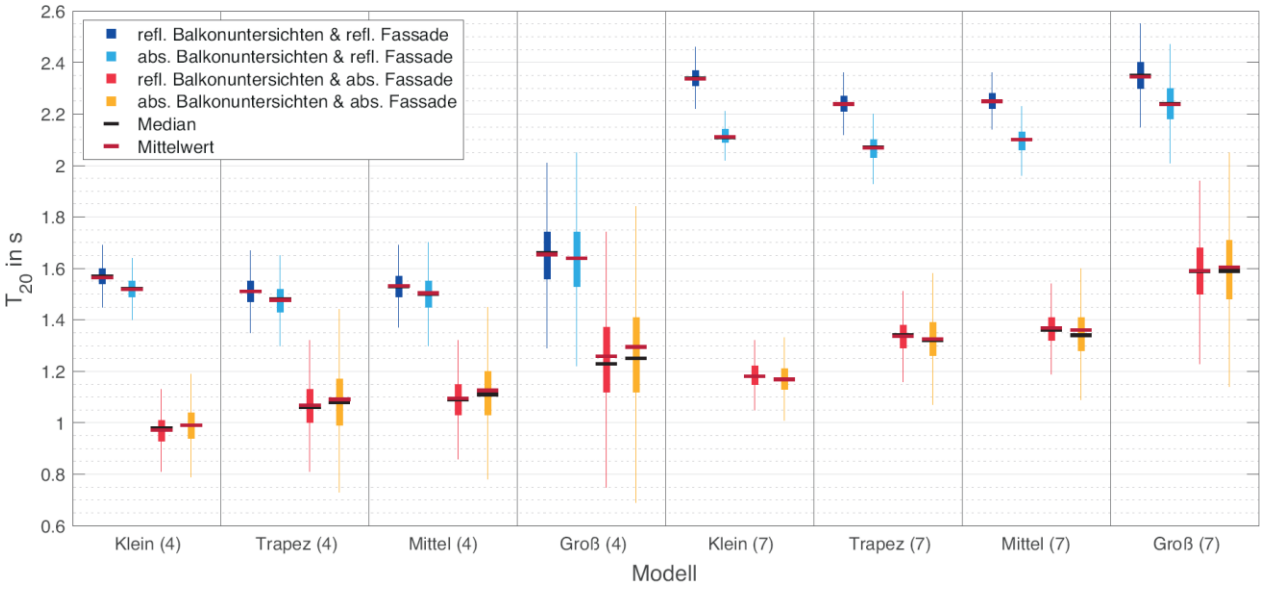

Abbildung 22 Wirkung absorbierender Balkonuntersichten auf die T_{20}, dargestellt als Boxplots und Mittelwerte für alle generischen Modelle mit absorbierendem Boden, bei sowohl vollständig reflektierender als auch vollständig absorbierender Fassade. In jedem Modell sind alle sechs möglichen Differenzen zwischen den Materialisierungsvarianten signifikant (p < 0.01). Bild aus [40] (Abbildung B.4).

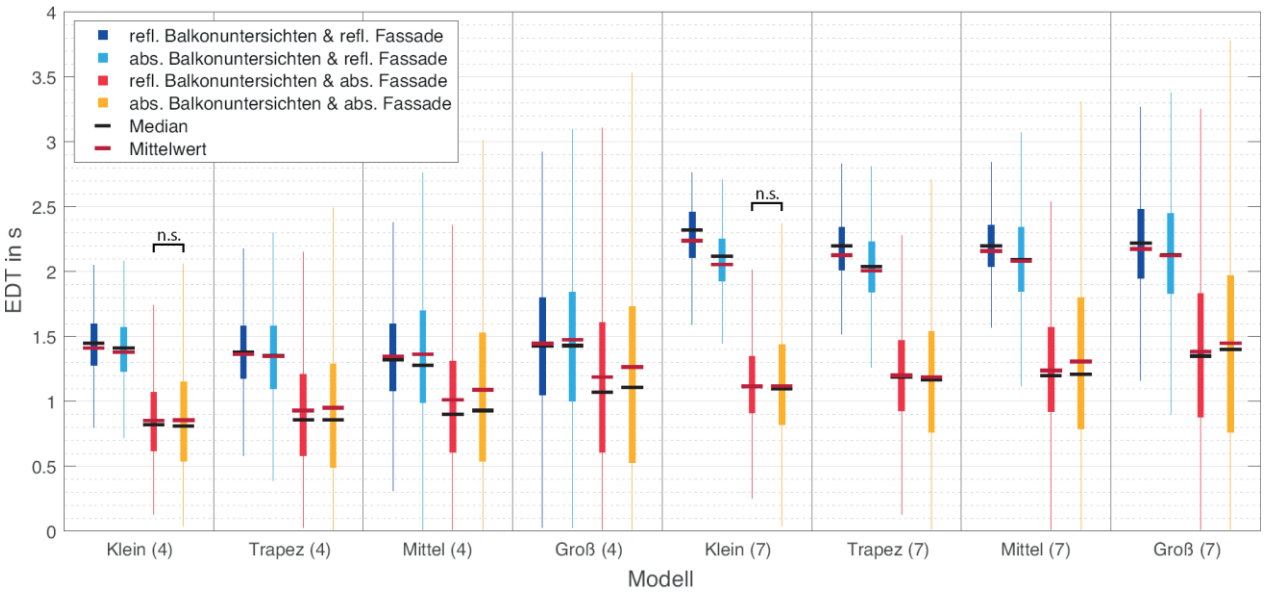

Abbildung 23 Wirkung absorbierender Balkonuntersichten auf die *EDT*, dargestellt als Boxplots und Mittelwerte für alle generischen Modelle mit absorbierendem Boden, bei sowohl vollständig reflektierender als auch vollständig absorbierender Fassade. Materialisierungsvarianten welche sich nicht signifikant (n.s.) mit p < 0.01 unterscheiden sind gekennzeichnet. Bild aus [40] (Abbildung B.3).

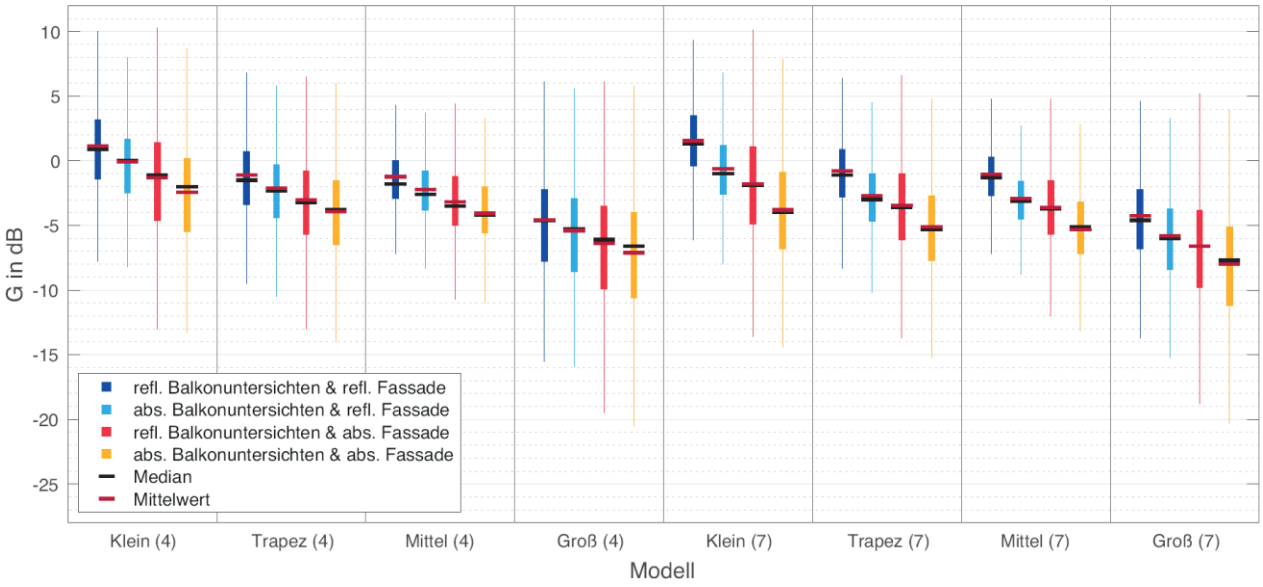

Abbildung 24 Wirkung absorbierender Balkonuntersichten auf *G*, dargestellt als Boxplots und Mittelwerte für alle generischen Modelle mit absorbierendem Boden, bei sowohl vollständig reflektierender als auch vollständig absorbierender Fassade. In jedem Modell sind alle sechs möglichen Differenzen zwischen den Materialisierungsvarianten signifikant ($p < 0.01$). Bild aus [40] (Abbildung B.5).

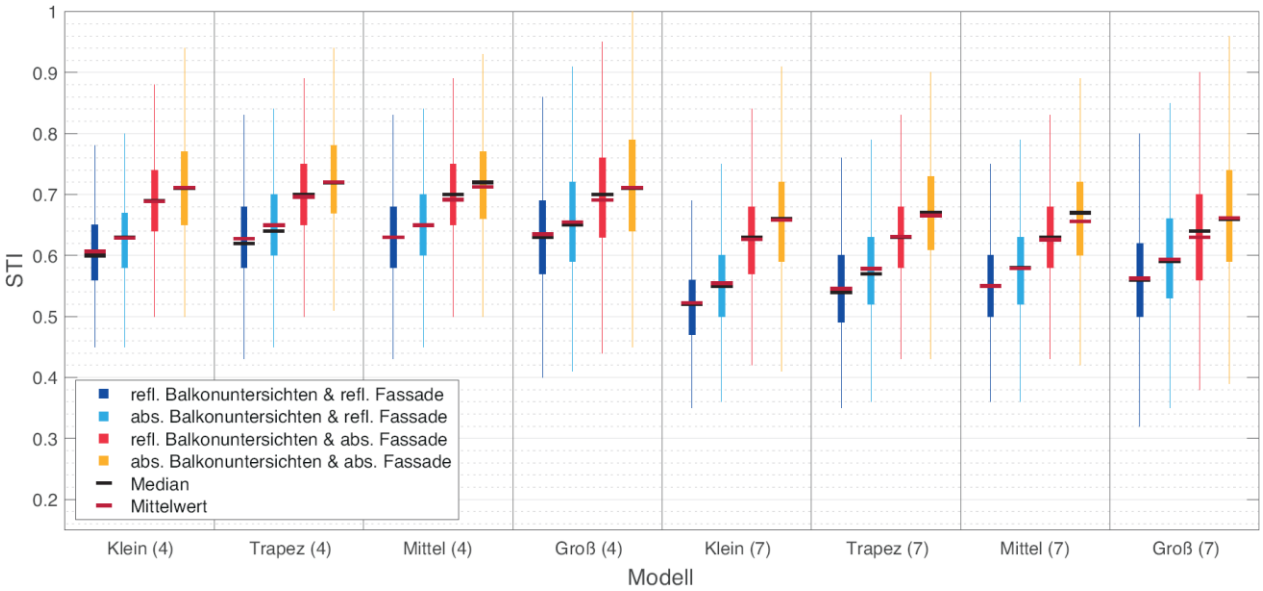

Abbildung 25 Wirkung absorbierender Balkonuntersichten auf den *STI*, dargestellt als Boxplots und Mittelwerte für alle generischen Modelle mit absorbierendem Boden, bei sowohl vollständig reflektierender als auch vollständig absorbierender Fassade. In jedem Modell sind alle sechs möglichen Differenzen zwischen den Materialisierungsvarianten signifikant ($p < 0.01$). Bild aus [40] (Abbildung B.6).

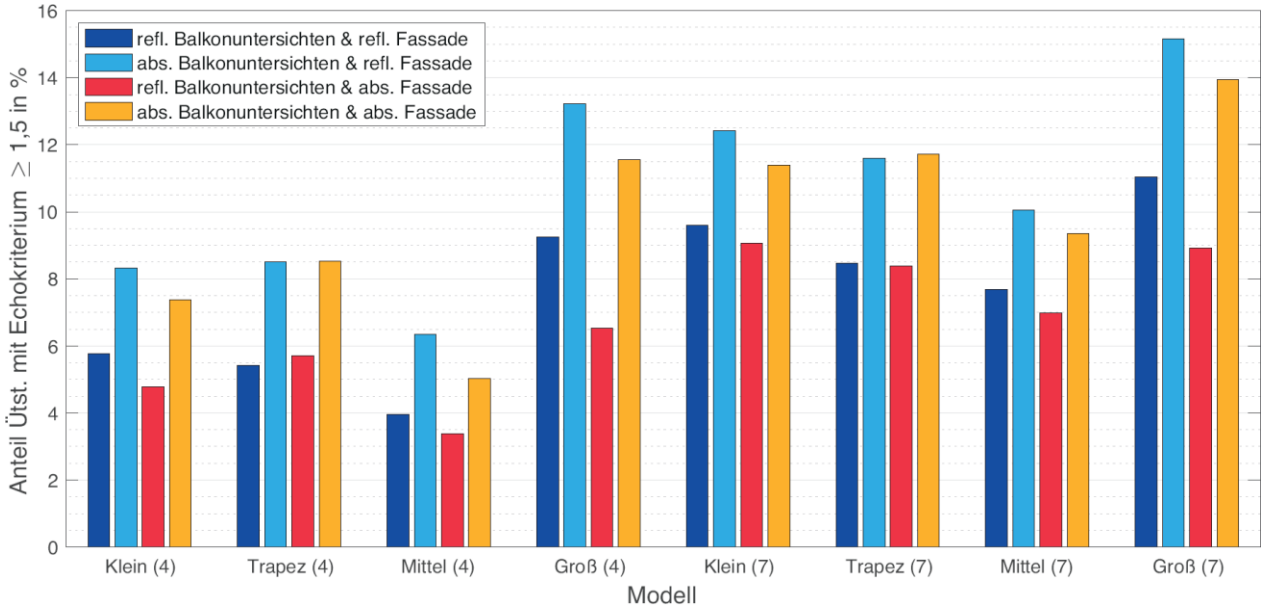

Abbildung 26 Wirkung absorbierender Balkonuntersichten auf das Echokriterium für alle Innenhofmodelle mit absorbierendem Boden, bei sowohl vollständig reflektierender als auch vollständig absorbierender Fassade, dargestellt als Anteil an Übertragungsstrecken mit Echokriterium ≥ 1.5. Bild aus [40] (Abbildung B.7).

4.5. Materialisierungsvarianten teilweise absorbierende Fassaden – reflektierende Innenhofböden – reflektierende Balkonuntersichten

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Simulationen verglichen, bei denen schrittweise von unten nach oben ein Stockwerk mehr schallabsorbierend verkleidet ist (Tabelle 11–Tabelle 14). Bei den Simulationen wurde jeweils reflektierender Boden verwendet, resp. bei Zwicky und Müller-Martini der reale Boden (teilweise absorbierend). Die Balkonuntersichten waren reflektierend.

Tabelle 11 Übersicht zu den Materialisierungsvarianten mit teilweise absorbierenden Fassaden der generischen Modelle (Klein, Trapez, Mittel, Gross) mit vier Stockwerken.
(F = Fassade; 1, 2, 3, 4 = Stockwerk; U = Balkonuntersicht; B = Boden; r = reflektierend; α = absorbierend)

F4	r	r	r	r	α
F3	r	r	r	α	α
F3	r	r	α	α	α
F1	r	α	α	α	α
B	r	r	r	r	r
U	r	r	r	r	r

Tabelle 12 Übersicht zu den Materialisierungsvarianten mit teilweise absorbierenden Fassaden der generischen Modelle (Klein, Trapez, Mittel, Gross) mit sieben Stockwerken (Var. = Materialisierungsvariante; F = Fassade; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 = Stockwerk; U = Balkonuntersicht; B = Boden; r = reflektierend; α = absorbierend)

F7	r	r	r	r	r	r	r	α
F6	r	r	r	r	r	r	α	α
F5	r	r	r	r	r	α	α	α
F4	r	r	r	r	α	α	α	α
F3	r	r	r	α	α	α	α	α
F3	r	r	α	α	α	α	α	α
F1	r	α	α	α	α	α	α	α
B	r	r	r	r	r	r	r	r
U	r	r	r	r	r	r	r	r

Tabelle 13 Übersicht zu den Materialisierungsvarianten mit teilweise absorbierenden Fassaden bei Zwicky mit fünf Stockwerken (Var. = Materialisierungsvariante; F = Fassade; 1, 2, 3, 4, 5 = Stockwerk; U = Balkonuntersicht; B = Boden; r = reflektierend; α = absorbierend)

F5	r	r	r	r	r	α
F4	r	r	r	r	α	α
F3	r	r	r	α	α	α
F3	r	r	α	α	α	α
F1	r	α	α	α	α	α
U	r	r	r	r	r	r

Tabelle 14 Übersicht zu den Materialisierungsvarianten mit teilweise absorbierenden Fassaden bei Müller-Martini mit sieben Stockwerken (Var. = Materialisierungsvariante; F = Fassade; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 = Stockwerk; U = Balkonuntersicht; B = Boden; r = reflektierend; α = absorbierend)

F7	r	r	r	r	r	r	r	α
F6	r	r	r	r	r	r	α	α
F5	r	r	r	r	r	α	α	α
F4	r	r	r	r	α	α	α	α
F3	r	r	r	α	α	α	α	α
F3	r	r	α	α	α	α	α	α
F1	r	α	α	α	α	α	α	α
U	r	r	r	r	r	r	r	r

In der Bachelorarbeit wurden nur T_{20} (Abbildung 27), *EDT* (Abbildung 28) und das Stärkemass *G* (Abbildung 29) besprochen bzw. dargestellt , was wie folgt begründet wurde: [40]:

> Für den *STI* ist sie [die Betrachtung] nicht relevant, da dessen Anstieg eine in Kauf zu nehmende Verschlechterung der Privatsphäre darstellt, welche sich aber bereits bei einer vollständig absorbierenden Fassade mit einer Verbesserung des *STI* um circa 0.1 als nicht besonders stark herausgestellt hat. Beim Echokriterium dagegen zeigte sich die Wirkung durch eine vollständig absorbierende Fassade als nicht

eindeutig. Ebenso war der Effekt vernachlässigbar klein, weshalb hier die Betrachtung teilabsorbierender Fassadenflächen keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn bringt.

Sowohl bei der Nachhallzeit T_{20} bzw. *EDT* als auch beim Stärkemass *G* fällt auf, dass die Verminderung pro hinzugefügtem schallabsorbierendem Stockwerk relativ gleichmässig verläuft. Jedenfalls zeigt sich keinesfalls eine Schwelle, ab der ein deutlicher Anstieg (bzw. eine deutliche Abnahme) der Wirkung festzustellen wäre. Somit bring jedes hinzugefügte Stockwerk eine deutliche Verbesserung.

Die Nachhallzeit T_{20} (Abbildung 27) vermindert sich durch das schrittweise Hinzufügen eines höher liegenden Geschosses mit absorbierender Fassade unabhängig vom Modell um mehr als 5%, was mehr als die gerade wahrnehmbare Änderung JND ist. Ausnahmen bilden dabei nur das oberste Stockwerk im Modell Gross (7) mit einer Verringerung um 0.08 s und das vorletzte Stockwerk bei Müller-Martini mit 0.09 s. Bei fast allen Modellen verringert damit selbst das oberste Stockwerk die Nachhallzeit T_{20} noch wahrnehmbar. Dennoch nimmt bei den hohen generischen Modellen die Effektstärke deutlich ab, je mehr Stockwerke bereits absorbierend verkleidet sind. Im Mittel über alle Modelle bewirkt die absorbierende Fassadenfläche des untersten Stockwerks eine Verkürzung der T_{20} um 0.21±0,07 s, die des obersten Stockwerks im Mittel hingegen nur noch 0.10±0,02 s. Bei Zwicky und Müller-Martini fällt auf, dass die Verminderung von T_{20} durch das unterste Stockwerk besonders gross ist, was auch beim obersten Stockwerk zu beobachten ist. Dies ist auf die bei diesen Stockwerken vergleichsweisen grösseren Flächenanteilen für die Absorption zurückzuführen.

Der Vollständigkeit halber ist in Abbildung 28 die Auswertung für *EDT* dargestellt. Die obigen Beobachtungen für T_{20} gelten auch für *EDT*, allerdings ist die Streuung deutlich höher.

Die Wirkung der geschossweisen Änderung der Fassadenmaterialisierung auf das Stärkemass *G* (Abbildung 29) ist geringer als die gerade wahrnehmbare Änderung JND von 1 dB. Das Modell Zwicky bildet dabei jeweils beim untersten und obersten Stockwerk die Ausnahme. In beiden Fällen ist die absorbierende Fassadenfläche aber aufgrund des geringeren Fensteranteils deutlich grösser als bei den anderen Stockwerken. Wie erwartet zeigt sich auch hier eine Verringerung der Wirkung, je mehr Anteil an der gesamten Fassade bereits absorbierend gestaltet ist. Zudem ist die Streuung der Daten gross. Die mittlere Änderung pro absorbierendes Stockwerk liegt bei den generischen Modellen bei 0.5±0.1 dB, bei Zwicky dagegen bei 1.1 dB und bei Müller-Martini bei etwa 0.5 dB.

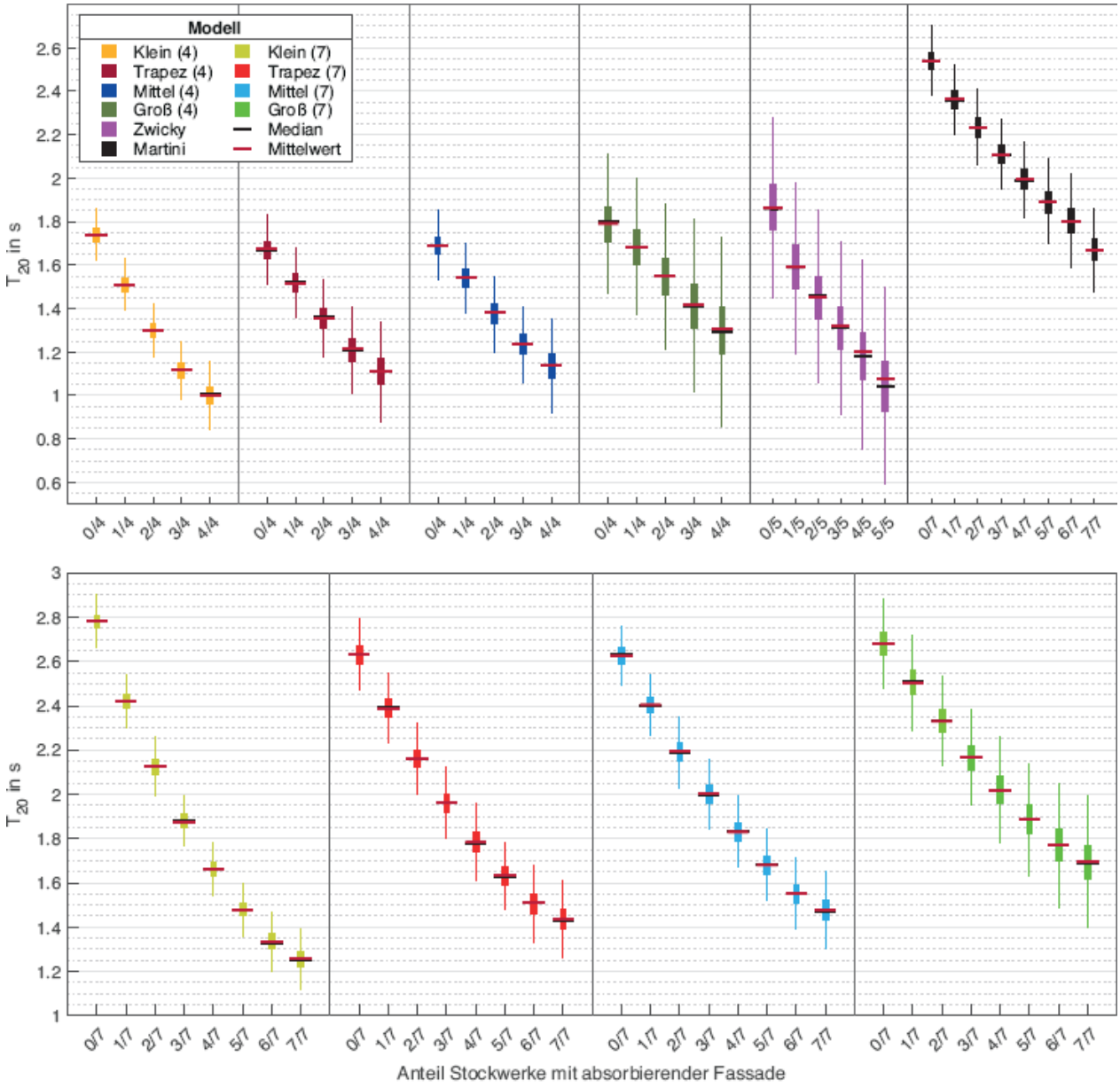

Abbildung 27 Wirkung teilweise absorbierender Fassaden auf T_{20} für alle Innenhofmodelle bei Referenzboden, dargestellt als Boxplots und Mittelwerte. Der Innenhofboden ist bei den generischen Modellen (Klein, Trapez, Mittel, Gross) reflektierend und bei den Zwicky und Müller-Martini wie im realen Innenhof. Die Balkonuntersichten sind immer reflektierend. Die absorbierende Fassadenfläche nimmt geschossweise von unten nach oben hin zu. In jedem Modell sind alle sechs möglichen Differenzen zwischen den Materialisierungsvarianten signifikant ($p < 0.01$). Bild aus [40] (Abbildung 4.7).

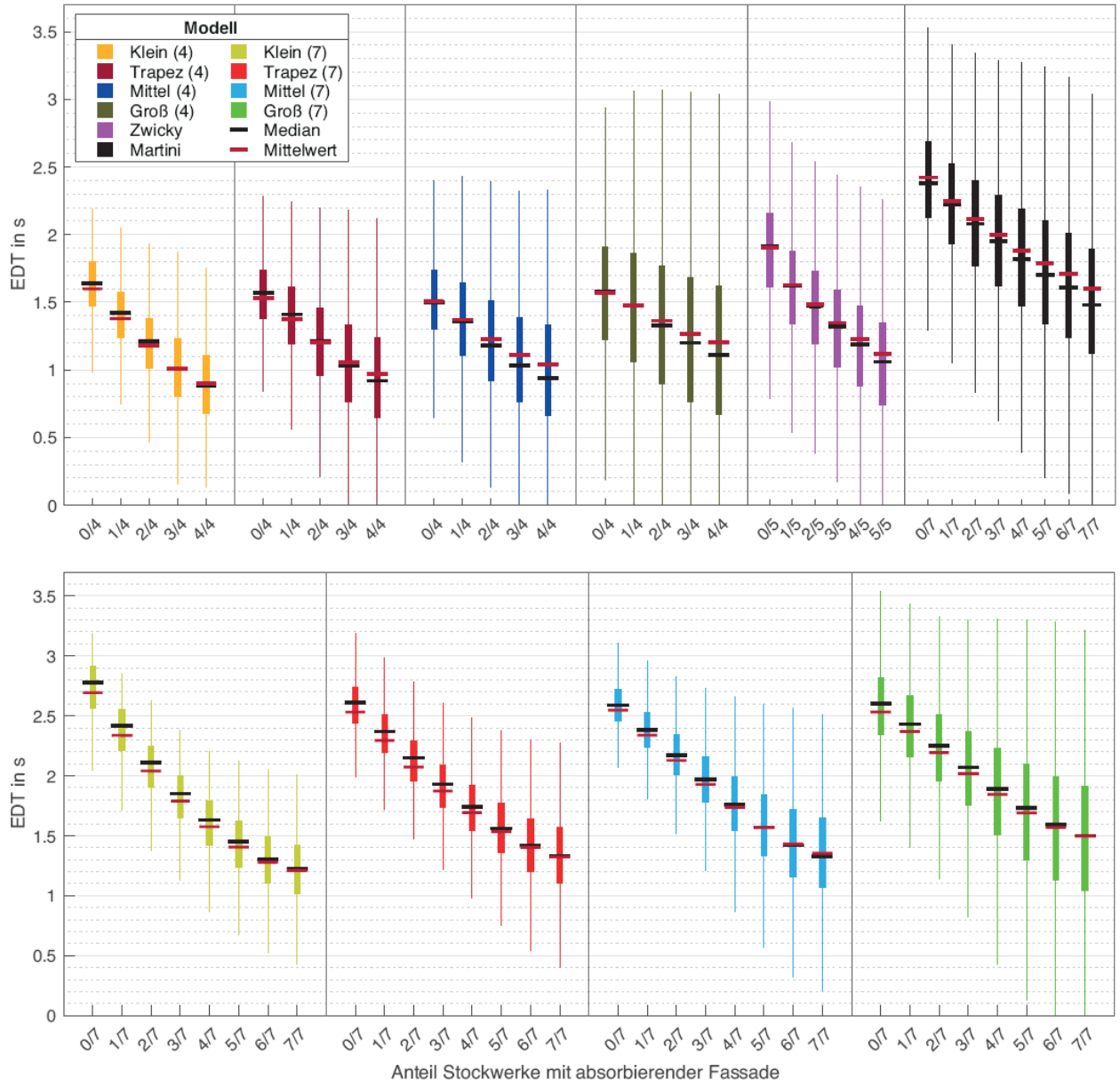

Abbildung 28 Wirkung teilweise absorbierender Fassaden auf *EDT* für alle Innenhofmodelle bei Referenzboden, dargestellt als Boxplots und Mittelwerte. Der Referenzboden ist bei den generischen Modellen (Klein, Trapez, Mittel, Gross) reflektierend und bei den Zwicky und Müller-Martini wie im realen Innenhof. Die Balkonuntersichten sind immer reflektierend. Die absorbierende Fassadenfläche nimmt geschossweise von unten nach oben hin zu. In jedem Modell sind alle sechs möglichen Differenzen zwischen den Materialisierungsvarianten signifikant (p < 0.01). Bild aus [40] (Abbildung B.2).

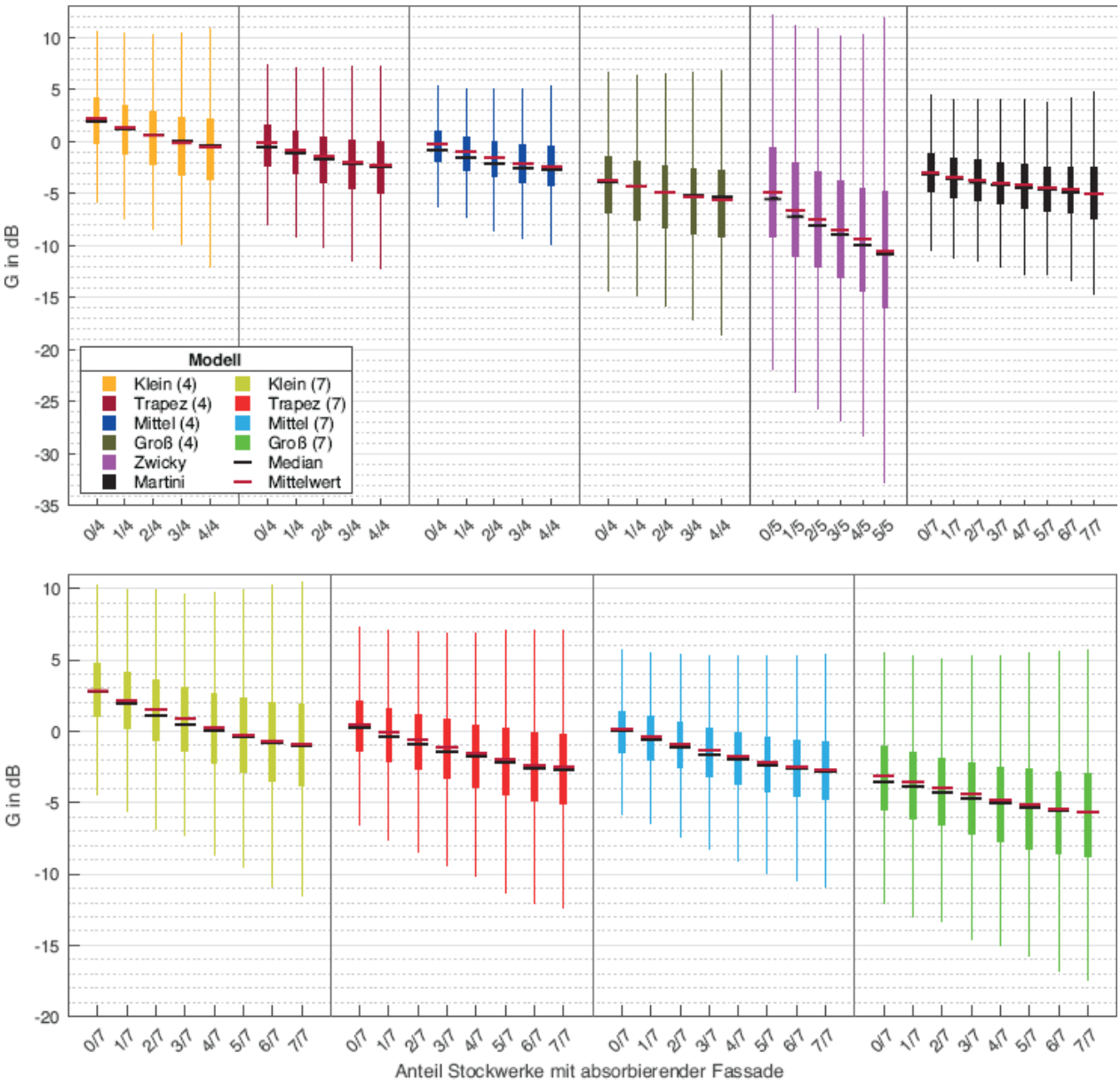

Abbildung 29 Wirkung teilweise absorbierender Fassaden auf *G* für alle Innenhofmodelle bei Referenzboden, dargestellt als Boxplots und Mittelwerte. Der Referenzboden ist bei den generischen Modellen (Klein, Trapez, Mittel, Gross) reflektierend und bei den und bei den Zwicky und Müller-Martini wie im realen Innenhof. Die Balkonuntersichten sind immer reflektierend. Die absorbierende Fassadenfläche nimmt geschossweise von unten nach oben hin zu. In jedem Modell sind alle sechs möglichen Differenzen zwischen den Materialisierungsvarianten signifikant ($p < 0.01$). Bild aus [40] (Abbildung 4.8).

4.6. Einfluss von Grundfläche und Stockwerkanzahl bei vollständig absorbierenden Fassaden.

In diesem Abschnitt wird der Einfluss von Grundfläche und Anzahl Stockwerke auf die Wirkung vollständig absorbierender Fassaden bzw. vollständig absorbierender Balkonuntersichten auf die untersuchten raumakustischen Parameter gezeigt. Es werden nur die generischen Modelle betrachtet, da dies weitere Einflussfaktoren wie beispielsweise ein anderes Verhältnis zwischen Fenster- und Fassadenfläche oder die Balkonfläche als mögliche weitere, unkontrollierbare Einflussfaktoren für eine veränderte Wirkung der Materialisierung ausschliesst.

In Abbildung 30 sind die Änderungen der raumakustischen Parameter bei vollständig absorbierender Fassade und reflektierenden Balkonuntersichten dargestellt. Die Änderungen sind jeweils gepoolt über die Bodenmaterialisierung (reflektierend und absorbierend). Das Echokriterium wird dabei nicht dargestellt, da die Wirkung der absorbierenden Fassade vernachlässigbar gering ist (siehe oben).

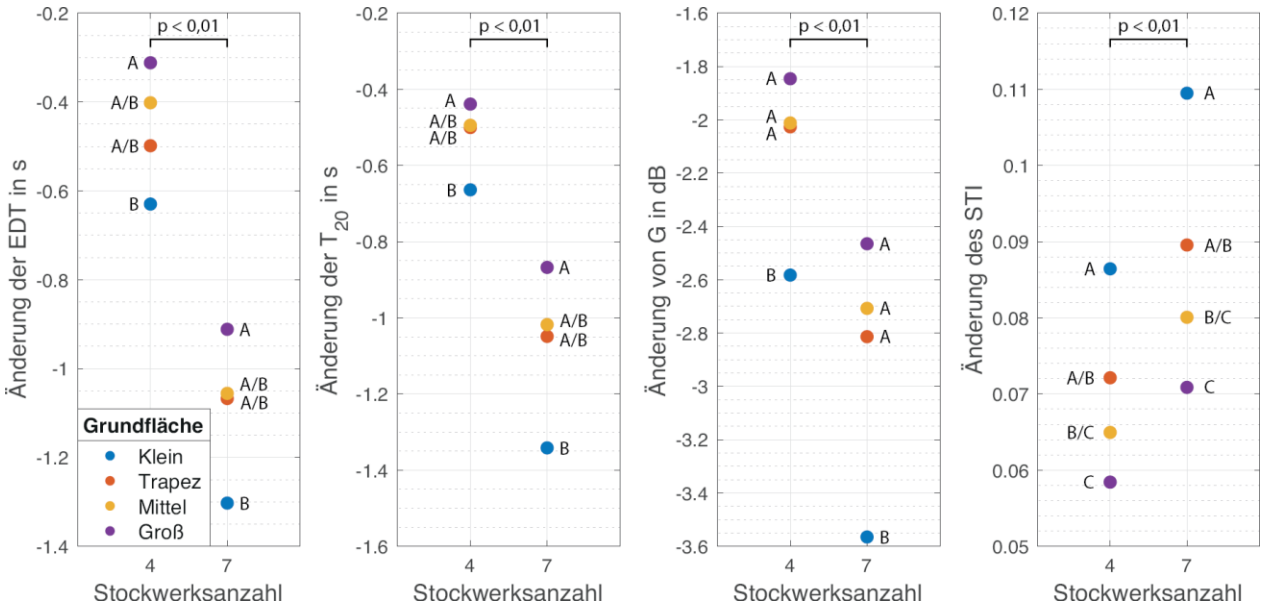

Abbildung 30 Abbildung 4.14: Modellabhängige Änderung der raumakustischen Parameter *EDT*, T_{20}, *G* und *STI* durch vollständig absorbierende Fassade im Vergleich zur vollständig reflektierender Fassade, gepoolt über die Bodenmaterialisierung (reflektierend und absorbierend). Dabei sind die Balkonuntersichten immer reflektierend. Die Buchstaben A, B & C repräsentieren Gruppen, die statistisch unterschiedlichen Grundgesamtheiten entstammen. Datenpunkte mit unterschiedlichen Buchstaben weisen eine signifikante Differenz im jeweiligen Parameter bei verschiedener Grundfläche auf ($p < 0.01$). Datenpunkte mit zwei Buchstaben unterscheiden sich zwischen diesen Gruppen nicht signifikant ($p \geq 0.01$). Ausserdem weist ein Verbindungsmarker die Signifikanz zwischen Modellen mit 4 und 7 Stockwerken aus ($p < 0.01$). Bild aus [40] (Abbildung 4.14).

Bei allen vier dargestellten Parametern ist die Wirkung der absorbierenden Fassade bei den Innenhöfen mit vier Stockwerken signifikant geringer als bei jenen mit sieben Stockwerken ($p < 0.01$). Die Verringerung von T_{20} und *EDT* der hohen Innenhöfe ist bei gleicher Grundfläche um etwa 0.5–0.6 s grösser als bei den entsprechenden niedrigen. Beim Stärkemass *G* beträgt der Unterschied im Mittel 0.8±0.2 dB und beim *STI* 0.02, was vernachlässigbar gering ist.

Zudem zeigt sich, dass auch die Grundfläche einen signifikanten Einfluss auf die Effektstärke haben kann. Welche der Grundflächen sich allerdings in der Effektstärke signifikant voneinander unterscheiden, ist zwischen den raumakustischen Parametern unterschiedlich. Bei T_{20} und *EDT* ist dies beispielsweise nur zwischen der kleinen und grossen Grundfläche der Fall. Bei dem Stärkemass *G* unterscheidet sich nur die grosse Grundfläche signifikant von den anderen. Bei allen Parametern weist die jeweils kleinere Grundfläche weist die grösste Effektstärke auf. Dadurch erfährt das Modell Gross (4) durch die absorbierende Fassade immer die kleinste Wirkung, wohingegen sich deren Wirkung am stärksten beim Modell Klein (7) äussert. Dies war zu erwarten, da Gross (4) am weitesten von einem Raum entfernt ist und am stärksten in Richtung eines offenen Platzes geht. Das Gegenstück dazu bildet Klein (7), welches am meisten einem "normalen" Raum mit Decke entspricht. Diese Betrachtungsweise stellt das bildliche Gegenstück zur Argumentation der Flächenverhältnisse zwischen Decke und Gesamtoberfläche dar.

Auffällig ist, dass bei keinem der raumakustischen Parameter ein signifikanter Unterschied zwischen der mittleren und trapezförmigen Grundfläche besteht. Diese haben sehr ähnlich grosse Grundflächen (Abbildung 3), aber bei den trapezförmigen Modellen sind die Längsseiten als einzige nicht parallel zueinander angeordnet.

Ein sehr ähnliches Bild zeigt die Betrachtung der modellabhängigen Wirkung bei vollständig reflektierenden Balkonuntersichten und bei vollständig absorbierender Fassade, welche in Abbildung 30 dargestellt ist. Auch hier ist über die Bodenmaterialisierung gepoolt, und es wird nur der Fall mit bereits vollständig absorbierender Fassade betrachtet. Da die Wirkung auf T_{20} und *EDT* sehr gering ist, wird diese hier nicht dargestellt.

Die Effektstärke der absorbierenden Balkonuntersichten ist insgesamt geringer als die der absorbierenden Fassaden, weshalb sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Grundflächen zeigen. Ausgenommen davon sind die grossen Modelle beim Echokriterium, bei welchen die absorbierenden Balkonuntersichten für einen signifikant grösseren Anteil an Übertragungsstrecken mit Echostörung sorgen. Hingegen gibt es beim Echokriterium bezüglich der Stockwerkanzahl keinen signifikanten Unterschied. Beim Stärkemass *G* und *STI* beeinflusst die Anzahl der Stockwerke die Effektstärke der Balkonmaterialisierung, wie zu erwarten, signifikant ($p < 0.01$). Die Wirkung bei den hohen Modellen ist bei *G* im Mittel 0.9±0.1 dB grösser als beim jeweiligen niedrigen Modell gleicher Grundfläche. Beim *STI* ist dieser Unterschied, obwohl statistisch signifikant, vernachlässigbar gering (0.01).

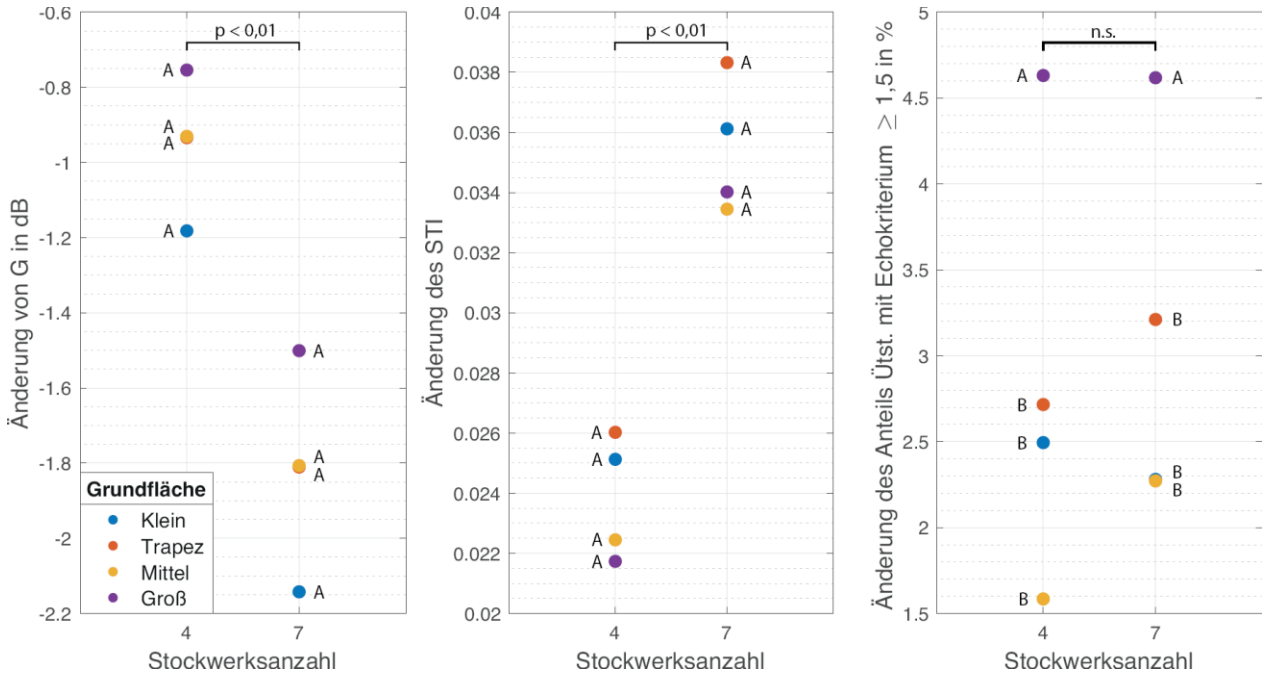

Abbildung 4.15: Modellabhängige Änderung der raumakustischen Parameter *G*, *STI* und Echokriterium durch absorbierende Balkonuntersichten im Vergleich zu reflektierenden Balkonuntersichten, gepoolt über die Bodenmaterialisierung (reflektierend und absorbierend). Dabei ist Fassade immer vollständig absorbierend. Die Buchstaben A & B repräsentieren Gruppen die sich signifikant voneinander unterscheiden ($p < 0{,}01$). Datenpunkte mit unterschiedlichen Buchstaben weisen eine signifikante Differenz im jeweiligen Parameter bei verschiedener Grundfläche auf. Ausserdem zeigt ein Verbindungsmarker die Signifikanz zwischen Modellen mit 4 und 7 Stockwerken an. Bild aus [40] (Abbildung 4.15).

5. Diskussion Bachelorarbeit

5.1. Einleitung

In der Diskussion versuchen wir, zu folgenden Fragen Antworten zu geben und den Gültigkeitsbereich der Aussagen bezüglich anderer Innenhöfe einzuschätzen.

- Wie stark wirkenden Einzelmassnahmen?
  - absorbierende Fassaden
    - vollständig
    - teilweise
  - absorbierende Balkonuntersichten
  - absorbierender Innenhofboden
- Wie stark wirken Kombinationen von Massnahmen?
  - absorbierende Fassaden + absorbierende Balkonuntersichten
  - absorbierende Fassaden + absorbierender Innenhofboden
  - absorbierende Fassaden + absorbierende Balkonuntersichten + absorbierender Innenhofboden

In der Bachelorarbeit [40] wurden die Erkenntnisse, welche aus den generischen Innenhöfe gewonnen wurden, an den Ergebnissen der Innenhöfe Zwicky und Martin-Müller getestet. Wir verzichten hier auf diese Methodik und versuchen aus allen simulierten Innenhöfen Erkenntnisse zu gewinnen, welche eventuell für den allgemeinen Fall angewendet werden können.

5.2. Einzelmassnahmen

5.2.1. Vollständig absorbierende Fassaden

Die Wirkung vollständig absorbierender Fassaden als Einzelmassnahmen kann in Abschnitt 4.2 aus Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 13–Abbildung 15 abgelesen werden.

Die recht langen Nachallzeiten *EDT* und T_{20} (1.5–2.7 s) in den Innenhöfen ohne schallabsorbierende Fassaden werden durch vollständig absorbierenden Fassaden sehr deutlich vermindert, und zwar bei den generischen Innenhöfen um 0.88±0.41 s (*EDT*) und bei Zwicky und Müller Martini 0.82 s resp. 0.79 s (*EDT*). Die Nachhallzeiten liegen damit bei allen Innenhöfen mit vollständig schallabsorbierenden Fassaden bei rund 0.8–1.6 s. Die so erreichten Nachhallzeiten sind von Innenhof zu Innenhof sehr unterschiedlich, was – wie aus den Abbildung 10 und Abbildung 11 ersichtlich und in Abschnitt 4.6 gezeigt – mit der Stockwerkanzahl und dem Grundriss erklärt werden kann. Die Wirkung der schallabsorbierenden Fassaden ist überall gross und sehr deutlich wahrnehmbar.

Beim Stärkemass *G* beträgt die Verminderung vollständig absorbierenden Fassaden bei den generischen Modellen im Mittel 2.6±0.6 dB. Die Verminderung ist für Müller Martini ähnlich gross, bei Zwicky beträgt sie 5.6 dB. Zur Einordnung dieser Pegelverminderungen ist die Tabelle 15 nützlich, welche von der Empa

schon seit vielen Jahren benutzt wird. Die Veränderung von *G* ist nicht gross, aber doch wahrnehmbar, was im Kontext zur sehr deutlichen Verminderung der Nachhallzeit als sehr positiv zu werten ist.

Tabelle 15 Beschreibung der Wahrnehmung von Schallpegelveränderungen

Schallpegeländerung	**Wahrnehmbarkeit**
< 2 dB	nicht wahrnehmbar
2–4 dB	gerade wahrnehmbar, kleine Veränderung
5–10 dB	deutlich wahrnehmbare Veränderung
11–19 dB	grosse und überzeugende Veränderung
> 20 dB	überaus grosse und überzeugende Veränderung

Beim Sprachübertragungsmass *STI* muss natürlich eine gewisse Erhöhung erwartet werden. Die Sprachverständlichkeit wird besser, je kürzer die Nachhallzeit und je geringer die Hintergrundgeräusche sind. Es wurde allerdings bei den Simulationen keine Hintergrundgeräusche angenommen, so dass es sich bei den ausgewiesenen *STI* um die maximal zu erwartenden Werte für die reale Situation handelt. Die *STI*-Werte bei reflektierenden Fassaden liegen bei den Modellen bei rund 0.50–0.60. Im Mittel über alle generischen Modelle erhöht sich der mittlere *STI* mit vollständig absorbierenden Fassaden um 0.08±0.02, bei Zwicky um 0.11 und bei Martini um 0.06. Natürlich wären hier besonders nahe Situationen auf Balkonen gesondert zu betrachten, was ja schon die beträchtliche Streuung der Werte zeigt. Wir benutzen den *STI* vorläufig aber einfach als weiteren raumakustischen Indikatoren für Änderungen. Für eine vertiefte Betrachtung müssten Überlegungen zum Hintergrundgeräusch gemacht werden, welches ja in Innenhöfen immer vorhanden ist.

Interessant ist schliesslich die Frage, wie sich die Echostörungen ändern, wird doch häufig in Innenhöfen das Vorhandensein von Echos und Flatterechos bemängelt. Hier ist deutlich anzumerken, dass grundsätzlich durch das Einbringen von Schallabsorption nicht unbedingt eine Verminderung von Echos resultieren muss. Im Gegenteil, schallabsorbierende Flächen können sogar die Hörbarkeit von Echos erhöhen. So werden z.B. in sparsam möblierten Räumen mit einer vollflächig schallabsorbierenden Decke Echos resp. Flatterechos besser hörbar als ohne absorbierende Decke. Die für die Echos und Flatterechos verantwortlichen Reflexionen sind selbstverständlich physikalisch auch im Raum ohne absorbierende Decke vorhanden. Sie sind aber nicht diskret hörbar, weil sie von den vielen anderen Raumreflexionen gehörmässig verdeckt werden. In den Innenhöfen ohne schallabsorbierende Fassaden liegt der Anteil an Echostörungen bei allen ausser einem unter 10%. Immerhin ist bei vielen der hier untersuchten Innenhöfe eine Verminderung festzustellen, aber bei zwei Innenhöfen steigt der Anteil sogar leicht an. Dies bedeutet, dass wie erwartet nicht nur das Einbringen von Schallabsorption eine Rolle spielt, sondern auch der Ort, wo sie angebracht wird – abhängig von der Raumform.

Fazit: Die Wirkung der schallabsorbierenden Fassaden ist insgesamt positiv und deutlich wahrnehmbar, sodass schallabsorbierende Fassaden wo immer möglich zu empfehlen sind.

5.2.2. Teilweise absorbierende Fassaden

Wegen des ausserordentlich grossen Berechnungsaufwands wurde das stockwerkweise Hinzufügen von schallabsorbierenden Fassaden nur für reflektierende Böden und Balkonuntersichten simuliert. Die Ergebnisse der Simulationen finden sich in Absatz 4.5 in Abbildung 27 – Abbildung 29.

Auffällig ist, dass sowohl für die Nachhallzeit T_{20} (bzw. *EDT*) als auch für das Stärkemass *G* die Verminderung pro hinzugefügtem Schallabsorption pro Stockwerk relativ gleichmässig verläuft und kein Schwelle feststellbar ist, ab der die Wirkung plötzlich stärker oder plötzlich nicht mehr stärker wird. Bei der Nachhallzeit T_{20} beträgt die Verminderung pro zugefügtem Stockwerk meistens etwas mehr als die gerade wahrnehmbare Änderung. Beim Stärkemass *G* dagegen ist die Zunahme meistens geringer als die gerade wahrnehmbare Änderung.

Fazit: Wenn man auf diese Weise die Ergebnisse über alle Übertragungsstrecken betrachtet, finden sich keine Argumente dafür, um in den untersuchten Innenhöfen nicht alle Stockwerke schallabsorbierend zu verkleiden.

5.2.3. Absorbierender Innenhofboden

Selbstverständlich kann in Realität nicht der ganze Boden des Innenhofs schallabsorbierend gestaltet werden. Aber mit der Wahl von Rasen als "Material" kann gut abgeschätzt werden, welche Wirkung maximal erwartet werden könnte. Die Wirkung eines absorbierenden Bodens findet sich Abbildung 10, Abbildung 11 und Abbildung 13–Abbildung 15 in Abschnitt 4.2 für die generischen Modelle. Zwicky und Müller-Martini wurden nicht variiert.

Die Nachallzeiten *EDT* und T_{20} vermindern sich erwartungsgemäss weniger stark als bei den vollständig absorbierenden Fassaden. Die Verminderung liegt deutlich über der Wahrnehmbarkeitsschwelle, liegt aber doch nicht in einer Grössenordnung, welche befriedigend ist. Die Verminderung des Stärkmasses *G* liegt gerade etwa bei der Wahrnehmbarkeitsschwelle, während die Erhöhung des *STI* eher darunterliegt. Die Echostörungen nehmen überall zu, was daran liegen mag, dass die Stärke der Reflexionen am Boden etwas vermindert ist und sie damit in gewissen Situationen die Echos für das Gehör nicht mehr verdecken.

Fazit: In den untersuchten generischen Modellen sind absorbierende Böden als alleinige Massnahme in Innenhöfen nicht empfehlenswert. Einerseits ist die positive Wirkung zu klein, andrerseits können Echostörungen etwas verstärkt werden.

5.2.4. Absorbierende Balkonuntersichten

Zur der Wirkung der absorbierenden Balkone finden sich Auswertungen in Abschnitt 4.3 in Abbildung 16–Abbildung 20. Die Verminderung der Nachallzeiten *EDT* und T_{20} liegen z.T. knapp bei und zum Teil auch klar über der Wahrnehmbarkeitsschwelle, sind aber insgesamt gering. Die Verminderung des Stärkemasses *G* liegt durchwegs über der Wahrnehmbarkeitsschwelle, beim Sprachübertragungsindex *STI* eher unterhalb. Etwas überraschend steigt bei allen Innenhofmodellen die Echostörung. Offensichtlich wird auch hier das Schallfeld so beeinflusst, dass gewisse Echos nicht mehr verdeckt werden.

Fazit: Auch hier gilt, dass in den untersuchten generischen Modellen absorbierende Balkonuntersichten als alleinige Massnahme in Innenhöfen nicht empfehlenswert sind. Einerseits ist die positive Wirkung zu klein, andrerseits können Echostörungen verstärkt werden.

5.2.5. Bemerkung zur Situation unter dem Balkon

In Abschnitt 1.3 wurde der folgende Punkt aufgeführt, bei welchem ebenfalls Massnahmen zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität untersucht werden sollte:

"ev. auch für die Situation auf dem Balkon selber (Wirkung absorbierenden Untersichten)"

Gemeint war damit die Frage der akustischen Aufenthaltsqualität für die Bewohner auf dem eigenen Balkon, wenn sie selber *alleine* die Schallquelle sind und über dem Balkon ein Balkon des oberen Stockwerks vorhanden ist. Etwas vereinfacht geht es um die Frage, ob in diesem Fall die akustische Aufenthaltsqualität besser ist, wenn die Balkonuntersicht des oberen Balkons reflektierend oder absorbierend ist. Es geht somit nicht um die Frage zu der Aufenthaltsqualität auf dem Balkon in Bezug auf andere Schallquellen, wie dies in Abschnitt 3.1.5 als Bemerkung zur Frage der Privatsphäre und Vertraulichkeit diskutiert wurde.

In der Literatur sind uns keine Aussagen zu der obigen Frage begegnet. Gemäss der Fachgruppe Klangraumgestaltung (Sitzung vom 27. Juni 2022) gab es bisher keine Reklamationen wegen schallabsorbierenden Balkonuntersichten. Aus der allgemeinen raumakustischen Erfahrung ist vorstellbar, dass eine harte, schallreflektierende Betonuntersicht stören kann, insbesondere wenn der Balkon eher schwach möbliert ist.

Aus den Simulationen lassen sich keine Ergebnisse zur dieser Frage ableiten, weil auf den Balkon nur ein einziger Punkt simuliert wurde. Auf Simulationen/Auralisationen der Situation (z.B. zwei Punkte auf dem Balkon) wurde verzichtet, einerseits, weil dazu keine Ressourcen mehr vorhanden waren, andrerseits, weil das Balkonvolumen zu klein ist für Simulationen über den ganzen Frequenzbereich, und die Aussage damit begrenzt wäre.

Fazit: Absorbierende Balkonuntersichten sind vermutlich für die akustische Aufenthaltsqualtät auf dem Balkon eher vorteilhaft.

5.3. Kombinierte Massnahmen

5.3.1. Absorbierende Fassaden + absorbierender Innenhofboden

Zur Wirkung vollständig absorbierender Fassaden und Böden der Innenhöfe finden sich die Auswertungen in Abschnitt 4.2 in Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 13 und Abbildung 14–Abbildung 15.

Es wird die zusätzliche Wirkung eines absorbierenden Innenhofbodens bei absorbierender Fassade betrachtet. Bei den Nachhallzeiten *EDT* und T_{20} ist die zusätzliche Verminderung fast vernachlässigbar gering. Das Stärkemass *G* wird zusätzlich um etwa 1 dB vermindert. Beim *STI* ist die Veränderung gering. Erwähnenswert ist, dass die Echostörungen leicht wachsen.

Fazit: Es ist fraglich, ob diese Kombination in den untersuchten Innenhofmodellen sinnvoll ist, da die sich nur geringe Verbesserungen ergeben, welche aber mit einer Erhöhung der Echostörungen einhergehen.

5.3.2. Absorbierende Fassaden + absorbierende Balkonuntersichten

In Abschnitt 4.3, Abbildung 16–Abbildung 20, finden sich die Ergebnisse zur der Wirkung vollständig absorbierender Fassaden und Balkonuntersichten.

Es wird die zusätzliche Wirkung von absorbierenden Balkonuntersichten bei absorbierender Fassade betrachtet. Bei den Nachhallzeiten *EDT* und T_{20} ist zusätzliche Verminderung durch absorbierende Balkonuntersichten fast vernachlässigbar gering. Das Stärkemass *G* wird zusätzlich um etwa 1–3 dB vermindert. Beim *STI* ist die Veränderung gering. Erwähnenswert ist, dass die Echostörungen überall recht stark wachsen.

Fazit: Auch hier ist fraglich, ob diese Kombination in den untersuchten Innenhofmodellen sinnvoll ist, da sich nur geringe Verbesserungen ergeben, welche aber mit einer Erhöhung der Echostörungen verbunden sind.

5.3.3. Absorbierende Fassaden + absorbierende Balkonuntersichten + absorbierender Innenhofboden

Die Ergebnisse der Kombination von absorbierende Fassaden, absorbierende Balkonuntersichten und absorbierender Innenhofböden findet sich in Abschnitt 4.4 in Abbildung 23–Abbildung 26.

Aus den Darstellungen kann geschlossen werden, dass die Kombination aller Massnahmen bezüglich *EDT* und T_{20} keine grosse Veränderung im Vergleich zu den bereits in den Abschnitten 5.3.1 und 5.3.2 zusätzlichen Wirkungen zur absorbierenden Fassade durch absorbierende Balkone resp. Böden bringt. Dies trifft auch zu für die Verminderung des Stärkemasses *G* und den Sprachübertragungsindex *STI*. Auffällig ist allerdings der Anteil an Echostörungen, der bei diesem Fall schliesslich am höchsten ist.

Fazit: Auch hier ist fraglich, ob kombinierte Massnahmen für die untersuchten Innenhofmodelle sinnvoll sind.

5.3.4. Sind kombinierte Massnahmen sinnvoll?

Es zeigt sich, dass in den untersuchten Innenhofmodellen der Anteil an Echostörungen steigen kann, wenn zusätzlich zu den Fassaden entweder die Innenhofböden oder die Balkonuntersichten oder sogar beide absorbierend gestaltet werden. Offensichtich wird das Schallfeld durch die zusätzliche Schallabsorption so beeinflusst, dass Echos besser hörbar werden. Somit sind solche kombinierten Massnahmen eher fraglich.

5.4. Zwischenfazit "Bachelorarbeit"

Auf der Basis der bisherigen Ergebnisse können folgende Aussagen gemacht werden:

- Vollständig schallabsorbierende Fassaden sind ein wirkungsvolles Mittel, um die akustische Aufenthaltsqualität in Innenhöfen zur verbessern.
- Teilweise schallabsorbierende Fassaden bringen deutlich weniger starke Verbesserungen.
    - Der Beitrag zu einer Verbesserung der Aufenthaltsqualität ist sehr klein, wenn nur im Erdgeschoss die Fassaden schallabsorbierend realisiert werden.

  - Jedes Stockwerk, welches zusätzlich schallabsorbierend gestaltet wird, bringt einen wahrnehmbaren Gewinn.
- Wenn bei nicht-schallabsorbierenden Fassaden nur der Boden im Innenhof schallabsorbierend ist (Rasen) oder nur die Balkonuntersichten absorbierend verkleidet werden, ist die der Gewinn für die Aufenthaltsqualität fraglich, weil vermehrt Störungen durch Echos auftreten können und der Nachhall und die Schallpegel nur wenig vermindert werden, resp. generell die Wirkung auf die raumakustischen Parameter gering ist.
- Ob zusätzlich zu den schallabsorbierenden Fassaden ein absorbierender Boden (Rasen) und/oder absorbierende Balkonuntersichten sinnvoll sind, muss im Einzelfall abgeklärt werden. Abgesehen davon, dass die Verbesserung der raumakustischen Parameter gering ist, resultieren allenfalls mit solchen Massnahmen erhöhte Echostörungen.

Diese Aussagen, welche auf der Basis der untersuchten Innenhöfe gewonnen wurden, können auf die allgemeine Situation von Innenhöfen übertragen werden. Sinnvoll ist es bei neuen Projekten, durch einfache zeichnerische Verfahren der geometrischen Akustik und/oder mit Computersimulation abzuklären, ob die geometrische Form Echos und Flatterechos fördert und wo (z.B. Balkonuntersichten) allenfalls das Anbringen von Schallabsorption zu einer Erhöhung von Echostörungen führen könnten. Zusätzlich zu den hier aufgestellten Faustregeln kann eine akustische Beratung also sehr hilfreich sein.

In unserer Untersuchung wurde die sogenannte "Matrix-Methode" bei der raumakustischen Simulation erstmals für Innenhöfe verwendet, was zu ausserordentlich langen Rechenzeiten führte. Dies war hilfreich für diese Untersuchung, es erscheint aber plausibel, dass für akustische Untersuchen für Neubauten die Anzahl der untersuchten Übertragungstrecken deutlich reduziert werden kann.

Schliesslich stellt sich die Frage, ob sich diese Folgerungen allenfalls ändern, wenn eine Auswertung von Gruppen von Übertragungstrecken durchgeführt werden. Solche Zusatzauswertungen wurden nach der Bachelorarbeit durchgeführt und im Folgenden dokumentiert. Je nach Ergebnis müssten Überlegungen angestellt werden, ob eine bestimmte Sende- oder Empfängerpositionen bezüglich Aufenthaltsqualität höher zu gewichten sind als andere, was allenfalls die Priorisierung von Massnahmen ändern könnten.

6. Zusatzauswertungen

6.1. Einleitung

Bei der Bewertung der Ergebnisse der Bachelorarbeit stellt sich die Frage, ob die Folgerungen auch gelten, wenn man einzelne Gruppen von Übertragungsstrecken betrachtet, z.B. nur jene im Hof, einem Bereich, der oft öffentlich zugänglich ist. Zur Beantwortung dieser Fragen waren nach der Bachelorarbeit zwar alle Daten vorhanden. Sie mussten allerdings noch aufwändig ausgewertet werden, womit Tilljan Jansohn für folgende Gruppen nach Abschluss der Bachelor-Arbeit beauftragt wurde:

- **Hof → Balkone** (alle Positionen vom Hof zu allen Positionen auf den Balkonen)
  Es geht um die Übertragungswege vom öffentlichen Hof (sprechende Personen, spielende Kinder etc.) zu den privaten Balkonen.
- **Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss** (alle Positionen Balkone im Erdgeschoss zu allen Positionen Balkone im Erdgeschoss)
  Bei verschiedenen Begehungen erschien in gewissen Innenhöfen die Situation für die Wohnungen im Erdgeschoss heikel.
- **Balkone ↔ Balkone** (alle Positionen Balkone zu allen Positionen Balkone)
  Es geht um die Frage der Aufenthaltsqualität von den privaten Balkonen zu den privaten Balkonen.
- **Hof ↔ Hof** (alle Positionen Hof zu allen Positionen Hof)
  Hier geht es um die Aufenthaltsqualität im öffentlichen Hof bezüglich Positionen im Hof.
- **alle ↔ alle (**alle Positionen zu allen Positionen**), Referenzgruppe**
  Die Auswertung wurde lag zwar schon vor (siehe Abschnitt 4), aber sie wurde hier im gleichen Format dargestellt wie die anderen Gruppe, um sie mit den anderen Gruppen vergleichen zu können.

Leider ergab sich bei der Auswertung für das Modell Gross (7) ein Fehler. Die Daten waren deckungsgleich mit Mittel (7). Tilljan Jansohn war für eine Nachauswertung leider nicht mehr verfügbar und eine Auswertung durch die Empa selber wäre mit einem unverhältnismässigen Aufwand verbunden gewesen. Die entsprechenden Daten fehlen deshalb hier.

6.2. Ergebnisse der Zusatzauswertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Zusatzauswertungen in kompakter Form zusammengestellt und diskutiert. Die Detailergebnisse der Zusatzauswertung finden sich in graphischer Form im Anhang (Abschnitt 9):

9.1	Ergebnisse *T20*	Seite 72
9.2	Early Decay Time *EDT*	Seite 81
9.3	Verminderung *Stärkemass G*	Seite 90
9.4	Sprachübertragungsindex *STI*	Seite 99
9.5	Prozentualer Anteil Echostörungen *EK*%	Seite 108

6.3. Diskussion und Zwischenfazit Zusatzauswertungen

Um einen Überblick über die Vielzahl der Diagramme von Abschnitt 9 zu erhalten, fragen wir uns:

- Wie gross ist die *Spannweite* der Mittelwerte der Untergruppen zur Referenzgruppe mit allen Übertragungstrecken (alle ↔ alle) bei der Materialisierungsvariante mit reflektierenden Fassaden, Innenhofböden und Balkonuntersichten?
- Wie gross ist die *Spannweite* der Mittelwerte der Untergruppen zur Referenzgruppe mit allen Übertragungstrecken (alle ↔ alle) bei der Materialisierungsvariante mit absorbierenden Fassaden sowie reflektierenden Innenhofböden und Balkonuntersichten?

Die entsprechenden Daten sind in Tabelle 17–Tabelle 20 dargestellt. Im Folgenden werden die Parameter einzeln diskutiert und dann die Ergebnisse zusammengefasst.

6.3.1. Nachhallzeit T_{20}

Tabelle 16 zeigt, dass die Spannweiten bei der Nachhallzeit T_{20} in der Regel relativ gering sind und jedenfalls weniger gross ist als bei der *EDT* (siehe Abschnitt 6.3.2). Es sei dabei daran erinnert, dass, wie in Abschnitt 4.2 erwähnt, T_{20} etwas weniger empfindlicher auf die Stärke einzelner Reflexionen reagiert als *EDT* und evtl. auch etwas besser vorhersagbar ist. Auffällig ist bei T_{20} die Gruppe "Hof ↔ Hof" mit grösseren Abweichungen.

Tabelle 16 Nachallzeit T_{20}: Prozentuale Abweichungen (in %) der zwischen der Referenzgruppe mit allen Übertragungsstecken (alle ↔ alle) und den Untergruppen für mit "reflektierenden Fassaden, Innenhofböden und Balkonuntersichten" (links) und mit "absorbierenden Fassaden sowie reflektierenden Innenhofböden und Balkonuntersichten" (rechts) für die verschiedenen Innenhofmodelle.

	alles reflektierend				=+ Fassade absorbierend			
	Hof>Balkon	Ba_EG<>Ba_EG	Ba<>Ba	Hof<>Hof	Hof>Balkon	Ba_EG<>Ba_EG	Ba<>Ba	Hof<>Hof
Klein (4)	0	0	1	1	2	1	2	6
Trapez (4)	0	0	1	2	1	0	2	4
Mittel (4)	0	0	1	2	1	1	2	5
Gross (4)	0	3	3	6	0	2	4	5
Klein (7)	0	0	0	0	1	1	1	4
Trapez (7)	0	0	0	0	0	0	1	2
Mittel (7)	0	0	0	0	0	0	1	2
Zwicky	1	1	1	1	5	0	0	5
Müller-Martini	5	0	4	5	2	0	6	2

6.3.2. Early Decay Time *EDT*

Der grobe Überblick bezüglich der Spannweiten von *EDT* in Tabelle 17 zeigt, dass bei den Situationen mit reflektierenden Fassaden, Innenhofböden und Balkonuntersichten sich in den meisten Innenhofmodellen die Ergebnisse der Gruppen nicht stark von jenen aller Übertragungsstrecken (alle ↔ alle) unterscheiden (Abweichungen meist ≤6%). Die grössten Spannweiten ergeben sich bei Zwicky für die Gruppe "Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss". Mit absorbierendem Fassaden (Abweichungen meist ≤ 7%) ergab sich eine grössere Veränderung bei den Spannweiten für Zwicky bei "Hof → Balkone", und "Hof ↔ Hof" (je 15%), sowie bei Gross(4) "Balkone ↔ Balkone" und "Hof ↔ Hof" (8% bzw. 14%). Grundsätzliche Tendenzen lassen sich kaum feststellen, ausser dass vielleicht "Hof ↔ Hof" etwas deutlicher unterscheidet, wie bei T_{20}.

Tabelle 17 Early Decay Time *EDT*: Prozentuale Abweichungen (in %) der zwischen der Referenzgruppe mit allen Übertragungsstecken (alle ↔ alle) und den Untergruppen für mit "reflektierenden Fassaden, Innenhofböden und Balkonuntersichten" (links) und mit "absorbierenden Fassaden sowie reflektierenden Innenhofböden und Balkonuntersichten" (rechts) für die verschiedenen Innenhofmodelle. Skalierung der Einfärbung gleich wie in Tabelle 16.

	alles reflektierend				=+ Fassade absorbierend			
	Hof>Balkon	Ba_EG<>Ba_EG	Ba<>Ba	Hof<>Hof	Hof>Balkon	Ba_EG<>Ba_EG	Ba<>Ba	Hof<>Hof
Klein (4)	1	4	2	4	1	1	1	2
Trapez (4)	1	4	3	6	4	1	3	6
Mittel (4)	2	6	4	6	2	2	1	7
Gross (4)	4	1	1	1	5	5	8	14
Klein (7)	0	1	0	2	2	0	1	3
Trapez (7)	1	1	1	3	2	3	0	0
Mittel (7)	1	2	1	4	1	2	1	1
Zwicky	4	17	5	4	15	3	4	15
Müller-Martini	5		4	5	2		6	2

6.3.3. Stärkemass *G*

Bezüglich *G* (Tabelle 18) zeigt sich ebenfalls, dass bei den Situationen mit reflektierenden Fassaden, Innenhofböden und Balkonuntersichten sich die Ergebnisse der Gruppen nicht stark unterscheiden (Abweichungen ≤ 3 dB). Die grössten Spannweiten zeigen sich bei Zwicky für "Hof → Balkon" und "Hof ↔ Hof", und es ist eine Tendenz für allgemein grössere Spannweiten für "Hof ↔ Hof" feststellbar. Mit absorbierenden Fassaden (Abweichungen meist ≤ 3 dB) ergibt sich eine deutliche Änderung bei Zwicky "Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss" und "Balkone ↔ Balkone". Die Tendenz zu grössere Spannweiten für "Hof ↔ Hof" bleibt erhalten.

Tabelle 18 Stärkemass *G*: Abweichungen in dB zwischen der Referenzgruppe mit allen Übertragungsstecken (alle ↔ alle) und den Untergruppen für mit "reflektierenden Fassaden, Innenhofböden und Balkonuntersichten" (links) und mit "absorbierenden Fassaden sowie reflektierenden Innenhofböden und Balkonuntersichten" (rechts) für die verschiedenen Innenhofmodelle

	alles reflektierend				=+ Fassade absorbierend			
	Hof>Balkon	Ba_EG<>Ba_EG	Ba<>Ba	Hof<>Hof	Hof>Balkon	Ba_EG<>Ba_EG	Ba<>Ba	Hof<>Hof
Klein (4)	1	0	1	2	1	0	1	2
Trapez (4)	1	0	1	2	1	0	1	2
Mittel (4)	1	0	1	2	1	1	1	2
Gross (4)	1	1	1	2	1	1	1	2
Klein (7)	1	1	0	3	1	1	0	3
Trapez (7)	1	1	1	3	1	1	1	3
Mittel (7)	1	1	1	2	1	1	1	2
Zwicky	3	0	2	3	1	7	5	1
Müller-Martini	2		1	2	2		1	2

6.3.4. Sprachübertragungsindex *STI*

Beim Sprachübertragungsindex *STI* (Tabelle 19) sind die Spannweiten nicht stark unterschiedlich (meist ≤ 3%), ausser bei den Innenhofmodellen Zwicky und Müller Martini (Abweichungen von 1–15%). Ein Vergleich mit der EDT zeigt gewisse Ähnlichkeiten.

Tabelle 19 Sprachübertragungsindex *STI*: Prozentuale Abweichungen (in %) zwischen der Referenzgruppe mit allen Übertragungsstecken (alle ↔ alle) und den Untergruppen für mit "reflektierenden Fassaden, Innenhofböden und Balkonuntersichten" (links) und mit "absorbierenden Fassaden sowie reflektierenden Innenhofböden und Balkonuntersichten" (rechts) für die verschiedenen Innenhofmodelle

	alles reflektierend				=+ Fassade absorbierend			
	Hof>Balkon	Ba_EG<>Ba_EG	Ba<>Ba	Hof<>Hof	Hof>Balkon	Ba_EG<>Ba_EG	Ba<>Ba	Hof<>Hof
Klein (4)	2	1	0	1	0	1	0	0
Trapez (4)	2	2	1	1	1	1	0	1
Mittel (4)	1	1	0	1	0	1	1	0
Gross (4)	2	2	1	3	0	2	0	2
Klein (7)	3	1	0	1	0	2	0	2
Trapez (7)	3	0	0	1	1	1	0	2
Mittel (7)	2	1	0	2	0	1	1	3
Zwicky	5	15	3	5	6	1	3	6
Müller Martini	7		4	7	7		4	7

6.3.5. Echostörungen

Bei den Echostörungen (Tabelle 20) zeigen sich eher grössere Unterschiede in den Spannweiten (meist Abweichungen von 1–9 %). Die grössten Spannweiten ergeben sich bei Zwicky für die Gruppe "Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss" (16% bzw. 30%). Bei den Situationen mit reflektierenden Fassaden, Innenhofböden und Balkonuntersichten ergaben sich zudem bei Klein (7) grössere Spannweiten von 3–9%. Mit absorbierendem Fassaden ergab sich eine deutliche Veränderung bei den Spannweiten für Zwicky bei "Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss", während sich der Rest kaum veränderte. Schliesslich lässt sich erkennen, dass die Gebäude mit sieben Geschossen eher grössere Spannweiten aufweisen als jene mit vier Geschossen.

Tabelle 20 Prozentualer Anteil Echostörungen EK > 1.5: Prozentuale Abweichungen (in %) zwischen der Referenzgruppe mit allen Übertragungsstecken (alle ↔ alle) und den Untergruppen für mit "reflektierenden Fassaden, Innenhofböden und Balkonuntersichten" (links) und mit "absorbierenden Fassaden sowie reflektierenden Innenhofböden und Balkonuntersichten" (rechts) für die verschiedenen Innenhofmodelle.

	alles reflektierend				=+ Fassade absorbierend			
	Hof>Balkon	Ba_EG<>Ba_EG	Ba<>Ba	Hof<>Hof	Hof>Balkon	Ba_EG<>Ba_EG	Ba<>Ba	Hof<>Hof
Klein (4)	5	1	4	6	4	3	3	5
Trapez (4)	4	2	3	1	4	3	4	3
Mittel (4)	4	1	2	4	3	2	2	3
Gross (4)	6	0	4	5	4	2	2	5
Klein (7)	9	5	3	9	8	8	3	9
Trapez (7)	7	5	3	4	7	6	3	6
Mittel (7)	7	5	4	0	7	6	3	1
Zwicky	4	16	6	4	4	30	6	4
Müller.Martini	3		1	3	0		0	0

6.3.6. Überblick und Zwischenfazit

Zusammenfassend bleibt Zwicky auffällig – und evtl. Gross (4). Zu Zwicky ist zu bemerken, dass dieser Innenhof im Vergleich zu den generischen Modellen unsymmetrisch ist. Die Balkone befinden sich nur auf einer Längsseite und einer Stirnseite. Bei Gross (4) handelt es sich um einen langen Innenhof, ähnlich wie bei Zwicky. Leider kann kein Vergleich mit Gross (7) gemacht werden, weil dort ja die Daten fehlen.

Schliesslich lässt sich in den Abschnitten 9.1–9.5 trotz der vielen Diagramme bezüglich der Wirkung der absorbierenden Fassaden für alle Gruppen relativ gut erkennen, dass sich die akustische Aufenthaltsqualität bezüglich *EDT*, T_{20} und *G* deutlich verbessert, während der *STI* ansteigt. Nur bei den Echostörungen ist die Situation weniger klar (s.u.).

Bei den Echostörungen ist die Situation weniger klar, so dass es sinnvoll ist zu versuchen, die Veränderungen zusammenfassend darzustellen. Dies wurde in Tabelle 21 gemacht. Es zeigt sich in allen Gruppen beim Schritt von reflektierenden Innenhofböden, Balkonuntersichten und Fassaden (0G 0B 0...F) zu absorbierenden Fassaden (0G 0B 1...F) eine Verringerung der Echostörungen oder mit kleinen Ausnahmen einer geringen Erhöhung – ausser bei Zwicky. Ähnlich, wenn auch weniger konsequent, sieht es bei absorbierenden Innenhofböden und Fassaden aus (1G 0B 1...F). In sehr vielen andern Situationen sind hingegen Erhöhungen der Echostörungen festzustellen.

Tabelle 21 Prozentualer Anteil Echostörungen EK > 1.5: Veränderung durch Massnahmen an Boden, Balkonuntersichten und Fassaden. negativ Werte = Verbesserung / positive Werte = Verschlechterung (rot). Bezüglich Kodierung der Materialisierung siehe Abschnitt 6.1.

	alle<>alle	Hof>Balkon	Ba_EG<>Ba_EG	Ba<>Ba	Hof<>Hof	alle<>alle	Hof>Balkon	Ba_EG<>Ba_EG	Ba<>Ba	Hof<>Hof
	Klein(4)					Klein(7)				
1G 0B 0...F	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0
0G 1B 0...F	2	1	3	4	0	3	1	3	3	0
1G 1B 0...F	3	1	5	4	0	3	1	5	4	0
0G 0B 1...F	-1	0	-3	-2	0	-1	0	-3	-1	0
0G 1B 1...F	1	2	0	1	0	2	2	0	2	0
1G 0B 1...F	-1	1	-3	-2	0	0	0	-3	0	0
1G 1B 1...F	2	2	2	2	0	2	2	3	2	0
	Trapez(4)					Trapez(7)				
1G 0B 0...F	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1
0G 1B 0...F	3	1	5	4	0	3	2	4	4	0
1G 1B 0...F	4	2	7	5	2	3	2	6	4	2
0G 0B 1...F	0	0	-1	1	-1	0	0	-1	0	-1
0G 1B 1...F	3	2	5	4	0	3	2	5	4	-1
1G 0B 1...F	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0
1G 1B 1...F	4	3	9	5	1	4	3	6	4	1
	Mittel(4)					Mittel(7)				
1G 0B 0...F	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2
0G 1B 0...F	2	2	2	3	0	2	2	2	3	0
1G 1B 0...F	3	2	3	3	2	2	2	3	3	2
0G 0B 1...F	-1	0	-2	-1	-2	-1	0	-2	-1	-2
0G 1B 1...F	1	1	0	1	-1	1	2	0	1	-1
1G 0B 1...F	0	0	-2	-1	0	-1	0	-2	-1	0
1G 1B 1...F	1	2	1	1	1	2	2	0	2	1
	Gross(4)					Gross(7)				
1G 0B 0...F	-1	1	2	1	3	-	-	-	-	-
0G 1B 0...F	4	3	5	3	3	-	-	-	-	-
1G 1B 0...F	5	6	6	4	6	-	-	-	-	-
0G 0B 1...F	-2	-1	-5	-4	-2	-	-	-	-	-
0G 1B 1...F	2	3	1	0	2	-	-	-	-	-
1G 0B 1...F	-2	0	-4	-4	1	-	-	-	-	-
1G 1B 1...F	3	5	2	1	6	-	-	-	-	-
	Zwicky					Müller Martini				
0G 1B 0...F	-5	0	27	11	0	0	-3	-	-	-
0G 0B 1...F	1	1	15	1	1	-1	-4	-	-	-
0G 1B 1...F	7	1	37	12	1	-1	-4	-	-	-

Fazit: Abschliessend, kann die in den Zusatzauswertungen behandelte Frage, ob die Folgerungen auch gelten, wenn man einzelne Gruppen von Übertragungsstrecken betrachtet, bejaht werden. Aus der Zusatzauswertung kann geschlossen werden, dass sich keine grundsätzlichen Tendenzen feststellen lassen, wo die Mittelwerte der untersuchten raumakustischen Parameter einer der Gruppen von Übertragungsstrecken völlig anders reagiert als jene über alle Übertragungsstrecken. Im Einzelnen lassen sich Unterschiede jedoch feststellen. Allerdings sind die bisherigen grundsätzlichen Folgerungen aus der Bachelorarbeit (Abschnitt 4 bzw. 5.4) immer noch gültig; wobei sich hierbei je nach Innenhof gewisse Einschränkungen bei der Übertragbarkeit der Ergebnisse ergeben können (eben z.B. einzelne Gruppen von Zwicky, s.o.)

Sinnvoll ist es sicher bei Neubauprojekten, der Frage nachzugehen, wo Massnahmen wie stark wirken. Dabei muss schliesslich auch die Frage beantwortet werden, für welche Übertragungsstrecken eine Optimierung durchgeführt werden soll, wenn nicht über alle. Das kann aber auch von Projekt zu Projekt verschieden sein.

7. Diskussion Schlussfolgerungen

Das Zwischenfazit zu den Hauptuntersuchungen (siehe Abschnitt 5.4) und zu den Zusatzuntersuchungen (siehe Abschnitt 6.2) werden hier nicht mehr wiederholt, sondern in der Zusammenfassung am Anfang des Berichts nochmals dargestellt. Es sollen hier besonders noch die Gültigkeit der Ergebnisse diskutiert und die Frage gestellt werden, wie in der Praxis mit der akustischen Gestaltung von Innenhöfen umgegangen werden soll.

Selbstverständlich musste eine Auswahl von Innenhofmodellen und auch Anteilen Fensterflächen etc. getroffen werden. Es sind Modelle, welche bezüglich Echos und Flatterechos eher problematisch sind. Bei strukturierten Fassaden wird die Problematik sicher entschärft, bei grösseren Fensteranteilen eher verschärft.

Eine solche Studie kann nur mit Simulationen durchgeführt werden. Es gibt unseres Wissens bis anhin keine Innenhöfe mit schallabsorbierenden Fassaden oder Balkonuntersichten. Selbst wenn es diese geben würde, wäre eine Variation dieser Flächen praktisch unmöglich. Messungen in realen Situationen sind also praktisch ausgeschlossen.

Es stellt sich die Frage, ob die eingesetzte kommerzielle Software ODEON zur raumakustischen Simulation auf der Basis der geometrischen Akustik genügt, werden doch die Wellenphänomene nicht oder nur sehr stark angenähert berücksichtigt. Es ist dazu zu bemerken, dass es keine genügend leistungsfähigen wellentheoretische Verfahren gibt, welche für so eine umfangreiche Studie eingesetzt werden könnten. Weiter ist es aber so, dass die Verfahren auf der Basis der geometrischen Akustik heute in der Raumakustik unter Kenntnis der Limitierungen sehr breit und mit grossem Gewinn eingesetzt werden. Wenn eine bessere Genauigkeit erforderlich ist oder Wellenphänomen eine grosse Rolle spielen, werden heute Messungen in speziellen physikalischen Massstabsmodellen durchgeführt. Das wäre auch für die vorliegende Untersuchung eine Option, würde aber einerseits den Kostenrahmen für die Auftraggeber deutlich sprengen und andererseits bei diesen Untersuchungsobjekten kaum zuverlässigere Ergebnissen bringen.

Die wissenschaftliche Basis bezüglich akustischer Aufenthaltsqualität in Innenhöfen ist noch immer dünn. Immerhin existiert eine zuverlässige Studie mit Hörversuchen [16], es gibt z.B. in der Fachgruppe Klangraumgestaltung des Cercle Bruit Erfahrungen mit Innenhöfen, besonders auch negative, und es gibt auch Vorstellungen für Verbesserungen. Bezüglich des Echokriteriums *EK* muss eingeräumt werden, dass dieser raumakustische Parameter zwar zu wenig validiert ist, dass es aber trotzdem sinnvoll sein kann, diesen Indikatoren vorsichtig zu benutzen.

Aus den Ergebnissen der Studie können wertvolle Erkenntnisse zur Frage der Akustik in Innenhöfen gewonnen werden. Es darf dabei nicht vergessen werden, dass die Nachbarschaft in Innenhöfen anspruchsvoll ist. Es wird in den allermeisten Fällen eine Sichtverbindung und damit Direktschall vom Hof zu den Balkonen oder von Balkonen zu Balkonen existieren. Gegenseitige Rücksichtnahme – auch abhängig von der Tageszeit – wird immer notwendig sein.

Wie ist der Praxis bei der Planung von Innenhöfen vorzugehen? Auf jeden Fall sollte beim Entwurf von Beginn weg die Akustik einbezogen werden. Dies kann in einer ersten Phase in Form von Faustregeln passieren, am besten mit einer fachlichen Akustikbegleitung. Je nach Komplexität des Projekts, also wenn es z.B. um die Frage von Echos und Flatterechos geht, ist eine raumakustische Simulation hilfreich. Die Begleitung durch ein Akustikbüro wird klären, wann Faustregeln funktionieren und wann zusätzlich Simulationstools notwendig sind. Dabei sind auch Fragen zu klären, wie gross die Streuung der Aufenthaltsqualität ist und was die Optimierungsziele sind. Weitere Faustregeln können aus der Raumakustik abgeleitet werden. Dies war aber nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

Die Frage der akustischen Aufenthaltsqualtät für die Bewohner auf dem eigenen Balkon, wenn sie selber *alleine* die Schallquelle sind und über dem Balkon ein Balkon des oberen Stockwerks vorhanden ist, konnte hier nicht untersucht werden. Es ist aber plausibel, dass absorbierende Balkonuntersichten günstiger sind als reflektierende.

8. Literatur

[1] Lärmschutzverordnung (LSV; SR 814.41) vom 15. Dezember 1986 (Stand am 1. Juli 2021)

[2] A. Bosshard und T. Maag, Klangraumgestaltung – Chancen im Lärm. Lärminfo 17 der Fachstelle Lärmschutz, Baudirektion Kanton Zürich. 1. Auflage Mai 2012. (PDF)

[3] A. Bosshard und T. Maag, Frag die Fledermaus: Fünf Werkzeugkästen zur Klangraumgestaltung- Lärminfo 19 der Fachstelle Lärmschutz, Baudirektion Zürich. 1. Auflage März 2013 (PDF)

[4] T. Maag, K. Tamara und A. Bosshard, Klangqualität für öffentliche Stadt- und Siedlungsräume – Eine Planungshilfe für das Ohr. Publikationsreihe „Chancen im Lärm – Klangraumgestaltung. 1. Auflage Juli 2016. (PDF)

[5] I. Neuhaus und F. Neuhaus, Akustisch gute Architektur für Strassenräume. Publikationsreihe „Chancen im Lärm – Klangraumgestaltung. 2016. (PDF)

[6] T. Maag, K. Tamara und A. Bosshard, Vom Lärmschutz zur hörenswerten Stadt. Fallbeispiele zur Entwicklung der akustischen Raumqualitäten in der Stadt Basel. AUE Basel. Januar 2015. (PDF)

[7] Cercle Bruit, Faktenblatt Klangraumgestaltung. Faktenblatt Cercle Bruit, September 2018 (PDF)

[8] A. Bosshard, Eggenschwiler K., Grundlagen der Klangraumgestaltung. Planungshilfe Cercle Bruit, Dezember 2020 (PDF)

[9] B. Hohmann, Beurteilung der Klangqualität von Innenhöfen, Plätzen und Pärken im Siedlungsraum, Cercle Bruit, Dezember 2020 (PDF)

[10] U. Sturm, M. Bürgin, Stadtklang – Wege zu einer hörenswerten Stadt 1, Band 1: Perspektiven, mit Beiträgen von Andreas Bosshard, Trond Maag, Bettina Nägeli, Thomas Steiner vdf 2016

[11] U. Sturm, M. Bürgin, A. Schubert, Stadtklang – Wege zu einer hörenswerten Stadt 2, Band 2: Klangraumgestaltung von Aussenräumen, Instrumentarium, mit Beiträgen von: Andres Bosshard, Kurt Eggenschwiler, Meike Müller, Christian Popp, Timo J. Walker, vdf, 2019

[12] A. Bosshard, K. Eggenschwiler, & U. Sturm, U. Stadtklang - Klangqualität als Gestaltungsziel. Lärmbekämpfung, 2019 14(3), 80-86.

[13] T. Sievers, K. Eggenschwiler, A. Taghipour & M. Blau. Untersuchungen zur raumakustischen Aufenthaltsqualität in Innenhöfen von Wohnbauten (pp. 1038-1041). Presented at the DAGA 2018. DEGA.

[14] A. Taghipour, T. Sievers & K. Eggenschwiler, Acoustic comfort in virtual inner yards with various building facades. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(2), 249 (20 pp.). https://doi.org/10.3390/ijerph16020249

[15] A. Taghipour, T. Sievers, & K. Eggenschwiler, K., Room acoustical parameters as indicators of short-term acoustic comfort in inner yards. In ICSV26 (Ed.), Proceedings of the 26th international congress on sound and vibration (p. (8 pp.). Canadian Acoustical Association.

[16] A. Taghipour, S. Athari, A. Gisladottir, T. Sievers & K. Eggenschwiler, Room acoustical parameters as predictors of acoustic comfort in outdoor spaces of housing complexes. Frontiers in Psychology, 11, 344 (17 pp.). https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00344

[17] A. Gisladottir, K. Heutschi, A. Taghipour, R. Pieren, K. Eggenschwiler, Influence of façade characteristics on perceived annoyance from moving cars in urban living environments, Forum Acusticum 2020, Lyon, December 7th- 11th 2020

[18] K. Eggenschwiler, K. Heutschi, A. Taghipour, A. Gisladottir, R. Pieren, B. Schäffer, Urban design of inner courtyards and road traffic noise: Influence of façade characteristics and building orientation on perceived noise annoyance, Building and Environment. Publikation in review

[19] M. Hornikx, "Ten questions concerning computational urban acoustics," Build. Environ., vol. 106, pp. 409–421, 2016. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.028

[20] W. Yang, J. Y, Jeon, Design strategies and elements of building envelope for urban acoustic environment, Building and Environment (2020), doi: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107121

[21] J. Forssén, L. Estévez-Mauriz, A. Gustafson and W., How can we plan for a good urban sound environment, focusing on road trafficc noise? IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 588, 1.15 – 1.19

[22] M. Hornikx and J. Forssén, "Noise abatement schemes for shielded canyons," Appl. Acoust., vol. 70, no. 2, pp. 267–283, 2009. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.04.002

[23] E. Badino, R. Manca, L. Shtrepi, C. Calleri, and A. Astolfi, "Effect of façade shape and acoustic cladding on reduction of leisure noise levels in a street canyons," Build. Environ., vol. 157, pp. 242–256, 2019. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.039

[24] C. Calleri, L. Shtrepi, A. Arnmando, and A. Astolfi, "Evaluation of the influence of building façade design on the acoustic characteristics and auditory perception of urban spaces," Building Acoustics Vol 25, Issue 1, 2018 2017. https://doi.org/10.1177/1351010X18757353

[25] J. Kang, "Numerical modelling of the sound fields in urban spaces," J. Acoust. Soc. Am., vol. 117, no. 6, pp. 3695–3706, 2005. https://doi.org/10.1121/1.1904483

[26] J. Kang, "Sound propagation in street canyons: Comparison between diffusely and geometrically reflecting boundaries," J. Acoust. Soc. Am., vol. 107, no. 3, pp. 1394–1404, 2000. https://doi.org/10.1121/1.1904483

[27] H. Onaga and J. H. Rindel, "Acoustic characteristics of urban streets in relation to scattering caused by building facades," Appl. Acoust., vol. 68, pp. 310–325, 2002. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2006.01.010

[28] Y. Aoki, M. Koehler, D. Goecke, Der Ruhe den Hof machen/Oases of calm: Acoustic design of courtyards, Lärbekämpfung 2021 16(06):182-188 doi.org/10.37544/1863-4672-2021-06-20

[29] D. Goecke, M. Koehler, Y. Aoki, Bauakustische Gestaltung von städtischen Innenhöfen. DAGA 2021 - 47. Jahrestagung für Akustik, 15. - 18. August 2021, Wien

[30] D. Goecke, P. Brandstätt, Y. Aoki, Der Ruhe den Hof machen, Beispiel für die Gestaltung von städtischen Innenhöfen, Lärmbekämpfung. 2022 17(03):83-87 1 10.37544/1863-4672-2021-06-20

[31] A. Balderrama, J. Kang, A. Prieto, A. Luna-Navarro, D. Arztmann, U. Knaack, Effects of Façades on Urban Acoustic Environment and Soundscape: A Systematic Review, Sustainability 14(15), 2022, https://doi.org/10.3390/su14159670

[32] A. Taghipour, A. Gisladottir, F. Aletta, M. Bürgin, M. Rezaei U. Sturm, Improved acoustics for semi-enclosed spaces in the proximity of residential buildings, Conference: Internoise 2022 Glasgow
[33] P. Leistner, A. Kaufmann, M. Koehler, M. Würth, W. K. Hofbauer, S. Dittrich, S. Maier, A. Gordt. Michael Jäge, Bauphysik urbaner Oberflächen. Bauphysik 40 (2018), Heft 5 https://doi.org/10.1002/bapi.201800009
[34] P. Leistner, Akustik-Potenzial urbaner Oberflächen. Symposium »Akustische Stadtgestaltung« 23./24. Juli 2015, Stuttgart
[35] S. K. Kirchsteiger, Schallabsorptionspotential urbaner Fassadensysteme, Masterarbeit, TU Graz, 2017
[36] CoDeFa, Joined research project between Institute Integrative Design|Masterstudio, FHNW and ERNE AG Holzbau, co-financed by Innosuisse. https://codefacades.ch
[37] Kirill Horoshenkov, Timothy Van Renterghem, Jian KangNew approaches to noise reduction, Urban Sound Symposium 2021, www.urban-sound-symposium.org
[38] Siu-Kit Lau, Xing-Feng Zhu, Zhenbo Lu, Enhancing the acoustic absorption of vegetation with embedded periodic metamaterials, Applied Acoustics, Volume 171, 2021, https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107576.
[39] Lan-Ting Chang, Feng-Cheng Chang, Study of Living Wall Systems' (LWSs) Support system for improving LWSs Life cycle performance and noise reduction potential, Building and Environment, Volume 216, 2022, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109007.
[40] Tilljan Jansohn, Wirkung absorbierender Fassadenflächen und Balkonuntersichten auf die raumakustische Aufenthaltsqualität in Innenhöfen von Wohnbauten. Bachelor-Arbeit, Jade Hochschule Oldenburg, 8. März 2022
[41] EN ISO 3382-1:2009 Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 1: Aufführungsräume
[42] Weinzierl, S. (Hrsg.). Handbuch der Audiotechnik. Springer Berlin Heidelberg, 2008
[43] EN 60268-16:2012 Elektroakustische Geräte - Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex
[44] Bradley J. S., Reich R., Norcross S.G., A just noticeable difference in C50 for speech. Applied acoustic 58 (1999), 99-108.
[45] Dietsch, L. & Kraak, W. (1986). Ein objektives Kriterium zur Erfassung von Echostörungen bei Musik- und Sprachdarbietungen. Acustica, 60(3), 205–216
[46] A. Løvstad, Evaluation of objective echo criteria, Diploma Thesis, Norwegian University of Science and Technology (NTNU). June 2003
[47] S. Frey, H. Fastl, H. Schmoch, E. Mommertz, Psychoakustische und messtechnische Detektion von Echos in Räumen, DAGA 2014 - 40. Jahrestagung für Akustik, 10. - 13. März 2014, Oldenburg
[48] DIN 18041: 2016 Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung
[49] Fasold, W., Sonntag, E. & Winkler, H. Bau- und Raumakustik. VEB Verlag für Bauwesen 1987
[50] EN ISO 3382-3:2012 Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 3: Grossraumbüros
[51] Wolfgang Probst, Michael Böhm, Die STI-Matrix ein Verfahren zur Bewertung und Beurteilung von Restaurants Bueros und anderen Aufenthaltsräumen Lärmbekämpfung (Nr. 2/ 2018)

[52] Goecke D. Der Ruhe den Hof machen, Beispiel für die Gestaltung von städtischen Innenhöfen, IBP, Jahresbericht 2020/21, Fraunhofer-Institut für Bauphysik,
[53] Odeon A/S, User's Manual Version 16, May 2020, Lyngby
[54] Vorländer M., Performance of computer simulations for architectural acoustics, Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010.
[55] EN ISO 11654:1997 Akustik - Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden - Bewertung der Schallabsorption
[56] Schuchmann, M. & Sanns, W., Nichtparametrische Statistik mit Mathematica. De Gruyter Oldenbourg
[57] Field, A., Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics. SAGE Publications Ltd.
[58] Nemenyi, P. B., Distribution-free Multiple Comparisons (Diss.). Priceton University, 1963
[59] Kourentzes, N., ANOM and Nemenyi tests. Verfügbar 7. März 2022 unter https://kourentzes.com/forecasting/2013/04/19/nemenyi-test/

9. Anhang: Ergebnisse Zusatzauswertungen

Im Folgenden wurde die Materialisierung wie folgt kodiert:

B= Balkon, G= Boden (Ground), F= Fassade, 0= reflektierend, 1 = absorbierend, also z.B.

0G 0B 1110F = Boden reflektierend, Balkon reflektieren, Fassade bei den Geschossen 1, 2 und 3 absorbierend, bei Geschoss 4 reflektierend.

9.1. Ergebnisse T_{20}

9.1.1. Modell Klein (4)

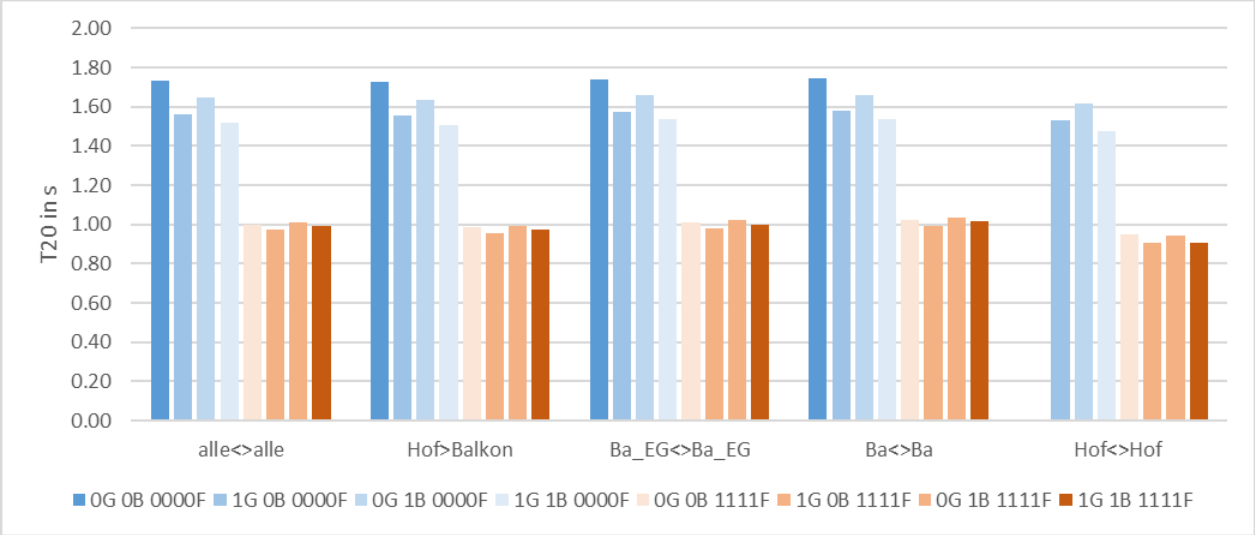

Abbildung 31 Modell Klein (4): Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

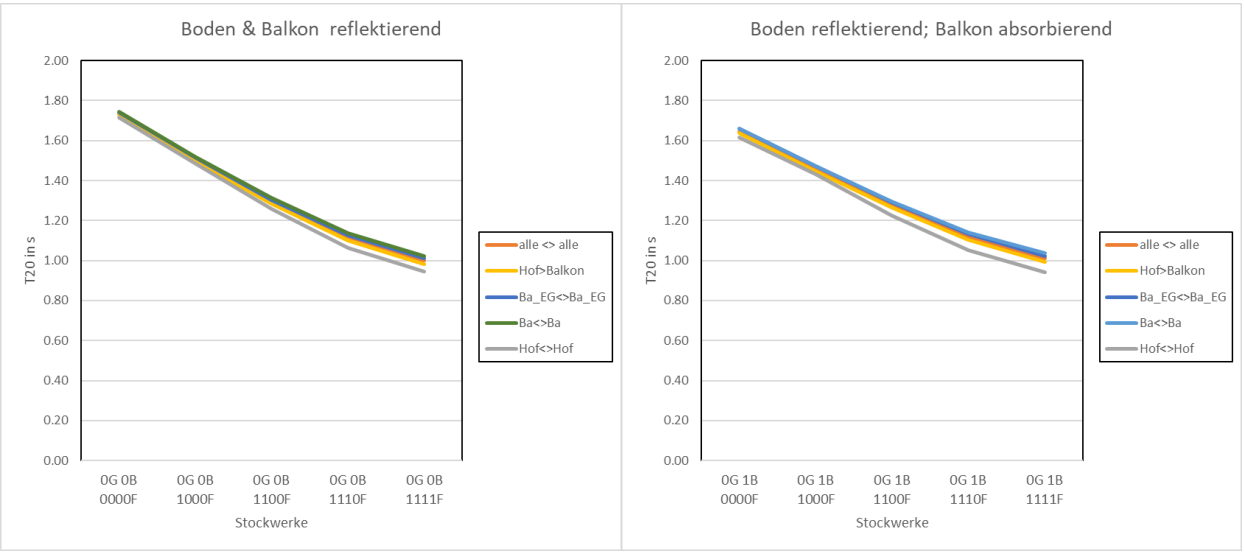

Abbildung 32 Modell Klein (4): Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.1.2. Modell Trapez (4)

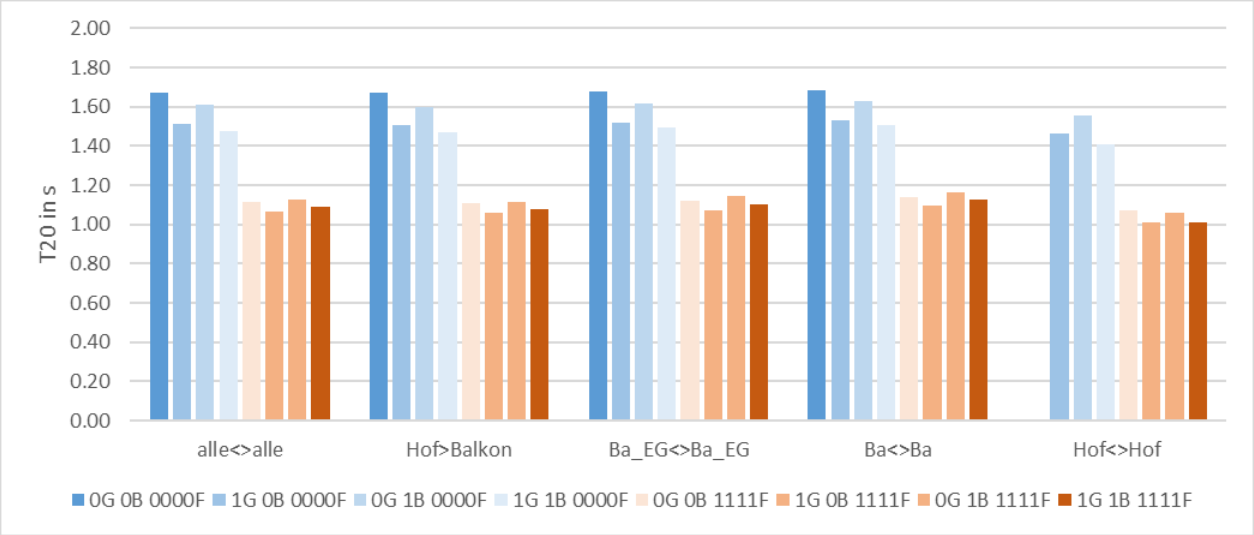

Abbildung 33 Modell Trapez (4): Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

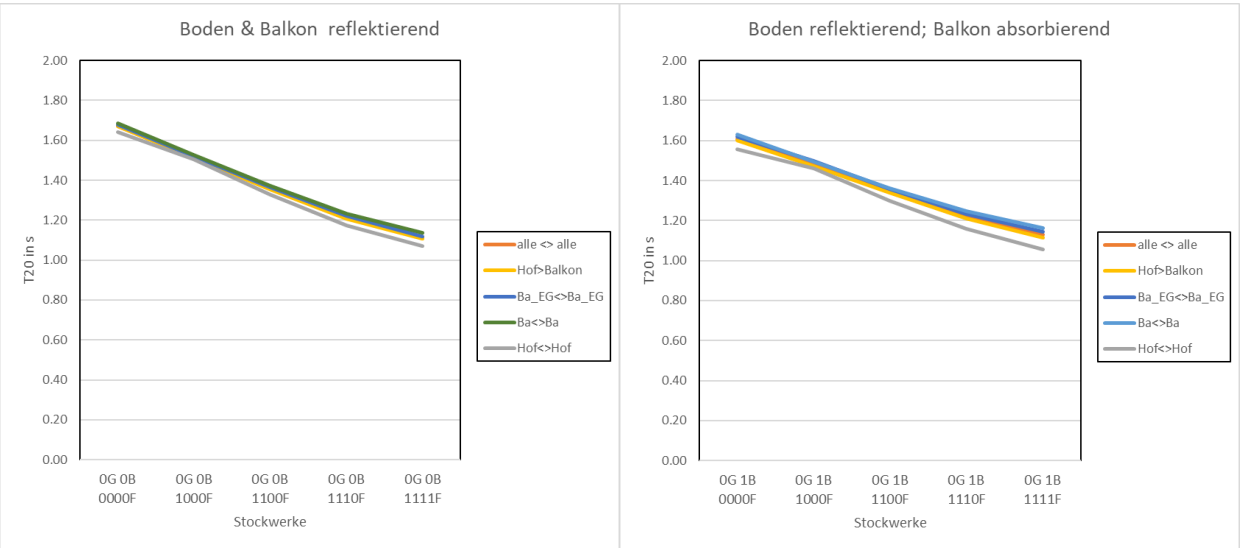

Abbildung 34 Modell Trapez (4): Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.1.3. Modell Mittel (4)

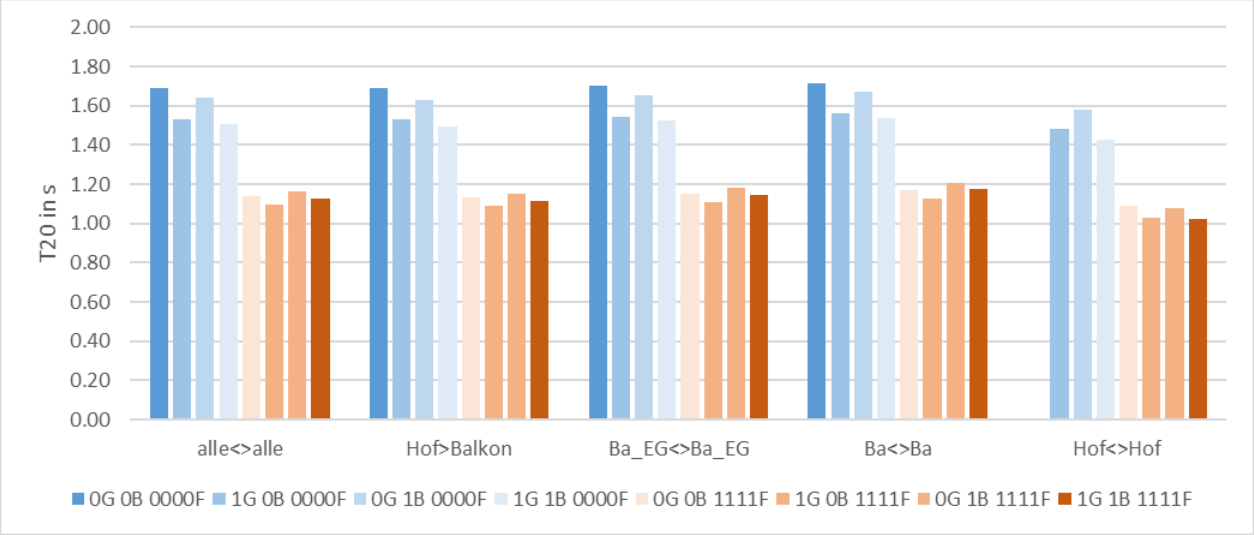

Abbildung 35 Modell Mittel (4): Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

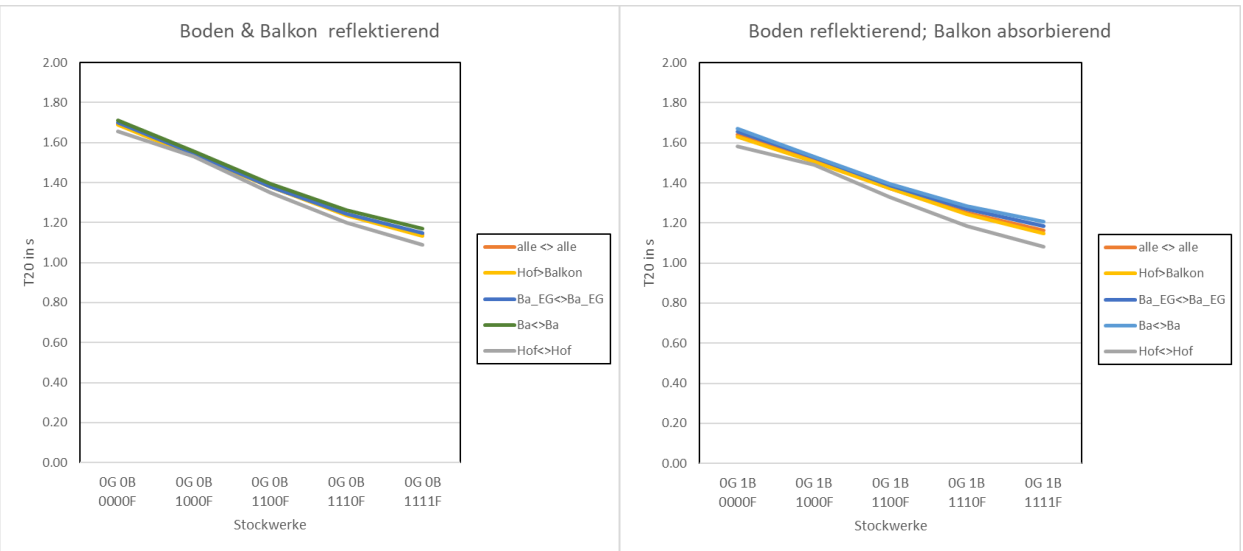

Abbildung 36 Modell Mittel (4): Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.1.4. Modell Gross (4)

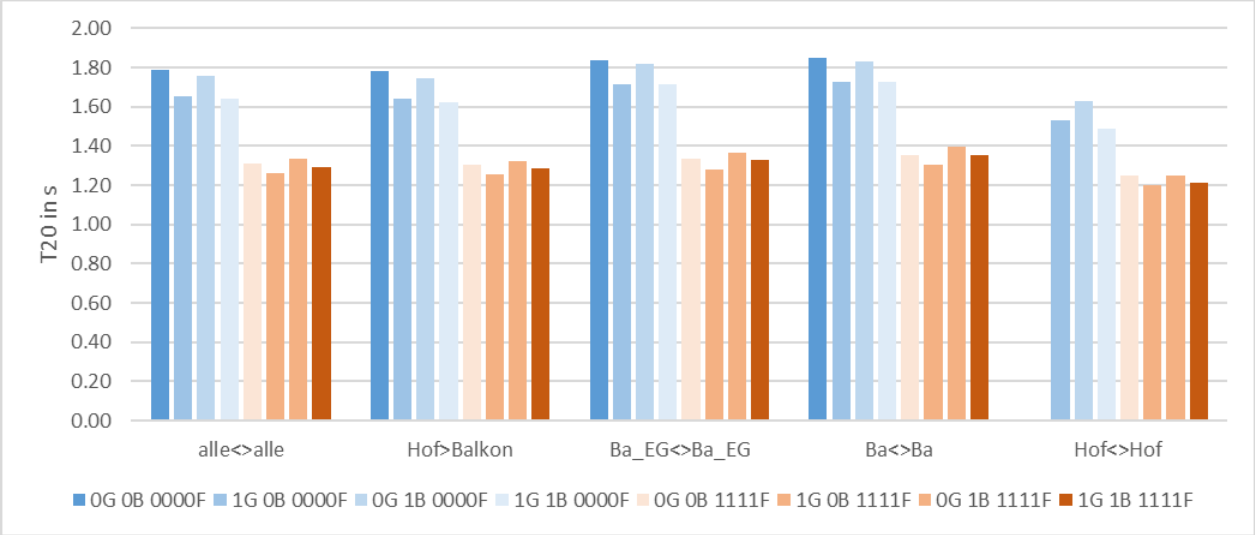

Abbildung 37 Modell Gross (4): Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

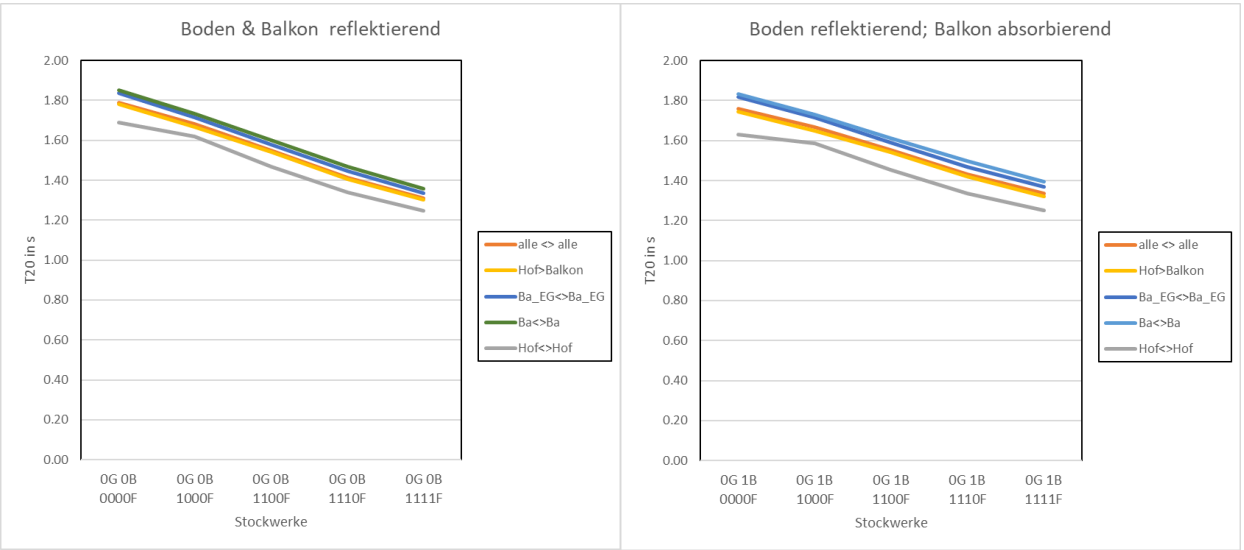

Abbildung 38 Modell Gross (4): Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.1.5. Modell Klein (7)

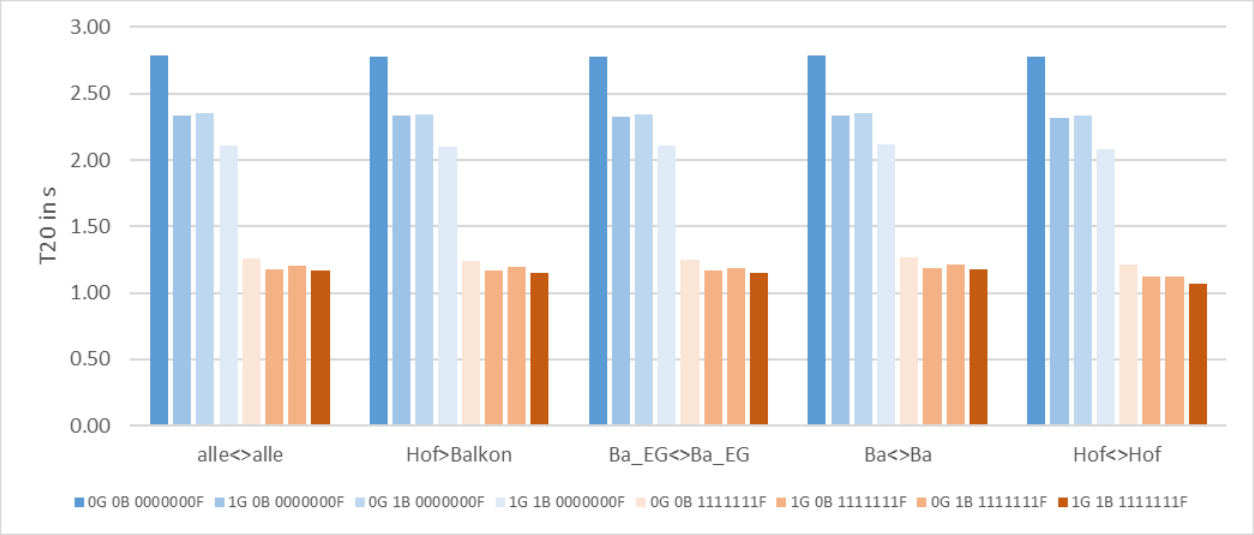

Abbildung 39 Modell Klein (7): Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

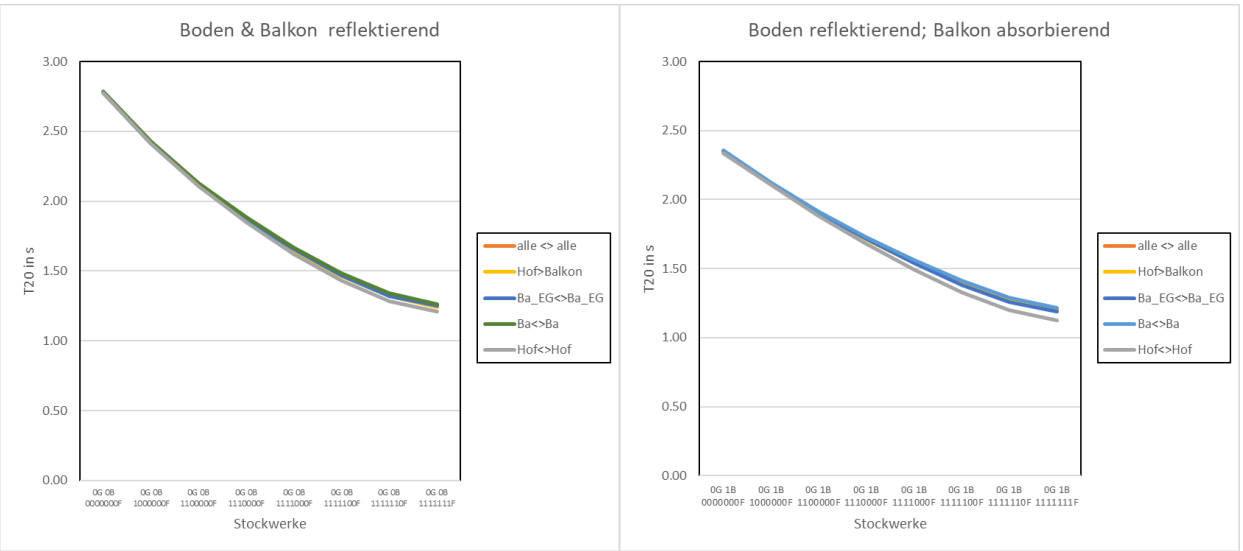

Abbildung 40 Modell Klein (7): Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.1.6. Modell Trapez (7)

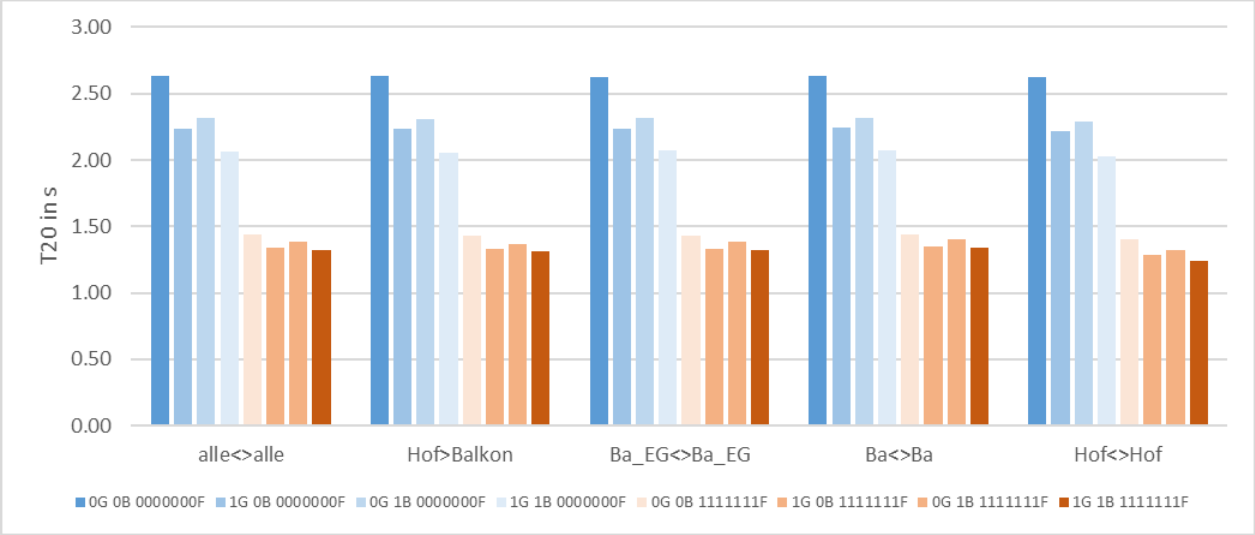

Abbildung 41 Modell Trapez (7): Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

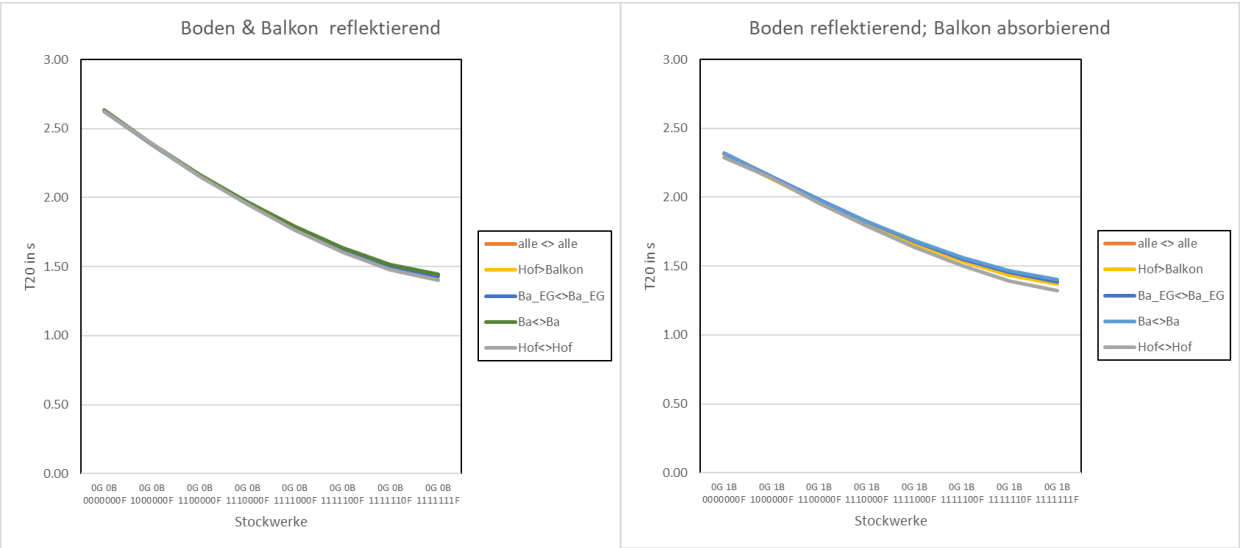

Abbildung 42 Modell Trapez (7): Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.1.7. Modell Mittel (7)

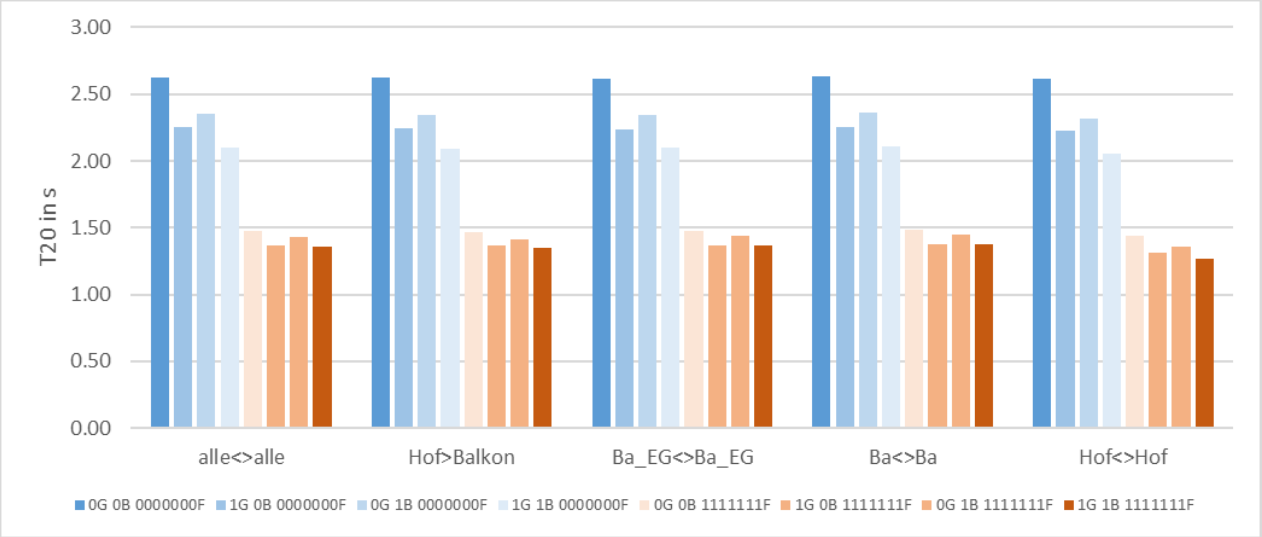

Abbildung 43 Modell Mittel (7): Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

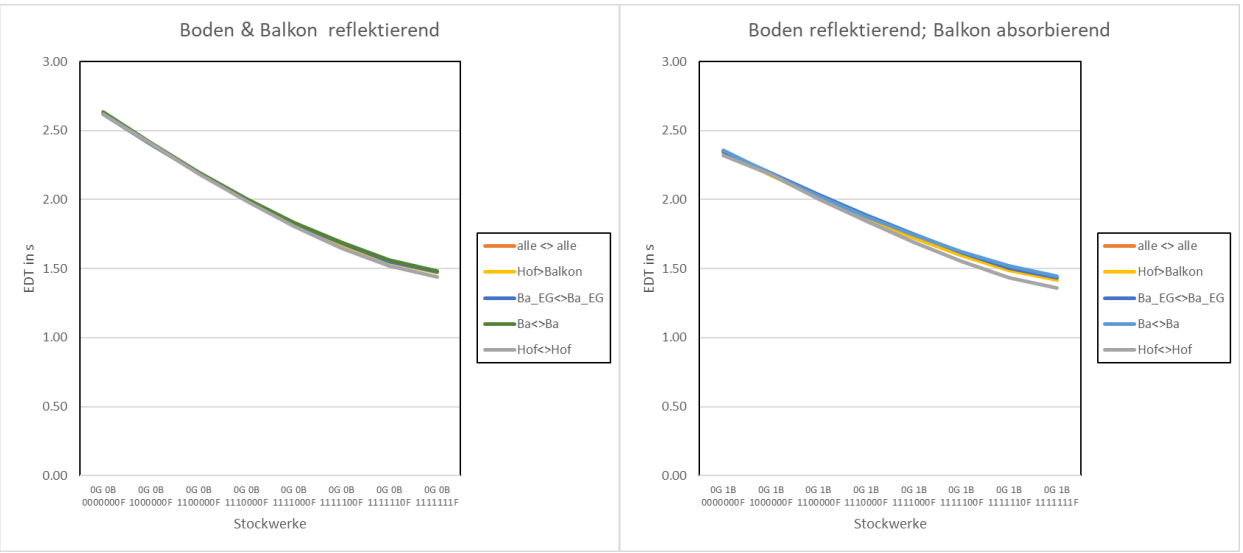

Abbildung 44 Modell Mittel (7): Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.1.8. Modell Zwicky

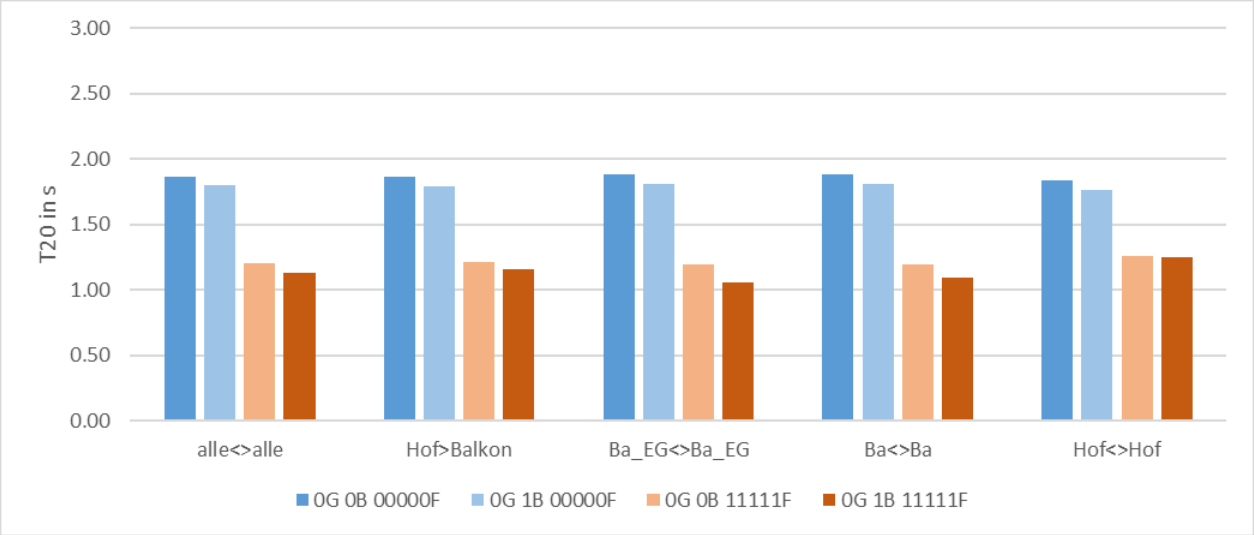

Abbildung 45 Zwicky: Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

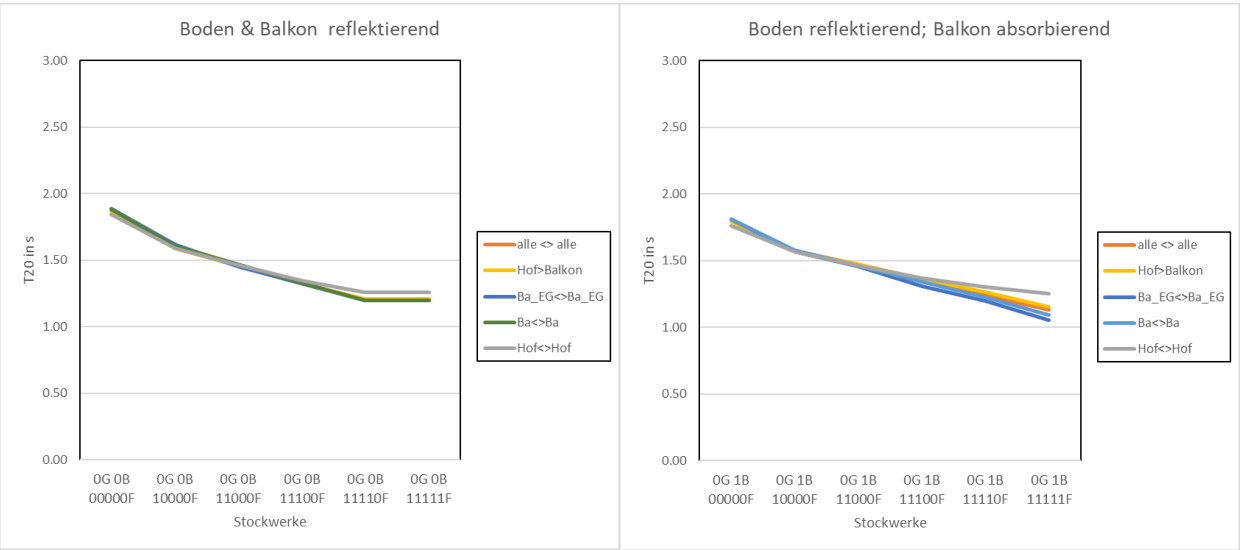

Abbildung 46 Zwicky: Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone und Innenhofboden.

9.1.9. Modell Müller Martini

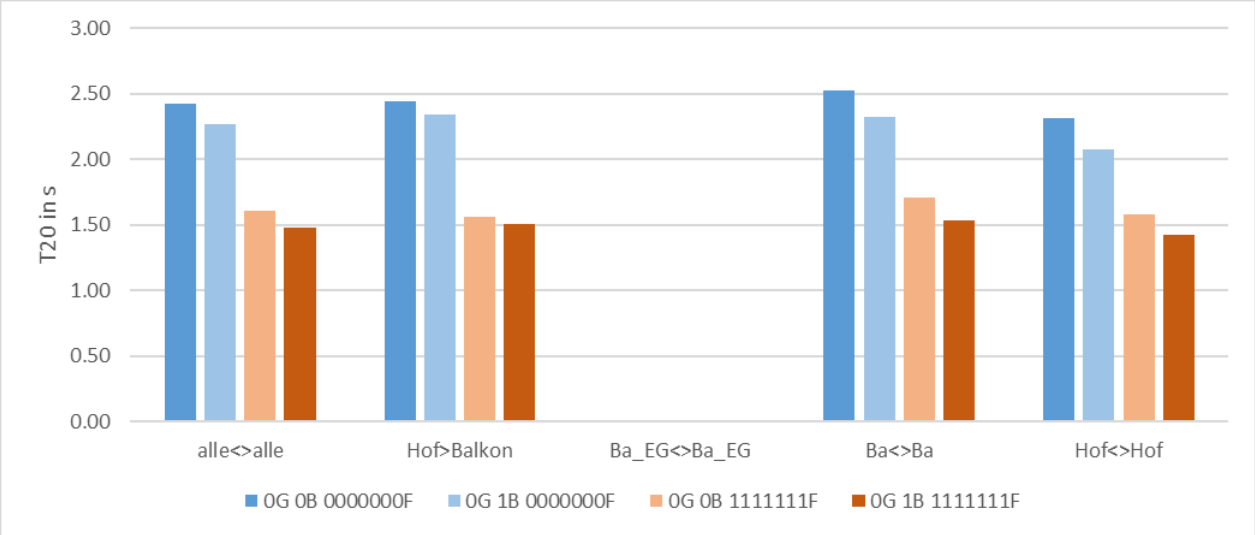

Abbildung 47 Müller Martini: Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

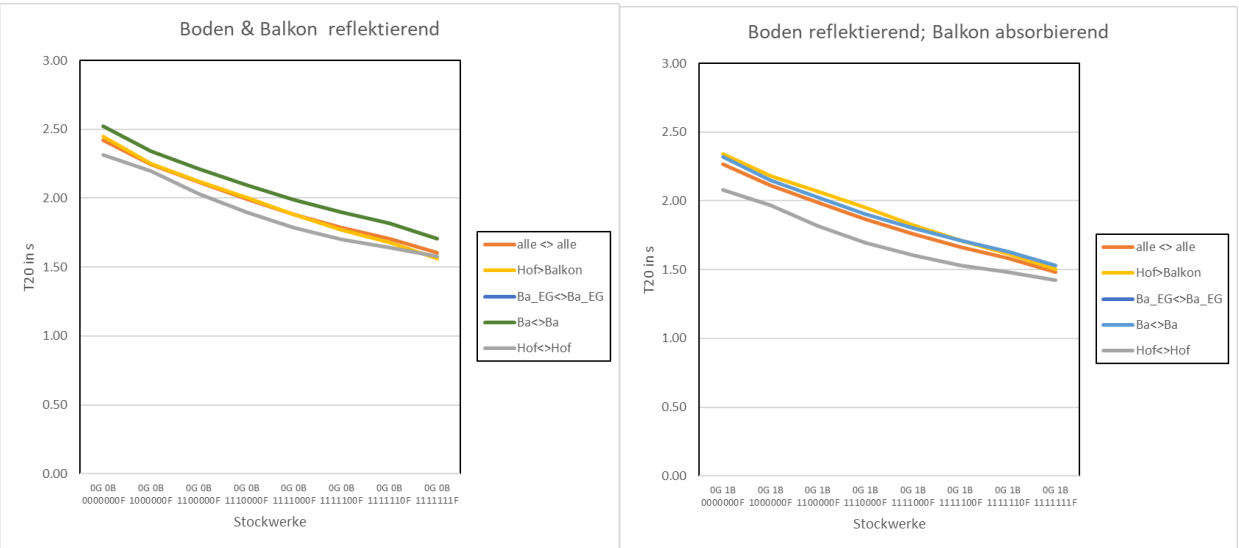

Abbildung 48 Müller Martini: Mittlere Nachhallzeit T_{20} ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone und Innenhofboden.

9.2. Early Decay Time *EDT*

9.2.1. Modell Klein (4)

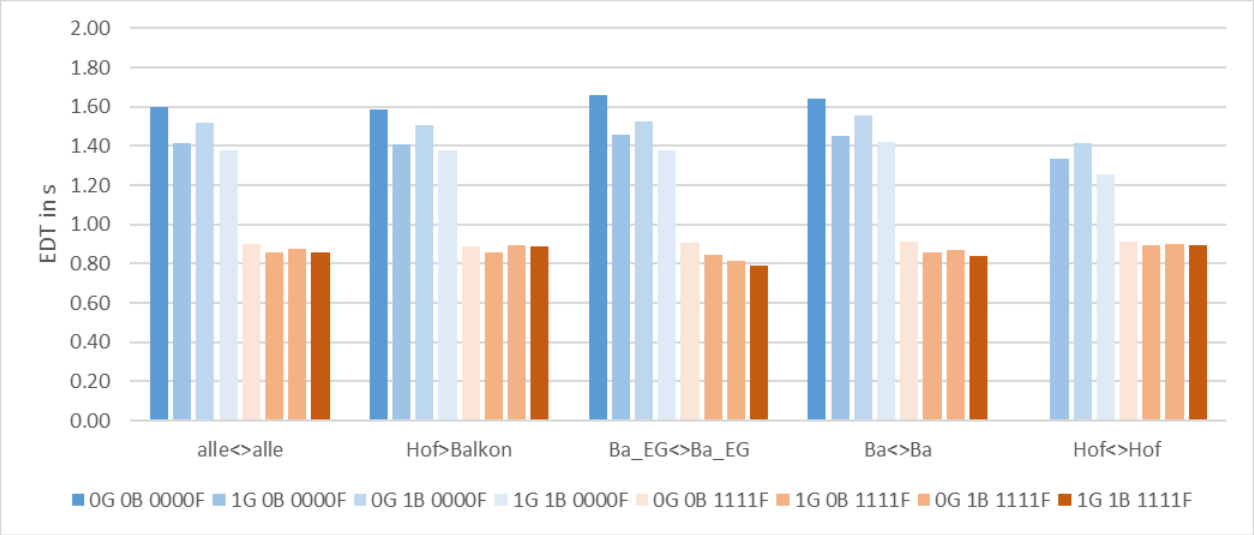

Abbildung 49 Modell Klein (4): Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

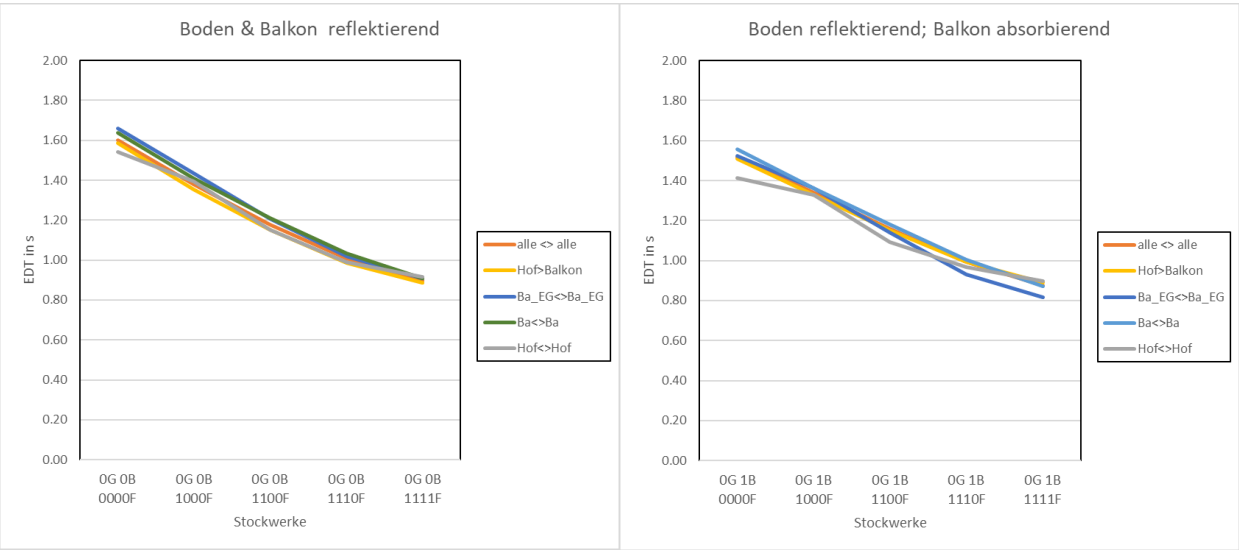

Abbildung 50 Modell Klein (4): Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.2.2. Modell Trapez (4)

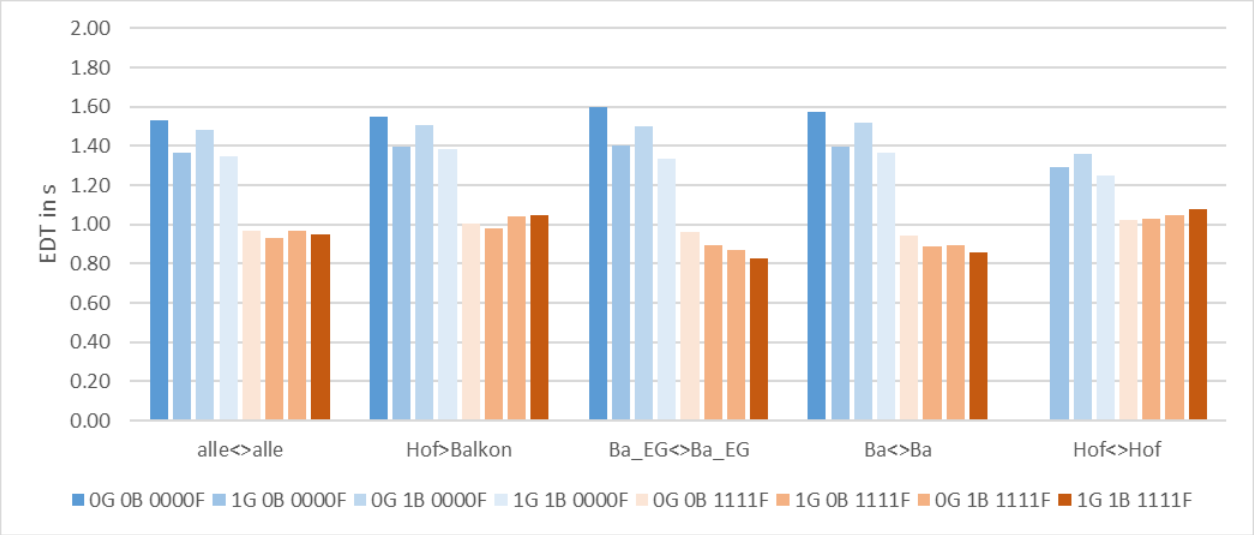

Abbildung 51 Modell Trapez (4): Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

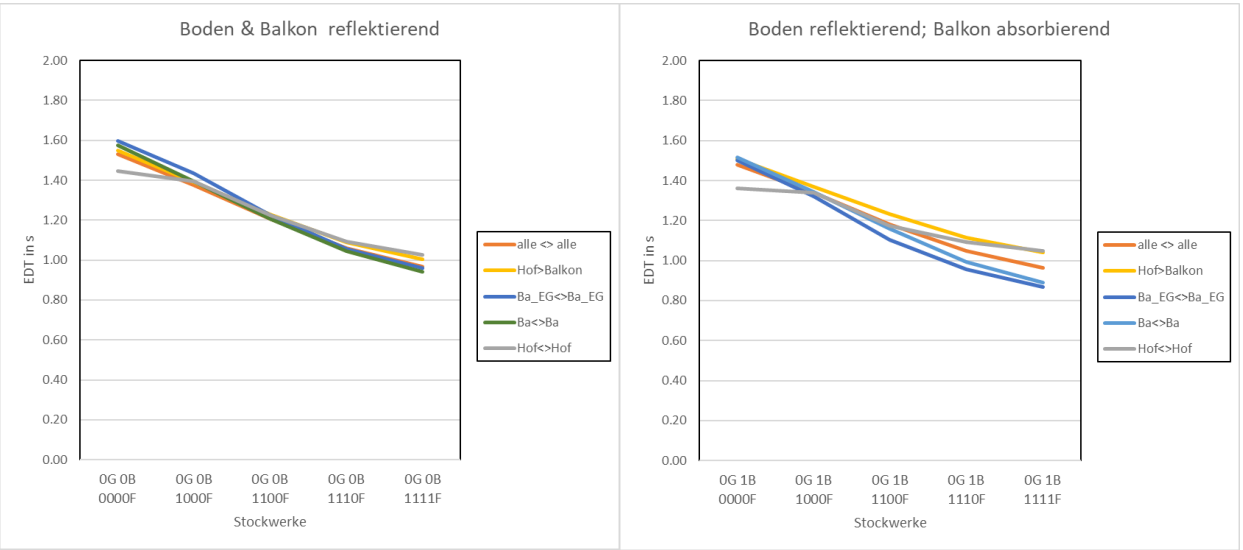

Abbildung 52 Modell Trapez (4): Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.2.3. Modell Mittel (4)

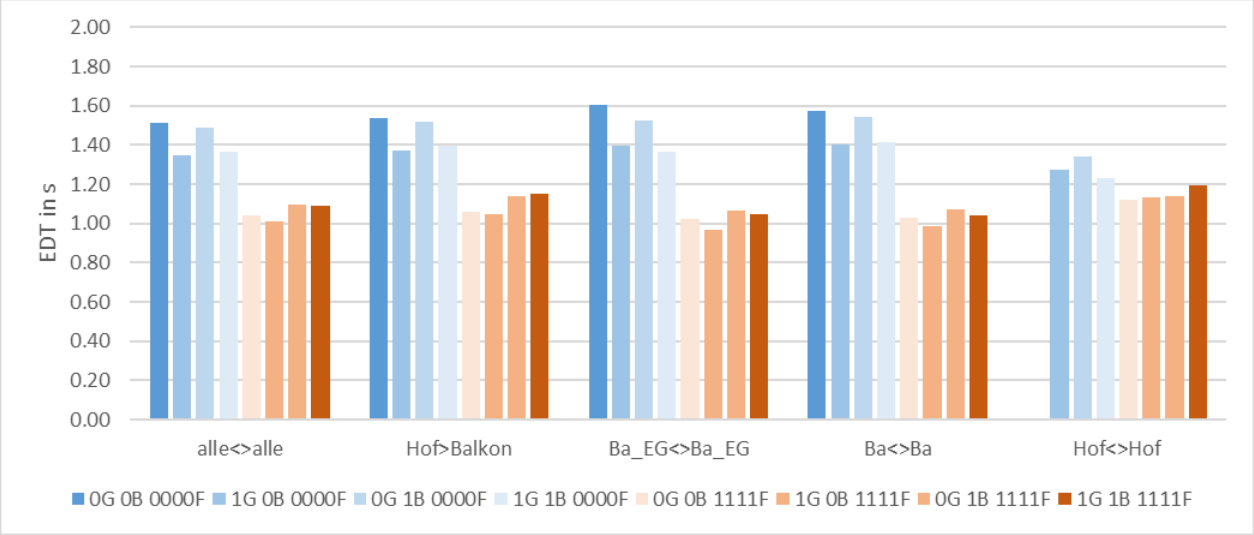

Abbildung 53 Modell Mittel (4): Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

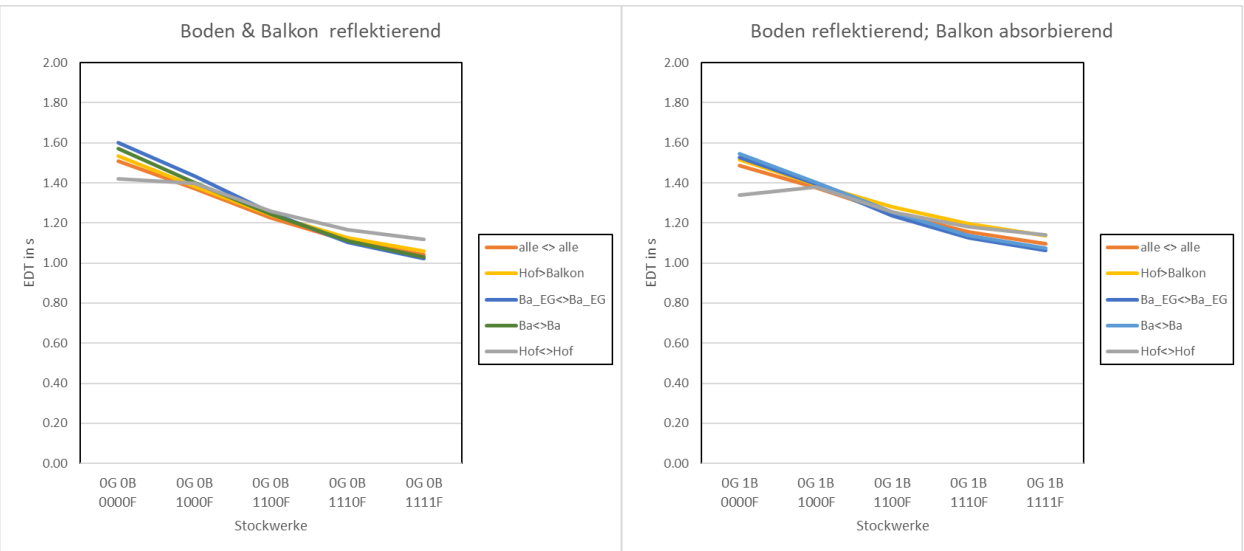

Abbildung 54 Modell Mittel (4): Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.2.4. Modell Gross (4)

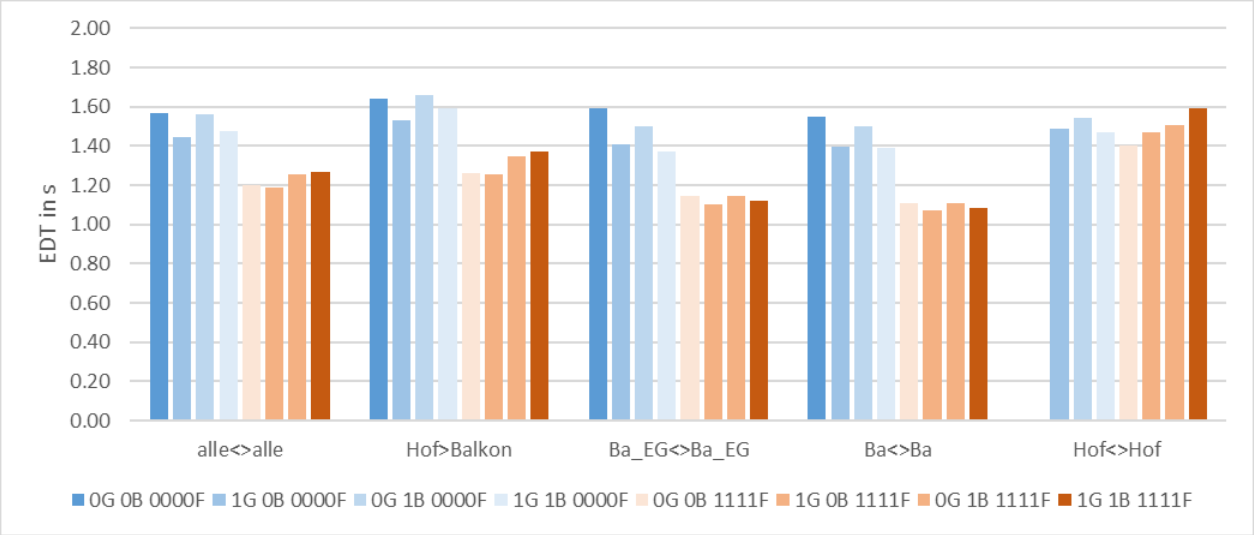

Abbildung 55 Modell Gross (4): Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

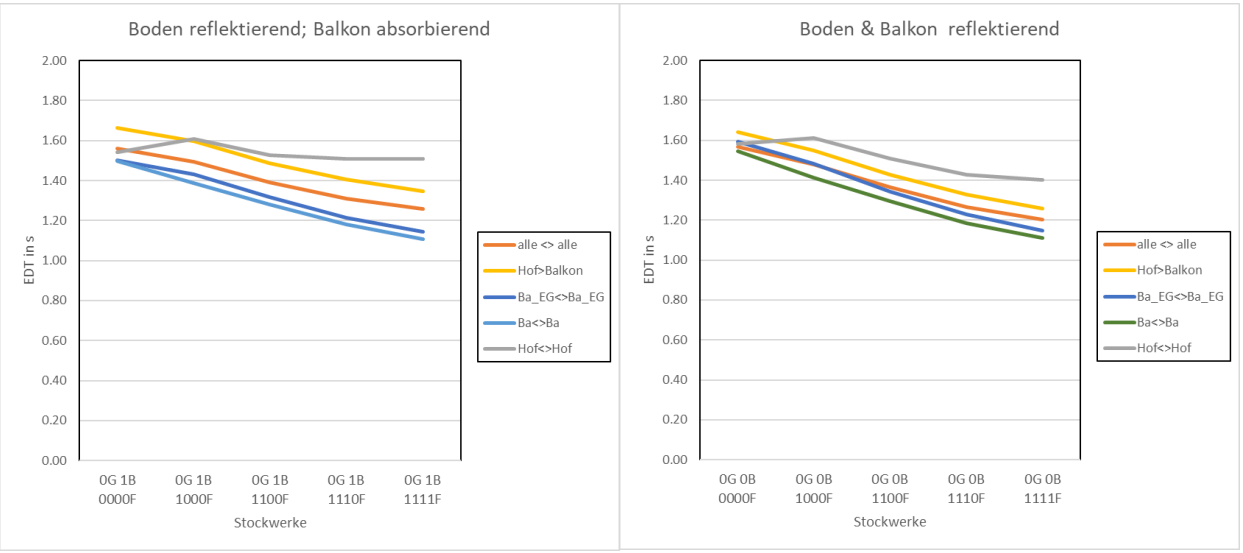

Abbildung 56 Modell Gross (4): Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.2.5. Modell Klein (7)

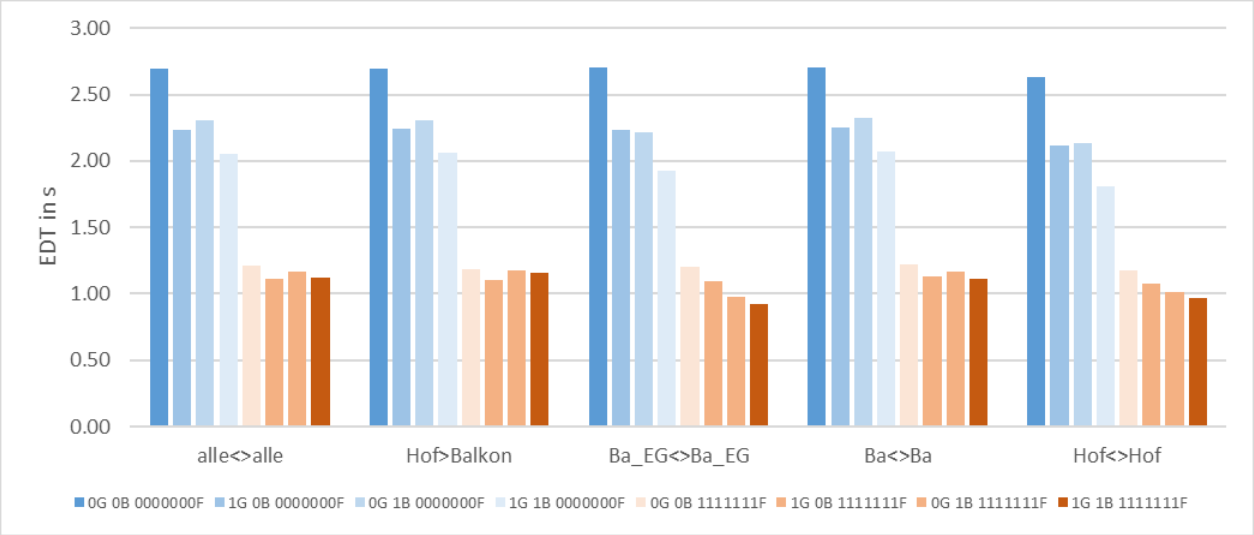

Abbildung 57 Modell Klein (7): Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

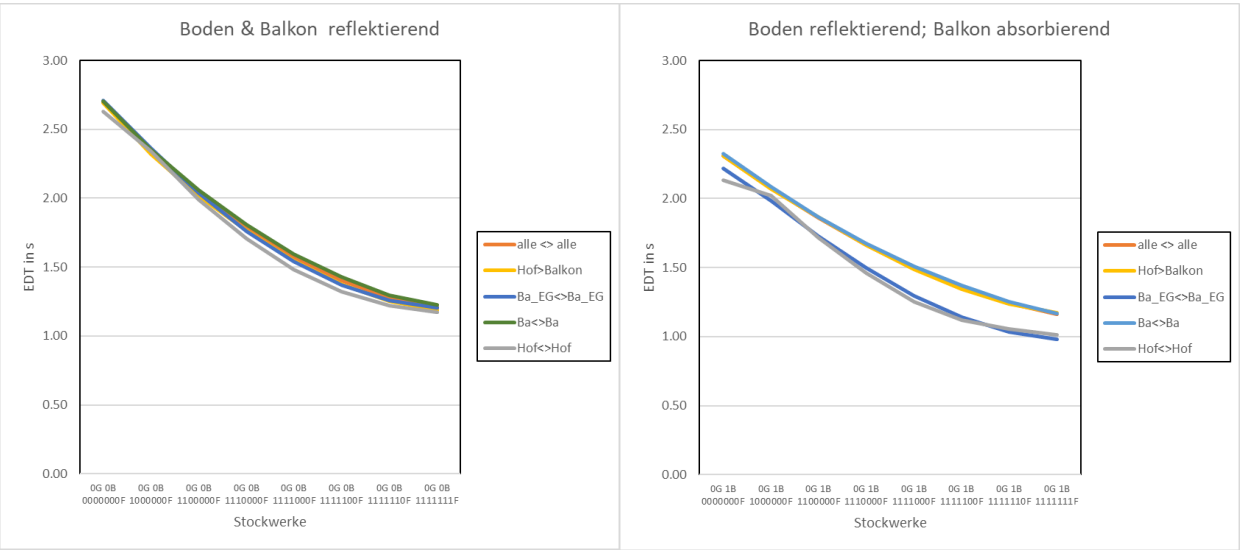

Abbildung 58 Modell Klein (7): Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.2.6. Modell Trapez (7)

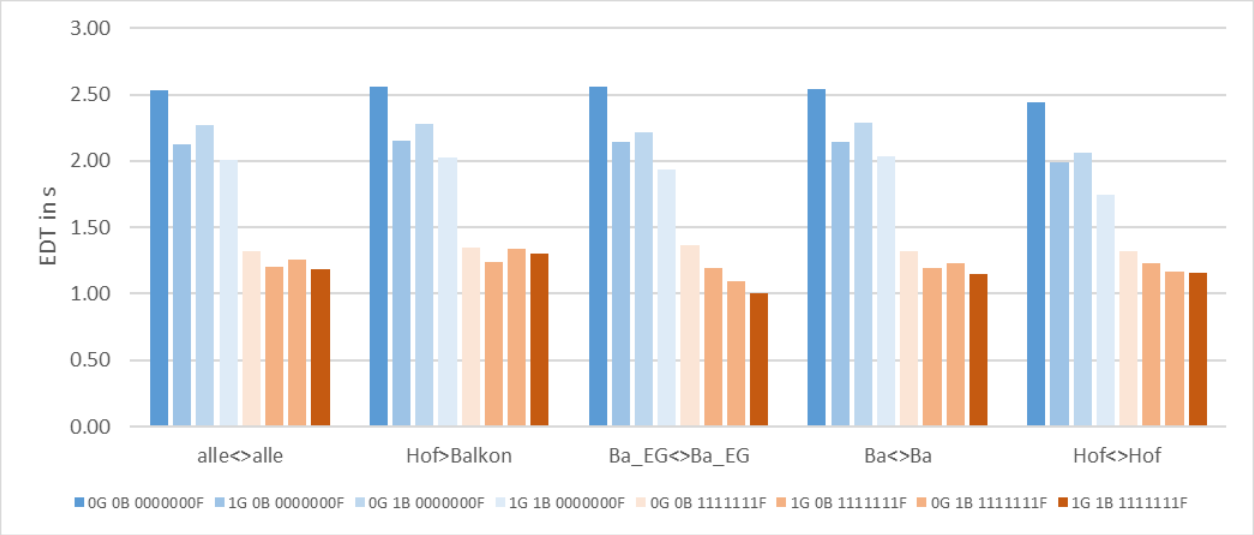

Abbildung 59 Modell Trapez (7): Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

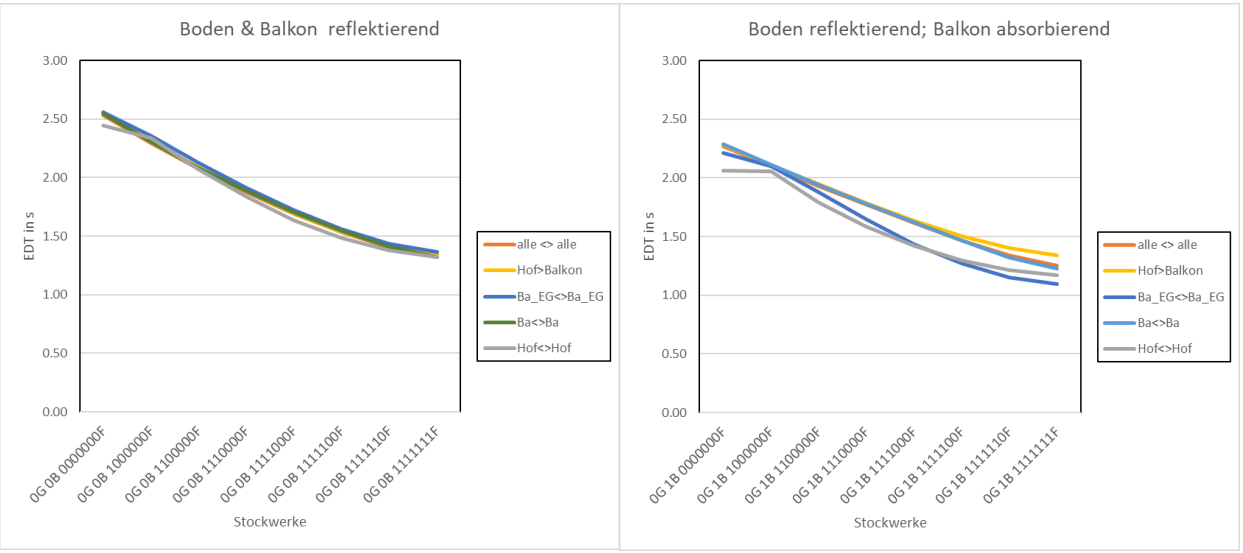

Abbildung 60 Modell Trapez (7): Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.2.7. Modell Mittel (7)

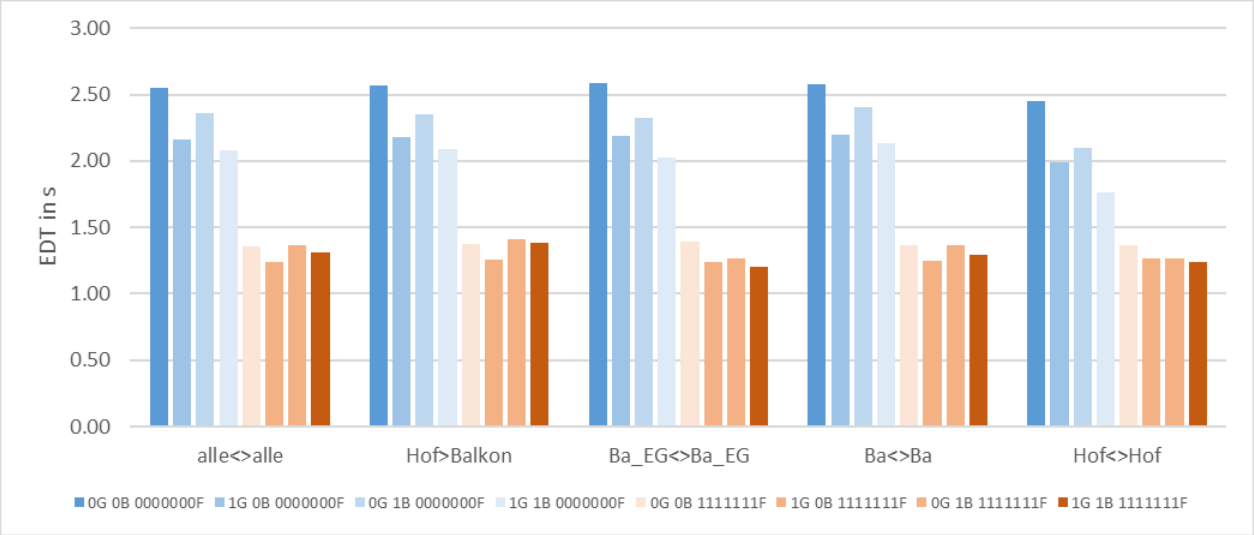

Abbildung 61 Modell Mittel (7): Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

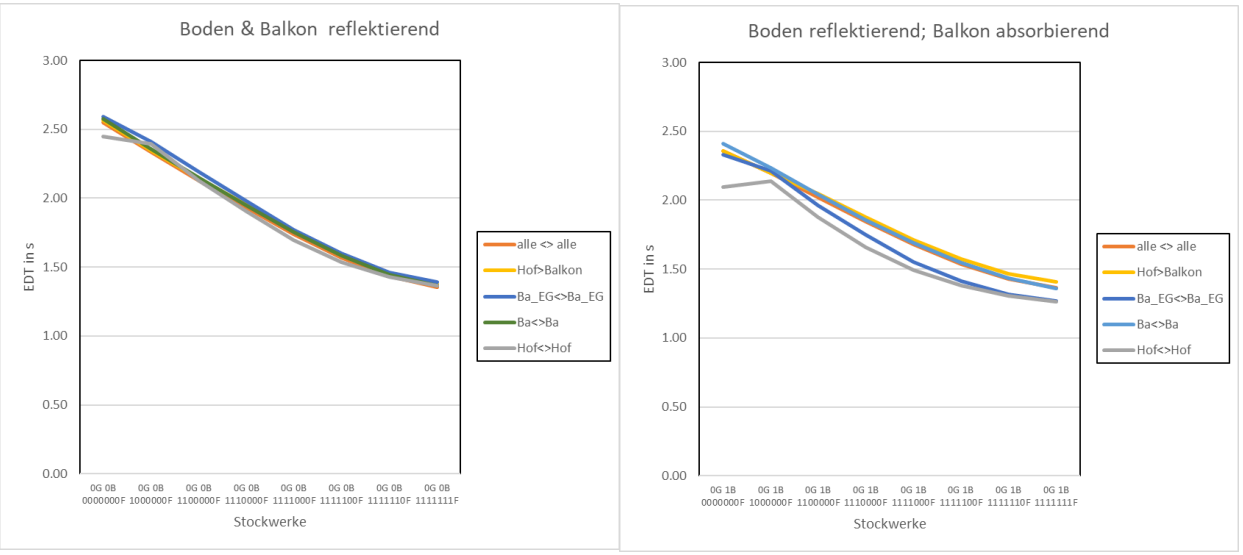

Abbildung 62 Modell Mittel (7): Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.2.8. Modell Zwicky

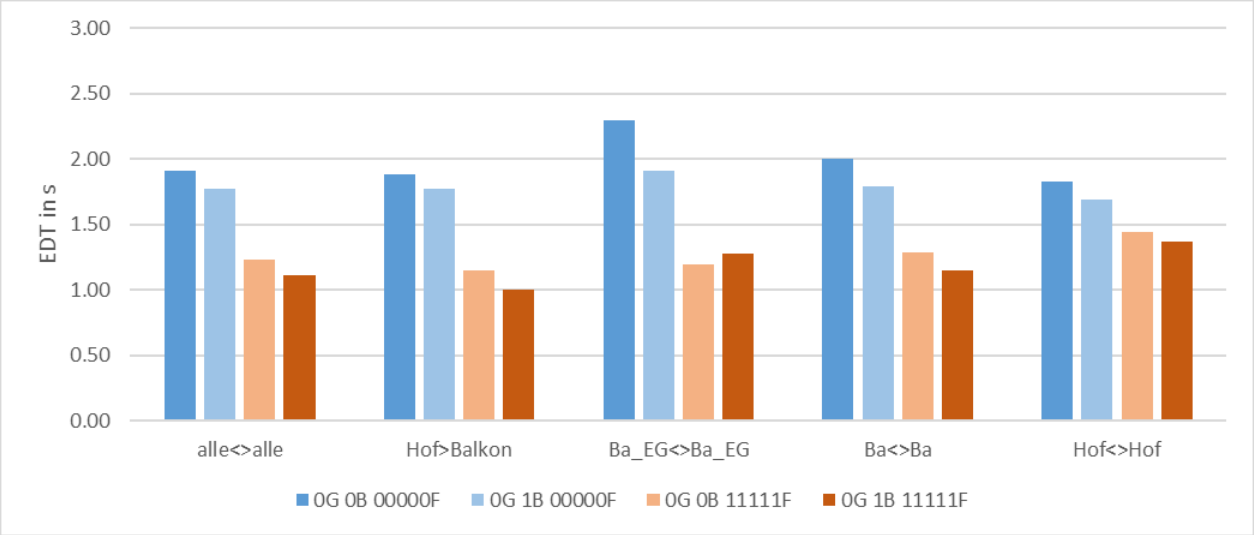

Abbildung 63 Zwicky: Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

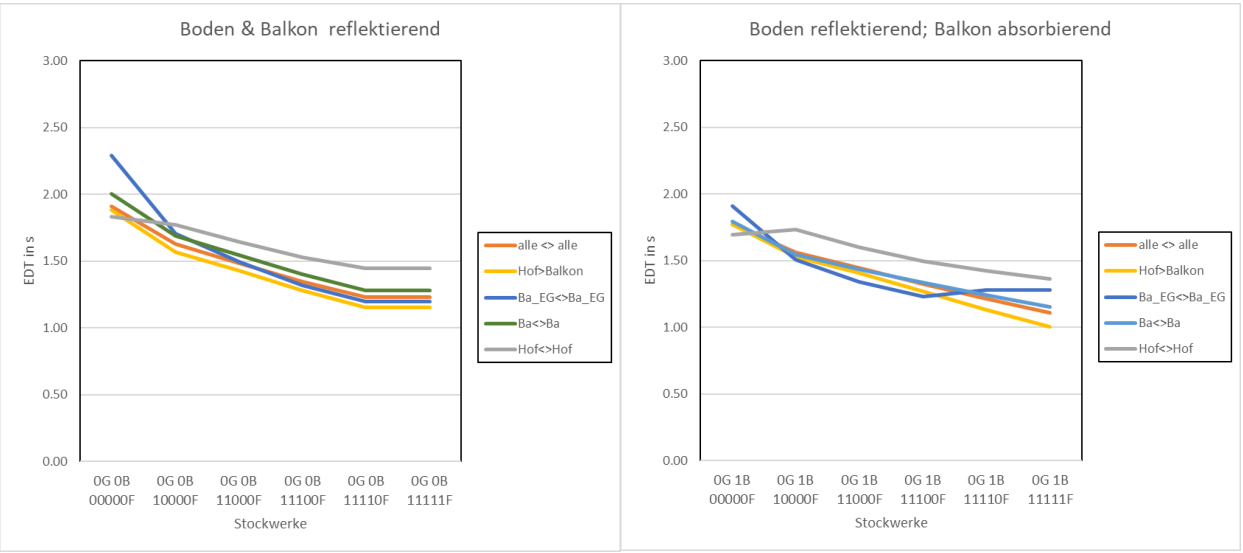

Abbildung 64 Zwicky: Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone und Innenhofboden.

9.2.9. Modell Müller Martini

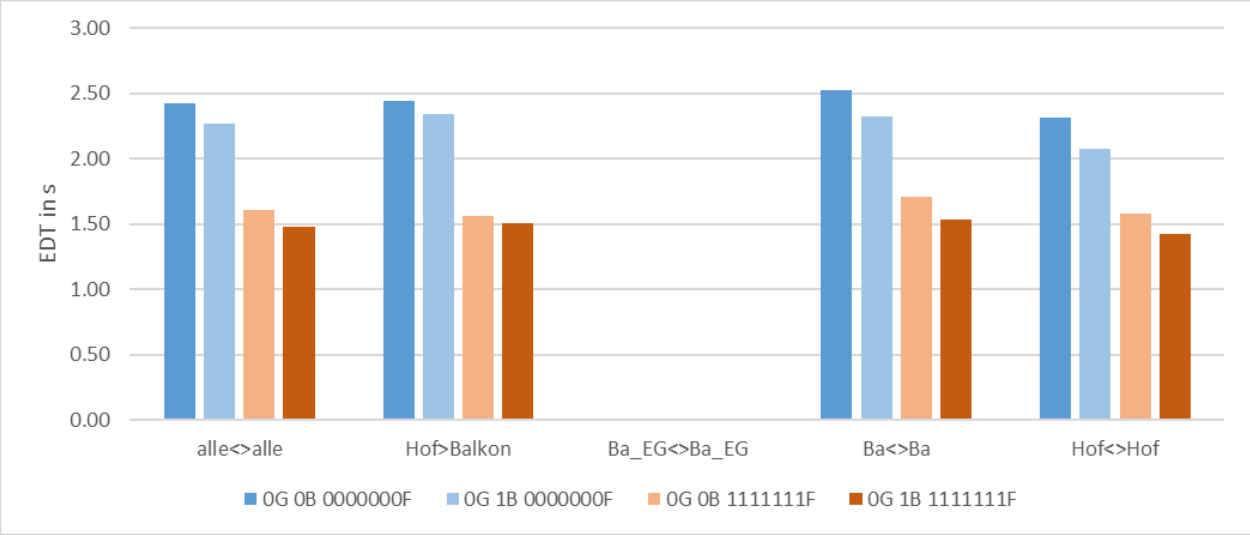

Abbildung 65 Müller Martini: Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

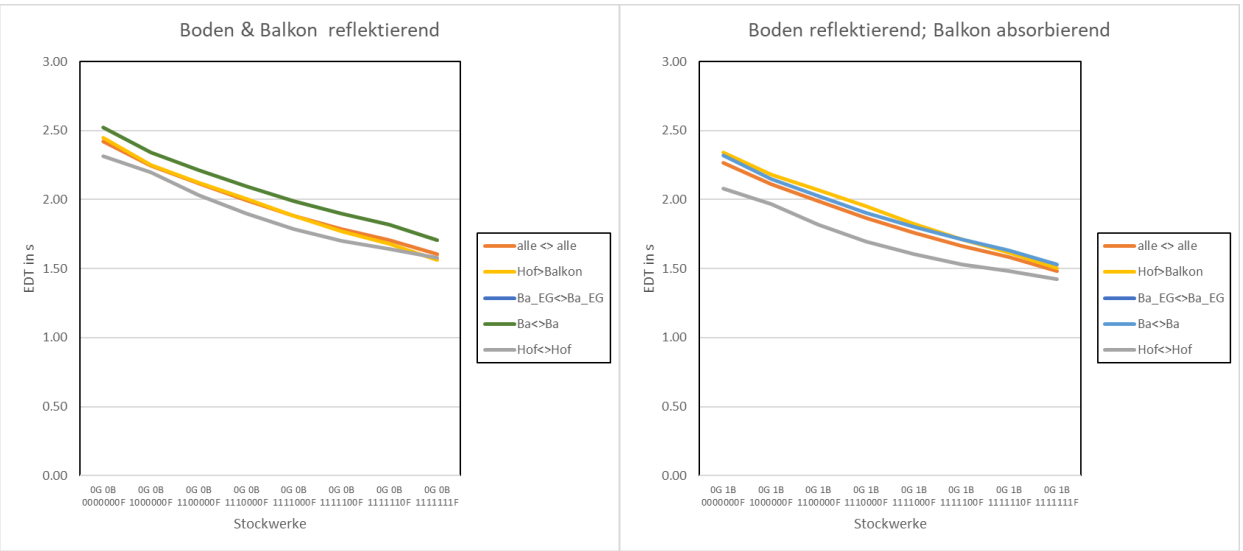

Abbildung 66 Müller Martini: Mittlere Early Decay Time *EDT* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone und Innenhofboden.

9.3. Verminderung Stärkemass *G*

9.3.1. Modell Klein (4)

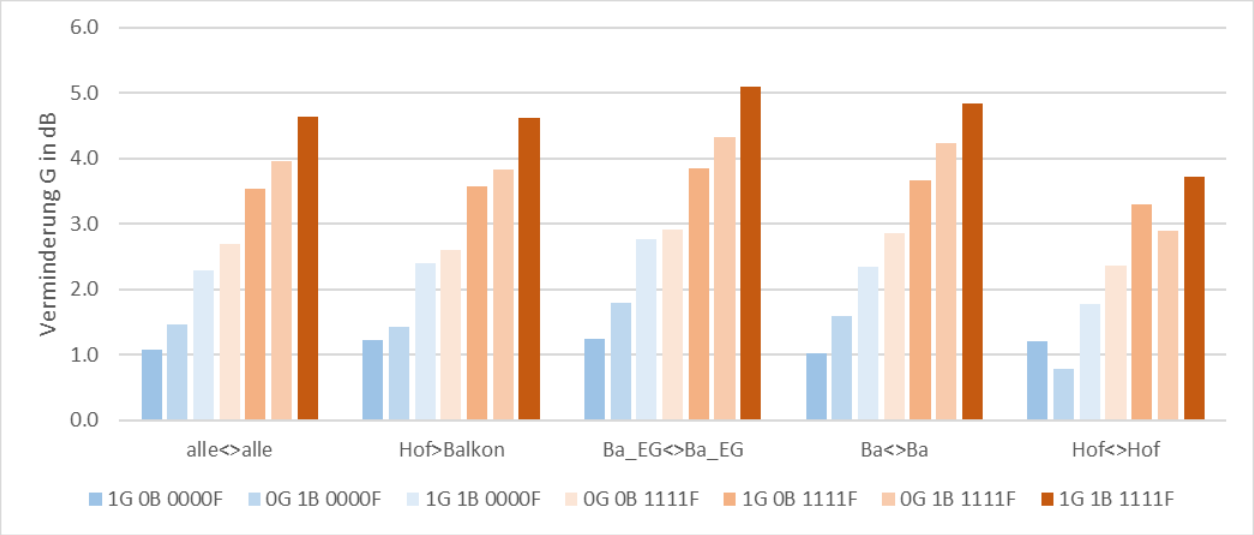

Abbildung 67 Modell Klein (4): Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

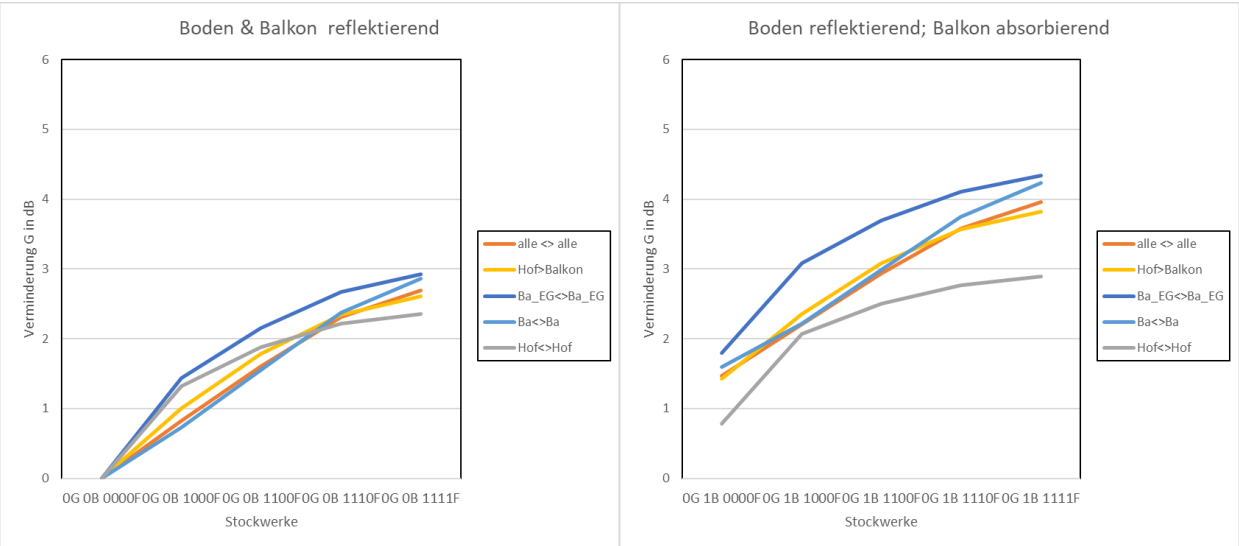

Abbildung 68 Modell Klein (4): Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.3.2. Modell Trapez (4)

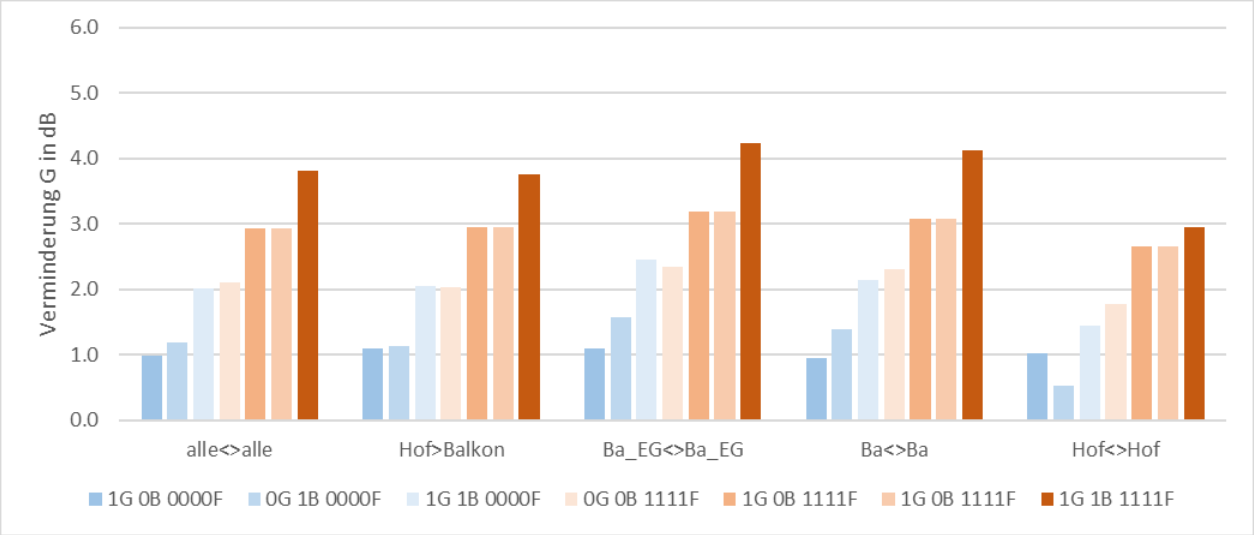

Abbildung 69 Modell Trapez (4): Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

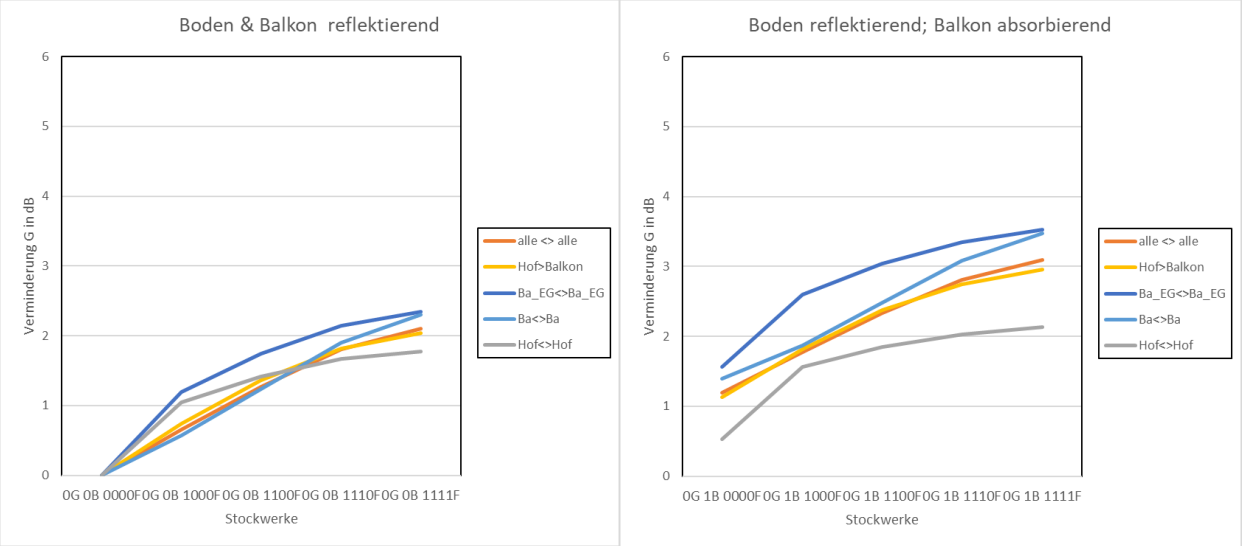

Abbildung 70 Modell Trapez (4): Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.3.3. Modell Mittel (4)

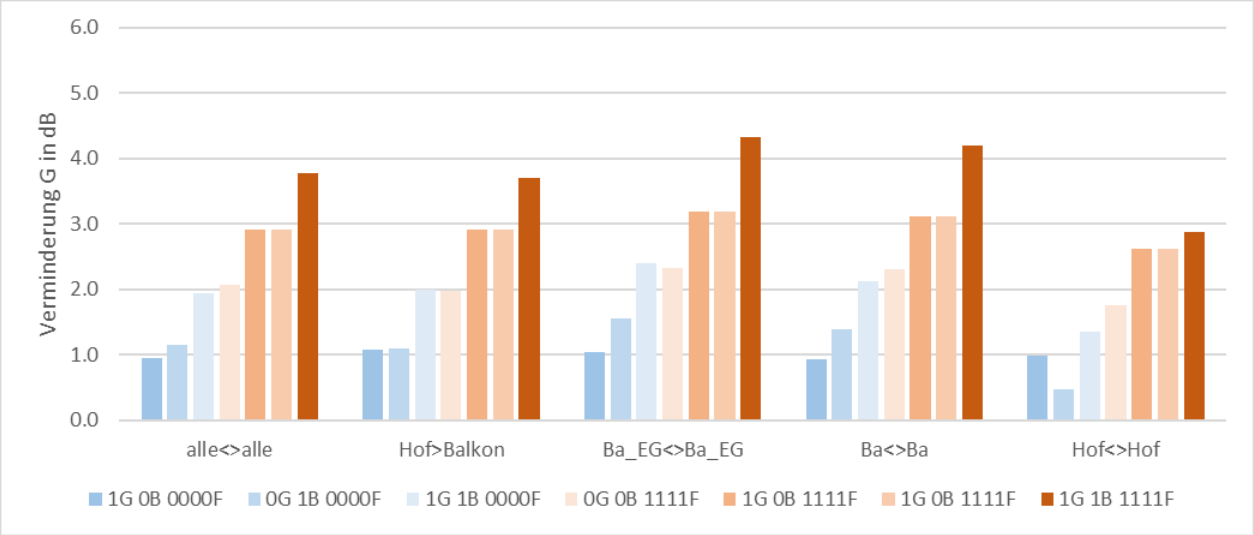

Abbildung 71 Modell Mittel (4): Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

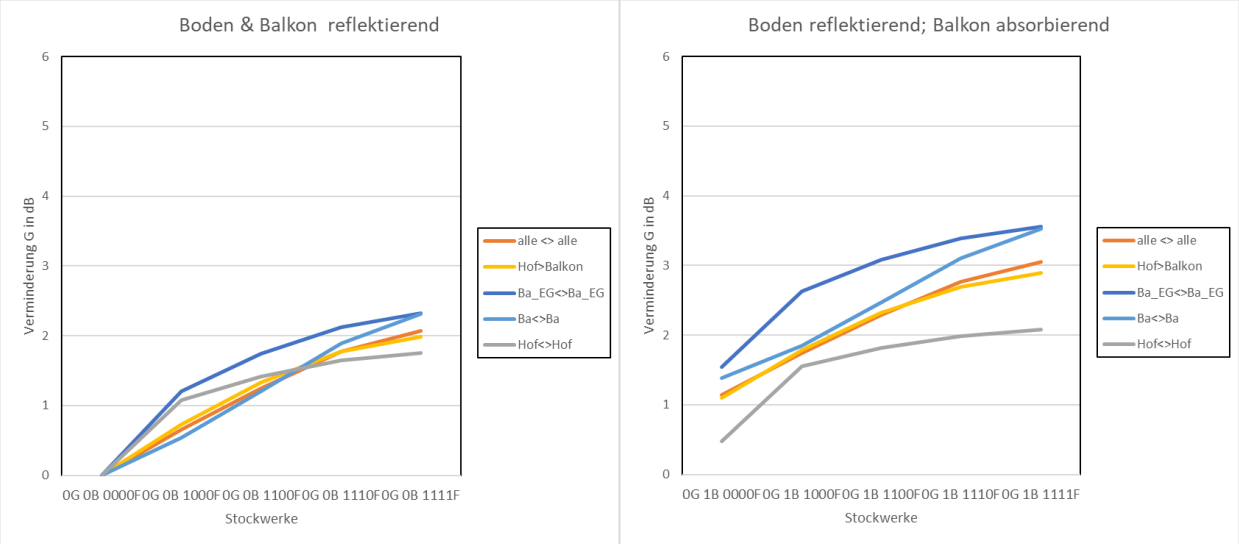

Abbildung 72 Modell Mittel (4): Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.3.4. Modell Gross (4)

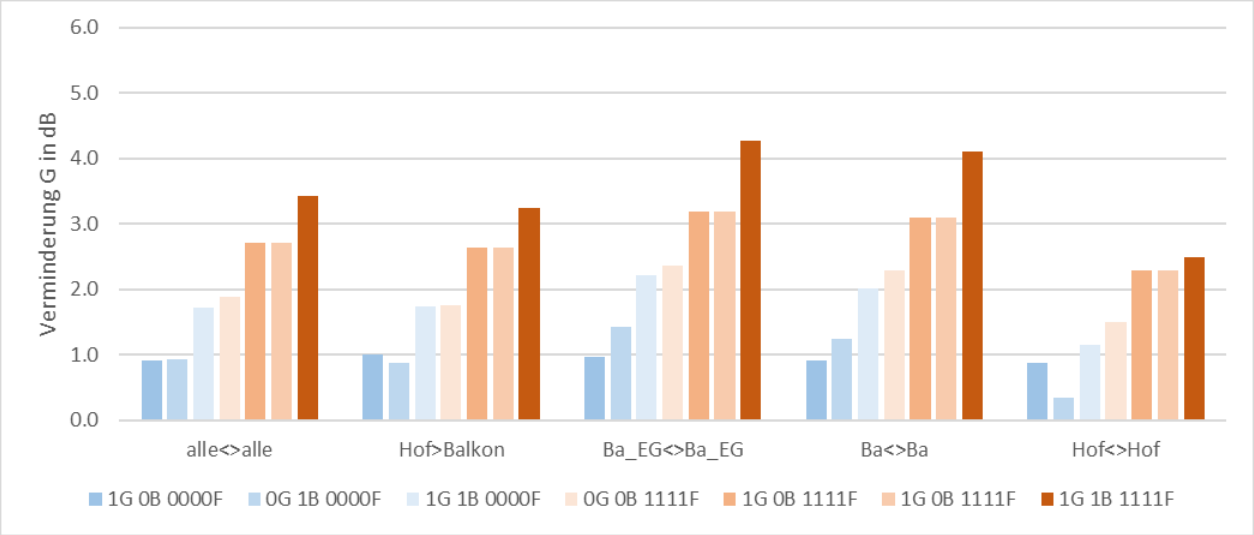

Abbildung 73 Modell Gross (4): Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

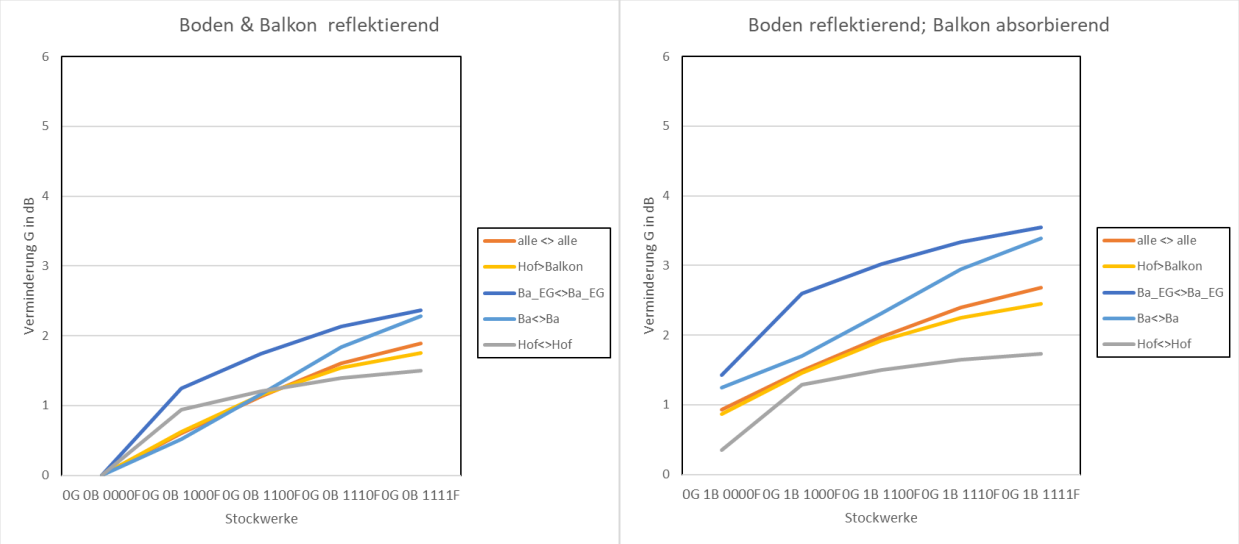

Abbildung 74 Modell Gross (4): Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.3.5. Modell Klein (7)

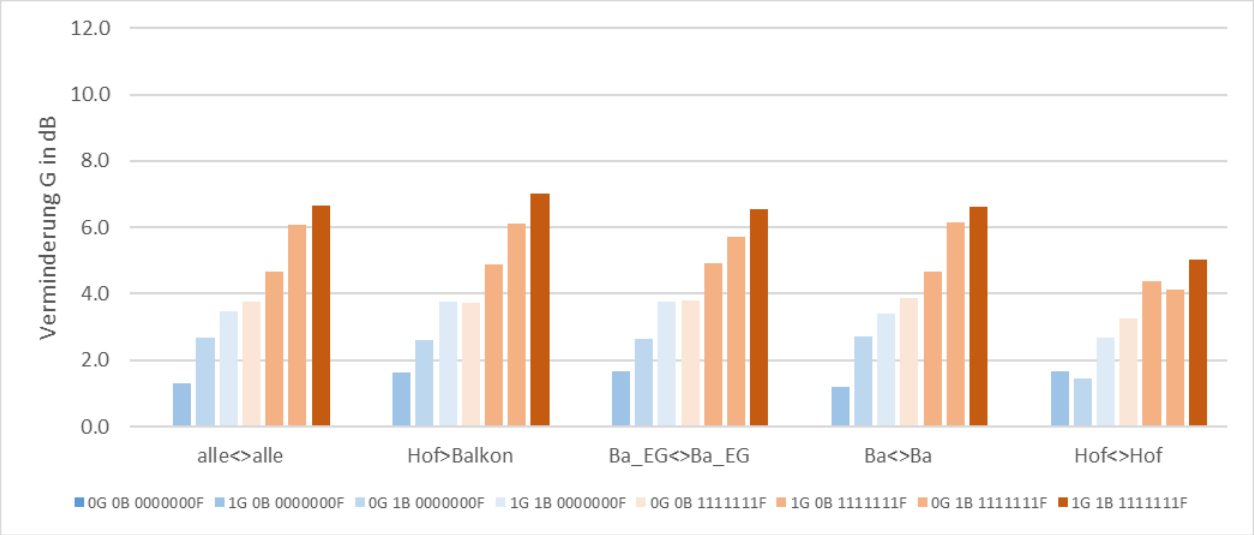

Abbildung 75 Modell Klein (7): Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

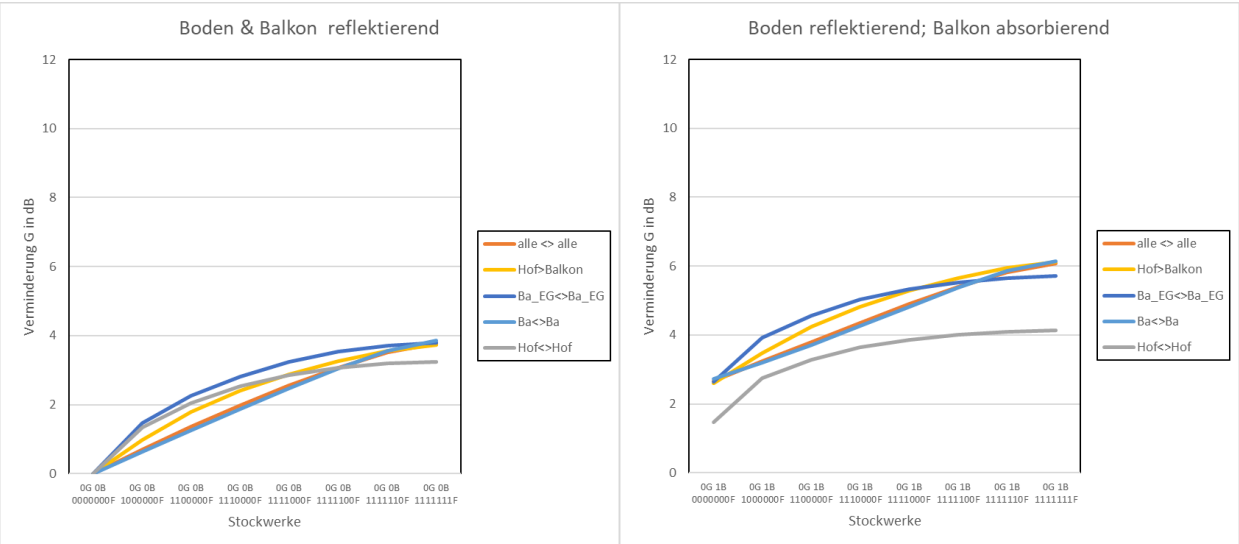

Abbildung 76 Modell Klein (7): Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.3.6. Modell Trapez (7)

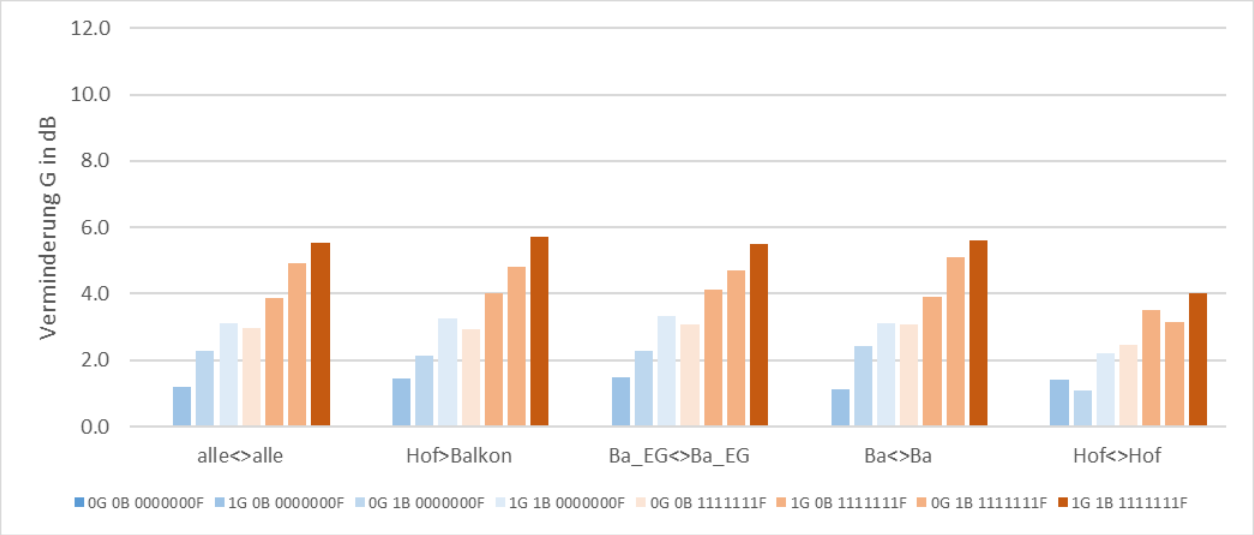

Abbildung 77 Modell Trapez (7): Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

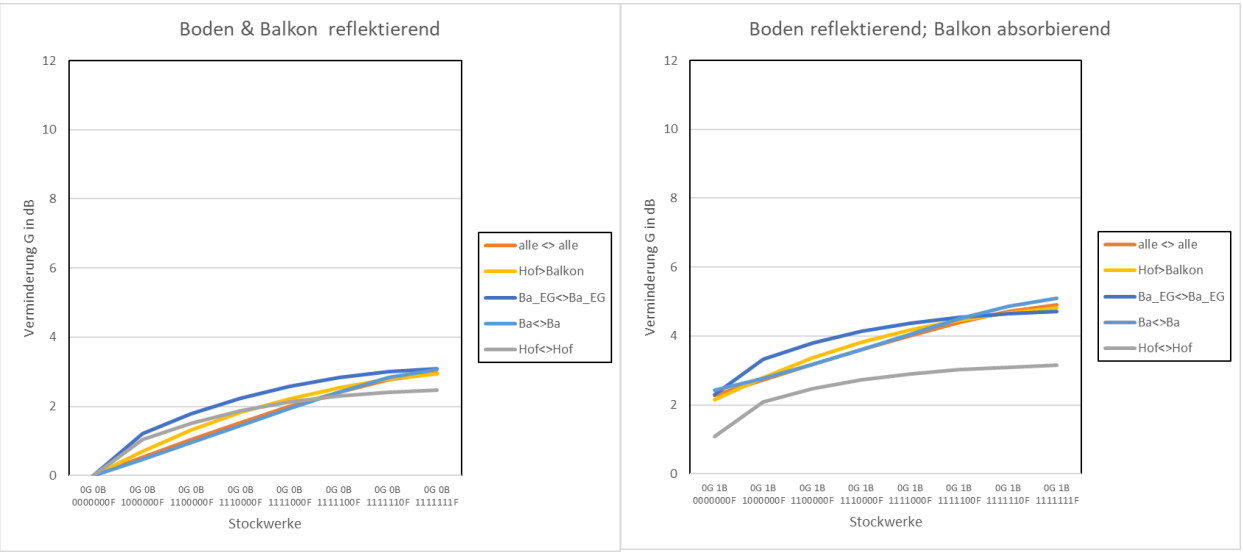

Abbildung 78 Modell Trapez (7): Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.3.7. Modell Mittel (7)

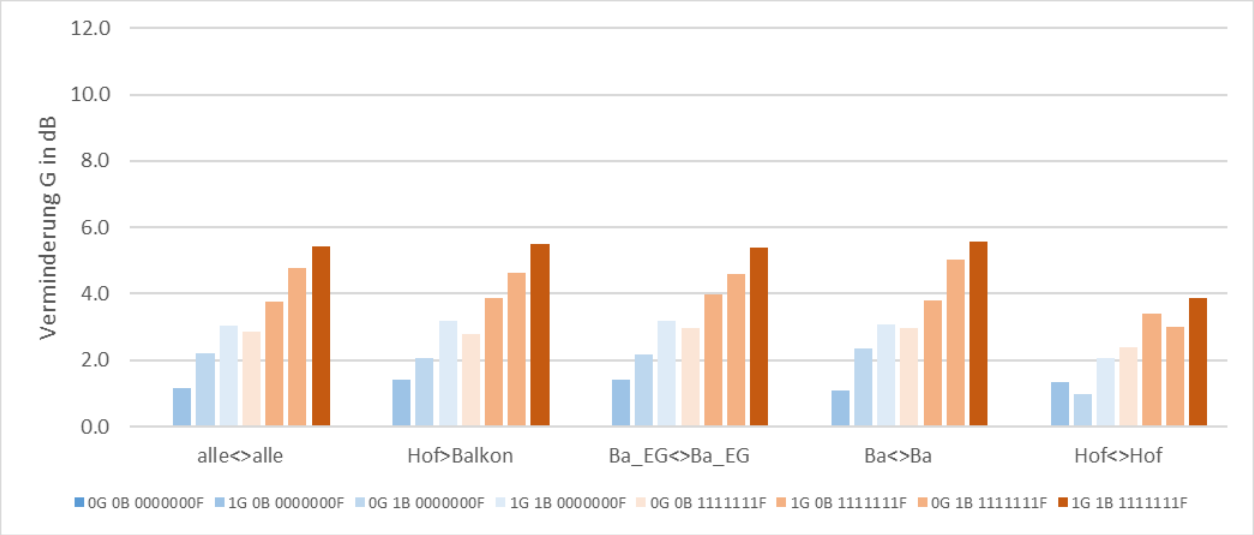

Abbildung 79 Modell Mittel (7): Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

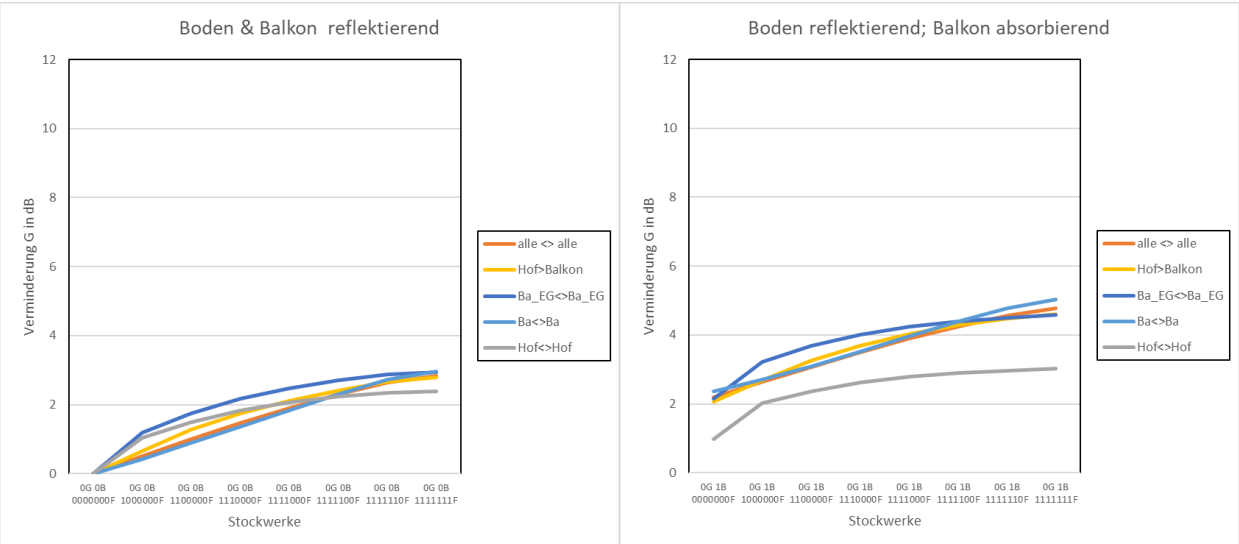

Abbildung 80 Modell Mittel (7): Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.3.8. Modell Zwicky

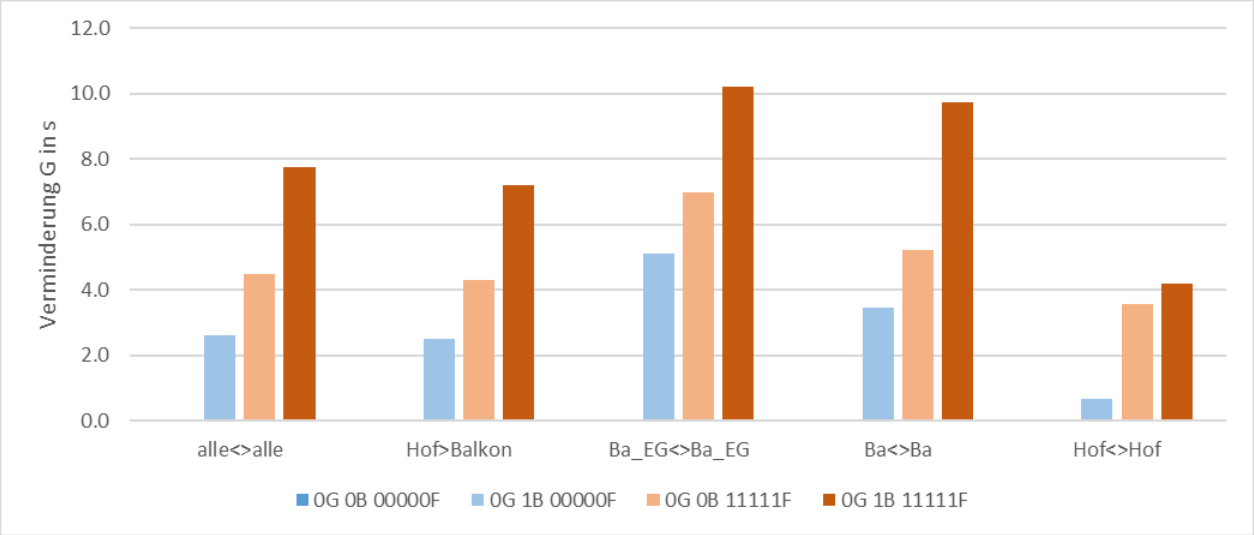

Abbildung 81 Zwicky: Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

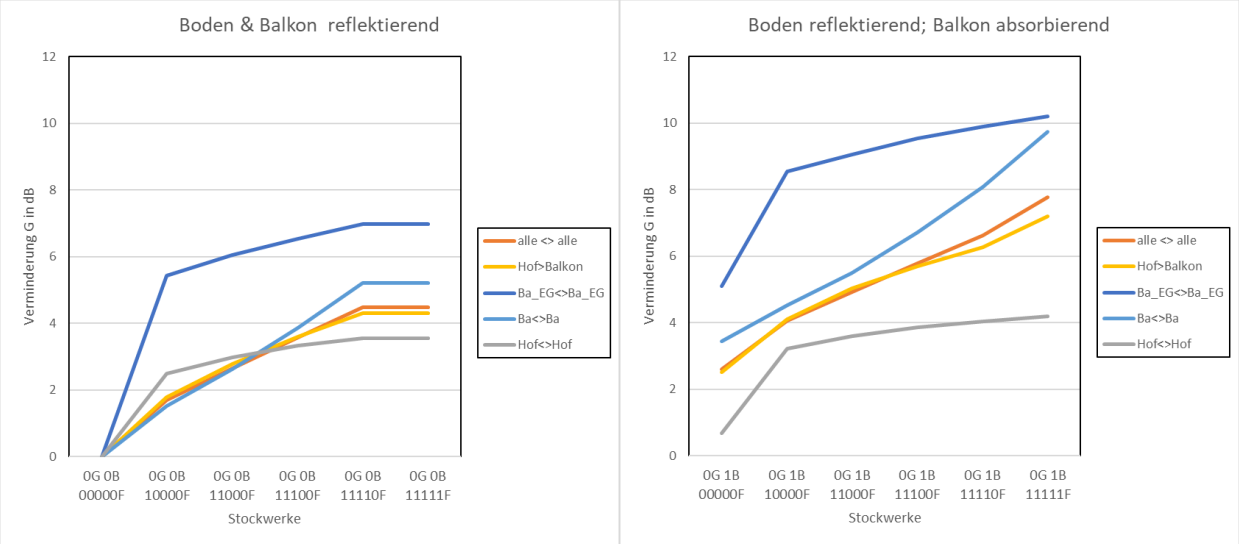

Abbildung 82 Zwicky: Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone und Innenhofboden.

9.3.9. Modell Müller Martini

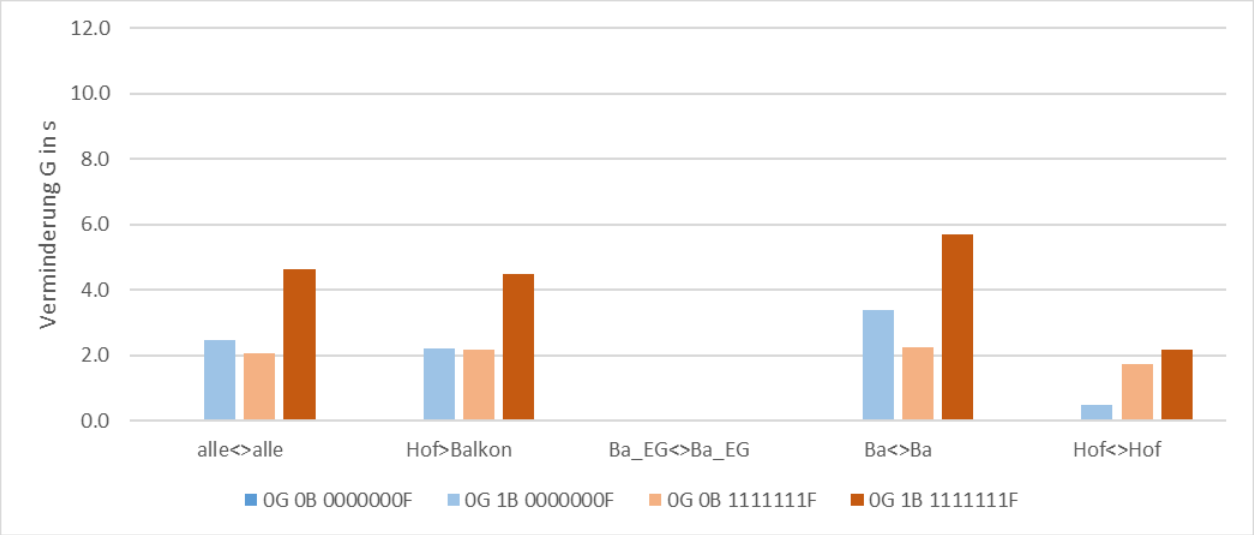

Abbildung 83 Müller Martini: Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

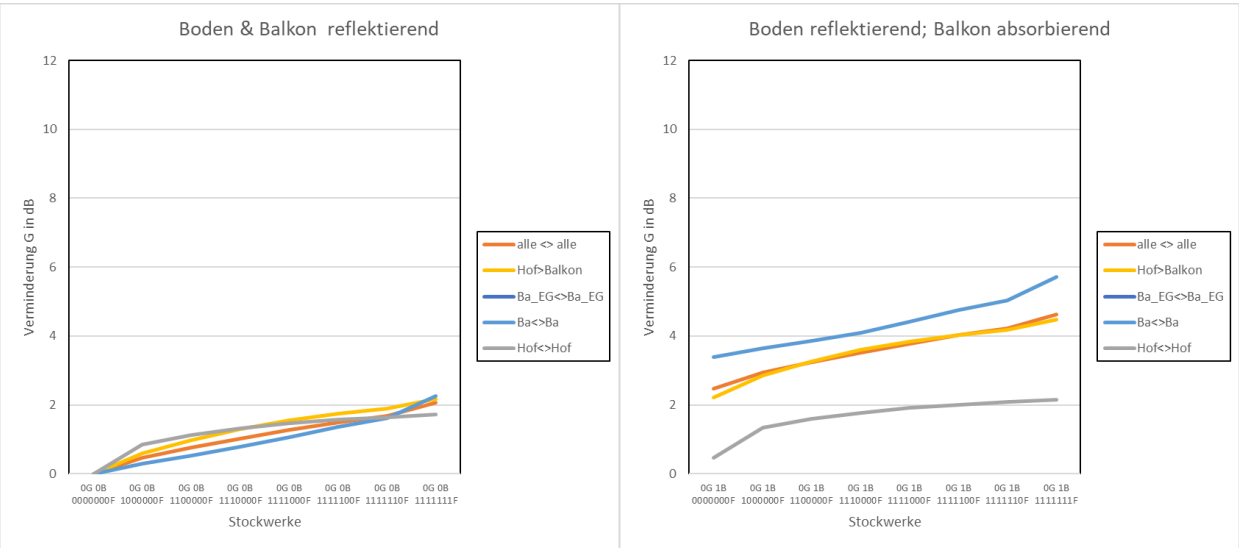

Abbildung 84 Müller Martini: Verminderung Mittleres Stärkemass *G* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone und Innenhofboden.

9.4. Sprachübertragungsindex *STI*

9.4.1. Modell Klein (4)

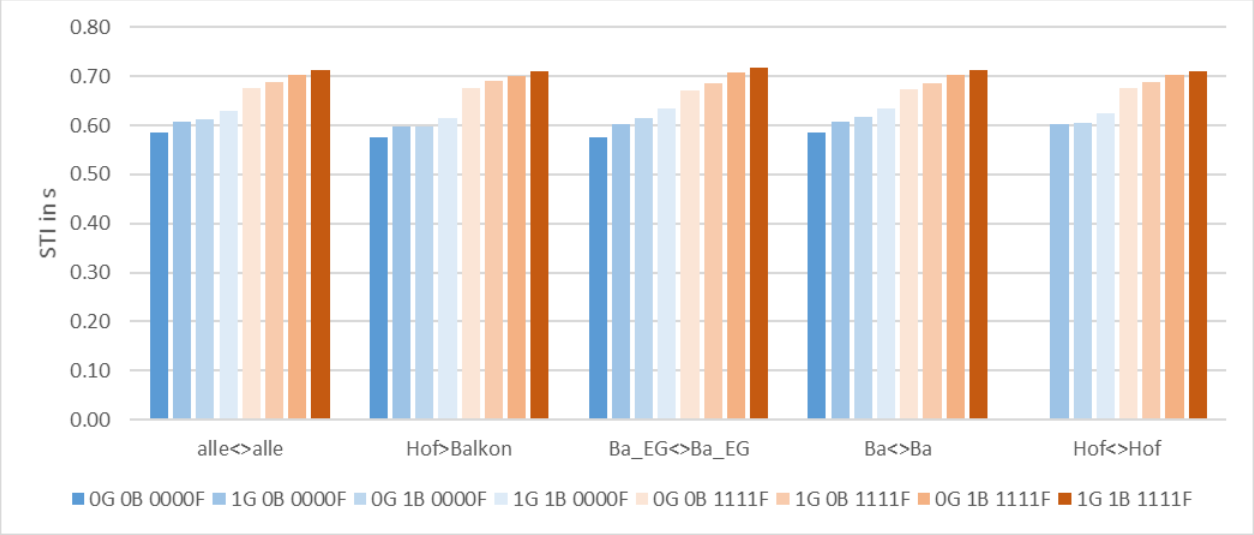

Abbildung 85 Modell Klein (4): Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

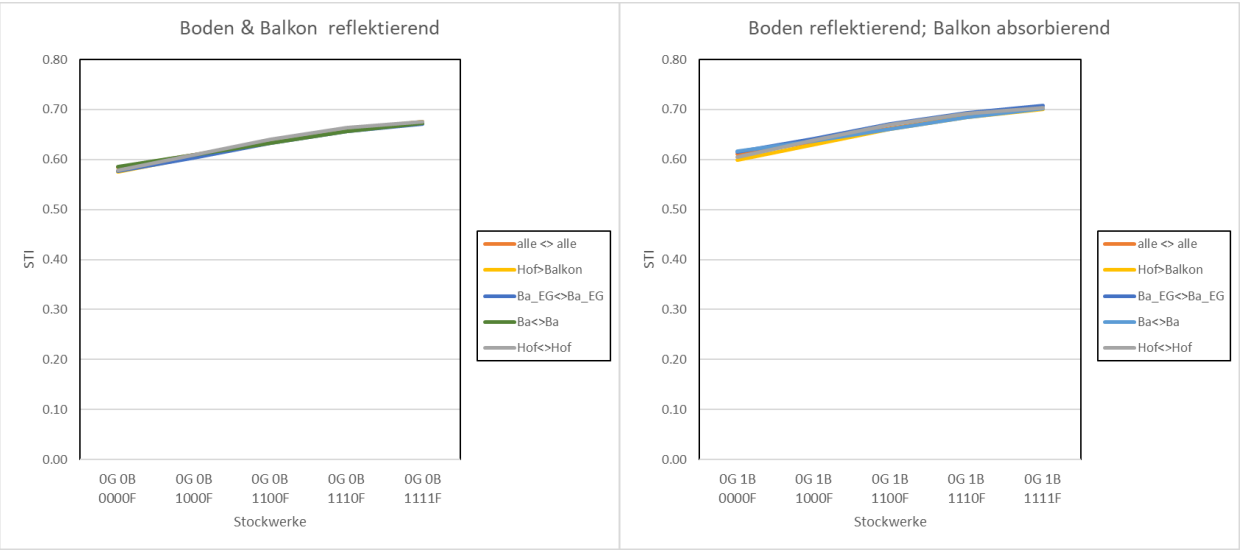

Abbildung 86 Modell Klein (4): Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.4.2. Modell Trapez (4)

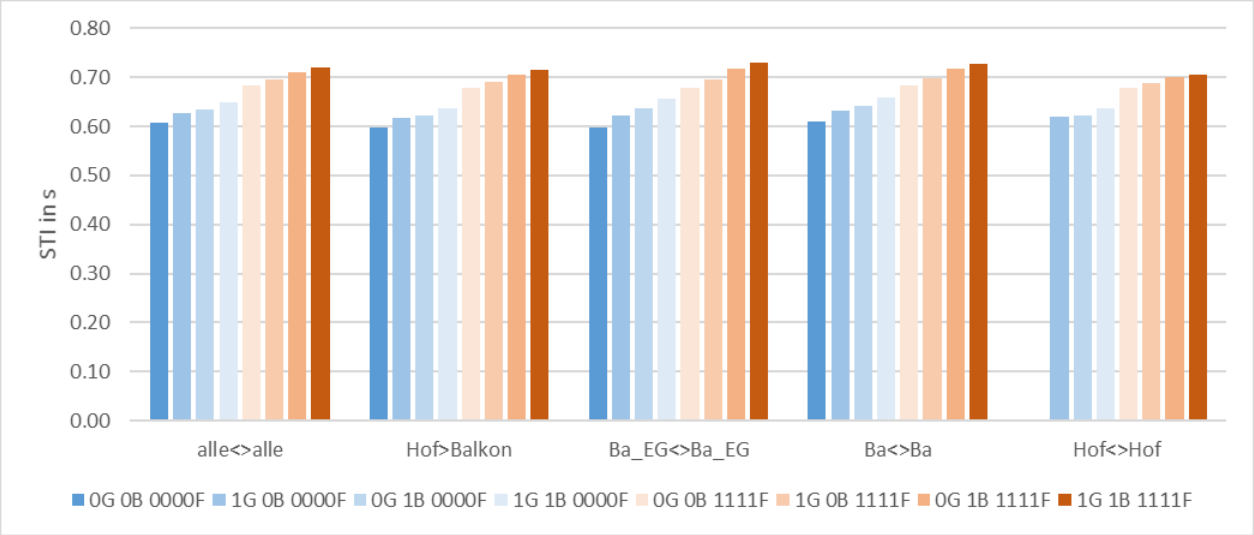

Abbildung 87 Modell Trapez (4): Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

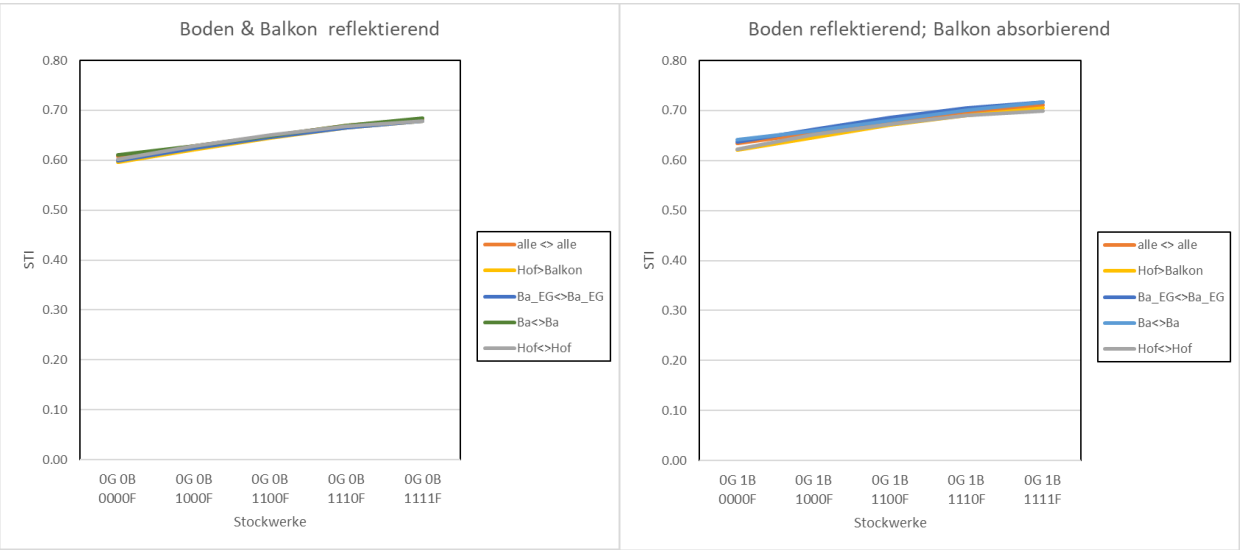

Abbildung 88 Modell Trapez (4): Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.4.3. Modell Mittel (4)

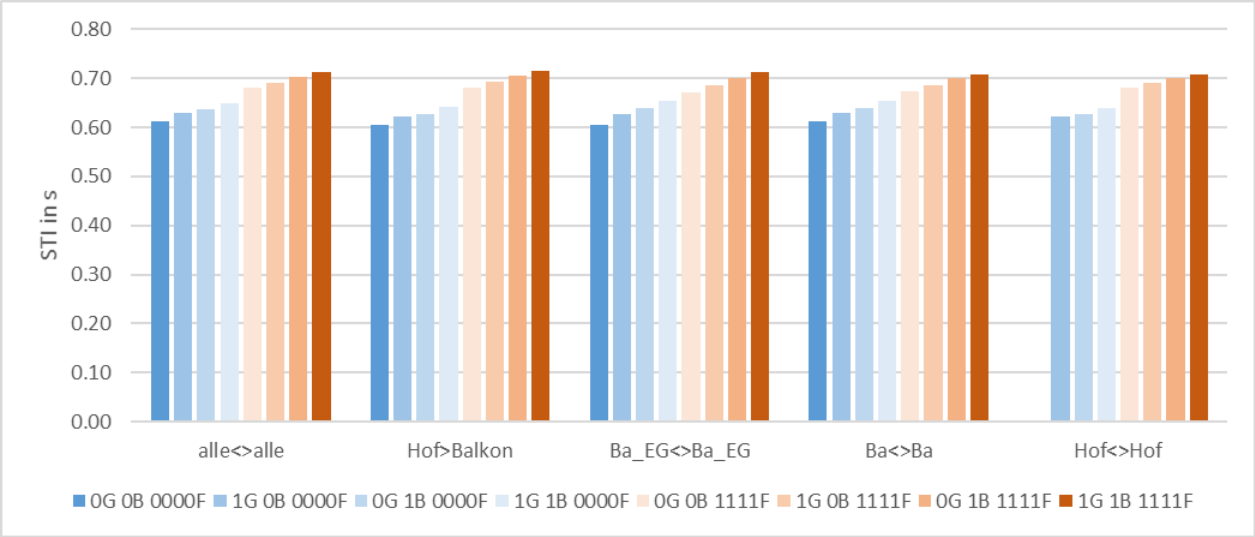

Abbildung 89 Modell Mittel (4): Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

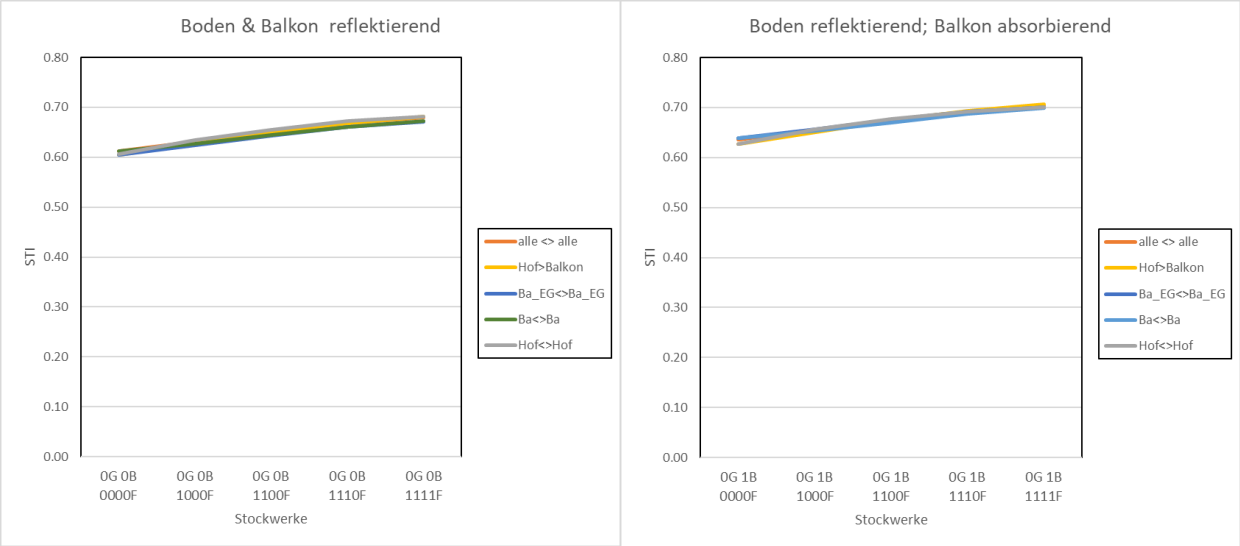

Abbildung 90 Modell Mittel (4): Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.4.4. Modell Gross (4)

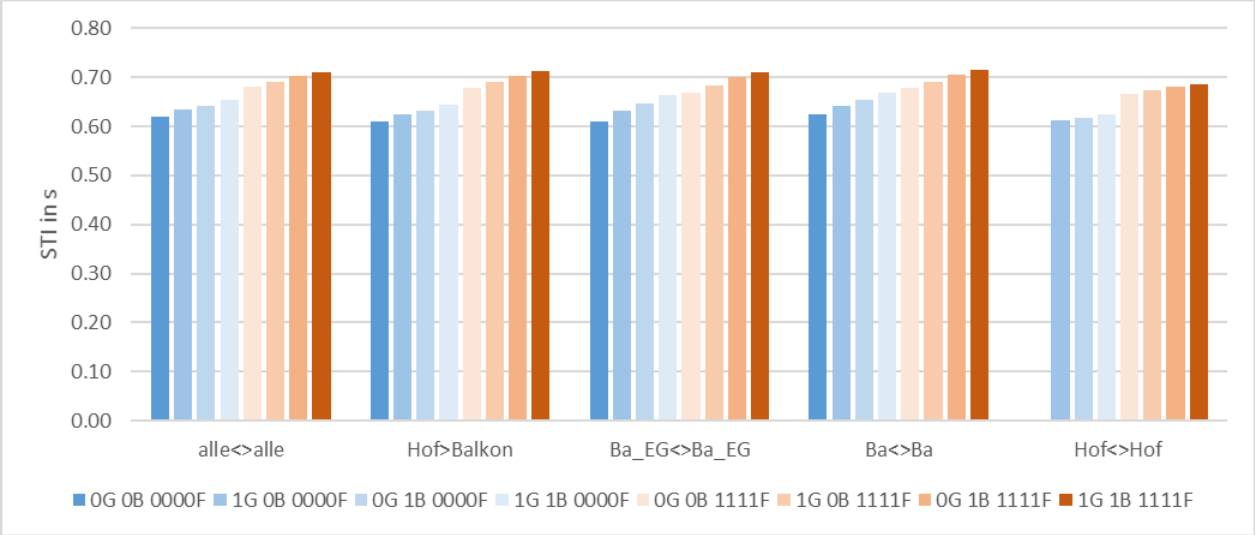

Abbildung 91 Modell Gross (4): Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

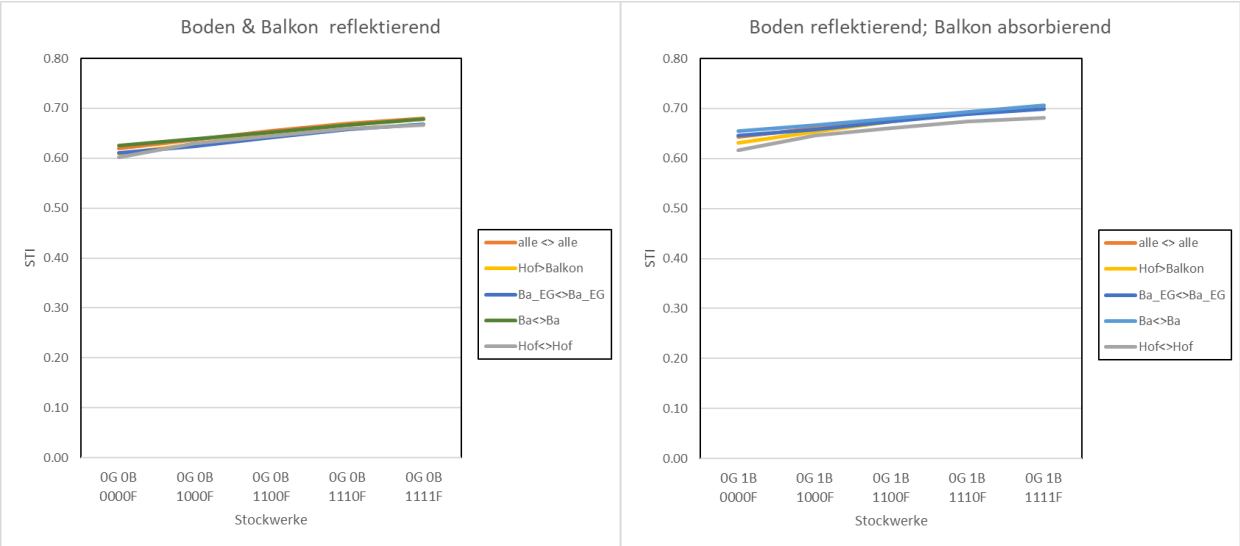

Abbildung 92 Modell Gross (4): Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.4.5. Modell Klein (7)

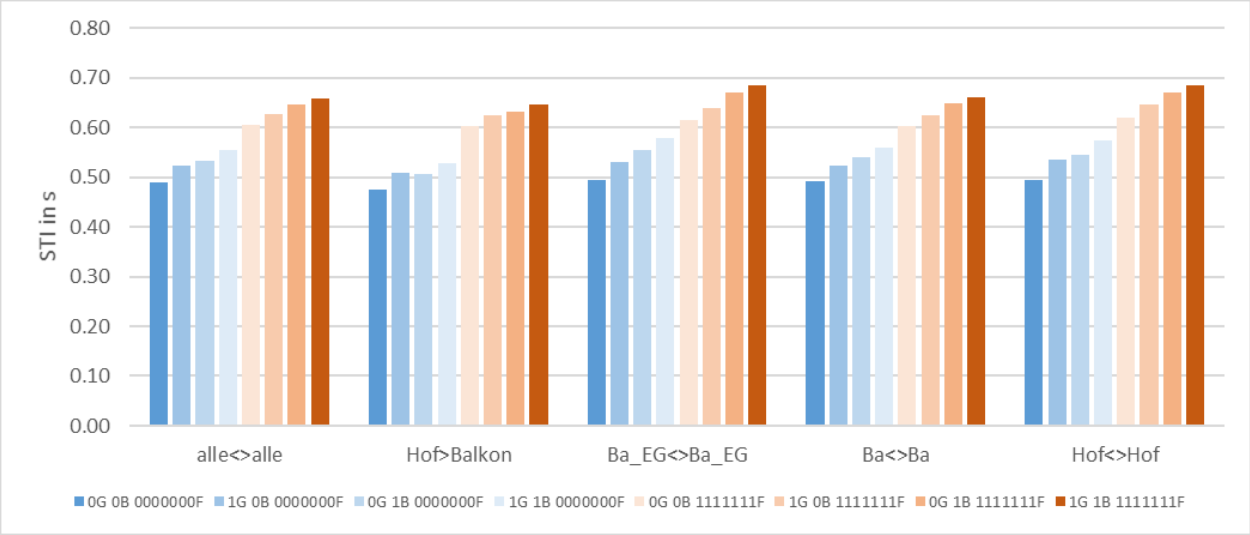

Abbildung 93 Modell Klein (7): Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

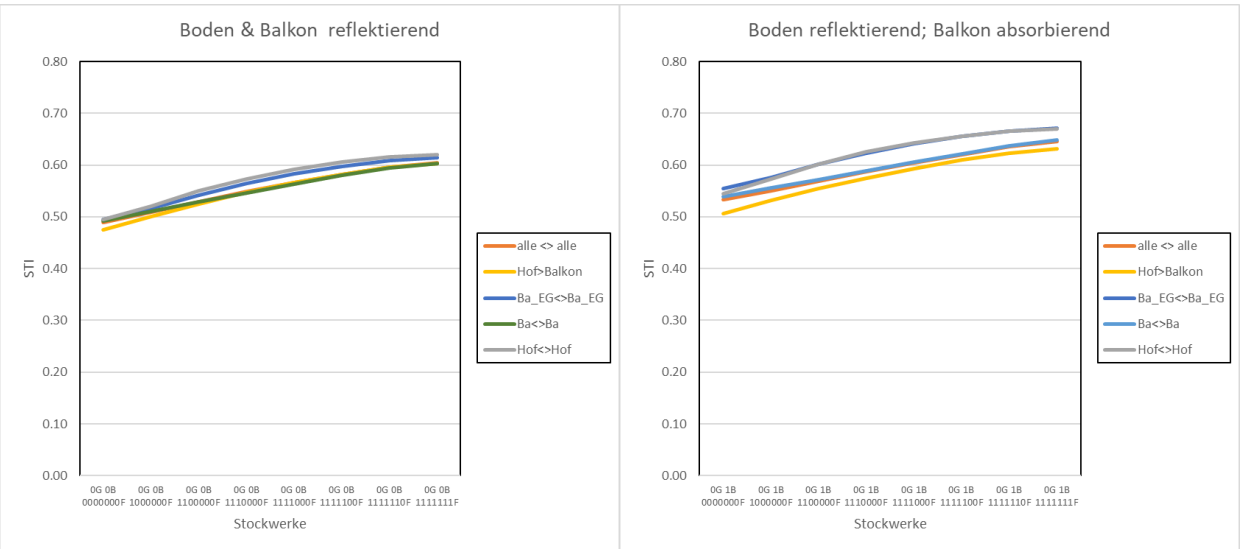

Abbildung 94 Modell Klein (7): Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.4.6. Modell Trapez (7)

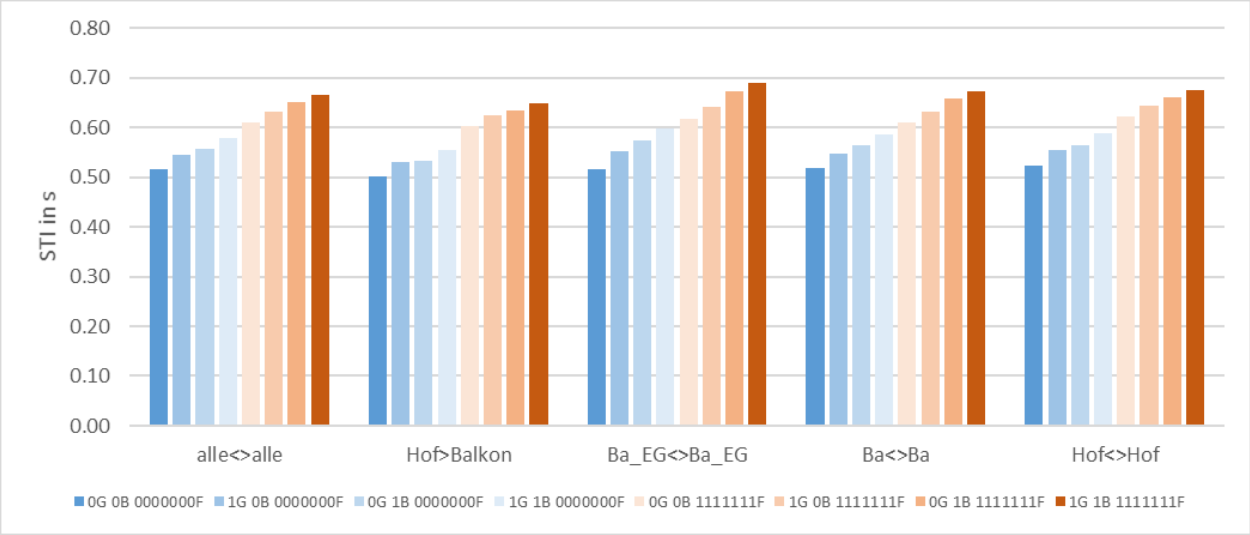

Abbildung 95 Modell Trapez (7): Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

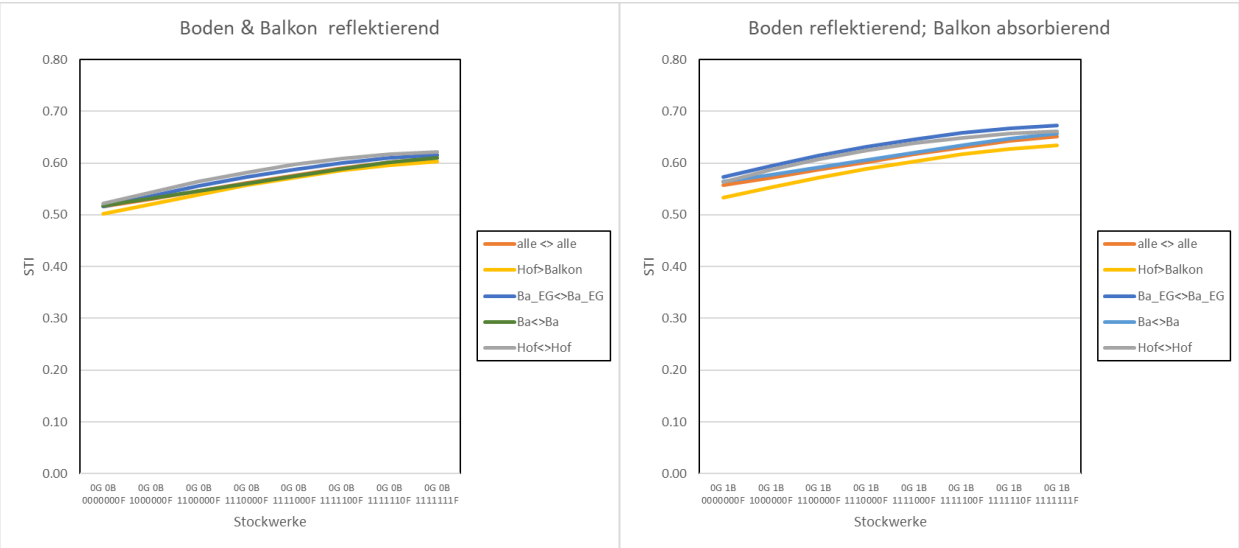

Abbildung 96 Modell Trapez (7): Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.4.7. Modell Mittel (7)

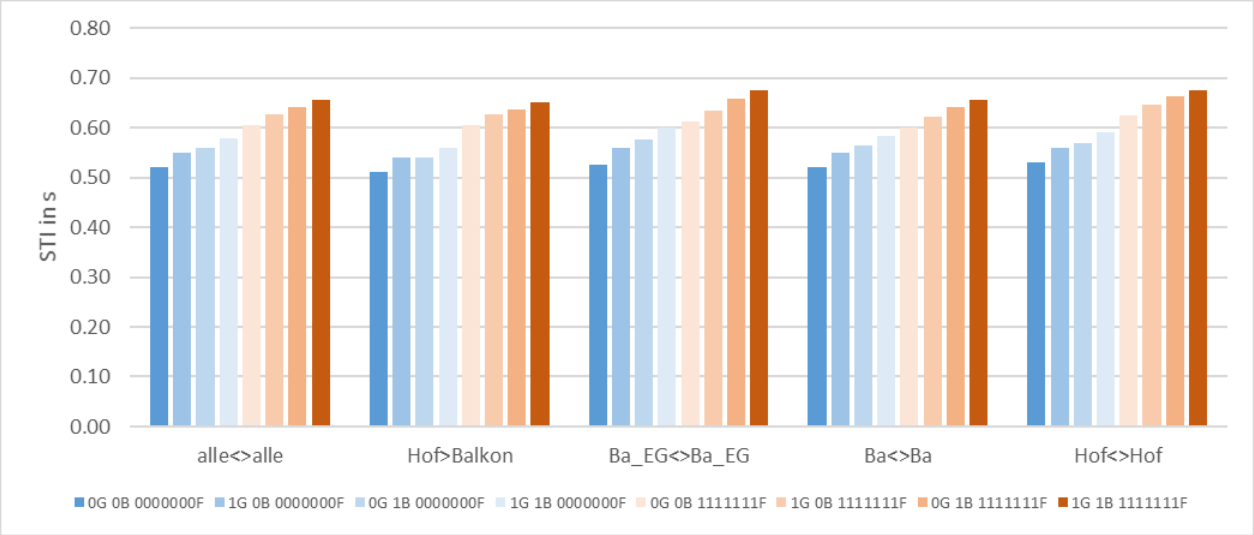

Abbildung 97 Modell Mittel (7): Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

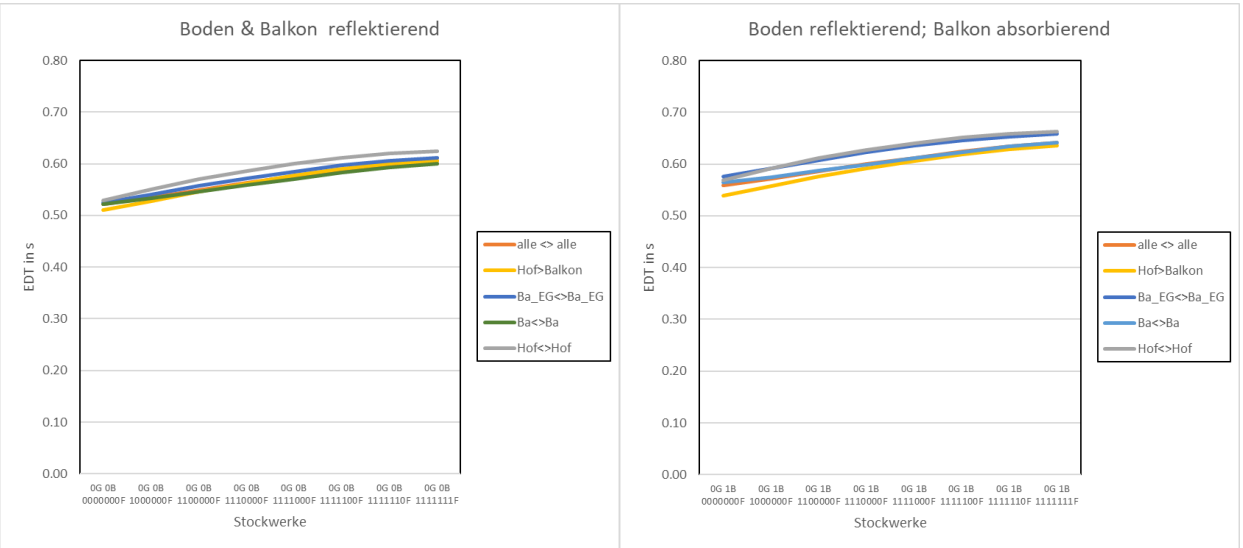

Abbildung 98 Modell Mittel (7): Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.4.8. Modell Zwicky

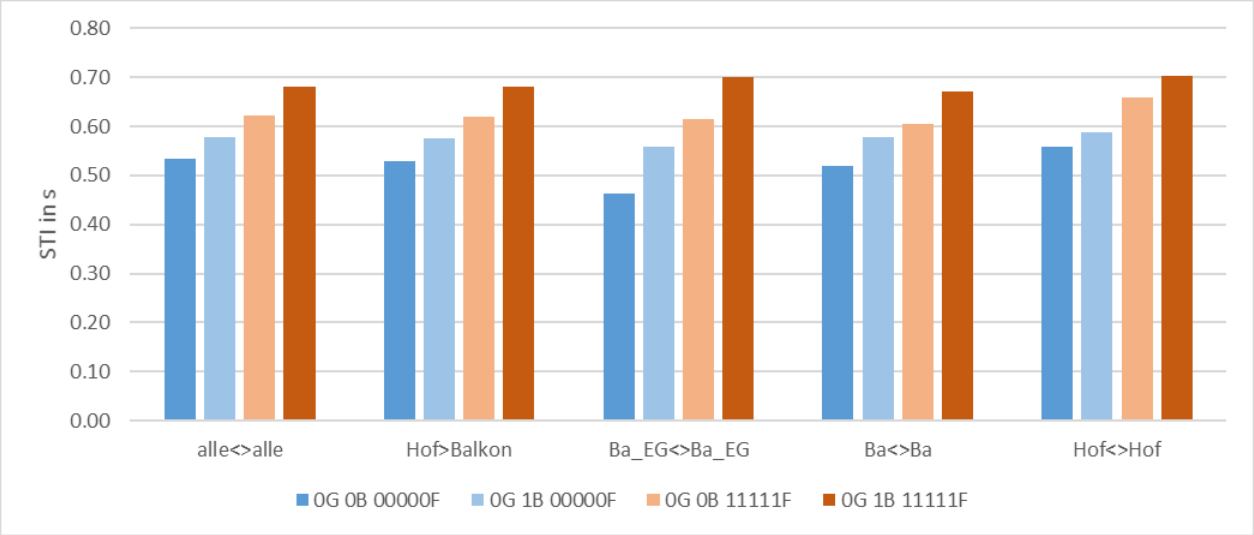

Abbildung 99 Zwicky: Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

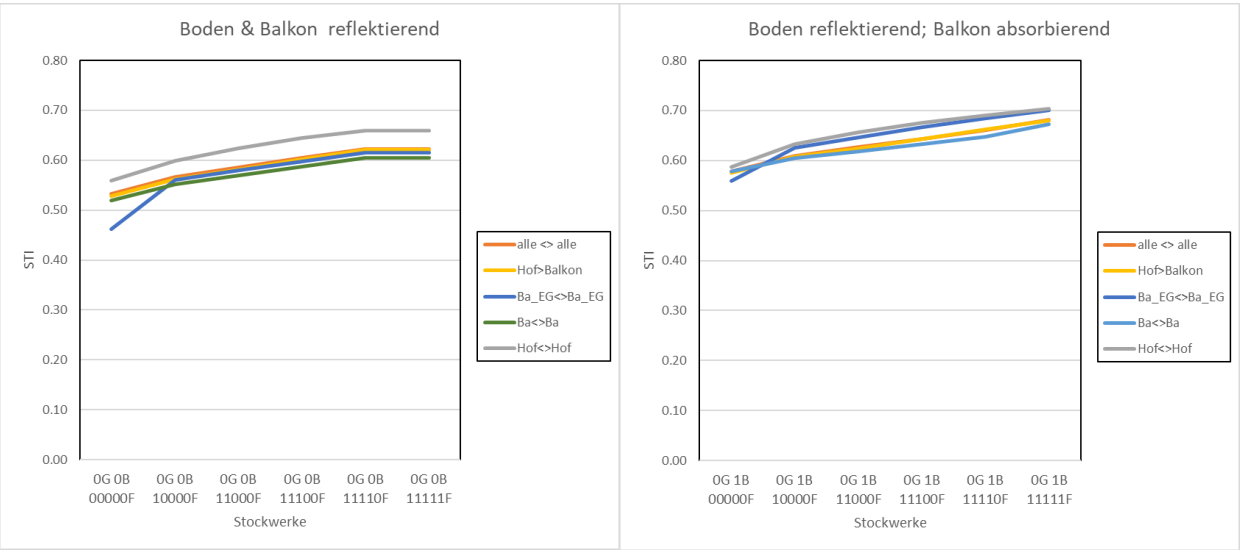

Abbildung 100 Zwicky: Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone und Innenhofboden.

9.4.9. Modell Müller Martini

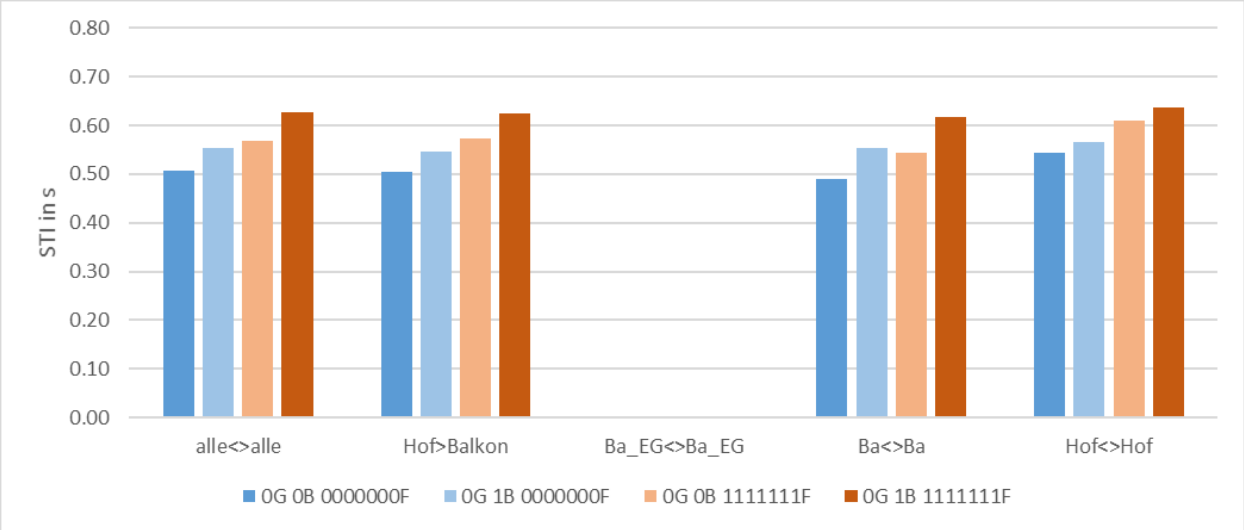

Abbildung 101 Müller Martini: Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

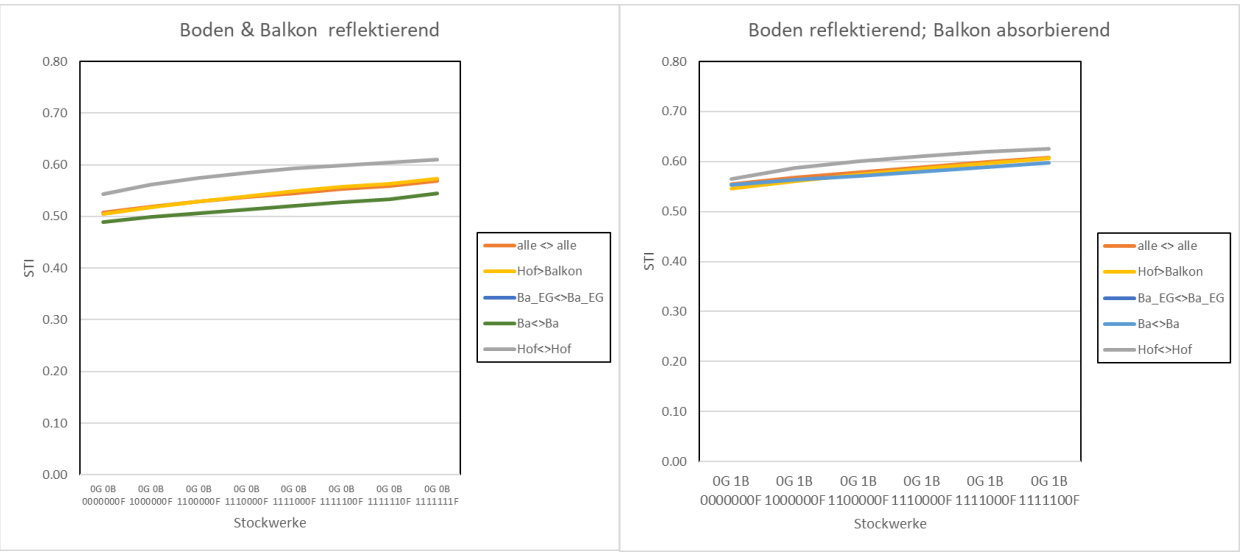

Abbildung 102 Müller Martini: Mittlere Sprachübertragungsindex *STI* ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone und Innenhofboden.

9.5. Prozentualer Anteil Echostörungen *EK%*

9.5.1. Modell Klein (4)

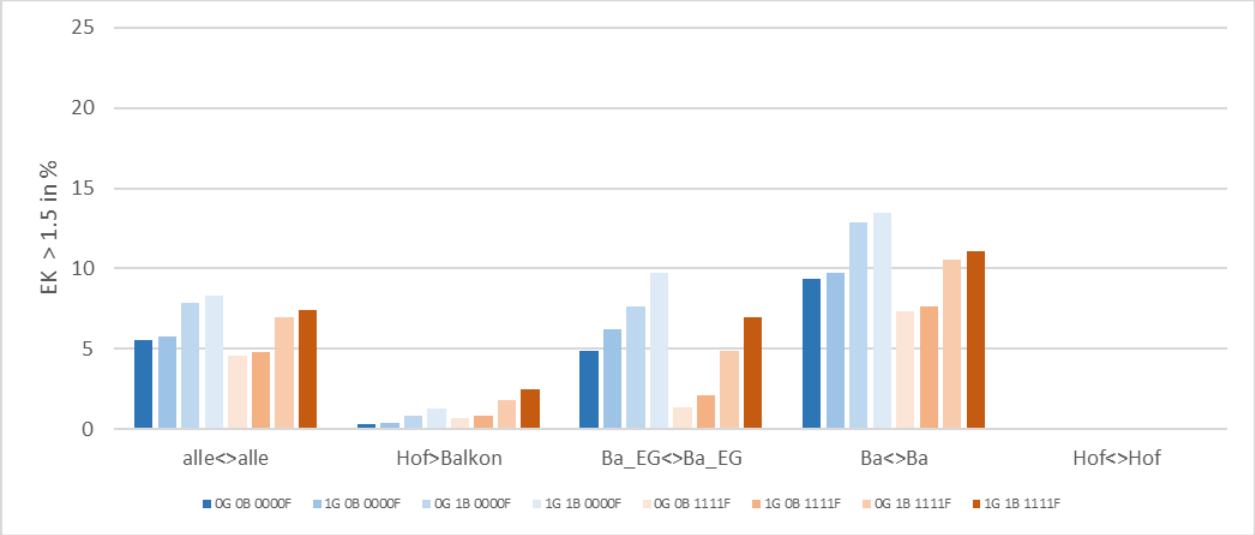

Abbildung 103 Modell Klein (4): Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

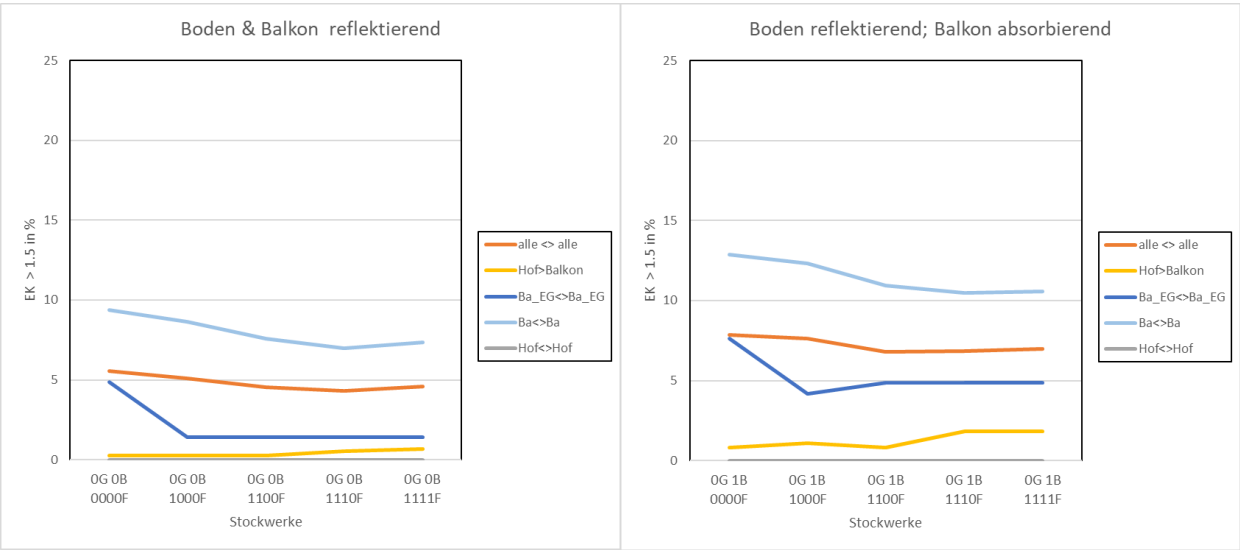

Abbildung 104 Modell Klein (4): Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.5.2. Modell Trapez (4)

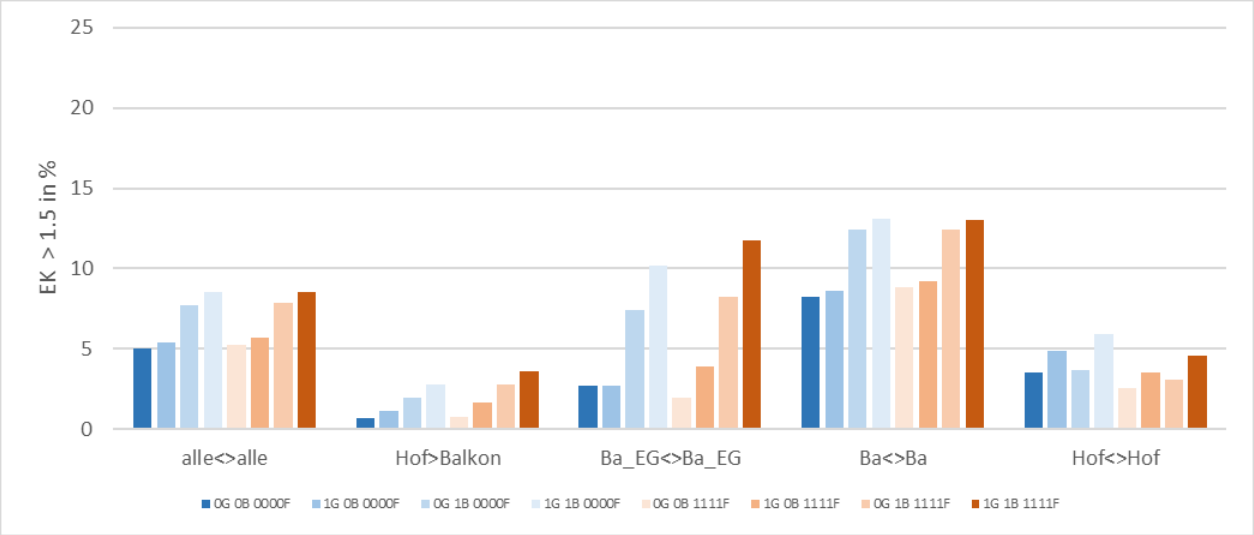

Abbildung 105 Modell Trapez (4): Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

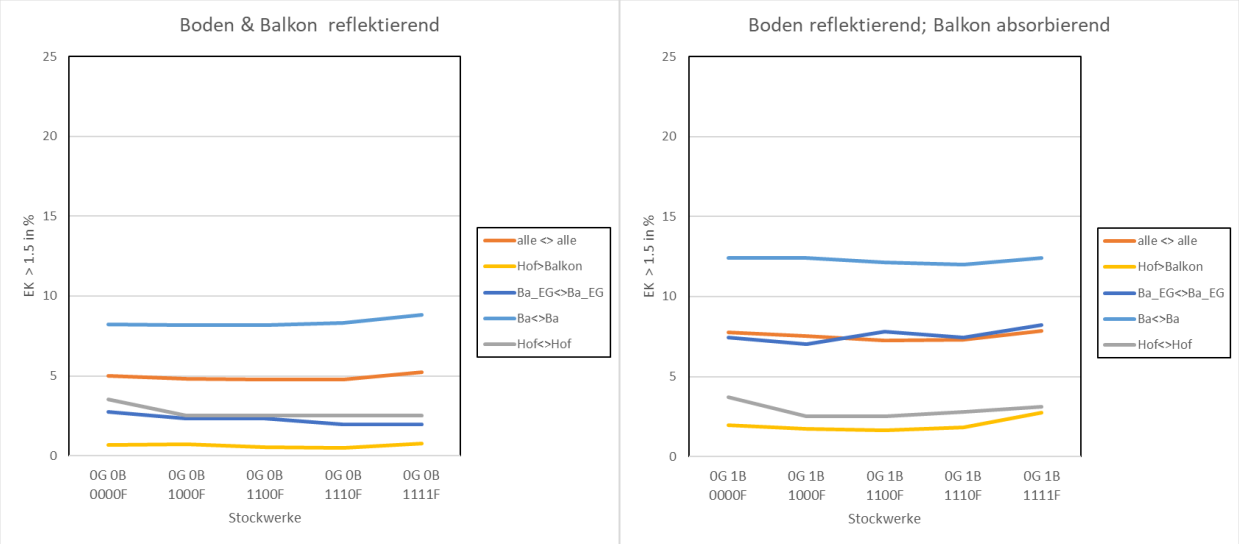

Abbildung 106 Modell Trapez (4): Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.5.3. Modell Mittel (4)

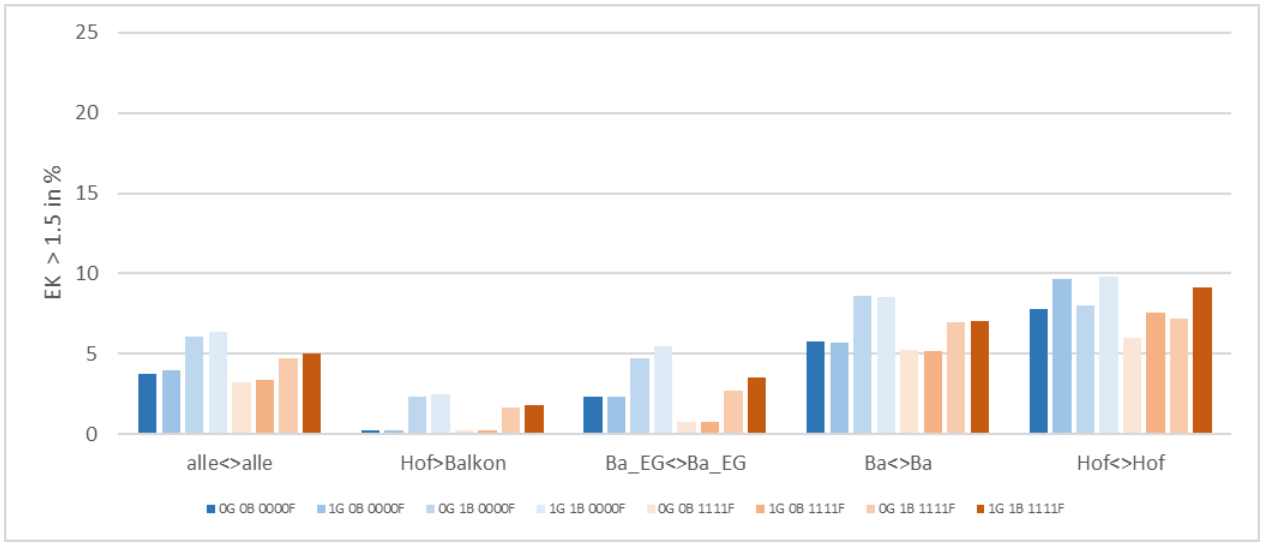

Abbildung 107 Modell Mittel (4): Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

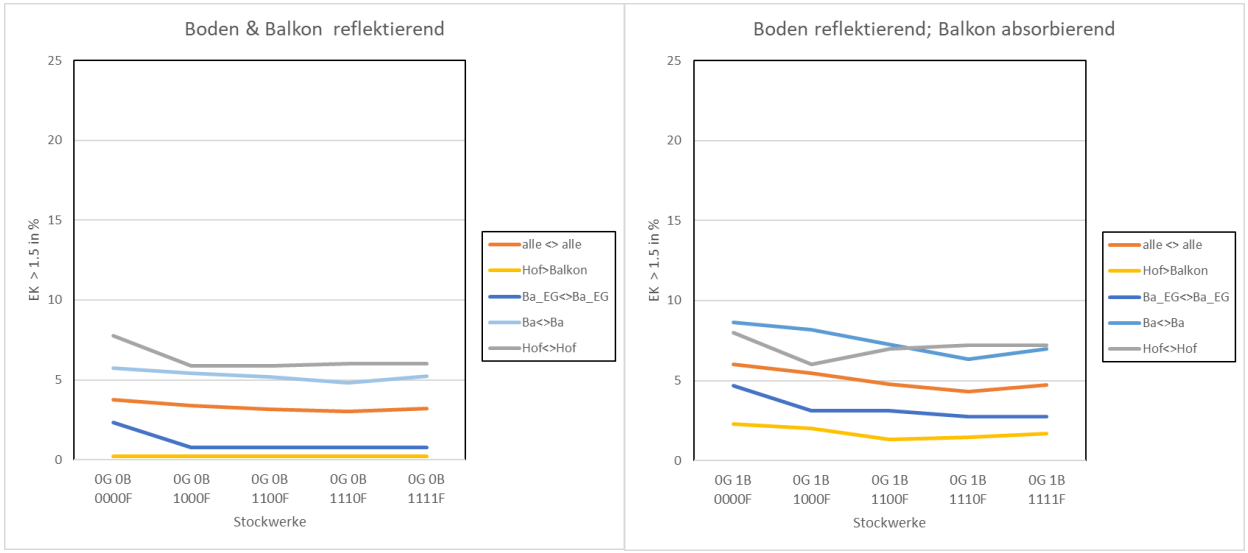

Abbildung 108 Modell Mittel (4): Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.5.4. Modell Gross (4)

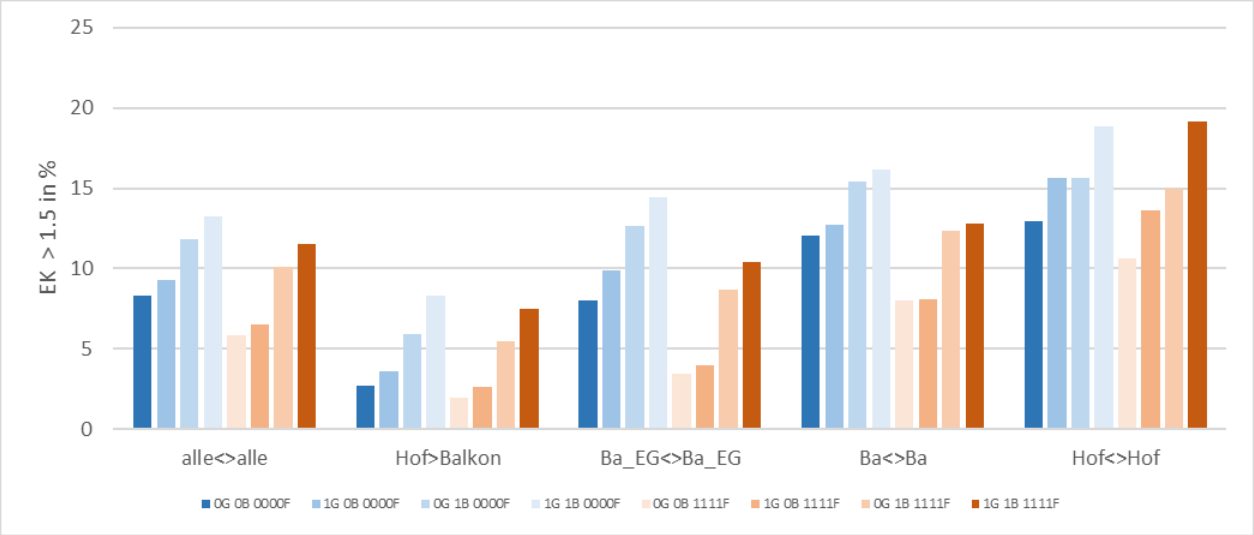

Abbildung 109 Modell Gross (4): Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

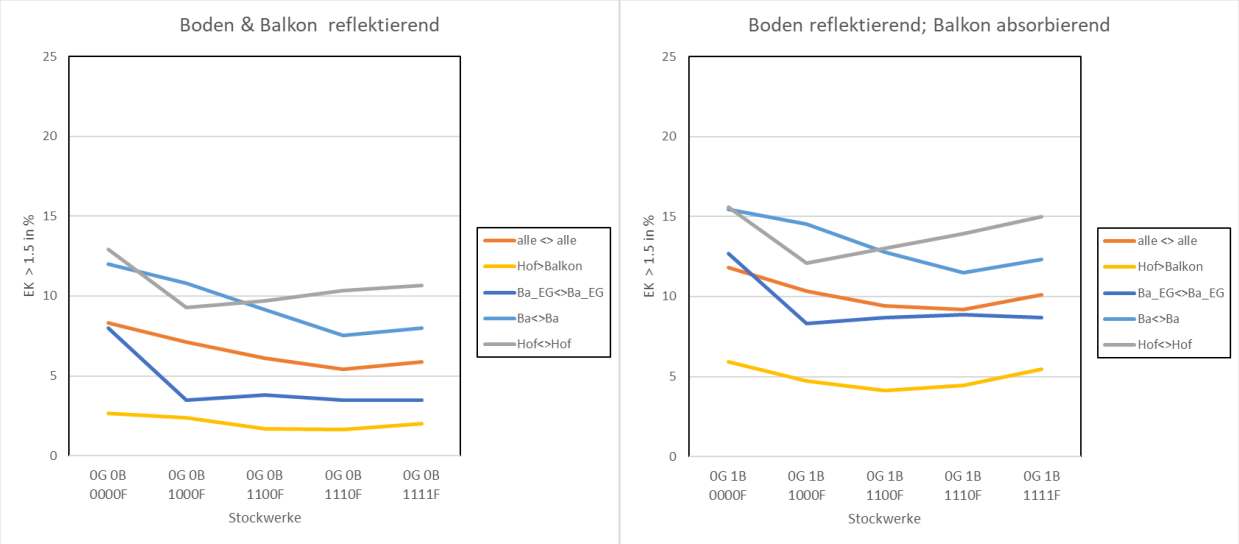

Abbildung 110 Modell Gross (4): Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.5.5. Modell Klein (7)

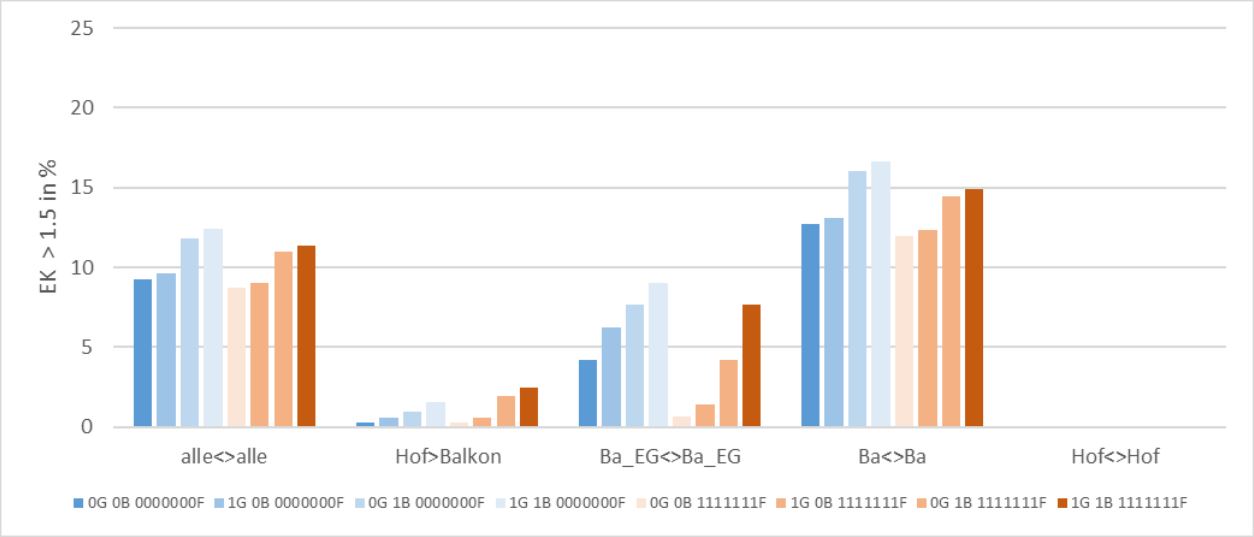

Abbildung 111 Modell Klein (7): Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

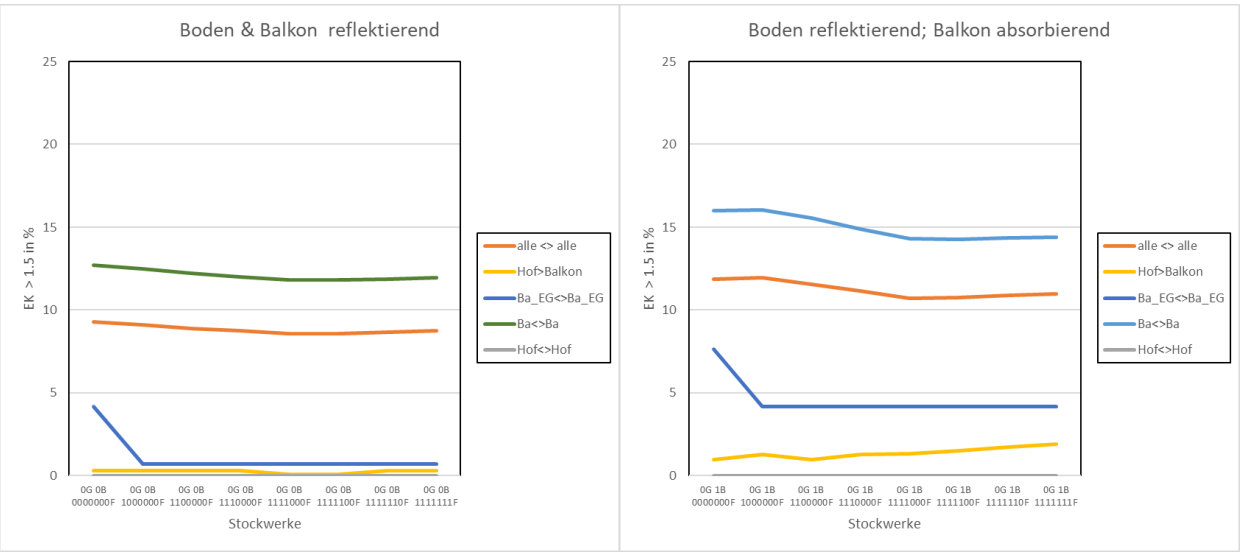

Abbildung 112 Modell Klein (7): Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.5.6. Modell Trapez (7)

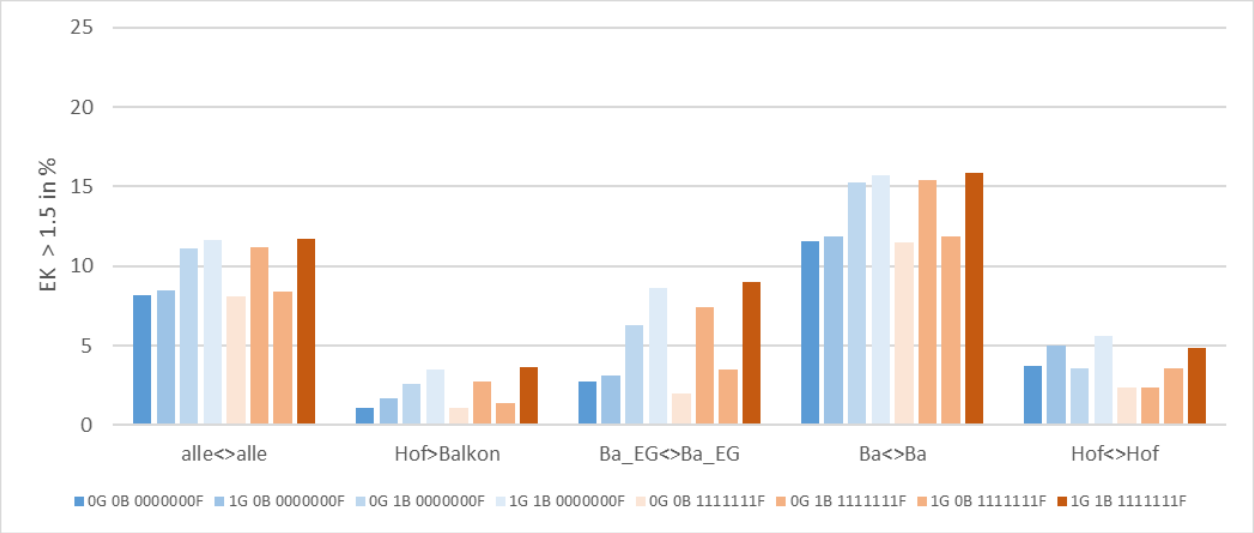

Abbildung 113 Modell Trapez (7): Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

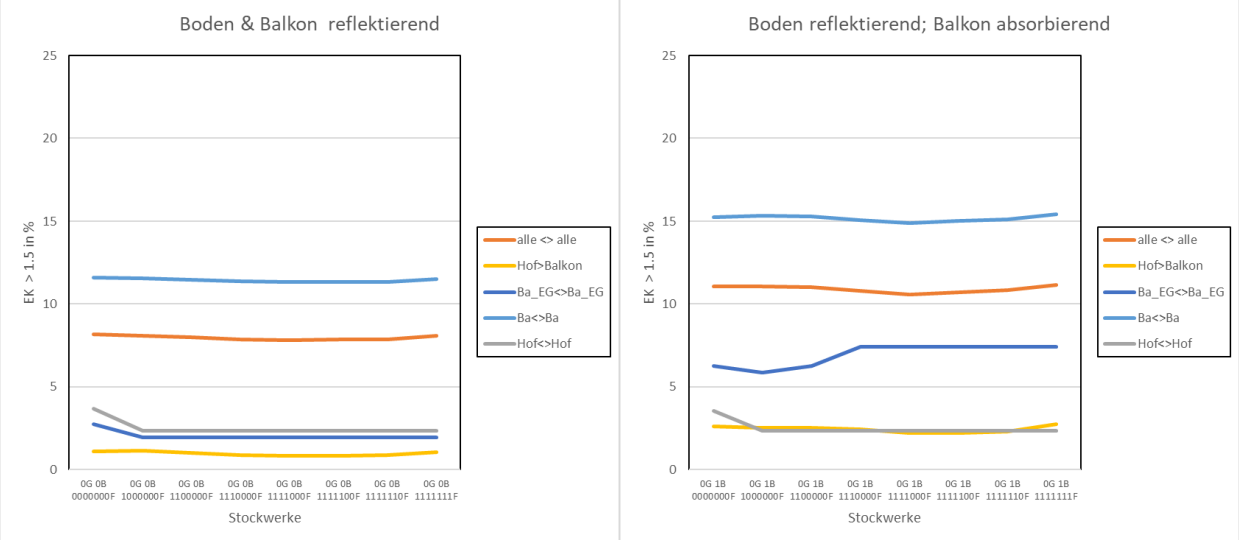

Abbildung 114 Modell Trapez (7): Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.5.7. Modell Mittel (7)

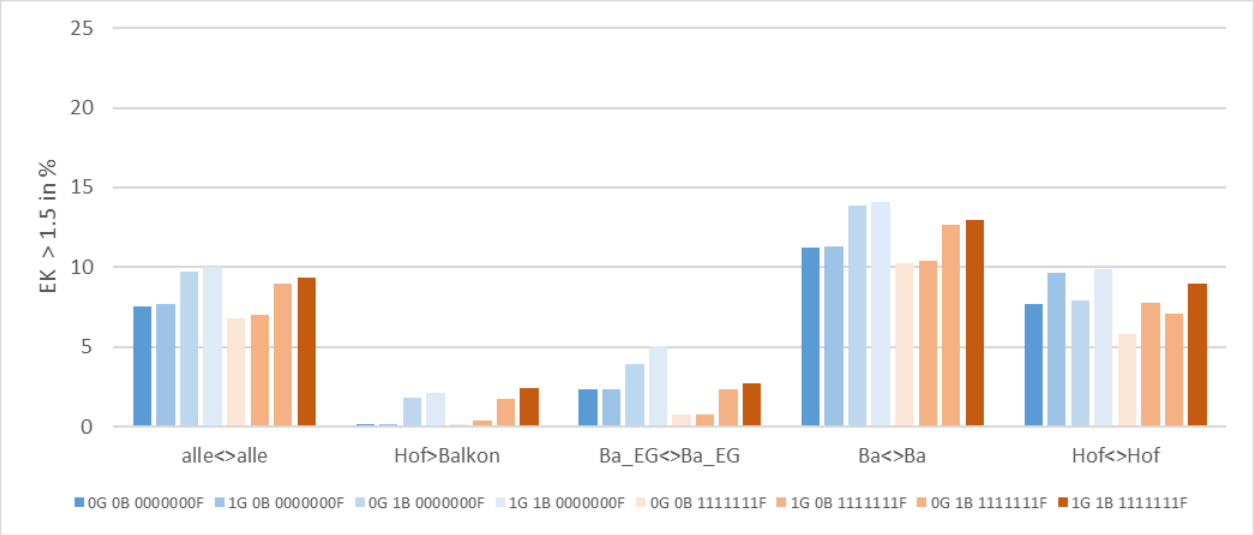

Abbildung 115 Modell Mittel (7): Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

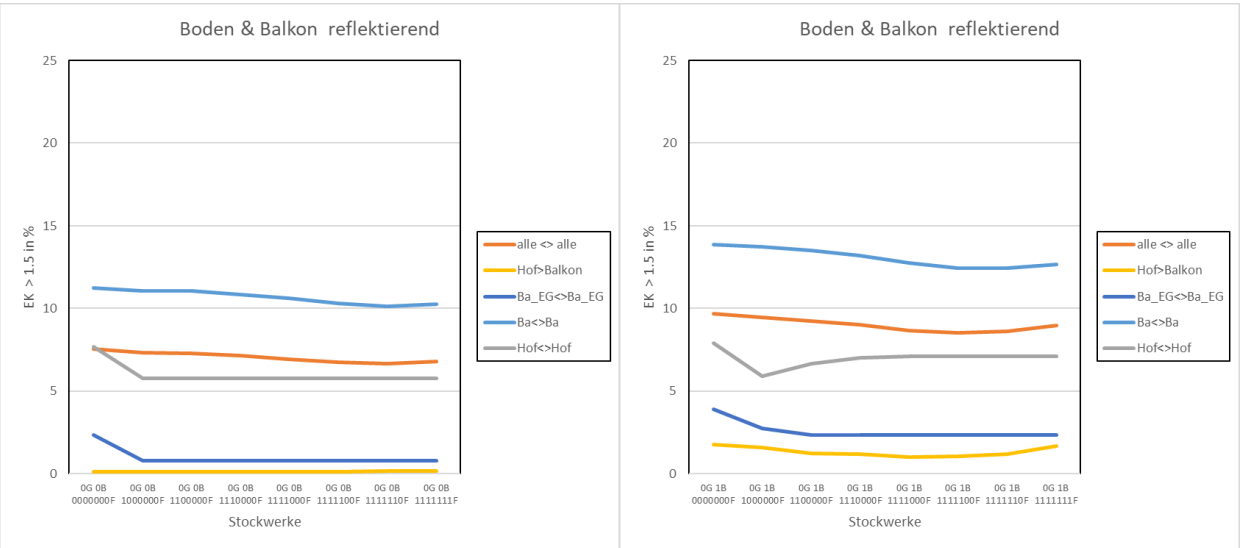

Abbildung 116 Modell Mittel (7): Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone.

9.5.8. Modell Zwicky

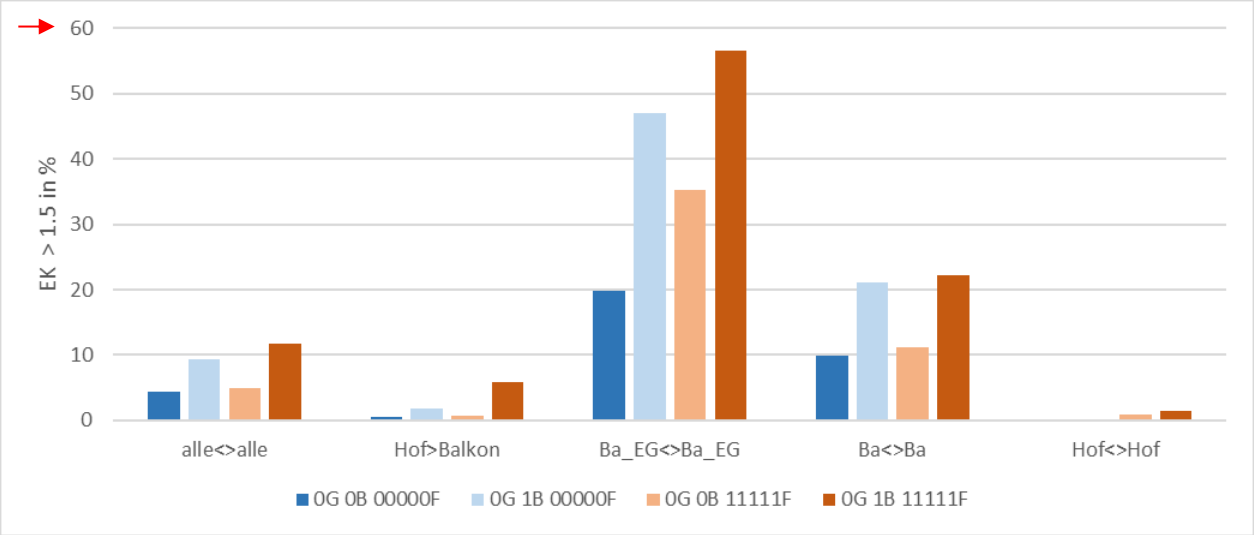

Abbildung 117 Zwicky: Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

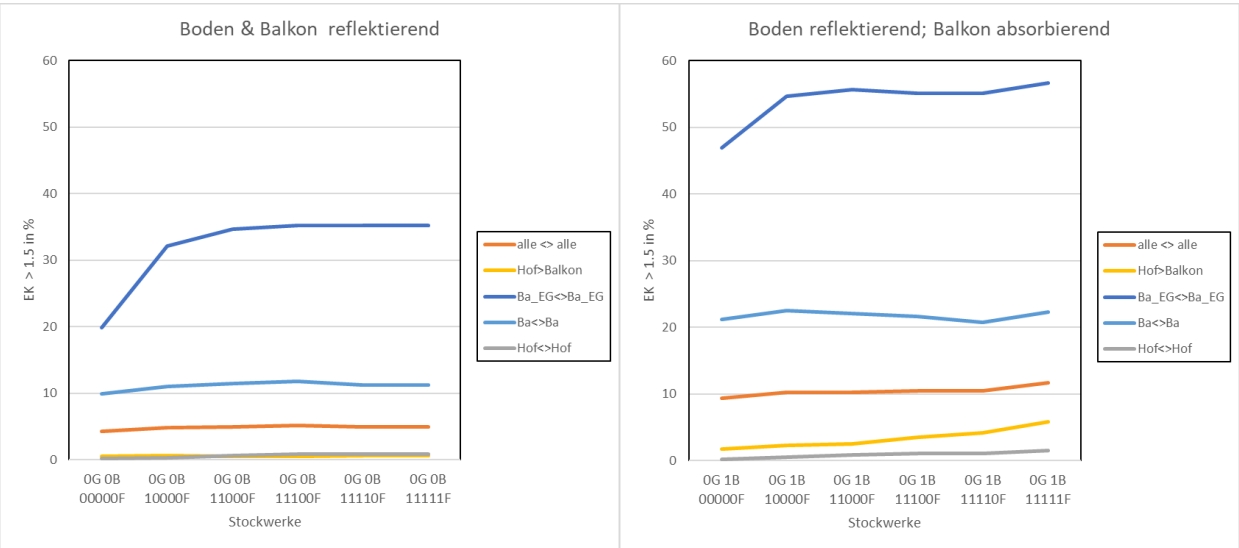

Abbildung 118 Zwicky: Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone und Innenhofboden.

9.5.9. Modell Müller Martini

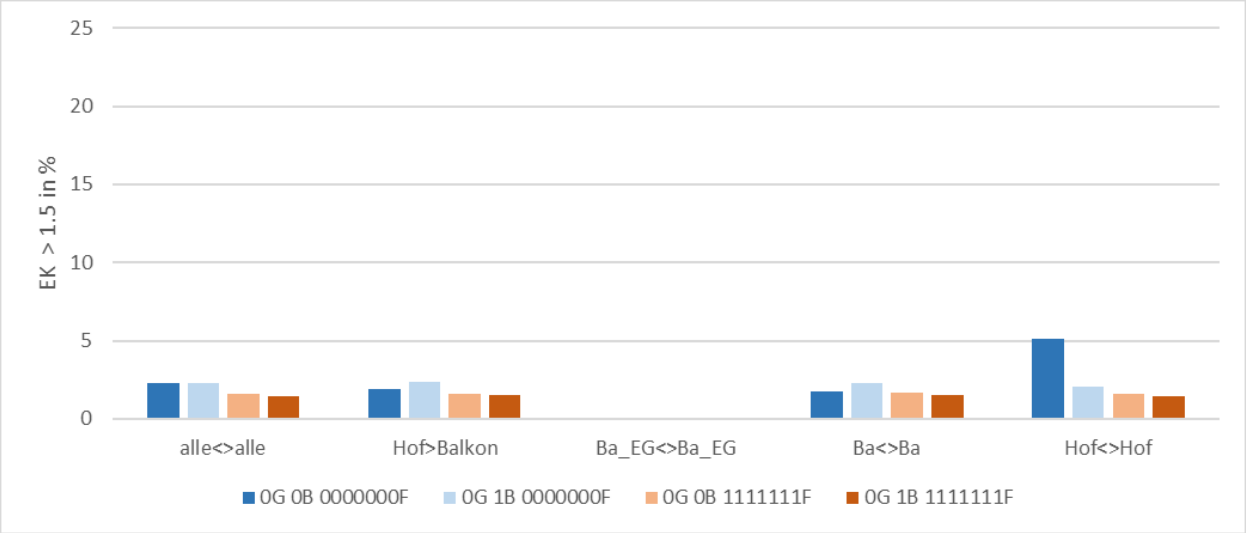

Abbildung 119 Müller Martini: Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss und Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für verschiedene Materialisierungen

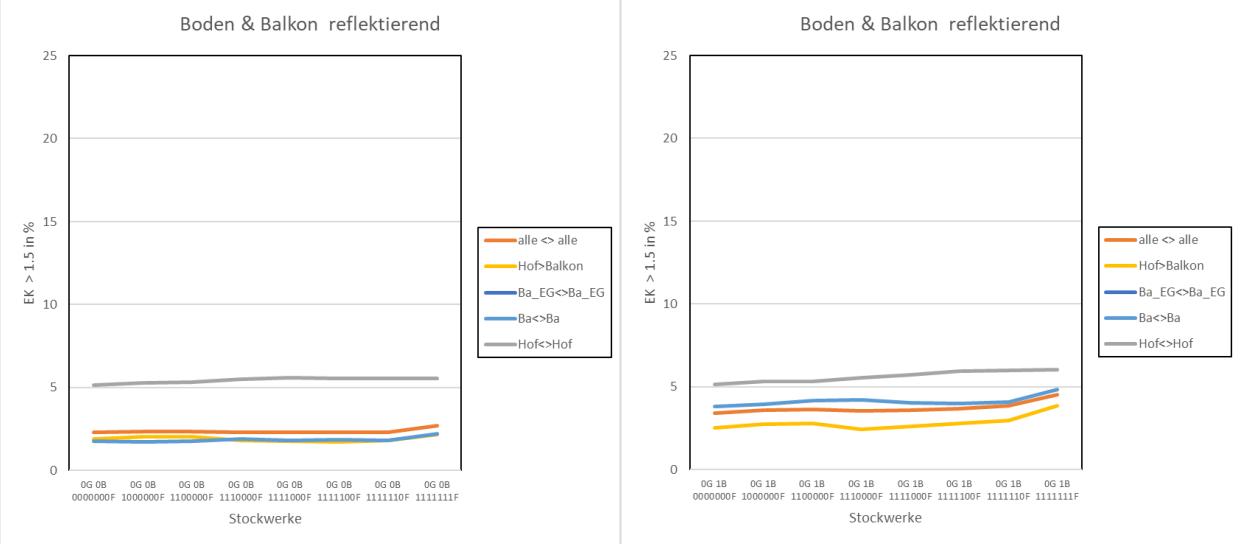

Abbildung 120 Müller Martini: Prozentualer Anteil Echostörungen EK% ausgewertet für alle ↔ alle, Hof → Balkone, Balkone Erdgeschoss ↔ Balkone Erdgeschoss, Balkone ↔ Balkone, Hof ↔ Hof für geschossweise absorbierende Fassaden und reflektierend/absorbierende Balkone und Innenhofboden.