
MASTERARBEIT

im Studiengang Ingenieurakustik

Herr
Andreas Türk

**Untersuchung konzeptioneller
raumakustischer Maßnahmen
zur Umsetzung der
Zielwerte nach VDI 2569
für typische Büroformen
mittels Simulations-Methoden
der geometrischen Akustik**

2023

Hochschule Mittweida Fakultät:
Ingenieurwissenschaften
Hochschule München Fakultät:
Maschinenbau, Fahrzeugtechnik, Flugzeugtechnik

MASTERARBEIT

Untersuchung konzeptioneller raumakustischer Maßnahmen zur Umsetzung der Zielwerte nach VDI 2569 für typische Büroformen mittels Simulations-Methoden der geometrischen Akustik

Autor/in:
Herr Andreas Türk

Studiengang:
Ingenieurakustik

Seminargruppe:
IA18w1-M

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

Zweitprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Stefan Sentpali

Einreichung:
Leipzig, 12.02.2023

University of applied Science Mittweida Faculty:
Engineering Sciences
University of applied Science Munich Faculty:
Mechanical, Automotive, Aeronautical Engineering

MASTER THESIS

Study on Conceptual Measures for Room Acoustic Treatment for Common Office Layouts to Match Target Values According to VDI 2569 Based on Geometrical Acoustics

author:
Mr. Andreas Türk

course of studies:
Acoustical Engineering

seminar group:
IA18w1-M

first examiner:
Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

second examiner:
Prof. Dr.-Ing. Stefan Sentpali

submission:
Leipzig, 12.02.2023

Bibliografische Angaben

Türk, Andreas:

Untersuchung konzeptioneller raumakustischer Maßnahmen zur Umsetzung der Zielwerte nach VDI 2569 für typische Büroformen mittels Simulations-Methoden der geometrischen Akustik.

Study on Conceptual Measures for Room Acoustic Treatment for Common Office Layouts to Match Target Values According to VDI 2569 Based on Geometrical Acoustics.

109 Seiten, Hochschule München / Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Maschinenbau, Fahrzeugtechnik, Flugzeugtechnik / Ingenieurwissenschaften

Masterarbeit, 2023

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Inhaltsverzeichnis | V |
| Abkürzungsverzeichnis | VII |
| Formelverzeichnis..... | VIII |
| Abbildungsverzeichnis | IX |
| Tabellenverzeichnis | X |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 1.1 Motivation und Zielstellung..... | 1 |
| 1.2 Vorgehensweise | 2 |
| 2 Grundlagen..... | 3 |
| 2.1 Büroorganisationsformen | 3 |
| 2.1.1 Büroorganisationsformen | 3 |
| 2.2 Theoretische Grundlagen der Akustik | 6 |
| 2.2.1 Schallfelder in Räumen | 6 |
| 2.2.2 Schallbeugung und -streuung | 9 |
| 2.3 Gebäudezertifizierung | 10 |
| 2.4 Normative Grundlagen | 10 |
| 2.4.1 Anforderungen der VDI 2569 | 11 |
| 2.4.2 Ermittlung der Kennwerte und deren Auswertung | 14 |
| 2.5 Simulationsmethoden der Raumakustik | 16 |
| 2.5.1 Geometrische Akustik | 17 |
| 2.5.2 Generelle Limitierungen | 20 |
| 2.5.3 Wellenbasierte Erweiterungen der geometrischen Akustik..... | 21 |
| 3 Erläuterungen zur verwendeten Software | 22 |
| 3.1 CATT-Acoustic..... | 22 |
| 3.1.1 Implementierung der Streuung in CATT-Acoustic | 22 |
| 3.1.2 Implementierung der Beugung in CATT-Acoustic..... | 23 |
| 3.1.3 Berechnungsmethoden in CATT-Acoustic..... | 24 |
| 3.2 Weitere Software..... | 25 |
| 4 Validierung der Untersuchungsmethode | 26 |
| 4.1 Validierung der Beugungsberechnung | 26 |
| 4.2 Unsicherheiten der raumakustischen Simulation | 30 |

| | | |
|----------|--|-------------|
| 5 | Modellierung und Simulation | 36 |
| 5.1 | Modellierung für Simulation mit GA | 36 |
| 5.2 | Anforderungen an Büroflächen..... | 38 |
| 5.3 | Untersuchte Bürolayouts | 39 |
| 5.4 | Untersuchte Geometrien und Varianten | 40 |
| 5.5 | Eingangsdaten und Parameter..... | 43 |
| 5.6 | Wahl der Messpfade und Messpunkte | 46 |
| 6 | Auswertung und Ergebnis..... | 51 |
| 6.1 | Nomenklatur zur Beschreibung der Auswertung | 51 |
| 6.2 | Auswertung der Simulationsergebnisse | 52 |
| 6.2.1 | Trennerhöhen | 52 |
| 6.2.2 | Trennerdichte..... | 57 |
| 6.2.3 | Trennerbreite | 62 |
| 6.2.4 | Akustisch wirksame Wandflächen | 64 |
| 6.2.5 | Akustisch wirksame Deckenflächen | 67 |
| 6.2.6 | Abstand und Anordnung von Arbeitsplätzen | 70 |
| 6.2.7 | Allgemeine Zusammenhänge..... | 73 |
| 6.2.8 | Vergleich der Nachhallzeit zw. Simulation und Sabine | 76 |
| 6.3 | Zusammenfassung und Designempfehlungen | 78 |
| 7 | Diskussion und Fazit | 82 |
| | Literaturverzeichnis | XI |
| | Anlage 1 – Übersicht der Messpfade | XVI |
| | Anlage 2 – Steckbriefe für Bürolayouts | XXII |
| | Eigenständigkeitserklärung | XXVI |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------|--|
| AP | Arbeitsplatz |
| ASR | Arbeitsstättenrichtlinie |
| CATT | Kürzel für Software CATT-Acoustic |
| GA | geometrische Akustik |
| GK | Gipskarton |
| JND | engl.: just noticable difference (gerade wahrnehmbarer Unterschied) |
| MP | Messpunkt |
| MPF | Messpfad |
| SES | engl.: secondary edge source |
| SSQ | Spiegelschallquelle |
| TUCT | engl.: The Universal Cone Tracer, Kürzel für Berechnungsmodul von CATT-Acoustic |

Formelverzeichnis

| | |
|----------------|--|
| A | (energie-)äquivalente Schallabsorptionsfläche [m ²] |
| a | Strukturgröße [m] |
| α | Schallabsorptionsgrad |
| α_w | bewerteter Schallabsorptionsgrad |
| $D_{2,S}$ | räumliche Abklingrate der Sprache [dB] |
| f | (Oktav-)Frequenz [Hz] |
| f_S | Schröder-Grenzfrequenz [Hz] |
| $L_{NA,Bau}$ | Störschalldruckpegel bauseitiger Geräusche [dB(A)] |
| $L_{p,A,S,4m}$ | A-bewerteter Schalldruckpegel der Sprache im Abstand von 4 m [dB(A)] |
| λ | Wellenlänge |
| m | arithmetisches Mittel [Einheit der betrachteten Größe] |
| N | Anzahl der Arbeitsplätze nach VDI 2569 |
| R | Spannweite R [s] |
| R^2 | Bestimmtheitsmaß |
| S | Fläche [m ²] |
| s | Streugrad |
| σ | Standardabweichung [Einheit der betrachteten Größe] |
| σ_{rel} | relative Standardabweichung [%] |
| T_{20} | Nachhallzeit, über einen Pegelabfall von 20 dB ermittelt [s] |
| T_{60} | Nachhallzeit [s] |
| V | Volumen [m ³] |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: links: Schallstrahlen im Raum, rechts: Echogramm, rot – Direktschall, grün/blau/gelb - Reflexionen 1./2./3. Ordnung | 7 |
| Abbildung 2: Schalldruckpegel der Sprache in Abstand zur Quelle mit Regressionsgerade | 15 |
| Abbildung 3: Testsznarien mit allen Sende- und Empfangspositionen, links: RS5 rechts: RS6..... | 28 |
| Abbildung 4: RS5, Frequenzgänge von Sender- und Empfängerkombinationen aus Simulation (schwarze, geschlossene Linie) und Referenzmessung (rote, gestrichelte Linie), Glättung 1/24-Oktave, Kombinationen v.l.o.n.r.u.: A3-04 / A2-03 / A1-01 / A4-02 | 29 |
| Abbildung 5: RS6, Frequenzgänge von Sender- und Empfängerkombinationen aus Simulation (schwarze geschlossene Linie) und Referenzmessung (rote, gestrichelte Linie), Glättung 1/24-Oktave, Kombinationen v.l.o.n.r.u.: A3-03 / A2-02 / A1-01 | 30 |
| Abbildung 6: untersuchte Geometrien: „kleine“ Geometrien (001, 010), „große“ Geometrien (003, 020, 030, 043) | 41 |
| Abbildung 7: vermaßte Ansicht des 3D-Modells eines Arbeitsplatzes..... | 43 |
| Abbildung 8: Lage des Messpunkts an einem Arbeitsplatz | 46 |
| Abbildung 9: Messpfade am Beispiel der Geometrie 030..... | 48 |
| Abbildung 10: Messpfade am Beispiel der Geometrie 010..... | 49 |
| Abbildung 11: Messpfade der Geometrie 001 | 49 |
| Abbildung 12: Geometrie 030 mit Beschreibung der Nomenklatur bzgl. der Trenner-Ausrichtung und Achsenbezeichnung des Modells..... | 51 |
| Abbildung 13: Varianten ohne Trenner und mit verschiedenen Trennerhöhen (1,4 m / 1,6 m / 1,8 m) am Beispiel von Geometrie 030 | 53 |
| Abbildung 14: untersuchte Variationen der Trenner in vertikaler (x) Ausbreitungsrichtung, beispielhaft an Geometrie 001 (oben v.l.n.r.: keine Trenner, Trenner an jedem zweiten Arbeitsplatz, Trenner an jedem Arbeitsplatz / unten: jeweils die Trennerbreite um 0,5 m vergrößert)..... | 57 |
| Abbildung 15: untersuchte Variation der Trennerbreiten entlang der horizontalen (y) Ausbreitungsrichtung am Beispiel von Geometrie 001 und 004 | 62 |
| Abbildung 16: untersuchte Variation der Wandmaterialien (rot = Wandabsorber, gelb = Lamellenvorhang, hellblau = Fenster, beige = Wandfläche schallhart) am Beispiel von Geometrie 030..... | 64 |
| Abbildung 17: untersuchte Variation der Deckentypen am Beispiel von Geometrie 030 (v.l.n.r.: Deckensegel, gelochte GK-Decke, Mineralfaser-Rasterdecke, jeweils blaue Flächen), Ansicht von unten | 68 |
| Abbildung 18: Vergleich Anordnung: Grundversionen 030, 050, 043, 010 und ihre Abwandlungen mit erhöhtem Abstand zwischen den Arbeitsplätzen | 71 |
| Abbildung 19: gerade Messpfade mit unterschiedlichen Trennerkonfigurationen, links: gegen Grundfläche, rechts: gegen Fläche pro Arbeitsplatz | 74 |
| Abbildung 20: Messpfade mit unterschiedlichen Trennerhöhen, Punkt, Volllinie: horizontale MPF / Dreieck, Punktlinie: vertikale MPF..... | 75 |
| Abbildung 21: gerade verlaufende Messpfade Ausrichtung mit unterschiedlichen Konfigurationen, 1 – Trenner aller 3 AP / 2 – Trenner aller 3 AP + 0,6 m Überstand / 3 – Trenner aller 2 AP / 4 – Trenner aller 2 AP + 0,6 m Überstand / 5 -Trenner an jedem AP / 6 – Trenner an jedem AP + 0,6 m Überstand | 76 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Übersicht der Zielwerte nach VDI 2569 | 14 |
| Tabelle 2: Vergleich der Schallausbreitungsparameter über zehn Rechengänge mit Algorithmus 1 am Beispiel von Geometrie 030 | 32 |
| Tabelle 3: Vergleich der gemittelten Nachhallzeit T_{20} über zehn Rechendurchgänge mit Algorithmus 1 am Beispiel von Geometrie 030 | 33 |
| Tabelle 4: Vergleich der Schallausbreitungsparameter über die Differenzen der Rechengänge aus Alg. 1 und Alg. 2 am Beispiel von Geometrie 030 | 34 |
| Tabelle 5: Vergleich der gemittelten Nachhallzeit T_{20} über die Differenzen der Rechengänge aus Alg. 1 und Alg. 2 am Beispiel von Geometrie 030 | 35 |
| Tabelle 6: Berechnungsparameter mit Erklärung | 44 |
| Tabelle 7: Übersicht der verwendeten Schallabsorptionsgrade und Streugrade | 45 |
| Tabelle 8: Vergleich Trennerhöhen: Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter | 55 |
| Tabelle 9: Vergleich Trennerhöhen: Ergebnisse der simulierten Nachhallzeiten T_{20} | 56 |
| Tabelle 10: Vergleich Trennerdichte: Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter | 59 |
| Tabelle 11: Vergleich Trennerdichte, Gegenüberstellung der Ausbreitungsrichtung: Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter für Geometrie 030 | 60 |
| Tabelle 12: Vergleich Trennerdichte, Trenner nur zwischen Arbeitsplatzgruppen: Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter für Geometrie 030 | 61 |
| Tabelle 13: Vergleich Trennerdichte: Ergebnisse der simulierten Nachhallzeiten T_{20} | 62 |
| Tabelle 14: Vergleich Trennerbreiten: Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter | 63 |
| Tabelle 15: Vergleich Trennerbreite: Ergebnisse der simulierten Nachhallzeiten T_{20} | 64 |
| Tabelle 16: Vergleich Absorption an Wandflächen: Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter | 66 |
| Tabelle 17: Vergleich Absorption an Wandflächen: Ergebnisse der simulierten Nachhallzeiten T_{20} | 67 |
| Tabelle 18: Vergleich Absorption an der Decke: Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter | 69 |
| Tabelle 19: Vergleich Absorption an der Decke: Ergebnisse der simulierten Nachhallzeiten T_{20} | 70 |
| Tabelle 20: Vergleich Abstand und Anordnung: Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter | 73 |
| Tabelle 21: Vergleich Simulation und rechnerische Ermittlung der Nachhallzeit | 77 |

1 Einleitung

Im Zentrum dieser Untersuchung steht die Erarbeitung prinzipieller Maßnahmen zur Umsetzung der Anforderungen an die raumakustische Qualität von typischen Ausbauformen von Büroflächen nach der deutschen Richtlinie zur Büroakustik VDI 2569. Dazu werden Berechnungsmethoden der geometrischen Akustik inklusive einiger wellenbasierter Erweiterungen angewandt.

1.1 Motivation und Zielstellung

Viele Büro- und Gewerbegebäude, vor allem im Bereich Neubau, werden heute von einer Nachhaltigkeitszertifizierung begleitet. Die in Deutschland am weitesten verbreitete und mittlerweile auch international anerkannte Gebäudezertifizierung erfolgt durch die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB). Wenn eine solche Zertifizierung angestrebt wird, müssen u.a. gewisse bauliche Qualitäten nachgewiesen werden. Die entsprechenden Maßnahmen sind bereits in frühen Planungsphasen einzuleiten, um zum einen Planungssicherheit und nicht zuletzt auch Übersicht über die Investitionskosten zu erlangen. Bei großen Büroflächen fordert die Zertifizierung nach DGNB die Einhaltung der Kennwerte nach VDI 2569. Aufgrund der Komplexität des Bewertungssystems der VDI 2569 sind pauschale Aussagen dazu oft kaum mit ausreichender Sicherheit zu treffen, gerade in Planungsphasen in denen noch keine endgültige Nutzung oder Möblierung der Büroflächen feststeht. Zudem besteht vielfach von Seiten der Bauherrenschaft nur ein oberflächliches Verständnis darüber, was die jeweiligen Einstufungen der VDI 2569 baulich bedeuten können. Auch die Richtlinie selbst gibt dazu nur wenig Anhaltspunkte. Für diese planerische Lücke soll mit der vorliegenden Arbeit eine Hilfestellung erarbeitet werden. Dazu werden auf allgemeine Layouts und Maßnahmen bezogene Konzepte entwickelt, die in folgenden fünf Bereichen unterstützen sollen:

- Präsentationsmaterial zur Information über notwendige Maßnahmen zur Einstufung nach VDI 2569
- Entscheidungsvorlage für Fachfremde zur Festlegung des Planungsziels
- Ermöglichen einer übersichtlichen Bewertung bestehender bzw. geplanter Bürolayouts
- Vorlage für mögliche Maßnahmen zur Ertüchtigung
- Startpunkt für vertiefte raumakustische Auslegung bzw. Planung konkreter Layouts

Die Entwicklung der Konzepte basiert auf der Beantwortung folgender zentraler Fragen: Welche generellen Layouts und raumakustischen Maßnahmen können die Ziel-

werte der VDI 2569 für unterschiedliche Ausprägungen von Büroflächen erfüllen und ergeben sich Korrelationen zwischen akustischer Qualität und generellen Ausstattungsparametern? Dazu erfolgen Untersuchungen an raumakustischen Modellen mit Methoden der geometrischen Akustik unter dem nachfolgend skizzierten Vorgehen.

1.2 Vorgehensweise

Um zu validieren, dass die gewählte Untersuchungsmethode auch geeignet ist, werden Voruntersuchungen zur Qualität der Implementierung der Beugung sowie zur Unsicherheit des Berechnungsverfahrens selbst angestellt. Aus diesen Voruntersuchungen können zudem geeignete Berechnungsparameter abgeleitet werden.

Auf dieser Grundlage werden die Berechnungsmodelle erstellt. Diese bestehen aus gewissen Grundlayouts von Büroflächen, die mit unterschiedlichen Ausstattungsmerkmalen simuliert werden. Die Auswertung der Simulation erfolgt bezogen auf die einzelnen Messpfade.

Aus den Ergebnissen werden anschließend prinzipielle Designempfehlungen abgeleitet und unter Berücksichtigung dieser die entsprechenden Beispiellayouts entwickelt. Es werden zudem mögliche Korrelationen zwischen erreichter Qualität und vereinfachten Parametern (Grundfläche, Arbeitsplatzdichte, Schirmhöhe) untersucht.

2 Grundlagen

Im Rahmen dieses Kapitels werden die Grundlagen dieser Arbeit erläutert, auf die sich im Weiteren unmittelbar bezogen wird bzw. die wesentlich zum Verständnis beitragen. Das beinhaltet einen Überblick zu typischen Büroformen, die wesentlichsten akustischen Grundlagen, eine Erläuterung zu den Simulationsverfahren der geometrischen Akustik sowie die notwendigen Informationen zu Normen, Regelwerken und zur Zertifizierung nach DGNB.

2.1 Büroorganisationsformen

Die überwiegende Zahl der Beschäftigten ist im Bereich Dienstleistung und Verwaltung tätig, somit ist die Arbeitsumgebung „Büro“ auch die meistgenutzte (vgl. Gasser 2013, S. 20). Nur schwierig abzuschätzen ist aber die zukünftige Entwicklung. Zwar hat sich den letzten Jahren der Dienstleistungssektor deutlich ausgeweitet, daraus kann aber nicht unmittelbar geschlossen werden, dass dieser Trend anhält. Somit bekommt auch die mögliche Umnutzung von – gegenwärtig benötigten – Büroflächen eine größere Bedeutung zu (vgl. Gasser 2013, S. 21). Dieser bereits vor zehn Jahren beobachtete Trend setzt sich auch weiterhin fort. Dennoch sind im Gewerbebau Büroflächen nach wie vor stark nachgefragt und sind entsprechend häufig auch aus akustischer Sicht zu beplanen. Im Rahmen der Untersuchung wird sich auf die derzeit typischen Bürolayouts bezogen, die vor allem im deutschen Raum weit verbreitet sind.

2.1.1 Büroorganisationsformen

Großraumbüro

Die wohl typischste Vorstellung von Büroarbeit ist das klassische Großraumbüro. Desse Aufbau kennzeichnet sich besonders durch einen freien Raum, der möglichst wenig durch die Gebäudestruktur unterbrochen wird. Dabei ist der einzige feste Einbau i.d.R. der Treppenhaukern (inkl. WC, Aufzug, Garderobe). Die Bürofläche selbst wird ohne feste Flure erschlossen. Die technische Ausstattung ist relativ hoch und umfasst Klimatisierung, Beleuchtung und einen Hohl- oder Doppelboden für die Leitungsführung. Die Arbeitsplätze werden möglichst identisch ausgestattet (vgl. Staniek 2005, S. 56). Je nach Ausstattung und daraus resultierender Untergliederung ergeben sich unterschiedliche Ausprägungen.

- Der sogenannte „Bürosaal“ weist die zuvor beschriebene offene Struktur auf. Die Arbeitsplätze sind streng orthogonal ausgerichtet und es gibt klar definierte Flurflä-

chen. Dabei ist die gesamte Fläche nur gering durch Stellwände untergliedert (vgl. Oswald 2013, S. 32 und Staniek 2005, S. 56).

- Die „Bürolandschaft“ besteht aus einer einzigen möblierten Fläche ohne klare Trennung zwischen Arbeits- und Flurbereich. Einzelne Bereiche können gegenüber anderen z.B. durch Stellwände abgetrennt werden (vgl. Staniek 2005, S. 56).
- Durch die Anordnung von „Raum-in-Raum“-Systemen kann eine stärkere Untergliederung erzielt und unterschiedliche Nutzungen berücksichtigt werden (vgl. Oswald 2013, S. 32).

Generell dient das Großraumbüro der Unterbringung großer Mitarbeitergruppen (im Bereich von 25 bis 100 Mitarbeiter pro Büroeinheit) (vgl. Oswald 2013, S. 32), die einen hohen Grad an Arbeitsteilung aufweisen, üblicherweise für Tätigkeiten die eine geringe Konzentration erfordern. Diese Büroform, als reine Bürofläche, ist heute eher die Ausnahme (vgl. Neufert u.a. 2019, S. 494), wenngleich sie sich für bestimmte Tätigkeitsprofile durchaus gut eignet und noch immer angewandt wird. So ist beispielsweise Routine-Sachbearbeitung mit hohem Maß an Kommunikation und Informationsaustausch in dieser Form gut unterzubringen (vgl. Fuchs, Muschiol 2013 2006, S. 28).

Gruppenbüro

Eine Weiterentwicklung des zuvor beschriebenen Großraumbüros ist das Gruppenbüro. Es bildet sich aus kleineren Bereichen mit typischerweise 8 bis 25 Arbeitsplätzen. Die einzelnen Gruppenbereiche werden über offene Flure erschlossen und teilweise durch Stellwände oder andere Nutzungsbereiche abgegrenzt (vgl. Staniek 2005, S. 57). Dabei entstehen deutlich geringere Raumtiefen als bei einem klassischen Großraumbüro, wodurch gerade die natürliche Beleuchtung erheblich verbessert wird und zudem mechanische Belüftung und Klimatisierung nur noch teilweise erforderlich sind (vgl. Neufert u.a. 2019, S. 494).

Das Gruppenbüro eignet sich für Anwendungen mit hohem Anteil an Teamarbeit und notwendiger Kommunikation in kleineren Gruppen. Durch die Möglichkeit der Kombination mit anderen Büroformen (z.B. zur Schaffung einer stärkeren Separierung für konzentrierte Einzelarbeit) bleibt dieser Typ auch aktuell nutzbar. Er ist daher vor allem für kreativ arbeitende Berufsgruppen, die auf den Austausch mit Kollegen angewiesen sind attraktiv (vgl. Staniek 2005, S. 57).

Innerhalb der Arbeitsbereiche ist eine echte visuelle und akustische Trennung, ähnlich wie im Großraumbüro, nicht vorhanden. Störungen durch andere Mitarbeiter sind also in Kauf zu nehmen. Allerdings ist das sonstige Arbeitsumfeld (Klima, Belüftung, Be-

leuchtung) gegenüber dem Großraumbüro deutlich verbessert. Ein individuelles Einstellen dieser Parameter ist eingeschränkt möglich (vgl. Oswald 2013, S. 34 f).

Zellenbüro

Sozusagen der Gegenentwurf zu den offenen Großraum- oder Gruppenbüroflächen ist das sog. Zellenbüro. Dabei werden einzelne Räume für Einzelarbeitsplätze oder kleine Gruppenarbeitsplätze geschaffen. Die einzelnen Räume sind dabei i.A. an der Fassade angeordnet und werden über einen zentralen Mittelflur erschlossen. Mitunter wird dieses Layout auch von der Gebäudestruktur (gerade in Bestandsgebäuden) vorgegeben. Diese Form ist heute noch häufig anzutreffen (vgl. Neufert u.a. 2019, S. 494).

Für konzentriertes Arbeiten sind Einzelbüros mit Abstand die beste Lösung (maximale akustische und visuelle Trennung erzielbar), allerdings sind großflächige Zellenbürokonzepte aus wirtschaftlicher Sicht eher unattraktiv (vgl. Fuchs, Muschiol 2013, S. 28).

Kombibüro

Eine Vereinigung der beiden Konzepte Großraumbüro und Zellenbüro stellt das in den 70er Jahren in Skandinavien entwickelte Kombibüro dar. Es verfügt über an der Fassade angeordnete Einzel- und Mehrpersonenbüros (allerdings mit geringerer Fläche gegenüber dem Zellenbüro) die von einer breiteren Mittelzone über Glastrennwände separiert wird. Zum einen wird damit die Mittelzone mit Tageslicht versorgt und zudem besteht ein visueller Kontakt zwischen den Bürozellen und der Mittelzone bei gleichzeitig bestehender akustischer Trennung. Im Bereich der Mittelzone sind Nebenfunktionen, Besprechungsräume und Räume für den informellen Kontakt der Mitarbeiter angeordnet (vgl. Staniek 2005, S. 58 und Oswald 2013, S. 38 f).

Das Kombibüro räumt einige Nachteile der beiden zugrunde liegenden Konzepte aus und ermöglicht so einen flexiblen Wechsel zwischen Teamarbeit, konzentrierter Einzelarbeit und dem informellen Austausch zwischen den Mitarbeitern. Damit kann diese Organisationsform einige Ansprüche der heutigen Arbeitswelt abdecken (vgl. Fuchs, Muschiol 2013, S. 28).

Multi-Space-Büro und Open-Space-Büro

Das Multi-Space-Büro vereint verschiedene Nutzungen der zuvor beschriebenen Layouts, indem auf einer Fläche sowohl Arbeitsplatzgruppen als auch eine Mittelzone mit zusätzlichen funktionalen Zuordnungen (Besprechungsbereiche, Team- und Projekträume, Pausenbereiche, Rückzugsorten für Telefonate oder konzentriertes Arbeiten usw.) bereitgestellt wird. Als Weiterentwicklung dessen, bricht das Open-Space-Büro

die fixen Strukturen und Zuordnungen weiter auf, indem z.B. auch die feste Arbeitsplatzzuweisung („non-territoriales Büro“) entfällt. Arbeitsplätzen und werden flexibel genutzt und bei Bedarf auch umgenutzt (Oswald 2013, S. 40 f). Seit den 90er Jahren wird dieses Format in Deutschland vermehrt eingesetzt und bietet sich insbesondere in Mietobjekten an, wenn die endgültige Nutzung ggf. noch nicht feststeht. Damit ist diese Büroform häufig in der frühen Planung zu berücksichtigen (vgl. Klaffke, 2016 S. 127f).

Diese Büroform ist i.W. die Grundlage für alle der untersuchten Büroflächen im Rahmen dieser Arbeit, wobei sich die Untersuchung auf die Gruppenbereiche bezieht, die die eigentlichen Arbeitsplätze beinhalten. Ob flexibel genutzt oder mit fixer Zuweisung, sind es diese Bereiche die im Rahmen der Zertifizierung nach den Maßgaben der VDI 2569 zu bewerten sind.

2.2 Theoretische Grundlagen der Akustik

Zum besseren Verständnis ist es an dieser Stelle angebracht einen kurzen Überblick über die akustischen Grundlagen zu geben. Es werden dabei nur die wesentlichsten Mechanismen erläutert, die für die weiteren Ausführungen, insbesondere zum Simulationsverfahren, von Interesse sind. Eine ausführlichere Darstellung geht über den Rahmen dieser Arbeit hinaus.

2.2.1 Schallfelder in Räumen

Schallquellen können in der Akustik (und auch für die nachfolgenden Simulationen) modellhaft als eine ideale, allseitig gleichförmig abstrahlende Punktschallquelle angesehen werden, zumindest solange die abgestrahlte Wellenlänge klein gegenüber der Quellenausdehnung ist. Die Schallleistung einer solchen Schallquelle verteilt sich mit größer werdendem Abstand zur Quelle auf eine immer größere Kugeloberfläche. Damit nehmen die Schallintensität und auch der resultierende Schalldruckpegel mit Abstand zur Quelle stetig ab. Dies ist das reine Direktfeld der Quelle (vgl. Müller, Möser 2004, S. 194).

In einem Raum breitet sich der durch eine Schallquelle abgestrahlte Schall wie zuvor beschrieben aus, wird dann aber an den Begrenzungsflächen reflektiert. Die Überlagerung von Direktschall und Reflexionen bilden zusammen das Schallfeld im Raum. Beschreibt man den Schall als Welle (Wellengleichung), ist die Überlagerung der Wellen abhängig von der betrachteten Frequenz. Bei tiefen Frequenzen (bei denen die Wellenlänge groß gegenüber den Raumdimensionen ist) können einzelne Wellen deutlich hervortreten und das Schallfeld ggf. dominieren. Man spricht von sogenannten Raummoden oder Eigenfrequenzen. Mit steigender Frequenz nimmt die Dichte dieser Eigen-

frequenzen zu, bis zu einem Punkt an dem die Moden stochastisch gleichverteilt sind (vgl. Müller, Möser 2004, S. 332). Die Frequenz ab der eine ausreichende Modenüberlappung gegeben ist wird als Schrödergrenzfrequenz f_s [Hz] bezeichnet und errechnet sich zu:

$$f_s = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (\text{Gl. 1})$$

mit dem Raumvolumen V [m³] und der Nachhallzeit T_{60} [s], die weiter unten erläutert wird (vgl. Kuttruff 2000, S. 76).

Sofern der Direktschall der Quelle in einem Raum keinen Einfluss auf das Schallfeld hat (ausreichender Abstand) wird das Schallfeld als Diffusfeld bezeichnet. Die Grenze zwischen Direkt- und Diffusfeld ist der Hallradius (vgl. Sinambari, Sentpali 2014, S. 281).

Für zahlreiche Betrachtungen im Bereich der Raumakustik ist die vollständige Beschreibung mittels Wellengleichung nicht immer notwendig bzw. aufgrund der hohen Komplexität der Wellenbeschreibung nicht zielführend (vgl. Vorländer 2020, S. 51). Daher wird in der geometrischen Akustik (GA) die Schallausbreitung nicht über die Wellengleichung, sondern vereinfacht als „Schallstrahlen“, die von der Quelle ausgesendet werden, beschrieben. Diese Schallstrahlen tragen eine gewisse Schallenergie, die wie zuvor mit Abstand zur Quelle abnimmt. Da sich die Schallstrahlen mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten ergeben sich gewisse Laufzeiten der unterschiedlichen Anteile. Betrachtet man einen Punkt im Raum (Empfangsposition oder Messpunkt) kommt als erstes der Direktschall an, danach folgenden die verschiedenen Reflexionen entsprechend ihrer jeweiligen Laufzeiten. Trägt man die energetischen Anteile über der Zeit auf ergibt sich das Echogramm des Raumes (s. Abbildung 1). Es ist spezifisch für eine bestimmte Kombination aus Geometrie, Quell- und Empfangsposition (vgl. Müller, Möser 2004, S. 333f).

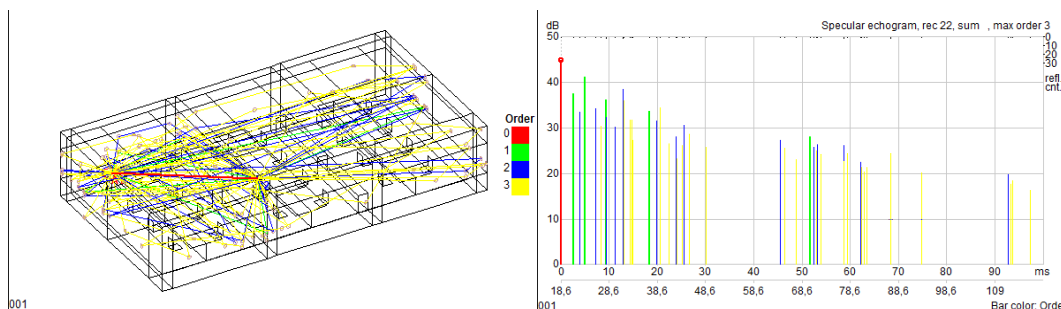


Abbildung 1: links: Schallstrahlen im Raum, rechts: Echogramm, rot – Direktschall, grün/blau/gelb - Reflexionen 1 / 2 / 3. Ordnung

Das Echogramm ist die rein energie-basierte Variante der sogenannten Impulsantwort. Bezieht man die Phasenlage in die Schallausbreitung mit ein (im Rahmen der wellentheoretischen Betrachtung) erhält man statt des Echogramms die Impulsantwort. Da diese dann die Phasenbeziehung der Schallanteile zueinander enthält, weist sie positive und negative Anteile auf und wird üblicherweise als Schalldruck über der Zeit aufgetragen (vgl. Vorländer 2022, S. 89f). Die Impulsantwort entspricht systemtheoretisch gesehen der Reaktion (Antwort) des Raumes im Zeitbereich, wenn dieser mit einem idealen Impuls (Dirac-Impuls) beaufschlagt wird. Durch die Transformierung der Impulsantwort in den Bildbereich erhält man die Frequenzantwort bzw. den Frequenzgang des untersuchten Systems (bezogen auf die konkrete Sender- und Empfängerkombination), als Funktion der Amplitude über der Frequenz (vgl. Kuttruff 2000, S. 19f).

Sowohl im Echogramm als auch in der Impulsantwort ist zu beobachten, dass die Energie der Schallanteile mit voranschreitender Zeit weiter abnimmt. Dieses Abfallen oder „Ausklingen“ der Schallenergie wird als Nachhall oder Halligkeit eines Raumes bezeichnet. Ursache dafür ist i. W. der Energieverlust des Schalls beim Auftreffen auf die Raumbegrenzungen. Dabei wird ein Anteil durch das Bauteil hindurchgelassen (Transmission) und in einen anderen Raum abgestrahlt und der andere Anteil breitet sich im Bauteil aus (Dissipation) und wird in kinetische Energie umgewandelt. Beide Anteile zusammen bilden den absorbierten Schallanteil und stehen in Bezug auf das Schallfeld im Raum nicht mehr zur Verfügung. Die übrige Energie wird zurück in den Raum reflektiert (vgl. Sinambari, Sentpali 2014, S. 287f). Zur Beschreibung wieviel ein Material von der auftreffenden Schallenergie absorbiert, wird der Schallabsorptionsgrad α ($0 =$ schallhart, keine Absorption / $1,0 =$ vollständige Absorption) verwendet.

Als Maß für die Halligkeit eines Raumes wird die Nachhallzeit T_{60} [s] angegeben. Sie wurde als die Zeit definiert, die vergeht, bis der Schalldruckpegel im Diffusfeld eines Raumes nach Abschalten einer konstant betriebenen Schallquelle um 60 dB abgefallen ist (vgl. Müller, Möser 2004, S. 337). Die Nachhallzeit kann gerade bei Simulationen oder Messungen auch aus einem Pegelabfall von z.B. 20 oder 30 dB bestimmt und auf einen Abfall von 60 dB hochgerechnet werden. Sie wird dann entsprechend als T_{20} oder T_{30} gekennzeichnet.

In einem perfekt diffusen Raum ist die Energiedichte über den Raum konstant. Damit kann man annehmen, dass die Energie auch in Abhängigkeit von der Schallabsorption an jedem Punkt in gleicher Weise abnimmt. Zudem wird vorausgesetzt, dass der Schall nach einer gewissen mittleren Zeit (abhängig vom Raumvolumen) immer eine Begrenzungsfläche mit einer mittleren Schallabsorption trifft (vgl. Müller, Möser 2004, S. 336f). Unter diesen Annahmen ergibt sich die Formel für die Nachhallzeit nach SABINE, auf die Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet und auf die entsprechende Fachliteratur

verwiesen. Die Formel lautet (ohne Berücksichtigung der Ausbreitungsdämpfung in Luft):

$$T_{60} = 0,163 \cdot \frac{V}{A} \quad (\text{Gl. 2})$$

wobei V das Raumvolumen [m^3] und A die äquivalente Absorptionsfläche [m^2] beschreibt. Diese ergibt sich aus der Summe einer jeden Fläche im Raum S_i mit ihrem zugehörigen Schallabsorptionsgrad α_i zu:

$$A = \sum_i \alpha_i \cdot S_i \quad (\text{Gl. 3})$$

2.2.2 Schallbeugung und -streuung

Bisher war nur von Reflexionen im Allgemeinen die Rede. Abhängig von der Ausdehnung und der Oberfläche eines Objektes kann es aber auch zur Beugung um Objekte bzw. zur Streuung des Schalls kommen. Diese Mechanismen sind generell abhängig vom Verhältnis der Abmessungen a eines Objektes und der Wellenlänge λ des auf das Objekt auftreffenden Schalls. Dabei sind folgende Fälle zu unterscheiden:

- $a > \lambda$: geometrische Reflexion des Schalls
- $a \approx \lambda$: diffuse Reflexion an strukturierten Flächen mit Strukturgröße $\approx a$ bzw. Streuung an Objektkanten für Flächen mit Abmessungen $\approx a$
- $a < \lambda$: Beugung um Fläche / Objekte herum

Bei freien Objekten im Raum ist auch der Einfallswinkel des Schalls von Bedeutung, sodass a dann als Abmessungen der auf die Schallquelle projizierten Fläche zu verstehen ist (vgl. Kuttruff 2000, S. 51f).

Streuung ist auch dann zu beobachten, wenn benachbarte Oberflächen (auch wenn diese plan nebeneinander in einer Ebene liegen) eine unterschiedliche Impedanz (also z.B. wechselnde Flächen mit hoher und niedriger Absorption) aufweisen und der Bereich in dem der Impedanzwechsel geschieht, klein gegenüber der Wellenlänge ist (vgl. Kuttruff 2000, S. 55f).

Um zu beschreiben wie stark ein Objekt den auftreffenden Schall streut wird der Streugrad s herangezogen. Dieser bildet sich aus dem Verhältnis der nicht-geometrisch reflektierten Energie zur gesamten reflektierten Energie (vgl. Cox u.a. 2006, S. 3). Dieser ist nicht zu verwechseln mit dem Diffusivitätsgrad d , der ein Maß für die Verteilung der

gestreuten Schallenergie ist. Er wird als Polardiagramm abhängig von Frequenz und Pegel, ähnlich wie bei der Richtcharakteristik von Lautsprechern, angegeben (vgl. Cox u.a. 2006, S. 7f).

2.3 Gebäudezertifizierung

Die grundlegende Motivation für diese Arbeit, resultiert vor allem aus der mittlerweile in der Bauplanung weit verbreiteten Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden, die auch für Akustik-Planer Zielvorgaben enthält, welche für eine Zertifizierung nachzuweisen sind.

Mit dem Zertifizierungssystem der „Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen“ (kurz: DGNB), steht ein national – und mittlerweile auch international – anerkannter Standard zur Beurteilung der Nachhaltigkeitsqualität von Gebäuden, Quartieren und Innenräumen zur Verfügung (vgl. DGNB 2023). Ziel ist es mit der Bewertung (von Bronze bis Platin) eine gewisse Qualität bei der Errichtung und im Betrieb von Objekten zu fördern.

Zukünftige Nutzer bzw. Investoren können mit der erreichten Einstufung direkt eine bestimmte Gebäudequalität assoziieren, daher gilt die Zertifizierung z.T. bereits als Voraussetzung für den Verkauf bzw. sie wird als Vermarktungsinstrument eingesetzt. Für Bauherren ist eine Zertifizierung somit vielfach bereits unerlässlich, um ein Objekt überhaupt am Markt adäquat platzieren zu können.

Wird eine Zertifizierung angestrebt, sind im Rahmen des Zertifizierungsprozesses Nachweise über die erzielte Qualität aus den verschiedensten Planungsbereichen zu erbringen. Für diese Arbeit sind dabei die Kriterien zur „Soziokulturelle und funktionale Qualität – Akustischer Komfort“ (vgl. DGNB SOC 1.3) in Büro- und Verwaltungsgebäuden (Neubau) von Interesse. Darin werden qualitative Anforderungen an Büroflächen gestellt. Für die Raumakustik sind demnach zum Erreichen einer gewissen Be-punktung für die Zertifizierung bestimmte Zielwerte nach der Richtlinie VDI 2569 umzusetzen, auf die im nachfolgenden Kapitel eingegangen wird.

2.4 Normative Grundlagen

Für die Bewertung der Raumakustik von Büroflächen existieren verschiedene Normen und Regelwerke die zur Anwendung kommen können. In Deutschland werden die anerkannten Regeln der Technik (a.R.d.T.) in Bezug auf die Raumakustik von Büroflächen nach allgemeiner Auffassung durch die Norm DIN 18041 beschrieben (vgl. DEGA BR 0107, S. 1f). Darüber hinaus besteht mit den „Technischen Richtlinien für Arbeits-

stätten ASR A3.7“ eine Durchführungsempfehlung für konkrete Maßnahmen zur Umsetzung der Anforderungen aus der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV). Die ASR A3.7 steht allerdings in der Kritik, in einigen Bereichen von den a.R.d.T. abzuweichen und damit hinter der nach DIN 18041 erzielbaren raumakustischen Qualität zurückzubleiben. Über die Vorgaben der DIN 18041 hinausgehende Empfehlungen können mit Anwendung der VDI 2569 umgesetzt werden (vgl. DEGA BR 0107, S. 5).

Für die Einstufung nach DGNB (schriftlich niedergelegt in DGNB SOC 1.3) werden die Büroräume anhand der Grundfläche unterschieden. Abhängig von dieser Einstufung beruft sich der Kriterienkatalog der DGNB auf Zielwerte aus den zuvor genannten Regelwerken. Die einzelnen Kriterien nach denen die entsprechende Bewertung mit einer gewissen Punktzahl erfolgt, werden als Indikatoren bezeichnet. Demnach ergibt sich folgendes:

- Indikator 3, Einzelbüros und Mehrpersonenbüros $\leq 40 \text{ m}^2$: Raumakustikklassen der VDI 2569 unter Einbeziehung des Kennwertes der Nachhallzeit T
- Indikator 4, Mehrpersonenbüros $> 40 \text{ m}^2$: Raumakustikklassen der VDI 2569 unter Einbeziehung der Kennwerte Nachhallzeit sowie der Schallausbreitungsparameter (im nachfolgenden Kapitel näher erläutert)

Der Nachweis hat immer für eingerichtete aber unbesetzte Büroräume zu erfolgen. Alternativ kann ein Nachweis auch im ausgeführten Zustand mittels Messungen erfolgen (Normenreihe DIN EN ISO 3382). Die darin aufgeführten Größen und Auswerteverfahren spielen auch für die Simulation im Weiteren noch eine Rolle, da die VDI 2569 insbesondere auf die DIN EN ISO 3382-3 verweist.

Aus den zuvor genannten Einstufungen wird ersichtlich, dass die VDI 2569 der Bewertungsmaßstab für die gesamten Untersuchungen der vorliegenden Arbeit sein muss, um den Kriterien (auch Indikatoren genannt) für die DGNB-Zertifizierung zu entsprechen.

2.4.1 Anforderungen der VDI 2569

Die VDI 2569 teilt die akustische Qualität von Büroräumen in sogenannte Raumakustikklassen A, B und C ein. Damit eine Bürofläche einer dieser Klassen zugewiesen werden kann, müssen verschiedene Parameter nachgewiesen werden. Diese werden nachfolgend näher erläutert.

Nachhallzeit T_{20}

Die Nachhallzeit ist oktavweise, in den sechs Oktaven von 125 bis 4000 Hz zu ermitteln. Bei der Planung hat die Berechnung nach DIN 18041, DIN EN 12354-6 oder anderen „geeigneten Verfahren“ (VDI 2569, S. 18) zu erfolgen. Damit sind prinzipiell zahlreiche Möglichkeiten von einer „einfachen“ Berechnung mittels SABINEScher Nachhallformel, über die richtungsbezogene Berechnung nach DIN EN 12354-6 oder auch eine raumakustische Simulation gegeben. Da in üblichen Bürobereichen die Rahmenbedingungen zur Anwendbarkeit der SABINESchen Nachhallformel aber nicht gegeben sind, ist diese keine valide Option. Die nachfolgenden Parameter sind ohnehin nur im Rahmen einer Simulation ermittelbar. Ein entsprechendes Modell muss also in jedem Fall erstellt werden und somit kann auch die Nachhallzeit (dann auch als tatsächliche T_{20}) durch Simulation bestimmt werden (vgl. VDI 2569, S. 8, 18).

Kenngößen der Schallausbreitung $L_{p,A,S,4m}$ und $D_{2,S}$

Als Maß für die Beurteilung der Abschirmung und Unterteilung der Bürofläche sind die folgenden beiden Kenngößen zu untersuchen:

- A-bewerteter Schalldruckpegel der Sprache in einem Abstand von 4 m $L_{p,A,S,4m}$ [dB(A)]
- räumliche Abklingrate der Sprache $D_{2,S}$ [dB], also die Rate mit welcher der Schalldruckpegel der Sprache je Abstandsverdopplung abnimmt

Beide Größen beziehen sich auf den A-bewerteten Schalldruckpegel der Sprache $L_{p,A,S}$, dem das Schalleistungsspektrum nach DIN EN ISO 3382-3 zugrunde liegt (vgl. DIN EN ISO 3382-3, S. 11f). Um auf einen Einzahlwert zu kommen ist der Summenpegel aller Oktaven (125 bis 4000 Hz) zu bilden. Es müssen beide Parameter einen gewissen Wert erfüllen, damit der jeweilige Messpfad einer „Stufe der Schallausbreitung“ von 1 bis 3 zugeordnet werden kann. Die Einordnung der einzelnen Messpfade wird dann für die Gesamt-Bewertung der untersuchten Bürofläche herangezogen (vgl. VDI 2569, S. 8, 18).

Störschalldruckpegel bauseitiger Geräusche $L_{NA,Bau}$

Bei der Planung einer Bürofläche werden die entsprechenden Kennwerte als Vorgabe (z.B. für die Auslegung der haustechnischen Anlagen) geführt. Ein Nachweis im eigentlichen Sinne ist gerade in frühen Phasen der Planung nicht möglich. Im Rahmen der DGNB-Zertifizierung wird auch kein Nachweis dieses Parameters gefordert, sodass im Folgenden keine weitere Betrachtung erfolgt.

Mehrpersonenbüros im Sinne der VDI 2569

Die Unterscheidung von Mehrpersonenbüros erfolgt in VDI 2569 anhand des Abstandes zwischen den am weitesten voneinander entfernten Arbeitsplätzen. Sind diese < 8 m voneinander entfernt handelt es sich um ein „kleines Mehrpersonenbüros“. Beträgt die Entfernung der am weitesten voneinander entfernten Arbeitsplätze ≥ 8 m wird das Büro als „großes Mehrpersonenbüro“ eingestuft (vgl. VDI 2569, S. 23).

Einstufung in Raumakustikklassen

Damit eine Bürofläche eine endgültige Einstufung in eine Raumakustikklasse erhält, müssen alle Parameter einen gewissen Wert erreichen bzw. einhalten. Bei „kleinen Mehrpersonenbüros“ betrifft das lediglich $L_{NA,Bau}$ und die Nachhallzeit T_{20} .

Diese Parameter sind auch für „große Mehrpersonenbüros“ heranzuziehen. Hier kommen aber zusätzlich noch die Kennwerte der Schallausbreitung hinzu. Die einzelnen Messpfade erhalten je nach erreichtem Wert eine entsprechende „Stufe der Schallausbreitung“. Es müssen folgende Stufen für die jeweilige Einstufung in die Raumakustikklasse erzielt werden (vgl. VDI 2569, S. 24ff):

- Raumakustik-Klasse A: mindestens 2/3 der Messpfade in Stufe 1, die restlichen Messpfade in Stufe 2
- Raumakustik-Klasse B: mindestens 2/3 der Messpfade in Stufe 2, die restlichen Messpfade in Stufe 3
- Raumakustik-Klasse C: mindestens 1/3 der Messpfade in Stufe 2 und die restlichen Messpfade in Stufe 3

Die Anforderungen und Klassifizierungen lassen sich wie folgt tabellarisch zusammenfassen:

| Raumtyp | | Störschalldruck- pegel bauseitiger Geräusche | Nachhallzeit | | räumliche Abkling- rate der Sprache | A-bew. Schall- druckpegel der Sprache im Abstand von 4 m |
|-------------------------------|-----------------------|--|----------------------|----------------------|--|--|
| | | | 125 Hz | 250 bis 4k Hz | | |
| | | $L_{NA,Bau}$ | T_{20} | | $D_{2,s}$ | $L_{pA,S,4m}$ |
| kleines Mehr- personenbüro | Klasse A | $\leq 35 \text{ dB(A)}$ | $\leq 0,6 \text{ s}$ | $\leq 0,4 \text{ s}$ | - | - |
| | Klasse B | $\leq 40 \text{ dB(A)}$ | $\leq 0,7 \text{ s}$ | $\leq 0,5 \text{ s}$ | - | - |
| | Klasse C | $\leq 40 \text{ dB(A)}$ | $\leq 0,9 \text{ s}$ | $\leq 0,7 \text{ s}$ | - | - |
| großes Mehrpersonenbüro | Klasse A | $\leq 35 \text{ dB(A)}$ | $\leq 0,8 \text{ s}$ | $\leq 0,6 \text{ s}$ | - | - |
| | Stufe 1 ¹⁾ | - | - | - | $\geq 8 \text{ dB}$ | $\leq 47 \text{ dB(A)}$ |
| | Klasse B | $\leq 40 \text{ dB(A)}$ | $\leq 0,9 \text{ s}$ | $\leq 0,7 \text{ s}$ | - | - |
| | Stufe 2 ¹⁾ | - | - | - | $\geq 6 \text{ dB}$ | $\leq 49 \text{ dB(A)}$ |
| | Klasse C | $\leq 40 \text{ dB(A)}$ | $\leq 1,1 \text{ s}$ | $\leq 0,9 \text{ s}$ | - | - |
| | Stufe 3 ¹⁾ | - | - | - | $\geq 4 \text{ dB}$ | $\leq 51 \text{ dB(A)}$ |

¹⁾ Die Stufen („Stufen der Schallausbreitung“) beziehen sich auf die Schallausbreitungsgrößen $D_{2,s}$ und $L_{pA,S,4m}$ für die einzelnen Messpfade. Bei großen Mehrpersonenbüros müssen zur Einstufung in die jeweilige Raumakustik-Klasse A und B mindestens 2/3 der Messpfade in der entsprechenden Stufe, die restlichen Messpfade in einer Stufe darunter liegen. Für die Raumakustik-Klasse C muss 1/3 der Pfade in Stufe 2 und die restlichen in Stufe 3 liegen.

Tabelle 1: Übersicht der Zielwerte nach VDI 2569

2.4.2 Ermittlung der Kennwerte und deren Auswertung

Die prinzipielle Ermittlung aller relevanter Kennwerte erfolgt im Simulationsmodell nach den gleichen Kriterien wie bei einer „realen“ akustischen Messung im ausgeführten Objekt. Dabei sind abhängig vom untersuchten Kennwert verschiedene Auflagen und Hinweise zu berücksichtigen. Die Durchführung erfolgt in Übereinstimmung mit VDI 2569 und DIN EN ISO 3382-2 bzw. -3.

Nachhallzeit

Die Nachhallzeit T_{20} wird über einzelne Messpunkte im Raum gemittelt. Die Messpunkte sollen nach Möglichkeit keinen größeren Abstand als 8 m zur Schallquelle aufweisen, da eine arbeitsplatzbezogene Nachhallzeit die Zielstellung der VDI ist (vgl. VDI 2569, S. 25). Es ist eine omnidirektionale (allseitig abstrahlende) Schallquelle zu verwenden.

Kenngrößen der Schallausbreitung

Die Schallanregung erfolgt auch hier mittels einer omnidirektionalen Schallquelle, die ein hinsichtlich Frequenzspektrum und Schallleistung fest definiertes Signal aussendet. Es wird an jedem Messpunkt entlang eines Messpfades der A-bewertete Schalldruck-

pegel bestimmt und über der direkten Entfernung zur Schallquelle aufgetragen. Mittels Regression wird daraus die Pegelabnahme $D_{2,S}$ ermittelt, wie in Abbildung 2 beispielhaft dargestellt.

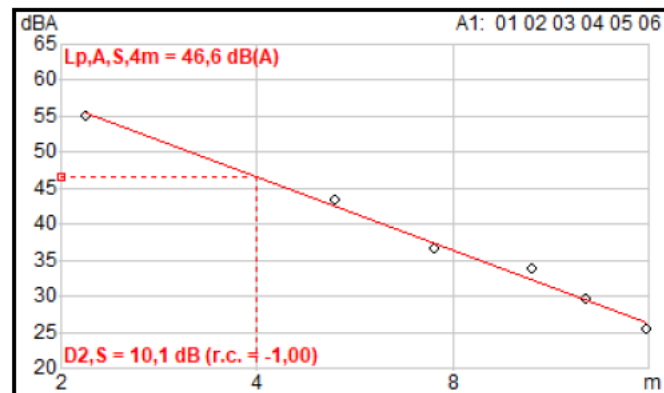


Abbildung 2: Schalldruckpegel der Sprache in Abstand zur Quelle mit Regressionsgerade

$D_{2,S}$ wird dabei für alle Messpunkte ausgewertet, die einen Abstand von 2 bis 16 m zur Quelle aufweisen. $L_{p,A,S,4m}$ wird nicht direkt ermittelt, sondern aus der Regressionsgeraden für $D_{2,S}$ bestimmt (vgl. DIN 3382-3, S. 13f).

Die notwendige Anzahl an Messpfaden ist abhängig von der Zahl der Arbeitsplätze N , nach Möglichkeit soll diese aber ein Vielfaches von drei betragen. Es ergibt sich folgende Aufschlüsselung (vgl. VDI 2569, S. 26):

- $N \leq 6$, Anzahl Messpfade = max. 3, Auswertung aber eher nicht sinnvoll
- $6 < N \leq 15$, Anzahl Messpfade = 3
- $15 < N \leq 24$, Anzahl Messpfade = $N/4$, empfohlen 3 oder 6
- $25 < N \leq 50$, Anzahl Messpfade = $N/5+1$, empfohlen 6 oder 9
- $50 < N$, Anzahl Messpfade = 12

Weitere Hinweise zur Wahl der Messpfade lassen sich wie folgt stichpunktartig zusammenfassen (vgl. VDI 2569, S. 25ff):

- möglichst lange Messpfade wählen, Anzahl längerer Pfade sollte doppelt so groß sein wie Anzahl kürzerer Pfade
- Messpfade vorzugsweise entlang der nutzungsrelevanten Schallausbreitungswege
- sofern vorhanden sind Pfade mit und ohne Abschirmungen (Schränke, Trennwände, ...) zu wählen
- wenn Abschirmungen vorhanden sind muss ein Messpunkt noch zwischen erstem Schirm und Quelle liegen

- Richtungsänderungen von mehr als 30° vermeiden
- keine raumhohen Trennwände/Hindernisse entlang des Messpfades, es sei denn diese sind Bestandteil des Zonierungskonzeptes
- bei sehr langen, schmalen Büroflächen kann die geforderte Pfadanzahl zu hoch sein
- bei stark zergliederten Anordnungen sollten die Messpfade mit möglichst unterschiedlicher Orientierung ausgewählt werden
- auch parallele Messpfade verwenden, wenn die akustischen Bedingungen unterschiedlich sind
- es kann von den Vorgaben in DIN EN ISO 3382-3 begründet abgewichen werden

Daneben gibt es noch die Bestimmungen in (DIN EN ISO 3382-3, S. 8ff):

- Tischhöhen sind bei elektrisch höhenverstellbaren Tischen auf 75 cm (+/- 5 cm) einzustellen
- Messpfade sollen so gerade wie möglich sein
- bei hohen Abschirmungen (über 1,20 m) soll zwischen Schallquelle und erstem Messpunkt eine solche Abschirmung liegen
- Abstand von Schallquelle bzw. Messpunkt zu Wänden mind. 1,00 m
- Abstand von Schallquelle zum nächsten Tisch mind. 0,40 m
- an allen Arbeitsplätzen entlang eines Messpfades ist ein Messpunkt vorzusehen
- mind. 4 Messpunkte pro Pfad, empfohlene Anzahl ist 6 bis 10, Messpunkte mit einer Entfernung von mehr als 16 m zur Quelle müssen nicht mehr berücksichtigt werden, dürfen aber mit ausgewertet werden
- Messpunkthöhe: 1,20 m
- erster Messpunkt muss sich an dem Arbeitsplatz in größter Nähe zur Schallquelle befinden

2.5 Simulationsmethoden der Raumakustik

Da einige der nach VDI 2569 nachzuweisenden Kennwerte nicht analytisch berechnet werden können bzw. (z.B. im Fall der SABINESchen Nachhallformel) die entsprechenden Bedingungen nicht gelten, ist eine Untersuchung mittels raumakustischer Simulation notwendig. Grundlegendes Ziel von akustischen Simulationen ist die Erstellung

eines Echogramms bzw. einer Impulsantwort um daraus die gängigen raumakustischen Parameter zu berechnen (vgl. Savioja, Svensson 2015, S. 709). Übliche Methoden, die im Bereich der Raumakustik angewendet werden sind z.B. (vgl. Savioja, Xiang 2019, S. 2597):

- wellenbasierte Modelle (Boundary Element Method, Finite Element Method, ...)
- geometrische Akustik (Spiegelschallquellen, Particle/Ray/Beam-Tracing, ...)
- zusätzliche Modelle für Streuung und Beugung

Die für die raumakustischen Planungspraxis verbreiteten Programme nutzen überwiegend Verfahren der geometrischen Akustik mit zusätzlichen Aufsätzen zur Berücksichtigung von Beugung und Streuung (vgl. Vorländer 2020, S. 171f).

2.5.1 Geometrische Akustik

Die ersten computergestützten Berechnungen die auf der Methode der Strahlenverfolgung basieren, wurden bereits in den 1960er Jahren durchgeführt. In einer Veröffentlichung von 1968 wird das prinzipielle Vorgehen beschrieben: Ein mathematisches Modell des Raumes bildet die Grundlage. Dieser Raum wird mittels einer feststehenden allseitig abstrahlenden Quelle (Kugelschallquelle) angeregt. Dabei wird die Laufzeit der ausgesendeten Strahlen im Verhältnis zum Direktschall ermittelt (vgl. Krokstad u.a. 1968, S. 120f). Geometrische Akustik (GA) betrachtet lediglich die Ausbreitung des Direktschalls und geometrische Reflexionen. Für eine gute Näherung an reale Räume ist das aber nicht ausreichend, es müssen zusätzlich diffuse (nicht-geometrische) Reflexionen betrachtet werden (vgl. Dalenbäck 2021, S. 2).

Schallausbreitung

Die Schallausbreitung kann rein über das Abstandsgesetz abgebildet werden (Abnahme der Schallintensität ist proportional zu $1/r^2$, wobei r die Entfernung zu einer isotropen, idealen Kugelquelle ist). Die an einem Punkt ankommende Energie wird dann in diskreten Intervallen aufaddiert und es ergibt sich ein Echogramm (energie-basiert). Es ist auch möglich die Schallausbreitung komplex zu berechnen, dann erhält man entsprechend die schalldruck-basierte Impulsantwort mit Betrag und Phase. Diese ist z.B. Grundlage für die Auralisierung oder um Interferenzen zwischen unterschiedlichen Quellen (oder Reflexionsanteilen) darzustellen. Durch Betragsbildung kann daraus vergleichsweise einfach das Echogramm gewonnen werden (vgl. Savioja, Svensson 2015, S. 711). Um jedoch eine Impulsantwort aus einem Echogramm zu berechnen, muss die fehlende Phaseninformation ersetzt werden. Diese wird üblicherweise über eine zufällige Bildungsvorschrift generiert. Im Allgemeinen ergibt dieses Vorgehen eine

hinreichende Lösung, da es in realen Räumen durch Reflexionen ohnehin zu einer zufälligen Phasenverteilung kommt (vgl. Kuttruff 2000, S. 307f).

Reflexion

Für die GA wird im Üblichen von „lokal reagierenden“ Oberflächen ausgegangen, d.h. dass die Bereiche einer Oberfläche nicht mit umgebenden Bereichen interagieren (also z.B. seitliche Schallausbreitung auf der Oberfläche). Daraus folgt, dass es keine Rückwirkung von den Oberflächen gibt (diese also nicht angeregt werden können und selbst Schall abstrahlen) und keine winkelabhängige Änderung von Reflexion, Absorption bzw. Streuung stattfindet (vgl. Kuttruff 2000, S. 38f). In Realität kommen solche Oberflächen i.d.R. nicht vor, die Annahme bietet eine ausreichende Näherung solange der Schalleinfall nicht zu flach (oder gar streifend) erfolgt. Darüber hinaus stehen die notwendigen Eingangsdaten für nicht-lokal reagierende Oberflächen kaum zur Verfügung (vgl. Vorländer 2020, S. 195).

Spiegelschallquellenverfahren

Die geometrische Reflexion an einer großen Oberfläche kann mittels der Verfahren aus der Optik modelliert werden. Dabei wird jenseits der reflektierenden Fläche eine virtuelle Quelle angeordnet (gespiegelt an der Reflektorebene, daher Spiegelschallquelle (SSQ)). Von dieser wird dann zum Empfangspunkt eine Verbindungslinie konstruiert. Wendet man dieses Prinzip auf die Schallausbreitung an, ergibt sich aus der Wegstrecke zwischen SSQ und Empfangspunkt auch die korrekte Laufzeit des Schalls. Es muss zusätzlich das Abstandsgesetz explizit in die Berechnung eingebunden werden (vgl. Kuttruff 2000, S. 91f).

Für jede Quell- und Empfangskombination wird eine SSQ mit jeder Fläche im Modell gebildet. Dieses Prinzip wird dann auf jede Kombination aus SSQ und Empfänger angewendet und bis zu einem Abbruchkriterium (z.B. maximale Anzahl an gewünschten Ordnungen) wiederholt (vgl. Savioja, Svensson 2015, S. 715). Bei unregelmäßigen Räumen und vor allem Räumen mit nicht-konvexer Form muss dann noch geprüft werden, ob eine Sichtverbindung zwischen Empfänger und Spiegelquelle besteht, da nur diese einen Beitrag zur Bildung der Impulsantwort liefern (vgl. Savioja, Svensson 2015, S. 716f). Da auf diese Art alle möglichen Reflexionen gefunden werden, funktioniert das SSQ-Verfahren deterministisch. Problematisch ist aber der exponentielle Zuwachs der Zahl von SSQ, daher ist dieses Verfahren gut geeignet für frühe Reflexionen (niedrige Ordnungen), wird aber für spätere zu rechenintensiv (vgl. Savioja, Svensson 2015, S. 717).

Ray-Tracing und verwandte Verfahren

Für das ray-tracing werden von einer Quelle (Sender) Strahlen (oder auch Partikel, z.B. beim particle-tracing) ausgesandt. Diese werden anhand vordefinierter Parameter oder über ein stochastisches Verfahren über die Oberfläche der Quelle verteilt, welche sich durch den Raum ausbreiten und an Oberflächen reflektiert werden. Diese Strahlen tragen eine Information über ihre Energie. Da die Energie der Quelle auf die Strahlen aufgeteilt wird, ist auch das Abstandsgesetz implizit berücksichtigt. Bei Reflexion wird die Energie des Strahls um die absorbierte Energie, abhängig vom jeweiligen Schallabsorptionsgrad der Oberfläche, gemindert. Treffen die Strahlen auf einen Empfänger werden sie von diesem mit ihrer „Restenergie“ registriert und es bildet sich das Echogramm (vgl. Savioja, Svensson 2015, S. 717).

Sind die Empfänger nur als Punkte angelegt, wären Treffer relativ unwahrscheinlich. Daher werden für die Empfänger Volumenkörper (z.B. Kugeln) eingesetzt und jeder Strahl der diesen Körper schneidet zählt als Treffer. Je nach Größe der Empfänger sind die erzeugten Echogramme allerdings ungenauer, weil deutlich mehr diffuse Anteile registriert werden als tatsächlich am jeweiligen Empfangsort vorhanden sind. Starke geometrische Reflexionen treten dann ggf. in den Hintergrund. Um diese Fehler zu minimieren wird häufig für frühe Reflexionen im Echogramm das SSQ-Verfahren genutzt und erst spätere Reflexionen mittels ray-tracing berechnet (vgl. Savioja 2016, III.5.4).

Beam-tracing (auch: cone-tracing) als Erweiterung des ray-tracing

Klassisches ray-tracing erfordert wie zuvor beschrieben Empfänger, die Volumenkörper darstellen, da sonst die Chance schlichtweg zu gering ist, dass ein Punktempfänger überhaupt von hinreichend vielen Strahlen getroffen wird. Um die damit verbundenen Fehler geringer zu halten wird beim beam-tracing der Strahl als Volumenkörper (z.B. Kegelstumpf oder Pyramidenstumpf) angelegt, sodass dieser höhere Wahrscheinlichkeiten hat, dass eine Punktquelle getroffen wird. Trifft ein Strahl auf mehrere Flächen, muss er entsprechend auf die verschiedenen Reflexionen aufgeteilt werden, was für die Implementierung allerdings relativ kompliziert ist (vgl. Vorländer 2020, S. 205).

Daher gibt es eine zweite Interpretation des cone-tracing: Hierbei wird der Empfänger als Kugel mit zeitlich wachsendem Radius angelegt und die Strahlen werden analog zum ray-tracing als Linien berechnet. Damit bleiben die Fehler durch einen zu großen Empfänger im frühen Bereich des Echogramms gering aber im späteren Echogramm werden ausreichend Detektionen sichergestellt. Allerdings muss die Energie aller

Strahlen für die wachsende Oberfläche des Empfängers energetisch korrigiert werden, damit das Abstandsgesetz weiterhin gilt (vgl. Savioja 2016, III.5.5).

Weitere Modelle

Es gibt noch andere Modelle, bei denen beispielsweise die ankommende Energie von den reflektierenden Oberflächen gespeichert wird und in einem nächsten Rechenschritt diese dann zum Empfänger abgestrahlt wird (vgl. Savioja, Svensson 2015, S. 722)., da solche Methoden aber in der hier verwendeten Software nicht enthalten sind werden diese an der Stelle nicht weiter erläutert.

2.5.2 Generelle Limitierungen

Da die Simulation mit Methoden der GA lediglich eine Näherung an die tatsächlichen physikalischen Vorgänge darstellen, bestehen einige generelle Limitierungen die im nachfolgenden kurz erläutert werden. Diese sind auch für die vorliegende Untersuchung im Hinterkopf zu behalten.

Die größte Einschränkung resultiert aus dem grundlegenden Ansatz den Schall als Strahl oder Teilchen zu betrachten. Während dieses Modell bei hohen Frequenzen (Wellenlänge klein gegenüber den Abmessungen der Geometrie) eine gute Näherung bietet, fehlt zu tiefen Frequenzen hin, die Berücksichtigung der wellenbasierten Effekte (wie z.B. Beugung, Streuung, Raummoden usw.). Wenngleich durch zusätzliche Modelle manche Effekte implementiert werden können, werden die zu erwartenden Abweichungen zu tiefen Frequenzen generell größer (vgl. Savioja, Svensson 2015, S. 726).

Zum Teil wird die Grenze für die Nutzbarkeit der GA in üblichen Räumen mit 1000 Hz benannt, darunter diene die GA lediglich einer „qualitativen Einschätzung“ (vgl. Kuttruff 2000, S. 89). Allerdings sind solche Grenzwerte nicht als fix zu verstehen und hängen vom konkreten Raum und der Form der Modellierung ab. Die Schrödergrenzfrequenz f_s kann dabei zumindest eine grobe, aber immerhin volumenabhängige Abschätzung liefern. Unterhalb von f_s ist in jedem Fall nicht mehr anzunehmen, dass die Bedingungen für die Gültigkeit der GA noch erfüllt sind (vgl. Dalenbäck 2021, S. 6f). Für viele Parameter der Raumakustik ist die GA aber dennoch brauchbar, da tieffrequente Anteile üblicherweise geringer gewichtet werden und somit einen geringeren Einfluss auf das Gesamtergebnis haben (vgl. Dalenbäck 2021, S. 4).

Einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse hat auch die Qualität der Eingangsdaten. Das betrifft zum einen, dass die geometrische Modellierung (vor allem der Detailgrad) an die Berechnungsmethode angepasst sein muss (vgl. Dalenbäck 2010, S. 2).

Zum anderen sind erforderliche Materialkennwerte entweder gar nicht breit verfügbar (wie etwa beim Streugrad) oder wurden unter von der Simulation abweichenden Bedingungen ermittelt, wie beispielsweise der Schallabsorptionsgrad der üblicherweise für diffusen Schalleinfall ermittelt wird (vgl. Savioja, Svensson 2015, S. 726f).

Derartige Limitierungen müssen bei der Benutzung von GA-basierten Berechnungsmethoden stets berücksichtigt werden, damit aus den Ergebnissen keine falschen oder unzulässigen Schlüsse gezogen werden.

2.5.3 Wellenbasierte Erweiterungen der geometrischen Akustik

Um einige der zuvor erwähnten Einschränkungen etwas auszugleichen und die GA damit für ein breiteres Spektrum akustischer Probleme anwendbar zu machen, gibt es zusätzliche Methoden, die wellenbasierte Effekte modellieren sollen. Das bezieht sich insbesondere auf die Schallstreuung und -beugung. Diese Methoden werden im nachfolgenden Kapitel anhand der konkreten Implementierung in der verwendeten Software erläutert.

3 Erläuterungen zur verwendeten Software

3.1 CATT-Acoustic

Für die raumakustische Simulation basierend auf geometrischer Akustik wurde die Software CATT-Acoustic v9.1 mit dem Berechnungsmodul TUCTv2 eingesetzt. Das Programm wird von Herrn Bengt-Inge Dalenbäck (Ph.D.) entwickelt und vertrieben und zählt zu den am weitesten verbreiteten Programmen dieser Art.

CATT-Acoustic nutzt zur Berechnung eine Kombination aus Spiegelschallquellenverfahren, ray-tracing bzw. cone-tracing und einem Verfahren für die deterministische Berechnung der Streuung bis zu einer gewissen Ordnung. Für Direktschall, die erste Ordnung und auch die Beugung wird die Berechnung zudem schalldruck-basiert unter Berücksichtigung der Phase durchgeführt, sodass für diese Schallanteile auch Interferenzen möglich sind (vgl. TUCT 2022, S. 6f)

3.1.1 Implementierung der Streuung in CATT-Acoustic

Die Erzeugung von diffusen Reflexionen (Streuung) ist abhängig vom Streugrad der vom Schall getroffenen Oberfläche und wird je nach Ordnung der Reflexion über eines von zwei Verfahren realisiert.

Für frühe Reflexionen (bis zu welcher Ordnung hängt dabei vom verwendeten Algorithmus ab) wird das deterministische ray split-up verwendet (vgl. Dalenbäck 2010, S. 4). Die Energie des ankommenden Strahls wird nach dem Wert des Streugrads der Oberfläche aufgeteilt in einen geometrischen und einen diffusen Anteil. Der diffuse Anteil wird auf mehrere neue Strahlen aufgeteilt. Durch die Erhöhung der Strahlenszahl steigt die Genauigkeit des Ergebnisses, aber auch die Rechenlast erhöht sich (TUCT 2022, S. 74).

Für höhere Ordnungen der Streuung wird eine Zufallszahl erzeugt und mit dem Streugrad der Oberfläche verglichen. Ist die Zufallszahl größer oder gleich dem Streugrad wird der Strahl geometrisch reflektiert, ist die Zufallszahl kleiner wird der Strahl diffus reflektiert. Damit ist die Berechnung für alle Ordnungen bei denen dieses Verfahren angewandt wird von stochastischer Natur (sowohl die geometrische als auch die diffuse Reflexion) und es kommt zu gewissen Varianzen zwischen den Rechendurchgängen (vgl. Savioja, Svensson 2015, S. 712).

Um für beide Fälle die Verteilung der Schallenergie bei diffuser Reflexion zu bestimmen wird auf das Lambert'sche Gesetz zurückgegriffen. Ursprünglich ein Zusammen-

hang aus der Optik, stellt es zwar eine starke Vereinfachung dar, hat sich für die meisten Anwendungsfälle aber als ausreichende Näherung erwiesen (vgl. Schroeder, Pohl 2013 S. 3). Es existieren verschiedene Arten der Implementierung für die Anwendung in der GA, die in diesem Rahmen aber nicht weiter erläutert werden sollen. Ein Überblick der Methoden ist beispielsweise in (Weigand, Stephenson 2016) zu finden. Ganz generell beschreibt das Lambert'sche Gesetz die Verteilung der Intensität über einer diffus streuenden Oberfläche. Die Verteilung des diffus reflektierten Anteils ist dabei nicht vom Einfallswinkel abhängig, sondern vom Winkel der diffusen Reflexion.

Mit der zusätzlichen Funktion `auto-edge scattering` kann für einzelne Flächen eine automatische Berechnung des Streugrades (abhängig von der Größe des Elements und der Frequenz) aktiviert werden. Ist eine Fläche klein zur Wellenlänge erzeugt diese mit „`auto-edge scattering`“ eine schwache geometrische aber starke diffuse Reflexion. Diese Option ist üblicherweise für einzelne Elemente oder Flächen im Raum (Stellwände, Schränke, Tischplatten, usw.) anzuwenden (TUCT 2022, S. 72).

3.1.2 Implementierung der Beugung in CATT-Acoustic

Es existieren zahlreiche Methoden für die Berechnung von Beugung, die aber überwiegend an bestimmte Bedingungen geknüpft sind (z.B. ein unendlich ausgedehnter Schirm oder nur eine einzelne Kante mit Beugung). Diese Bedingungen werden im Bereich der Raumakustik zum Großteil nicht erfüllt, wodurch sich diese Modelle nicht für die Erweiterung der GA eignen. Daher wurde für CATT-Acoustic ein Verfahren mit der Bezeichnung `secondary edge source (SES)` eingesetzt, das einige dieser Beschränkungen umgeht (Dalenbäck 2016, S. 2). Das grundlegende Verfahren wurde bereits messtechnisch validiert (vgl. Lokki u.a. 2008, S. 831).

Die SES basiert auf dem Verfahren der Spiegelschallquellen und erzeugt entlang einer Kante viele neue Schallquellen, die ihrerseits eine Richtcharakteristik aufweisen. Diese Richtwirkung hängt u.a. von Entfernung der Sender und Empfänger und dem Winkel zur Kante ab (vgl. Svensson u.a. 1999, S. 2333). Für eine Kante von einem Meter Länge werden dabei mehr als 250 neue Quellen erzeugt. Durch die unterschiedlichen Laufzeiten der einzelnen Kanten-Quellen ergibt sich eine Impulsantwort der Kante (Dalenbäck 2016, S. 2). Die Frequenzabhängigkeit ist zum einen durch frequenz- und winkelabhängige Richtcharakteristik der einzelnen SES implementiert (vgl. Svensson u.a. 1999, S. 2333). Zudem hängt sie implizit mit der Länge der Kanten-Impulsantwort zusammen. Lange Kanten erzeugen eine längere Impulsantwort, je länger eine Impulsantwort desto mehr tieffrequente Energieanteile enthält sie und umgekehrt (Dalenbäck 2016, S. 2). In Realität ist zu beobachten, dass kleine Objekte kaum ein Hindernis für tiefe Frequenzen sind, also eigentlich eine hohe Beugung haben müssten. Dies steht erst einmal im Widerspruch zu der Methode der SES. Allerdings kommt eine kurze

Kante im raumakustischen Kontext nie isoliert vor, sondern es gibt i.d.R. immer noch weitere Kanten. Damit summieren sich die Impulsantworten aller Kanten wieder zur korrekten Antwort auf (Dalenbäck 2016, S. 5f).

Generell können in CATT-Acoustic folgende Übertragungswege mit der SES-Methode abgebildet werden. Die Wege werden mit den Kürzeln d für „diffracted“ und S für „specular (geometrisch)“ gekennzeichnet:

- „d“: Direktschall zu Beugung (Beugung 1. Ordnung)
- „Sd“: 1. Reflexion zu Beugung
- „dS“: Beugung zu Reflexion
- „dd“: Beugung zu Beugung (Beugung 2. Ordnung, z.B. zwei 2D-Schirme oder Doppelkanten an 3D-Objekten)

Diese Wege lassen sich nach Bedarf auch einzeln zu- oder abschalten.

3.1.3 Berechnungsmethoden in CATT-Acoustic

Die Erstellung des Modells sowie die Definition von Sende- und Empfangspositionen erfolgt im Grundmodul der Software („CATT-A“). Das Modell wird mit diesen Parametern exportiert um die eigentliche Berechnung und Auswertung mit dem Modul CATT TUCT (TUCT = The Universal Cone Tracer) durchzuführen. CATT TUCT verfügt über drei verschiedene Algorithmen zur Berechnung der Sender- / Empfängerkombinationen („SxR“). Alle diese Algorithmen haben folgendes gemeinsam (vgl. TUCT 2022, S. 73f):

- Strahlenzahl und Länge des Echogramms sind einstellbar
- oktavweise Berechnung von Direktschall und diffuser Reflexion, Beugung optional zuschaltbar
- Direktschall und 1. Ordnung (geometrische und diffuse Reflexion) werden deterministisch ohne ray tracing mittels SSQ-Verfahren berechnet
- Direktschall, 1. Ordnung (nur geometrische Reflexion) und Beugung sind schall-druck-basiert und enthalten Phaseninformationen (Interferenz möglich)

Algorithmus 1

Der erste der drei Algorithmen ist der im Vergleich einfachste und schnellste. Er ist gedacht für Vergleiche, Anpassung von Parametern und Durchspielen von Varianten. Er beinhaltet die Option über „max split-order“ einzustellen, das bis zur maximal dritten Ordnung deterministisch gerechnet werden soll. Außerhalb davon wird kein ray split-up

durchgeführt, sodass die Unterschiede zwischen Rechengängen höher ausfallen, gleichzeitig aber auch eine schnellere Berechnung durchführbar ist. Das führt bei offenen Räumen oder stark ungleich verteilter bzw. sehr hoher Absorption ggf. zu Ungenauigkeiten im späten Echogramm. Um die Varianz der Rechengänge etwas zu verringern, gibt es die Möglichkeit die Echogramme mehrerer Durchläufe zu mitteln, das betrifft dann jeweils nur die energie-basierten Anteile (vgl. TUCT 2022, S. 74f).

Algorithmus 2

Der Algorithmus 2 verwendet immer deterministisches ray split-up über alle Ordnungen und zwar für alle geometrischen Reflexionen, die aus Direktschall oder einem vorherigen ray split-up stammen. Die diffusen Reflexionen hingegen werden wie beim Algorithmus 1 nicht aufgeteilt, sondern stochastisch anhand des Streugrades diffus oder geometrisch reflektiert. Da es sich hierbei aber bereits um schwächere Schallanteile handelt, verringert sich der Einfluss auf die Variation zwischen Rechendurchgängen deutlich gegenüber Algorithmus 1. Da insgesamt häufiger neue Strahlen erzeugt werden, sind tendenziell weniger initiale Strahlen nötig (vgl. TUCT 2022, S. 75).

Algorithmus 3

Vom Prinzip ist Algorithmus 3 wie Nr. 2 angelegt, nur das hier das ray split-up auch für die erste diffuse Reflexion, die aus einem vorangegangenen ray split-up stammt, durchgeführt wird. Die wiederum daraus folgende diffuse Reflexion erfährt dann eine zufällige Verteilung. Diese Anteile spielen aber i.d.R. im gesamten Echogramm nur noch eine untergeordnete Rolle, sodass sich in den meisten Fällen praktisch keine Variation zwischen den Rechendurchgängen mehr ergibt (vgl. TUCT 2022, S. 75).

3.2 Weitere Software

Für die Erstellung der geometrischen Modelle wurde die Software Google Sketchup Make 2017 verwendet. Es handelt sich dabei um eine vereinfachte CAD-Software zur 3D-Modellierung, die über eine Erweiterung den Export der Modelle in das von CATT-Acoustic benutzte Format ermöglicht.

Zusätzlich wurde die Software REW (Room EQ Wizard) verwendet. Mit ihr können akustische Messungen durchgeführt und ausgewertet werden. Sie wurde benutzt um simulierte (und extern gemessene) Impulsantworten zu importieren und hinsichtlich der Frequenzgänge im Rahmen der Validierung der Untersuchungsmethode auszuwerten.

4 Validierung der Untersuchungsmethode

Um sicherzustellen, dass die Ergebnisse dieser Untersuchung auch für den allgemeinen Planungsprozess in der raumakustischen Konzeption Gültigkeit besitzt, sind i.W. zwei Punkte zu klären. Es ist zum einen sicherzustellen, dass die geplante Vorgehensweise mittels GA, insbesondere mit CATT-Acoustic im Speziellen überhaupt durchführbar ist. Hier ist besonders zu prüfen, inwiefern die Implementierung der Schallbeugung hinreichend genaue Ergebnisse liefern kann. Darüber hinaus ist zu bewerten ob die gewählten Einstellungen für die Simulation geeignet sind und wie stark die Streuung der Ergebnisse sein kann.

4.1 Validierung der Beugungsberechnung

Grundlegende akustische Mechanismen (Schallausbreitung, Abstandgesetz, Reflexion, Streuung, usw.) sind wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert in der Software CATT-Acoustic abgebildet und durch round-robin-Versuche, Tests der Entwickler und nicht zuletzt durch die breite Verwendung der Software von Planungsbüros weltweit hinreichend validiert. Eine Bürofläche ist aber akustisch gesehen eine spezielle Umgebung mit z.T. stark ungleich verteilter Absorption, vorwiegend Flachräumen und je nach Szenario ggf. zahlreichen Objekten im Schallausbreitungsweg. Vor allem die meist starke Absorption an der Decke führt dazu, dass die gestreuten und vor allem die um Objekte gebeugten Schallanteile deutlich an Gewicht im Ergebnis gewinnen. Daher ist die Implementierung eines Modells, welches die Beugung hinreichend korrekt abbildet, von besonderer Bedeutung.

Die grundlegende Methode nach der die Beugung in CATT-Acoustic implementiert wurde (Secondary Edge Source Model nach (Svensson u.a. 1999)), ist von (Lokki u.a. 2008) messtechnisch validiert worden. Dazu wurde ein Testaufbau mit einem omnidirektional abstrahlenden Lautsprecher und einer steifen Platte im schallreflexionsarmen Raum akustisch vermessen. Die Sende- und Empfangspositionen wurden so gewählt, dass alle drei relevanten Fälle geprüft werden können:

- 1) freie Schallausbreitung bei Anwesenheit einer Beugungskante unterhalb der direkten Verbindung zwischen Quelle und Empfänger
- 2) vollständige Abschattung (direkte Verbindung zw. Quelle und Empfänger durch Platte unterbrochen)
- 3) Übergangsbereich zw. 1) und 2) (Kante, Quelle und Empfänger in einer Linie)

Durch den Test im schallreflexionsarmen Raum können die Anteile der Beugung und des Direktschalls weitestgehend isoliert werden. Die messtechnisch ermittelten Im-

pulsantworten aus dem Testaufbau wurden den nach der Methode von Svensson berechneten Impulsantworten gegenübergestellt. Die Auswertung erfolgte insbesondere im Bildbereich. Es zeigt sich, dass die Frequenzgänge für die unterschiedlichen Fälle insgesamt eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung aufweisen (vgl. Lokki u.a. 2008, S. 831). Die beobachteten Abweichungen resultieren aller Wahrscheinlichkeit nach aus der Differenz zwischen angenommenen idealen Bedingungen für die Berechnung und den eben nicht vollständig perfekten Bedingungen eines jeden Messaufbaus. Typischerweise fallen die Frequenzspektren der Berechnung daher deutlich „glatter“ aus, als die der Messung, was auch in der Untersuchung zu beobachten ist. Der generelle Verlauf und die zu erwartenden Effekte werden aber mit ausreichender Übereinstimmung durch die Berechnung abgebildet (vgl. Lokki u.a. 2008, S. 829).

Durch die TU Berlin und die RWTH Aachen wurde im Rahmen einer „round-robin“-Untersuchung zu raumakustischen Simulationen ein ähnlicher, wenngleich deutlich umfangreicherer, Benchmark-Test (Benchmark for Room Acoustical Simulation (BRAS)) entwickelt (vgl. Brinkmann u.a. 2019, S. 2746). Es wurden verschiedene Szenarien erstellt, die im reflexionsarmen Halbraum aufgebaut und akustisch vermessen wurden. Anhand dieser Daten kann für beliebige Softwarelösungen (für Berechnungsverfahren mit GA) ein Vergleich zwischen Messung und Simulation erfolgen und die jeweilige Performance der Software evaluiert werden. Sämtliche notwendige Eingangsdaten wurden detailliert dokumentiert und online frei zur Verfügung gestellt (Aspöck u.a. 2022). Die Dokumentation enthält neben der Geometrie der Testanordnungen auch Schallabsorptionsgrad und Streugrad, mittels in-situ-Messverfahren bestimmt. Auch die verwendete Quelle (Lautsprecher) wurde mit ihrer Richtcharakteristik (als winkelabhängige, komplexe Größe mit Betrag und Phase) abgebildet. Die mit diesen Daten in der Software errechneten Impulsantworten des jeweiligen Testaufbaus können dann mit den ebenfalls verfügbaren messtechnisch ermittelten Impulsantworten verglichen werden.

Als Testszenarien wurden zwei Fälle ausgewählt, die eine starke Relevanz für die geplante Untersuchung aufweisen. Die Beugung um einen Schallschirm (RS5) und die Beugung um ein breiteres Objekt (RS6) (vgl. Aspöck u.a. 2020, S. 20f). Beide Szenarien wurden im schallreflexionsarmen Halbraum ermittelt, sodass Einflüsse von Reflexionen (mit Ausnahme der Bodenreflexion) weitgehend unterdrückt werden.

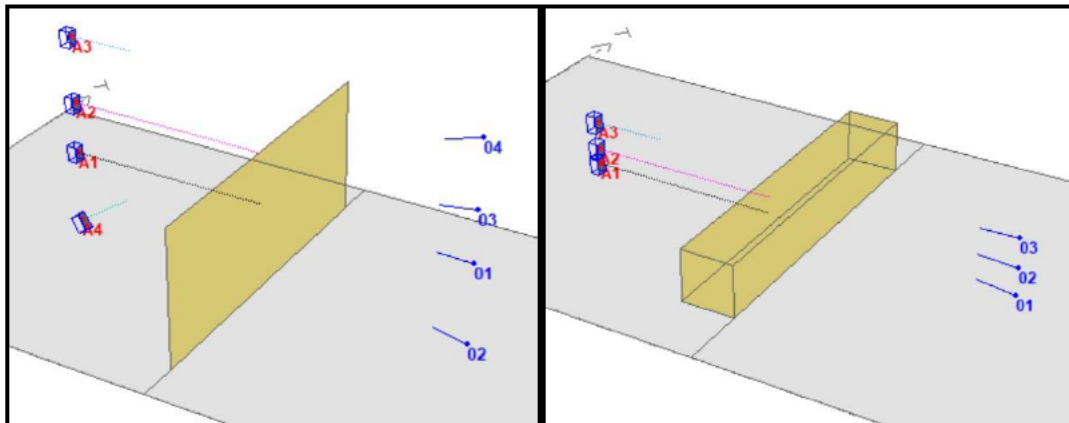


Abbildung 3: Testszenarien mit allen Sende- und Empfangspositionen, links: RS5 rechts: RS6

Im Messaufbau bestanden die Hindernisse (Wand und Box) aus mehreren Einzelelementen. Für die Modellierung der Szenarien wurden die Objekte aber aus einzelnen, geschlossenen Flächen modelliert, da sie akustisch gesehen zusammengehören. Sonst wäre beispielsweise die Beugungskante in mehrere, kürzere Segmente unterteilt und es würden weniger tieffrequente Anteile gebeugt werden. Die Wand wurde außerdem als 2-dimensionale Fläche angelegt. Sämtliche Abmessungen und Abstände, sowie Schallabsorptions- und Streugrade wurden der Dokumentation entnommen.

Die Simulation erfolgte mit Algorithmus 1, die Einstellungen entsprechen denen, die auch für die hauptsächliche Untersuchung verwendet wurden, diese werden in späteren Kapiteln erläutert. Da im reflexionsarmen Halbraum keine späten Reflexionen vorkommen, funktioniert Algorithmus 1 in diesem Fall auch vollständig deterministisch und es entsteht keine Varianz zwischen den Rechendurchgängen. Für die Beugung wurden die Wege „d“, „Sd“ und „dS“ aktiviert.

In der nachfolgenden Abbildung 4 sind die Frequenzgänge verschiedener Sende- und Empfangskombinationen für das Szenario RS5 dargestellt. Die Auswertung wurde mit der Software REW durchgeführt, indem die gemessenen bzw. berechneten Impulsantworten importiert wurden. Es erfolgte keine Nachbearbeitung der Daten, lediglich eine 1/24-Oktav-Glättung sowie eine Anpassung der Pegel für einen besseren optischen Vergleich.

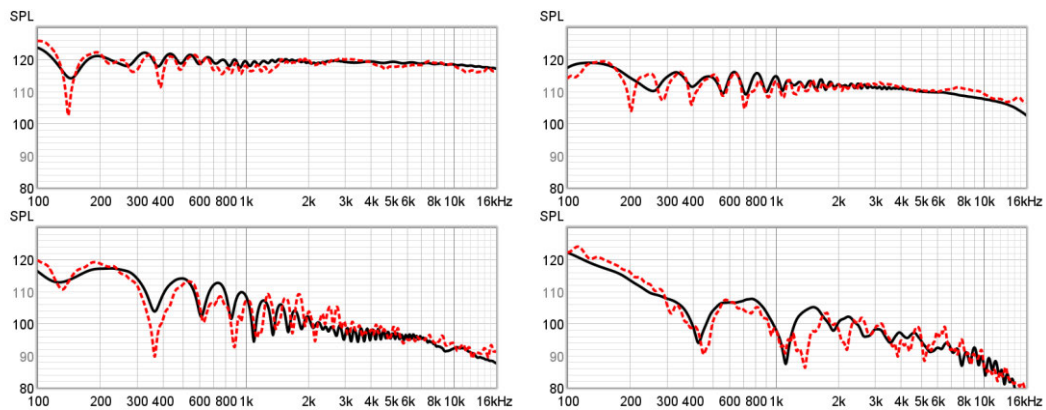


Abbildung 4: RS5, Frequenzgänge von Sender- und Empfängerkombinationen aus Simulation (schwarze, geschlossene Linie) und Referenzmessung (rote, gestrichelte Linie), Glättung 1/24-Oktave, Kombinationen v.l.o.n.r.u.: A3-04 / A2-03 / A1-01 / A4-02

Es zeigen sich für alle Bereiche (freie Schallausbreitung, vollständige Abschirmung und Übergangsbereich) relativ gute Übereinstimmungen zwischen Messung und Simulation, was die prinzipielle Frequenzantwort angeht.

Bei direkter „Sichtverbindung“ zwischen Quelle und Empfänger (aber dennoch eine Beugungskante, z.B. unterhalb der gedachten Verbindungslinie) ergibt sich ein erwartungsgemäß relativ linearer Frequenzgang, wenngleich Kammfiltereffekte sichtbar sind. Diese entstehen durch Überlagerung von Schall mit unterschiedlichen Laufzeiten, in diesem Fall der Direktschall der Quelle und Schallanteile die von der Beugungskante gestreut werden. Im Grenzbereich (A2-03) sieht man den beginnenden Tiefpass und deutliche Kammfiltereffekte, verursacht durch die Laufzeitunterschiede der verschiedenen Beugungsanteile. Im abgeschatteten Bereich verstärkt sich der Tiefpasscharakter weiter (vgl. Lokki u.a. 2008, S. 830).

Für das Szenario RS6 ergeben sich die in Abbildung 5 dargestellten Ergebnisse. Hier sind die Unterschiede zwischen Messung und Simulation etwas größer, vor allem bei der Schallausbreitung mit freier Verbindungslinie zwischen Sender und Empfänger (A3-03). Der generelle Trend ist insgesamt aber noch immer abgebildet, wenngleich einige der laufzeitbedingten Auslöschungen, die in der Messung zu beobachten sind, in der Simulation nicht auftreten. Allerdings ist nicht zweifelsfrei zu bestimmen, ob hier nicht schon der Testaufbau verstärkt von den simulierten „idealen“ Bedingungen abweicht. Selbst unter bestens kontrollierten Bedingungen können im Aufbau und der Durchführung des praktischen Experiments große Unsicherheiten auftreten. Dies wurde bereits in der Veröffentlichung zur Validierung der Berechnungsmethode diskutiert (vgl. Lokki u.a. 2008, S. 831), soll aber nicht Gegenstand dieser Arbeit sein. In jedem Fall kommt dieses Szenario mit Quelle und Empfänger knapp oberhalb eines Hindernisses mit Doppelkante (RS6, A3-03) im Rahmen der Untersuchung der Büroflächen ohnehin nicht vor und spielt damit nur eine untergeordnete Rolle.

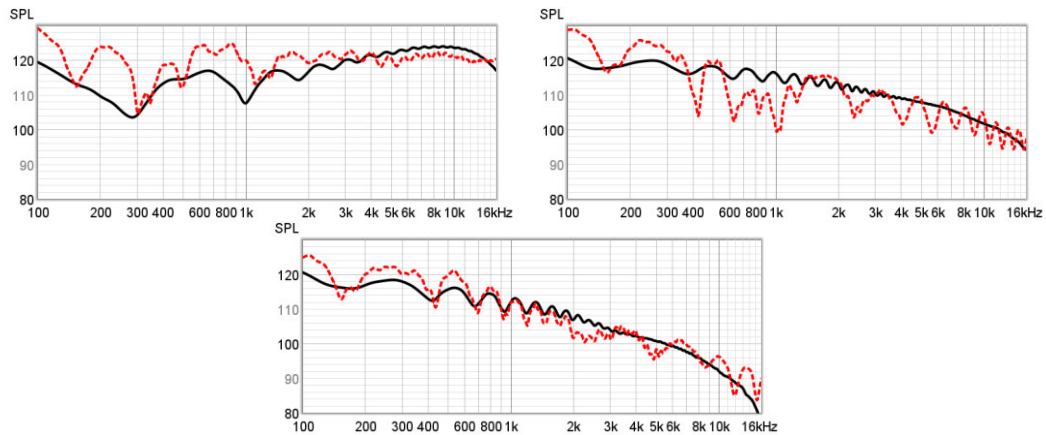


Abbildung 5: RS6, Frequenzgänge von Sender- und Empfängerkombinationen aus Simulation (schwarze geschlossene Linie) und Referenzmessung (rote, gestrichelte Linie), Glättung 1/24-Oktave, Kombinationen v.l.o.n.u.: A3-03 / A2-02 / A1-01

Bei Szenario RS6 war bzgl. der Beugung zusätzlich noch die Beugung zweiter Ordnung (von Kante zu Kante, „dd“) aktiviert, da es sonst im abgeschatteten Bereich (A1-01) erwartungsgemäß zur vollständigen Abschattung ohne jegliche Beugungsanteile kommt, also faktisch kein auswertbares Signal ankommt. Das bestätigt insofern die Notwendigkeit, die Simulationseinstellungen auf die Art und Weise der Modellierung anzupassen. Entweder sind also Doppelkanten an relevanten, abschirmenden Objekten zu vermeiden (Schallschirme z.B. als zweidimensionale Flächen) oder es ist zwingend mit der Beugungseinstellung „dd“ zu rechnen, es sei denn, das Schallfeld wird anderweitig von Diffusschall aus dem Raum dominiert.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die in CATT-Acoustic implementierte Methode zur Berechnung der Beugung zufriedenstellende Ergebnisse liefert und die Untersuchung auf dieser Grundlage erfolgen kann.

4.2 Unsicherheiten der raumakustischen Simulation

Die Unsicherheit von Simulationsmethoden der Raumakustik teilen sich grundlegend in zwei Bereiche auf. Der erste Bereich sind die systematischen Unsicherheiten der verwendeten Methodik, also namentlich die Ungenauigkeiten der Eingabedaten. Den zweiten Bereich bilden die stochastischen Unsicherheiten, also die Varianzen in den verwendeten Rechenverfahren selbst, sofern diese nicht vollständig auf deterministischen Verfahren basieren (vgl. Vorländer 2013, S. 1206, 1208).

Die systematischen Unsicherheiten betreffen bzgl. der raumakustischen Simulation i.W. die Abbildung der Geometrie (vor allem der Detailgrad) sowie Schallabsorptions- und Streugrad. Die Qualität dieser Daten kann nicht mittels rechnerisch aufwändigerer Simulationen oder einer „besseren“ Software ausgeglichen werden, sondern hier hat der

Anwender selbst mit seiner Erfahrung und Expertise den größten Einfluss (vgl. Vorländer 2020, S. 186).

Zur Beurteilung der Unsicherheiten von raumakustischen Simulationen hat sich die Betrachtung der sog. Unterscheidungsschwelle (JND – just noticeable difference) etabliert (vgl. Vorländer 2020, S. 96). Generell wird für Pegelgrößen eine Änderung von 1 dB als allgemein gültige JND angesehen (vgl. Zwicker 1982, S. 72). Für die Nachhallzeit wird die JND als eine Änderung von 5% (vgl. DIN EN ISO 3382-1, S. 16) angegeben. Änderungen unterhalb dieser Schwelle werden i.A. als nicht wahrnehmbar verstanden, folglich sind für Mess- und Prognoseverfahren Fehler in dieser Größenordnung noch vertretbar. Ziel wäre es für das Simulationsverfahren, dass die stochastischen Unsicherheiten unterhalb der jeweiligen JND liegen und damit der Einfluss der stochastischen Streuung des Rechenverfahrens keinen maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse mehr hat. Es bleibt dann lediglich die systematische Unsicherheit, für die gegenwärtig aber weder eine genormte Möglichkeit der Beurteilung noch ein Bewertungsmaßstab zur Verfügung steht. Der Unterschied zwischen Messungen und Simulationen wird bei sorgfältiger Ausführung aber im Bereich von 1 bis 2 JND vermutet (vgl. Vorländer 2020, S. 209). Systematische Unsicherheiten bei raumakustischer Simulation liegen vermutlich mehrheitlich oberhalb der JND, wenngleich sich eine deutliche Abhängigkeit vom betrachteten Frequenzbereich zeigt. Im Bereich von 500 bis 2000 Hz liegt die Abweichung unterhalb der JND, außerhalb dieses Frequenzbereiches sind hingegen systematische Abweichungen oberhalb der JND festzustellen (vgl. Brinkmann u.a. 2019, S. 2757). Letztere werden vor allem verursacht durch im Hallraum nach DIN EN ISO 354 gemessene Schallabsorptionsgrade, die sich nicht vollständig für die Implementierung in Verfahren der GA eignen sowie durch die notwendige Abschätzung von Streugraden, da diese nicht in breiter Menge zur Verfügung stehen (vgl. Vorländer 2013, S. 1212).

Die Minimierung der systematischen Unsicherheiten erfolgt in der vorliegenden Untersuchung, indem übliche und anerkannte Ansätze für Streugrad und Schallabsorptionsgrad getroffen werden und die geometrische Konstruktion der Modelle die Eigenschaften des verwendeten Berechnungsverfahrens berücksichtigen (vgl. auch vorangegangenes Kapitel). Kern der Untersuchung sind qualitative Aussagen im Rahmen des Planungsprozesses und einer etwaigen Zertifizierung. Das dafür anerkannte Instrument der akustischen Planung ist die raumakustische Simulation. Inwieweit die Zielwerte dann auch in der Praxis umgesetzt sind, ist eine Fragestellung die nicht im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchen ist. Daher wird nachfolgend lediglich eine Einschätzung zu den stochastischen Unsicherheiten getroffen.

Da für die vorliegende Arbeit eine relativ hohe Zahl an Simulationen erfolgen soll, ist es kritisch die Berechnungszeit möglichst zu optimieren. Der größte (zeitliche) Rechen-

aufwand entsteht neben der Notwendigkeit einer ausreichenden Strahlendichte durch die deterministischen Anteile der Berechnung („ray split-up“), wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert. Der zeiteffektivere Algorithmus 1 berechnet die späten Anteile im Echogramm i.W. stochastisch. Dadurch entsteht aber eine gewisse Streuung von Rechengang zu Rechengang. Diesen Umstand über eine Mehrfachberechnung und Mittelung der Daten auszugleichen, würde den zeitlichen Vorteil wieder negieren. Daher wird auch untersucht, wie groß die Streuung zum einen zwischen den Rechendurchgängen des Algorithmus 1 und zum anderen im Vergleich zur Berechnung mit Algorithmus 2 ausfällt und ob die beobachteten Streuungen vertretbar sind.

Stochastische Unsicherheit: Algorithmus 1

Aus der Untersuchung zu den Unsicherheiten sollen die erforderlichen Einstellungen für die Simulation abgeleitet werden. Daher wird an dieser Stelle etwas vorgegriffen und für eine der untersuchten Büroflächen (Geometrie 030) bereits eine Auswertung vorgenommen. Eine detaillierte Erläuterung zu Berechnungseinstellungen, verwendeten Modellen und der Art und Weise der Auswertung folgt in späteren Kapiteln. Die Geometrie 030 wurde ausgewählt, da diese vollständige Abschirmung und hohe Absorption aufweist und damit hinsichtlich der Berechnung am kritischsten ist.

Das Modell wurde mit den gleichen Software-Einstellungen mittels zehn separater Durchläufe berechnet und ausgewertet. Die Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter sind für die jeweiligen Messpfade in Tabelle 2 dargestellt.

| Messpfad | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | |
|----------------------------------|--|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB |
| Alg. 1: Run 1 | 46,6 | 10,1 | 52,4 | 5,3 | 47,8 | 9,3 | 44,8 | 10,8 | 46,5 | 5,3 | 45,3 | 10,9 |
| Alg. 1: Run 2 | 46,7 | 10,2 | 52,3 | 5,2 | 47,7 | 9,2 | 44,8 | 10,8 | 46,7 | 5,5 | 45,1 | 10,7 |
| Alg. 1: Run 3 | 46,8 | 10,4 | 52,5 | 5,3 | 47,7 | 9,4 | 44,8 | 10,3 | 46,5 | 5,4 | 45,0 | 10,7 |
| Alg. 1: Run 4 | 46,8 | 10,3 | 52,4 | 5,3 | 47,6 | 9,3 | 44,9 | 10,6 | 46,7 | 5,5 | 45,1 | 11,0 |
| Alg. 1: Run 5 | 46,8 | 10,3 | 52,3 | 5,2 | 47,9 | 9,1 | 44,9 | 10,8 | 46,5 | 5,4 | 45,1 | 10,9 |
| Alg. 1: Run 6 | 46,8 | 10,2 | 52,4 | 5,3 | 47,7 | 9,2 | 44,8 | 10,3 | 46,4 | 5,4 | 45,1 | 10,9 |
| Alg. 1: Run 7 | 46,8 | 10,4 | 52,5 | 5,4 | 47,7 | 9,5 | 44,9 | 10,5 | 46,3 | 5,4 | 45,1 | 10,9 |
| Alg. 1: Run 8 | 46,7 | 10,1 | 52,5 | 5,4 | 47,8 | 9,5 | 44,9 | 10,7 | 46,6 | 5,4 | 45,0 | 10,9 |
| Alg. 1: Run 9 | 46,9 | 10,3 | 52,4 | 5,2 | 47,7 | 9,4 | 44,8 | 10,5 | 46,4 | 5,5 | 45,1 | 10,6 |
| Alg. 1: Run 10 | 46,9 | 10,4 | 52,3 | 5,3 | 47,6 | 9,4 | 45,1 | 10,6 | 46,6 | 5,6 | 45,0 | 10,9 |
| Standardabweichung σ [dB] | 0,09 | 0,11 | 0,08 | 0,07 | 0,09 | 0,13 | 0,09 | 0,18 | 0,12 | 0,08 | 0,08 | 0,12 |
| Spannweite R [dB] | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,4 |
| L _{pAS4m} | A-bewerteter Schalldruckpegel der Sprache in einem Abstand von 4 m [dB(A)] | | | | | | | | | | | |
| D _{2S} | räumliche Abklingrate der Sprache [dB] | | | | | | | | | | | |

Tabelle 2: Vergleich der Schallausbreitungsparameter über zehn Rechengänge mit Algorithmus 1 am Beispiel von Geometrie 030

Die Ergebnisse aus zehn Rechendurchläufen lagen um bis zu 0,5 dB auseinander. Die Streuung liegt aber noch unter 0,2 dB, d.h. die ermittelten Werte aus der Simulation mit Algorithmus 1 liegen im Mittel max. 0,18 dB über oder unter dem „wahren“ Wert, im Vergleich zu einer vollständig deterministischen Berechnung und damit auch deutlich

unter der JND von 1 dB. Die Schallausbreitungsparameter erscheinen relativ robust gegenüber den Variationen der Rechendurchgänge. Ursache ist vermutlich, dass die Schalldruckpegel vor allem durch Ereignisse früh im Echogramm bestimmt werden, z.B. durch Direktschall, Reflexionen niedriger Ordnung und Beugungsanteile. Diese Komponenten werden sowohl von Algorithmus 1 und 2 deterministisch behandelt und weisen daher keine Streuung auf. Die geringen beobachteten Streuungen entstehen durch Schallanteile später Reflexionen, die wiederum mehr stochastischen Berechnungsmethoden unterliegen.

Für die Nachhallzeit ergeben sich die in Tabelle 3 aufgeführten Ergebnisse. Dabei sind die oktavweise gemittelten Nachhallzeiten aus dem jeweiligen Durchgang angegeben. Es handelt sich jeweils um das arithmetische Mittel der Kombinationen aus zwei Quellpositionen zu je 6 Empfangspositionen im Raum verteilt. Auf die Wahl der Sende- und Empfangspositionen für die Auswertung der Nachhallzeit wird im Detail in späteren Kapiteln eingegangen.

| Oktavmittelfrequenz f [Hz] | gemittelte Nachhallzeit T_{20} [s] | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Alg. 1: Run 1 | 0,56 | 0,39 | 0,28 | 0,24 | 0,22 | 0,18 |
| Alg. 1: Run 2 | 0,56 | 0,39 | 0,27 | 0,25 | 0,23 | 0,19 |
| Alg. 1: Run 3 | 0,56 | 0,39 | 0,28 | 0,23 | 0,22 | 0,19 |
| Alg. 1: Run 4 | 0,56 | 0,39 | 0,28 | 0,25 | 0,22 | 0,18 |
| Alg. 1: Run 5 | 0,56 | 0,39 | 0,29 | 0,25 | 0,20 | 0,19 |
| Alg. 1: Run 6 | 0,56 | 0,39 | 0,28 | 0,25 | 0,24 | 0,19 |
| Alg. 1: Run 7 | 0,56 | 0,39 | 0,28 | 0,27 | 0,23 | 0,19 |
| Alg. 1: Run 8 | 0,56 | 0,39 | 0,28 | 0,24 | 0,22 | 0,19 |
| Alg. 1: Run 9 | 0,56 | 0,39 | 0,28 | 0,24 | 0,23 | 0,19 |
| Alg. 1: Run 10 | 0,56 | 0,39 | 0,28 | 0,23 | 0,23 | 0,20 |
| arithmetisches Mittel m [s] | 0,56 | 0,39 | 0,28 | 0,25 | 0,22 | 0,19 |
| Standardabweichung σ [s] | 0,002 | 0,003 | 0,006 | 0,011 | 0,01 | 0,006 |
| rel. Standardabw. σ_{rel} [%] | 0,32 | 0,79 | 2,00 | 4,50 | 4,41 | 3,37 |
| Spannweite R [s] | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,02 |

Tabelle 3: Vergleich der gemittelten Nachhallzeit T_{20} über zehn Rechendurchgänge mit Algorithmus 1 am Beispiel von Geometrie 030

Gemäß der Ergebnisse kann erwartet werden, dass die Nachhallzeit im Mittel um bis zu 0,011 s abweicht, was einer relativen Abweichung von 4,5 % entspricht. Damit liegt die Unsicherheit noch unterhalb der JND von 5% für die Wahrnehmbarkeit von Änderungen in der Nachhallzeit.

Im Ergebnis sind sowohl bei den Parametern der Schallausbreitung als auch bei der Nachhallzeit nur moderate Streuungen unterhalb der JND mit den verwendeten Einstellungen zu erwarten. Die Auswirkung der stochastischen Unsicherheit resultierend aus der Varianz der Rechengänge kann als hinreichend klein eingestuft werden.

Stochastische Unsicherheit von Algorithmus 1 zu Algorithmus 2

Zur Einschätzung wie stark die Ergebnisse der Berechnung mit Algorithmus 1 gegenüber dem deutlich rechenintensiveren Algorithmus 2 streuen, wurde die bereits zuvor erwähnte beispielhafte Geometrie auch einmal mittels Algorithmus 2 berechnet. Dieser rechnet zu einem deutlich größeren Anteil deterministisch, die Streuung von Rechengang zu Rechengang ist demnach bedeutend geringer. Eine Berechnung mit Algorithmus 2 kann daher als Referenz für den „wahren“ Wert, zumindest im Sinne der Simulation, dienen.

In Tabelle 4 und Tabelle 5 ist für jeden Rechengang mit Algorithmus 1 der Betrag der Differenz zum Referenz-Rechengang mit Algorithmus 2 dargestellt. Das zeigt, in welchem Maß die Rechengänge jeweils von der Referenz abweichen und mit welcher mittleren Abweichung zu rechnen ist.

| Messpfad | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | |
|----------------------------------|--|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
| | L_{pAS4m} | D_{2S} | L_{pAS4m} | D_{2S} | L_{pAS4m} | D_{2S} | L_{pAS4m} | D_{2S} | L_{pAS4m} | D_{2S} | L_{pAS4m} | D_{2S} |
| | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB |
| Alg. 2: Run 1 (Referenz) | 46,6 | 10,4 | 52,3 | 5,4 | 47,9 | 9,6 | 45,1 | 10,9 | 46,4 | 5,2 | 45,2 | 10,9 |
| | Beträge der Differenzen von L_{pAS4m} bzw. D_{2S} [dB] | | | | | | | | | | | |
| Alg. 1: Run 1 - Alg. 2: Run 1 | 0,0 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 |
| Alg. 1: Run 2 - Alg. 2: Run 1 | 0,1 | 0,2 | 0,0 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,3 | 0,1 | 0,3 | 0,3 | 0,1 | 0,2 |
| Alg. 1: Run 3 - Alg. 2: Run 1 | 0,2 | 0,0 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,6 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Alg. 1: Run 4 - Alg. 2: Run 1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,1 | 0,1 |
| Alg. 1: Run 5 - Alg. 2: Run 1 | 0,2 | 0,1 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 0,5 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,0 |
| Alg. 1: Run 6 - Alg. 2: Run 1 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,3 | 0,6 | 0,0 | 0,2 | 0,1 | 0,0 |
| Alg. 1: Run 7 - Alg. 2: Run 1 | 0,2 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,0 |
| Alg. 1: Run 8 - Alg. 2: Run 1 | 0,1 | 0,3 | 0,2 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,0 |
| Alg. 1: Run 9 - Alg. 2: Run 1 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,0 | 0,3 | 0,1 | 0,3 |
| Alg. 1: Run 10 - Alg. 2: Run 1 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,3 | 0,2 | 0,0 | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 0,2 | 0,0 |
| Standardabweichung σ [dB] | 0,09 | 0,11 | 0,08 | 0,07 | 0,09 | 0,13 | 0,09 | 0,18 | 0,10 | 0,08 | 0,05 | 0,11 |
| Spannweite R [dB] | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,3 | 0,6 | 0,3 | 0,4 | 0,2 | 0,3 |
| L_{pAS4m} | A-bewerteter Schalldruckpegel der Sprache in einem Abstand von 4 m [dB(A)] | | | | | | | | | | | |
| D_{2S} | räumliche Abklingrate der Sprache [dB] | | | | | | | | | | | |

Tabelle 4: Vergleich der Schallausbreitungsparameter über die Differenzen der Rechengänge aus Alg. 1 und Alg. 2 am Beispiel von Geometrie 030

Für die Schallausbreitungsparameter ergibt sich eine mittlere Abweichung von bis zu 0,18 dB, welche damit erneut unterhalb der JND liegt.

| Oktavmittenfrequenz f [Hz] | gemittelte Nachhallzeit T_{20} [s] | | | | | |
|--|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Alg. 2: Run 1 | 0,56 | 0,38 | 0,27 | 0,24 | 0,24 | 0,19 |
| | Beträge der Differenzen der gemittelte Nachhallzeit T_{20} [10^{-3} s] | | | | | |
| Alg. 1: Run 1 - Alg. 2: Run 1 | 1,67 | 12,50 | 7,50 | 0,83 | 22,50 | 13,33 |
| Alg. 1: Run 2 - Alg. 2: Run 1 | 1,67 | 6,67 | 1,67 | 4,17 | 5,00 | 4,17 |
| Alg. 1: Run 3 - Alg. 2: Run 1 | 0,83 | 10,83 | 6,67 | 10,00 | 18,33 | 8,33 |
| Alg. 1: Run 4 - Alg. 2: Run 1 | 3,33 | 5,00 | 6,67 | 6,67 | 21,67 | 16,67 |
| Alg. 1: Run 5 - Alg. 2: Run 1 | 1,67 | 5,83 | 19,17 | 4,17 | 38,33 | 4,17 |
| Alg. 1: Run 6 - Alg. 2: Run 1 | 4,17 | 12,50 | 13,33 | 5,00 | 0,83 | 4,17 |
| Alg. 1: Run 7 - Alg. 2: Run 1 | 3,33 | 12,50 | 15,00 | 31,67 | 12,50 | 8,33 |
| Alg. 1: Run 8 - Alg. 2: Run 1 | 0,83 | 8,33 | 7,50 | 0,83 | 16,67 | 0,83 |
| Alg. 1: Run 9 - Alg. 2: Run 1 | 0,00 | 8,33 | 9,17 | 1,67 | 12,50 | 6,67 |
| Alg. 1: Run 10 - Alg. 2: Run 1 | 1,67 | 4,17 | 14,17 | 10,00 | 13,33 | 7,50 |
| Standardabweichung σ [10^{-3} s] | 1,24 | 3,08 | 4,92 | 8,65 | 9,81 | 4,45 |
| rel. Standardabw. σ_{rel} [%] | 0,22 | 0,81 | 1,83 | 3,57 | 4,11 | 2,30 |

Tabelle 5: Vergleich der gemittelten Nachhallzeit T_{20} über die Differenzen der Rechengänge aus Alg. 1 und Alg. 2 am Beispiel von Geometrie 030

Beim Vergleich der gemittelten Nachhallzeiten gegenüber der Referenz zeigt sich maximal eine mittlere Abweichung von knapp unter 0,01 s. Die zugehörige relative Standardabweichung von 4,11 % ist dabei bezogen auf die mittleren Nachhallzeiten berechnet mit Algorithmus 2.

Abschließend kann gesagt werden, dass Software-Einstellungen gefunden wurden, mit denen die stochastische Unsicherheit des Rechenverfahrens unterhalb der üblicherweise zur Beurteilung herangezogenen JND liegt und damit ausreichend niedrig ausfällt um keinen signifikanten Auswirkungen auf die Ergebnisse zu haben.

5 Modellierung und Simulation

Wie aus den vorangegangenen Kapiteln ersichtlich, weist die geometrische Modellierung für die Nutzung mit GA einige Besonderheiten auf, damit die tatsächlichen akustischen Effekte auch korrekt abgebildet werden. Zudem sind für die Auswahl geeigneter Büroflächen auch die technischen und organisatorische Parameter, hinsichtlich des Arbeitsrechts zu beachten.

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Auswirkungen der Simulation mit GA auf die Gestaltung der 3D-Modelle und stellt die für die Untersuchung ausgesuchten Bürolayouts vor, unter Berücksichtigung der Anforderungen aus dem Arbeitsrecht.

5.1 Modellierung für Simulation mit GA

Damit eine Simulation hinreichend gute Ergebnisse liefern kann, muss der zu untersuchende Raum in einer der Berechnung angepassten Form modelliert sein. Einige Merkmale die ein Modell für die GA aufweisen muss sind:

- möglichst geringe Elementzahl um Berechnungszeit gering zu halten
- gesamtes Modell muss aus Polygonen bestehen (geometrische Objekte höherer Ordnung müssen aus Polygonen modelliert werden)
- keine Verschneidung von Polygonen, keine Öffnungen innerhalb von Flächen

Damit weisen Modelle für GA meist eine deutlich einfachere Geometrie und wesentlich weniger Details auf als beispielsweise ein typisches architektonisches Modell. Letztere enthalten abhängig vom Planungsfortschritt z.T. einen hohen Detailgrad und mehrschichtige Bauteilaufbauten und sind damit für die raumakustische Simulation i.d.R. nicht geeignet (vgl. Vorländer 2020, S. 172f).

Damit einige akustische Wirkmechanismen bzw. bestimmte Problemstellungen durch die Berechnung korrekt abgebildet werden, sind gewisse Vorgaben bei der Modellierung zu beachten, die im Weiteren erläutert werden.

Streuung

Inwiefern eine Oberfläche bzw. Struktur auftreffenden Schall streut, statt ihn geometrisch zu reflektieren hängt vom Verhältnis der Abmessungen der Struktur und der betrachteten Wellenlänge ab. Für die Modellierung stellt sich die Frage, welcher Detailgrad für ein hinreichend genaues Ergebnis notwendig ist. Bei der GA wird Streuung grundlegend über den Streugrad bestimmt. Eine Modellierung geometrischer De-

tails um Streuung über das in CATT-Acoustic implementierte Beugungs-Modell zu erzeugen ist nicht sinnvoll, da dafür höhere Ordnungen von Beugung notwendig wären als tatsächlich berechnet werden (vgl. Dalenbäck 2016, S. 22f).

Als Daumenregel für die Modellierung gilt: Strukturen mit Abmessungen über 0,5 m (entspricht einer Frequenz von ca. 700 Hz) sollten als glatte, reflektierende Flächen modelliert werden, kleinere Strukturen entweder mit entsprechendem Streugrad oder als tatsächliche geometrische Objekte (vgl. Vorländer 2020, S. 173).

Die geometrische Modellierung von Details funktioniert aber nur für hohe Frequenzen, zusammen mit der Option „auto-edge scattering“, die dann geometrische Reflexionen bei (zu) tiefen Frequenzen verhindert. Diese erzeugt dann aber auch nicht den zu erwartenden Anteil an diffusen nachfolgenden Reflexionen, wie auch der Vergleich mit Messungen zeigt (vgl. Dalenbäck 2010, S. 2f). Daher ist grundsätzlich der Weg über den Streugrad zu gehen. Die Ansätze dafür werden ebenfalls in diesem Kapitel erläutert.

Bei großen Flächen mit kleineren Strukturen darauf wird bei aktiviertem „auto-edge scattering“ eine eigentlich nicht vorhandene Streuung bei tiefen Frequenzen verursacht, daher sollte in diesem Fall keine Modellierung der Details erfolgen. Der Gesamtfläche wird stattdessen ein adäquater Streugrad bei höheren Frequenzen gegeben, um die real vorhandenen Details abzubilden (vgl. Dalenbäck 2021, S. 4).

Beugung

Objekte im Raum, die deutlich kleiner als die betrachtete Wellenlänge sind, sollten auf die Schallausbreitung bei entsprechend tiefen Frequenzen keine Auswirkungen haben. Ist für solche Elemente „auto-edge scattering“ aktiviert, wird zumindest keine geometrische Reflexion erzeugt, sondern die Schallenergie diffus gestreut (vgl. CATT-A 2022, S. 128). Die Berücksichtigung der Beugung hinter das Objekt erfolgt erst, wenn die entsprechende Option bei der Simulation mit angewählt wurde. Das ist vor allem relevant, wenn Hindernisse im betrachteten Schallausbreitungsweg vorhanden sind, im Besonderen auch für die vorliegende Untersuchung.

Aus den Vergleichs-Simulationen mit den BRAS-Daten zeigt sich, dass die Trennwände zwischen Arbeitsplätzen als 2D-Elemente implementiert werden können. Es ergibt sich eine hinreichende Übereinstimmung mit den gemessenen Daten. Demnach wäre es nicht erforderlich, Beugung 2. Ordnung („dd“) zu rechnen. Allerdings kommen entlang der Messpfade auch Situationen vor, bei denen mehr als ein Trenner zwischen Quelle und Empfänger liegen. In diesem Fall bekommt die Beugung 2. Ordnung eine größere Bedeutung und muss in die Berechnung eingeschlossen werden.

Schallabsorption

Schallabsorbierende Flächen werden für die GA mit dem üblicherweise im Hallraum ermittelten oktavenweisen Schallabsorptionsgraden (nach DIN EN ISO 354) implementiert. Es wird dabei geometrisch lediglich die repräsentative, absorbierende Fläche angelegt und nicht der tatsächliche Aufbau des jeweiligen Absorbers. Bei flächigen Wandabsorbern oder Akustikdecken entspricht die Fläche im Modell i.W. der realen Fläche. Beispielsweise bei Baffeln (vertikal von der Decke abgehängte Platten) oder Vorhängen mit Wandabstand, wird im Modell die gesamte Fläche, über welche sich die Absorberanordnung erstreckt, als absorbierend angelegt. Diese Fläche erhält dann die für die jeweilige Anordnung des Absorbers ermittelten Schallabsorptionsgrade (vgl. Dalenbäck 2021, S. 5).

Bei Einzelelementen (z.B. Möbel, Deckensegel) bestehen z.T. deutliche Unterschiede in der Ermittlung der Schallabsorptionsgrade, je nachdem welche Fläche für die Umrechnung der äquivalenten Absorptionsfläche zugrunde gelegt wurde. Idealerweise ist der Ansatz dokumentiert und ermöglicht dann eine entsprechende Umsetzung im Modell (vgl. Probst 2015, S. 1365f). Wird die äquivalente Absorptionsfläche angegeben, kann diese z.B. direkt auf die Fläche des Absorbers im Modell umgerechnet werden. Auf diese Weise ist die vollständige „akustische Wirkung“ des Absorbers ins Modell integriert (Nocke 2017, S. 201).

Die nach DIN EN ISO 354 im Hallraum ermittelten Schallabsorptionsgrade gelten für diffusen Schalleinfall und sind damit abhängig von Geometrie und Verteilung der Absorption nicht in jedem Raum gültig. Zum Teil ist ein winkelabhängiger Schallabsorptionsgrad zwar bereits in CATT-Acoustic implementiert, da aber kaum die notwendigen Eingangsdaten verfügbar sind, handelt es sich bisher nur um eine experimentelle Funktion (vgl. Dalenbäck 2021, S. 5), welche für die vorliegende Arbeit nicht verwendet wird.

5.2 Anforderungen an Büroflächen

Aus Gründen des Brand- und Gesundheitsschutzes sowie des Arbeitsrechts sind für Büroflächen gewisse Mindestmaße für Arbeitsplätze, Verkehrs- und Fluchtwege einzuhalten. Die nachfolgenden Angaben orientieren sich an den allgemein üblichen bzw. gesetzlich geforderten Vorgaben. Zum Teil können im Landesbaurecht abweichende Bestimmungen vorhanden sein. Prinzipiell werden die Anforderungen in den „Technischen Richtlinie für Arbeitsstätten“ (kurz: ASR) aufgeführt.

Für einen Arbeitsplatz im Großraumbüro (gemäß ASR also eine Grundfläche von > 400 m²) sind als Richtwert 12 – 15 m² anzusetzen, dabei hat die Bewegungsfläche an

einem einzelnen Büroarbeitsplatz (sitzend oder stehend) mindestens 1,50 m² sowie Breite und Tiefe je mind. 1 m zu betragen. Bei nebeneinander angeordneten Arbeitsplätzen muss die Breite hingegen mind. 1,20 m aufweisen. Dabei dürfen Bewegungsflächen unterschiedlicher Arbeitsplätze sich nicht überlappen, bei Möbeln muss die jeweilige Funktionsfläche (also z.B. der Bereich der zum Öffnen einer Schranktür benötigt wird) zusätzlich berücksichtigt werden (vgl. ASR A1.2, S. 7ff). Die Funktionsflächen fremder Arbeitsplätze oder allgemeine Funktionsflächen, die nicht dem jeweiligen Arbeitsplatz zugeordnet sind, dürfen nicht in die Bewegungsfläche reichen (vgl. DGUV 2016, S. 16).

Die zulässige Verkehrswegbreite ist abhängig vom potenziellen Einzugsgebiet und der damit verbundenen Personenzahl. Bis 200 Personen wären dabei durch eine Verkehrswegbreite von 1,20 m abgedeckt. Die lichte Höhe über Verkehrswegen soll mind. 2,10 m betragen (vgl. ASR A1.8, S. 7f). Dies gilt auch für den Fall, dass es sich bei dem Verkehrsweg zusätzlich um einen Hauptfluchtweg handelt (vgl. ASR A2.3, S. 9). Dienen Verkehrswege dem Zugang zu einem zugewiesenen Arbeitsplatz muss ein Weg (außerhalb angrenzender Bewegungsflächen) von mind. 0,60 m Breite vorgehalten werden (vgl. ASR A1.8, S. 7f).

Die notwendige lichte Höhe in Arbeitsräumen muss mindestens 2,50 m betragen und ist darüber hinaus von der Grundfläche des jeweiligen Arbeitsraumes abhängig. Damit ist bei mehr als 50 m² Grundfläche eine lichte Höhe von 2,75 m, bzw. bei mehr als 100 m² eine lichte Höhe von 3,00 m umzusetzen. Von diesen Festlegungen sind gewisse Abweichungen möglich, für die vorliegende Untersuchung soll aber von üblichen Mindestmaßen ausgegangen werden (vgl. ASR A1.2, S. 12).

Bei der Erstellung der Bürolayouts wurden die o.g. Vorgaben berücksichtigt, da diese in der Realität nicht unterschritten werden dürfen und aus akustischer Sicht in der Tendenz den ungünstigeren Fall abbilden, da vielfach z.B. noch leicht größere Abstände vorgehalten werden. Ausnahme bildet lediglich die notwendige Grundfläche pro Arbeitsplatz. Diese wurde in den Modellen zumeist unterschritten, da lediglich Büroflächen Bestandteil der Untersuchung sind. Nebenflächen, welche die Struktur des gesamten Büros auflockern und zur Einhaltung der notwendigen Mindestfläche pro Arbeitsplatz führen, können beliebig ergänzt werden. Dies würde aber die akustische Einstufung der Bürofläche nur unwesentlich verändern.

5.3 Untersuchte Bürolayouts

Die simulierten Büroflächen sind alle dem „Multi-Space“ bzw. „Open-Space“ zuzuordnen. Diese sind zum einen die aktuell weit verbreitetste Form unter den Großraum-Büroflächen und zudem für den Gewerbebau, vor allem bei unbekanntem Nutzer bzw.

noch offenem Mieterausbau der Standardfall. Es wird hauptsächlich der Mehrpersonenbüro-Bereich eines einzelnen Clusters untersucht, da die Cluster wiederum durch andere Nutzungen getrennt werden.

Büroformen mit relativ kleinen zusammenhängenden Büroflächen, wie z.B. das noch verbreitete Zellenbüro, werden nicht untersucht. Hier sind die Bedingungen gemäß VDI 2569 für Mehrpersonenbüros (größter Abstand zw. AP über 8 m) nicht gegeben und auch kein Nachweis für die DGNB-Zertifizierung nach VDI 2569 verlangt.

Würde man eine konkrete Planung zugrunde legen ergäben sich z.T. wieder besondere oder generell vom „Normal“ abweichende Grundrissituationen, welche dann eine allgemeine Aussage erschweren würden. Daher wurden eigene Layouts entworfen, die sich aber sehr stark an üblichen Planungen orientieren. Es wurden Planungen aus realen Bauvorhaben ausgewertet und eine durchschnittliche Möblierung abgeleitet. Die Vergleichs-Planungen können aus rechtlichen Gründen im Rahmen dieser Arbeit nicht dokumentiert werden, dienten aber ohnehin nur einem prinzipiellen Abgleich.

5.4 Untersuchte Geometrien und Varianten

Ganz grundlegend wurden sechs unterschiedliche Geometrien untersucht, an denen dann verschiedene Parameter variiert wurden. Ein Überblick über alle Modelle (als Beispiel mit Trennern) ist Abbildung 6 zu entnehmen. Für die Auswertung wurden diese Modelle in „kleine Geometrien“ und „große Geometrien“ unterteilt, da sich zwischen diesen grundlegend unterschiedliche Messpfade ergeben. Als „kleine Geometrien“ werden die Modelle 001 und 010 eingestuft, bei diesen sind Messpfade nur in diagonal oder entlang der langen Seite des Modells möglich. Die übrigen Modelle werden als „große Geometrien“ bezeichnet, hier sind Messpfade sowohl diagonal, horizontal, als auch vertikal möglich.

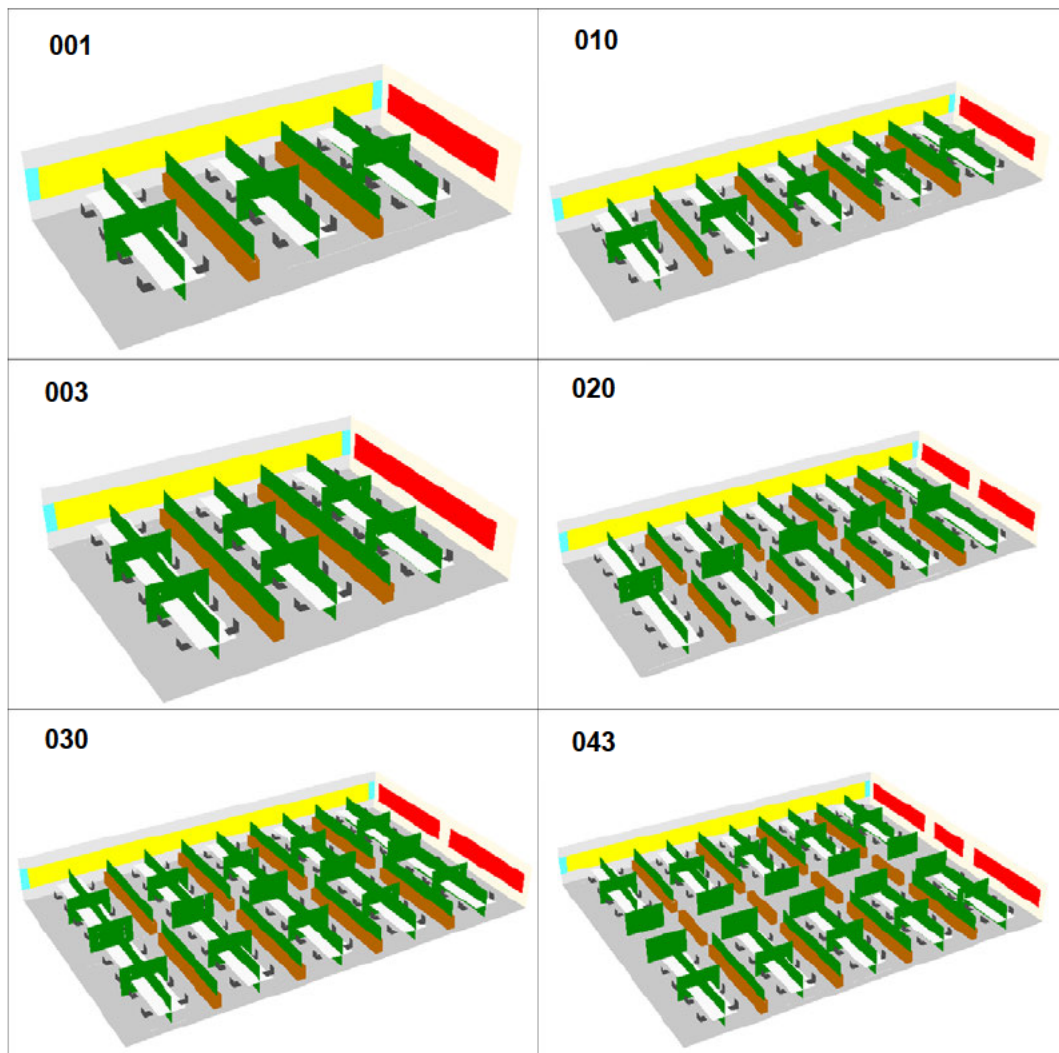


Abbildung 6: untersuchte Geometrien: „kleine“ Geometrien (001, 010), „große“ Geometrien (003, 020, 030, 043)

Es handelt sich bei Modell 001 um die kleinste Bürofläche, die im Sinne der VDI 2569 noch als großes Mehrpersonenbüro mit Schallausbreitungsparametern auszuwerten wäre. Bei einer Arbeitsplatzgruppe weniger, wären die zur Bildung der Messpfade notwendigen fünf Arbeitsplätze (Quelle + vier Messpunkte) in einer Linie nicht mehr vorhanden. Das Modell besteht aus sechs Arbeitsplatzgruppen zu je vier Arbeitsplätzen. Die Gruppen werden in Längsrichtung durch Schränke (braun) sowie durch die vorgehaltenen Trennerpositionen (grün) separiert. Auf einer Längsseite ist eine Fensterfront (gelbe Fläche, Kennzeichnung für Vorhang) und auf der gegenüberliegenden Seite anschließend an einen Erschließungsflur die Flurwand angeordnet. An den Stirnseiten, sowie an der Flurwand befinden sich Flächen zur Vorhaltung von Wandabsorbern (rot).

Modell 010 weist die gleiche Konfiguration auf, ist aber in Längsrichtung von größerer Ausdehnung, sodass insgesamt zehn Arbeitsplatzgruppen Platz finden. Bei Modell 003 ist hingegen die Ausdehnung entlang der kurzen Seite um eine Arbeitsplatzgruppe erhöht.

Die Modelle 020 und 030 verfügen jeweils über einen Mittelgang zur Erschließung. Es ist eine Arbeitsplatzgruppe aus sechs Arbeitsplätzen (020) bzw. je zwei Gruppen aus vier Arbeitsplätzen (030) links und rechts des Erschließungsflurs angeordnet. Bei Modell 043 kommt zusätzlich eine Mittelzone ohne Arbeitsplätze (links und rechts gesäumt von einem Erschließungsgang) hinzu. In den Modellen 020, 030 und 043 sind Plätze für Wandabsorber nur auf den Stirnseiten vorhanden, da bei der Raumtiefe davon auszugehen ist, dass auf beiden Längsseiten Fenster angeordnet sind.

Die unterschiedlichen Variationen der grundlegenden Geometrien werden im Rahmen der Auswertung dargestellt. Einige Konzepte wurden nicht weiter untersucht, da diese keine oder nicht ausreichend verschiedene zulässige Messpfade ermöglichen, selbst bei großzügiger Auslegung der Vorschriften zur Messpfadbildung. Das betrifft vor allem Flächen mit großen Abständen zwischen den Arbeitsplatzgruppen.

Anfängliche Testrechnungen zeigten auch, dass die Schallausbreitungsparameter kaum von der Größe des untersuchten Büros abhängen, solange Messpfade mit voller Länge gebildet werden können. Größere Flächen haben dann kaum einen Einfluss, da die weit entfernten Arbeitsplätze nicht mehr in die Auswertung einfließen. Sehr wohl ergibt sich aber eine Rückwirkung auf die Nachhallzeit, da diese u.a. eben auch vom Raumvolumen abhängt. Daher wurde außer bei explizit kleinen Büroräumen die Länge des Bürobereiches immer so gewählt, dass mind. eine AP-Gruppe außerhalb des 16 m -Radius liegen kann. Obwohl die Nachhallzeit nur im Nahbereich (Radius von 8 m) ausgewertet wird, ist auf diese Art zumindest die akustischen Rückwirkungen aus den ferneren Raumabschnitten mit im Modell berücksichtigt.

Grundausrüstung und Modellierung der einzelnen Arbeitsplätze

Alle Modelle wurden modular aus den gleichen Elementen aufgebaut, sodass Variationen nach Möglichkeit nur für den jeweils untersuchten Parameter auftreten.

In allen Modellen ist immer eine akustisch wirksame, sprich schallabsorbierende, Decke vorhanden. Es wurden drei bauübliche Ausprägungen von Akustikdecken untersucht: die Rasterdecke (als Beispiel für eine flächige Decke mit hoher Absorption auf ca. 80% der Deckenfläche), die gelochte Gipskartondecke (als Beispiel für eine flächige Decke mit mittlerer Absorption auf ca. 80% der Deckenfläche) und absorbierende Deckensegel (als Beispiel für reduzierte akustisch wirksame Deckenfläche (ca. 50%)). Die lichte Raumhöhe beträgt in allen Modellen 3,00 m.

Schallabsorbierende Wandflächen sind immer auf einer Fläche von 0,80 m bis 2,20 m über Boden angeordnet. Das betrifft zum einen die Fensterflächen, die mit und ohne Lamellenvorhänge untersucht wurden, zum anderen die Wandflächen die schallhart

bzw. mit Wandabsorber angelegt sind. Als Bodenbelag wurde in allen Modellen ein Teppichboden (Nadelfilz) angesetzt.

Generell erfolgt die Auswertung nach VDI 2569 nur für sitzende Tätigkeiten, stehende Büro-Tätigkeiten sind nicht zu bewerten. Daher befindet sich die Anordnung der Arbeitsplätze auch auf einer Höhe für sitzende Tätigkeit. Ein Arbeitsplatz besteht aus einem Tisch, einem Stuhl (gepolstert) und einem Schrank im Rücken des Arbeitsplatzes. Hinzu kommen optionale, schallabsorbierende Trennwände. Die konkreten Abmessungen und Abstände der Elemente sind in Abbildung 7 dargestellt.

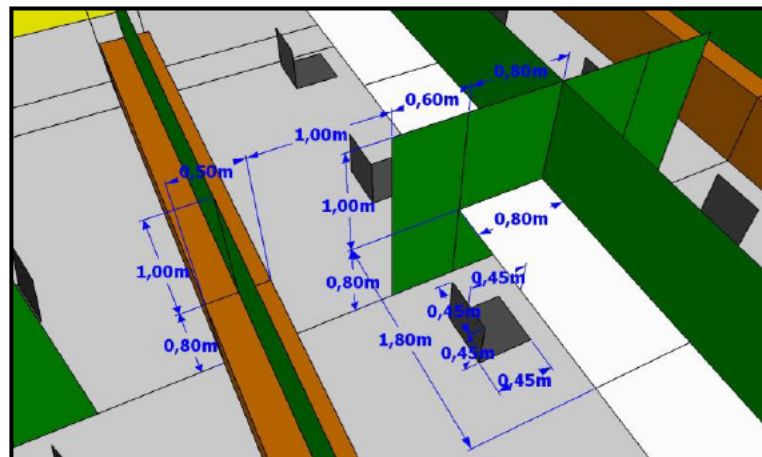


Abbildung 7: vermaßte Ansicht des 3D-Modells eines Arbeitsplatzes

Es wurden als abschirmende Elemente nur Raumtrenner verwendet. In realen Büros kommen noch andere größere Objekte wie Schränke, Besprechungs- oder Telefonkabinen vor, die ebenfalls abschirmend wirken. Als Maßnahme zur Minderung der Schallausbreitung haben solche Objekte aber eine vergleichbare Wirkung wie die untersuchten Raumtrenner. Auch für die Simulation macht es i.W. keinen Unterschied ob man zwei Trenner oder ein 3D-Objekt rechnet, beide Varianten sind mit Beugung an Doppelkanten zu rechnen.

Varierte Parameter

Für die Untersuchung wurden Trennerhöhen, Trenneranordnung, Wand- und Deckenabsorber sowie Abstände zwischen den Arbeitsplätzen variiert. Die einzelnen Variationen werden im Kapitel zur Auswertung der Ergebnisse im Detail beschrieben.

5.5 Eingangsdaten und Parameter

Es wurden für alle Modelle und alle Simulationen einheitliche Eingangsdaten sowie gleiche Parameter für die Berechnungseinstellungen verwendet um die Vergleichbar-

keit zu gewährleisten. Aus den Voruntersuchungen konnten die grundlegenden Berechnungsparameter festgelegt werden, welche in Tabelle 6 inklusive einer kurzen Erläuterung dargestellt sind.

| Parameter | Wert | Erläuterung |
|------------------------------------|---------------|---|
| Rechenalgorithmus | Alg. 1 | zeiteffizientester Algorithmus, ausreichende Übereinstimmung und ausreichend niedrige Varianz zu rechenintensiveren Algorithmen 2 und 3 |
| ray split-up | 1 | diffuse Schallanteile bis zur 1. Ordnung werden deterministisch berechnet, alle späteren mittels stochastischem Verfahren |
| Beugung | d, dS, Sd, dd | Beugung 1. und 2. Ordnung, Beugung von Reflexionen und Beugung zu Reflexionen |
| Länge des Echogramms | 2.000 ms | s. nachfolgende Anmerkung im Text |
| Strahlenzahl | 200.000 | s. Mittelungen |
| Mittelungen | 3 | ergibt effektive Strahlenzahl von 600.000, allerdings mit etwas verringerter Varianz zw. Rechendurchgängen |
| Streuung im Raum stehender Objekte | auto-edge | Streugrad wird abhängig von den Dimensionen des Objektes rechnerisch ermittelt, nur für Objekte die in den Raum ragen (Möblierung) |

Tabelle 6: Berechnungsparameter mit Erklärung

Die Länge des Echogramms sollte etwa der zu erwartenden längsten Nachhallzeit entsprechen, wenn noch eine gültige Nachhallzeit T_{30} berechnet werden soll (vgl. TUCT 2022, S. 6). Wenn nur die Auswertung der T_{20} von Interesse ist, kann die Echogrammlänge auf etwa 60% der längsten zu erwartenden Nachhallzeit reduziert werden (vgl. TUCT 2022, S. 8).

Für den Streugrad von Objekten existieren keine breit verfügbaren Daten. Daher werden die Werte für den Streugrad gemäß der Empfehlungen aus dem Manual zu CATT-Acoustic angesetzt. Für schallharte, glatte Oberflächen wird ein konservativer Ansatz von 0,1 für den Streugrad angenommen (vgl. CATT-A 2022, S. 127). Die Streugrade von stark absorbierenden und flächigen Materialien (Wand- und Deckenabsorber) sind aus der Literatur nicht zweifelsfrei zu bestimmen bzw. unterscheiden sich abhängig vom Absorbertyp. Es wird daher ebenfalls der Ansatz aus dem Benutzerhandbuch mit einem Streugrad von 0,1 für glatte Flächen gewählt. Damit sind die Bedingungen für die Simulation eher auf der „ungünstigen“ Seite. Darüber hinaus hat der Streugrad bei absorbierenden Materialien ohnehin eine geringere Bedeutung, da ja der überwiegende Anteil der Schallenergie bereits absorbiert wird.

Für alle Oberflächen die eine gewisse Struktur aufweisen, wird eine Abschätzung des Streugrades s nach folgender Formel vorgenommen:

$$s = 50 \cdot \sqrt{\frac{a}{\lambda}} \quad (\text{Gl. 4})$$

Für die Strukturgröße a [m] sind die kürzesten Abmessungen des jeweiligen Elementes einzusetzen (z.B. Tiefe der Stufen bei Treppen). Über die Wellenlänge λ lässt sich der Streugrad frequenzabhängig rechnerisch abschätzen (vgl. CATT-A 2022, S. 81f). Für einen konservativen Ansatz werden die so errechnete Streugrade noch zusätzlich auf einen Wert von max. 0,9 begrenzt. Diese Formel basiert auf Erfahrungswerten, die Abschätzung des Streugrades wird damit aber zumindest methodisch. Zudem decken sich die Ergebnisse diese Formel relativ gut mit Vergleichsmessungen, nach denen der Streugrad s bei 0,5 liegt, wenn die Abmessungen a in etwa der Wellenlänge λ entsprechen (vgl. Vorländer 2020, S. 341f).

In der nachfolgenden Tabelle 7 sind die verwendeten Schallabsorptions- sowie Streugrade inklusive der Quelle zusammengefasst. Die Qualitäten für grundlegende Raumflächen wurden aus der Literatur entnommen, es handelt sich um übliche Werte die in der Tendenz eher eine zu geringe Absorption aufweisen.

| Objekt | Schallabsorptionsgrad α bzw. Streugrad s je Oktavmittenfrequenz f [Hz] | | | | | | | Quelle / Bemerkung |
|--|---|------------------------------------|------|------|------|------|------|---------------------------|
| | | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | |
| Wand / Decke / Boden, schallhart (Mittelwert) | α | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | Vorländer 2020 |
| | s | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | CATT-A 2022 |
| Decke, Leichtbau (Plaster, ceiling, 30 mm w/lighting & ventilation) | α | 0,14 | 0,12 | 0,08 | 0,06 | 0,06 | 0,04 | Beranek u.a. 1998 |
| | s | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | CATT-A 2022 |
| Wand, Leichtbau (2x13 gypsum, 70 stud, 45 min-wool [mm]) | α | 0,12 | 0,10 | 0,08 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | Simmons 2016 |
| | s | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | CATT-A 2022 |
| Bodenbelag, weich (Nadelfilz) | α | 0,02 | 0,04 | 0,12 | 0,20 | 0,36 | 0,57 | DIN 18041 |
| | s | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | CATT-A 2022 |
| Fenster (Double glazing, 2 – 3 mm glass, 10 mm gap) | α | 0,10 | 0,07 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | Kristensen 1984 |
| | s | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | CATT-A 2022 |
| Schrank, geschlossen | α | 0,35 | 0,15 | 0,10 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | Radoi 2011 |
| | s | auto-edge scattering ¹⁾ | | | | | | |
| Bürostuhl (Sitz: 0,45 m, Lehne: 0,45 m) | α | 0,19 | 0,31 | 0,38 | 0,43 | 0,49 | 0,49 | Nocke 2017 |
| | s | auto-edge scattering ¹⁾ | | | | | | |
| Tisch (geringste Werte für Holzplatten) | α | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,06 | 0,11 | 0,12 | Smardzewski u.a. 2015 |
| | s | auto-edge scattering ¹⁾ | | | | | | |
| Lamellenvorhänge vor Fenster (offen 90°, ungünstigster Fall) | α | 0,10 | 0,07 | 0,13 | 0,28 | 0,49 | 0,56 | Vorländer 2020 |
| | s | 0,10 | 0,14 | 0,19 | 0,27 | 0,38 | 0,54 | berechnet, $a = 0,1$ m |
| Wandabsorber (Richtqualität: poröser Abs., 50 mm Miwo) | α | 0,20 | 0,50 | 0,75 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | Richtqualität |
| | s | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | CATT-A 2022 |
| Decke A (Richtqualität: Mineralfaser-Rasterdecke) | α | 0,45 | 0,60 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | Richtqualität |
| | s | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | CATT-A 2022 |
| Decke B (Richtqualität: HK-Deckensegel) | α | 0,25 | 0,65 | 0,70 | 0,65 | 0,60 | 0,60 | Richtqualität |
| | s | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | CATT-A 2022 |
| Decke C (Richtqualität: gelochte GK-Decke) | α | 0,45 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | Richtqualität |
| | s | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | CATT-A 2022 |
| Trenner (Richtqualität) | α | 0,10 | 0,30 | 0,60 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | Richtqualität |
| | s | auto-edge scattering ¹⁾ | | | | | | |

¹⁾ Streugrad wird in CATT-Acoustic berechnet, basierend auf den Abmessungen der Fläche

Tabelle 7: Übersicht der verwendeten Schallabsorptionsgrade und Streugrade

Für die raumakustischen Maßnahmen (Wand- und Deckenabsorber, Trennwände) wurden relativ niedrige Richtqualitäten angesetzt, damit eine möglichst weite Produktpalette noch abgebildet wird. Spezielle Absorber bzw. Absorptionskurven sind im Planungsprozess eher ungünstig, da vielfach im Rahmen der Vergabe produktneutral ausgeschrieben werden muss und dann einzelne hohe Schallabsorptionsgrade die Auswahl möglicher Hersteller zu stark einschränken. Die Richtqualitäten wurden aus dem Vergleich verschiedener Herstellerkataloge sowie der Datenbank der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB 2022) ermittelt.

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Möbelarten, Formen und Materialien gibt es kaum allgemeingültige Schallabsorptionsgrade für Möblierung und es ist in der Praxis mit einer hohen Streuung des Absorptionsgrades zu rechnen. Der Schallabsorptionsgrad für Schränke wurde in Anlehnung an (Radoi 2011) angesetzt, aber noch deutlich reduziert und gerundet.

Die Absorptionsgrade für einen gepolsterten Bürostuhl wurden nach der Methode und aus den Daten wie in (Nocke 2017) vorgeschlagen ermittelt. Dabei wird der Schallabsorptionsgrad nicht wie üblich auf die tatsächlichen Oberflächen des Objektes, sondern auf dessen geometrische Repräsentation im Modell bezogen. Die Bürostühle im Modell bestehen aus zwei Flächen (Sitzfläche und Rückenlehne) mit je 0,45 m Breite und 0,45 m Tiefe, also eine gesamte Oberfläche von 0,81 m². Zusammen mit den in (Nocke 2017, S. 201) aufgeführten äquivalenten Absorptionsflächen, ergeben sich die in der vorangegangenen Tabelle aufgeführten Absorptionsgrade für den Bürostuhl.

5.6 Wahl der Messpfade und Messpunkte

Es wurde an jedem Arbeitsplatz ein Messpunkt für sitzende Tätigkeit (also 1,20 m über Boden) gebildet, genau mittig über der Sitzfläche des jeweiligen Bürostuhls wie in Abbildung 8 dargestellt.

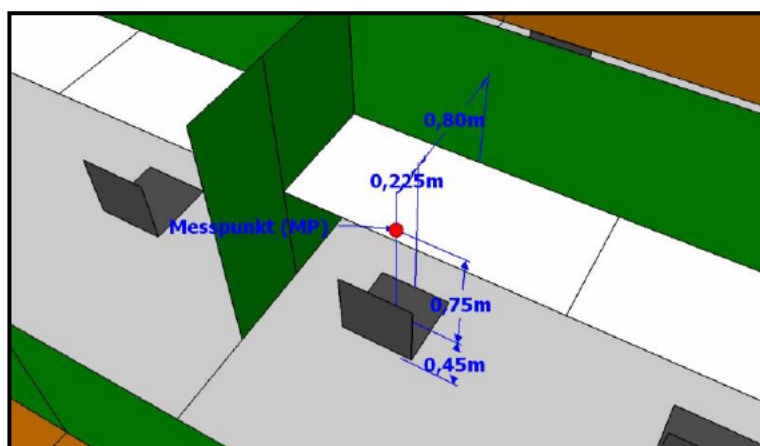


Abbildung 8: Lage des Messpunkts an einem Arbeitsplatz

Die Schallquellen wurden jeweils an der gleichen Position, aber in einer Höhe von 1,30 m über Boden verortet, da in CATT-Acoustic Sender und Empfänger nicht an exakt der gleichen Position liegen dürfen.

Nachhallzeit

Untersuchungen zeigen, dass die Nachhallzeit von Büroflächen eine deutliche Entfernungsabhängigkeit aufweist. Die Nachhallzeit von Arbeitsplätzen mit großer Entfernung kann demnach deutlich länger ausfallen als für nahe Positionen (vgl. Schanda u.a. 2009, S. 646). Die Nachhallzeit soll im Sinne der VDI 2569 ein Maß für die akustische Situation im jeweils untersuchten Arbeitsbereich sein, damit ist die Auswertung für zu große Distanzen nicht aussagekräftig. Sie wurde daher nur für Messpunkte bestimmt, die max. 8 m von der Schallquelle entfernt liegen, gemäß der Empfehlung in VDI 2569. Die ermittelte Nachhallzeit entspricht damit eher der wahrgenommenen Nachhallzeit am Arbeitsplatz.

Zur Vereinfachung des Simulationsprozesses wurden die gleichen Positionen an den jeweiligen Arbeitsplätzen für die Auswertung der Nachhallzeit genutzt, aus denen auch die Messpfade zur Bestimmung der Schallausbreitungsparameter gebildet wurden. Es wurden dazu immer alle Messpunkte an den Arbeitsplätzen mit einbezogen, die wie zuvor, in einem Radius bis einschließlich 8 m um die jeweilige Schallquelle liegen.

Die Ergebnisse aller Sender-Empfänger-Beziehungen wurden arithmetisch gemittelt und ergeben die zur Beurteilung herangezogene mittlere Nachhallzeit T_{20} in den relevanten Oktaven von 125 bis 4000 Hz.

Schallausbreitungsparameter

Da insbesondere durch die Wahl der Messpfade das Ergebnis signifikant beeinflusst werden kann (vgl. Nocke, Victoria 2019, S. 192f), wurde zur Bildung der Messpfade (MPF) immer das gleiche Grundprinzip berücksichtigt, sodass zum einen die Vergleichbarkeit gegeben ist, aber auch zu gleichen Teilen günstige als auch ungünstige Messpfade enthalten sind.

Darüber hinaus musste auch die praktische Umsetzbarkeit für die Simulation berücksichtigt werden, da mit CATT-Acoustic immer alle Sender- und Empfängerpositionen gerechnet werden. Es gibt keine Möglichkeit die Berechnung nur für bestimmte Kombinationen durchzuführen, also beispielsweise eine Quelle nur mit einem bestimmten Satz an Empfängern zu rechnen. Um daher die Anzahl „unnötiger“ Berechnungen im Modell (und damit die Berechnungszeit) möglichst gering zu halten, wurden die Messpfade immer von wenigen (zwei bis drei) Quellpositionen aus gebildet.

Es wurden nach Möglichkeit immer 6 Pfade erzeugt, mit der nachfolgend beschriebenen Anordnung:

- MP 1: horizontal verlaufend (in y-Richtung), nah an Begrenzungsfläche (Fenster)
- MP 2: vertikal verlaufend (in x-Richtung), nah an Begrenzungsfläche (Wand)
- MP 3: diagonal, beginnend in Raumecke
- MP 4: horizontal verlaufend (in y-Richtung), nah zum Gang bzw. im Raum gelegen
- MP 5: vertikal verlaufend (in x-Richtung), nah zum Gang bzw. im Raum gelegen
- MP 6: diagonal, beginnend im Raum

Eine typische Anordnung der Messpfade ist in Abbildung 9 dargestellt.

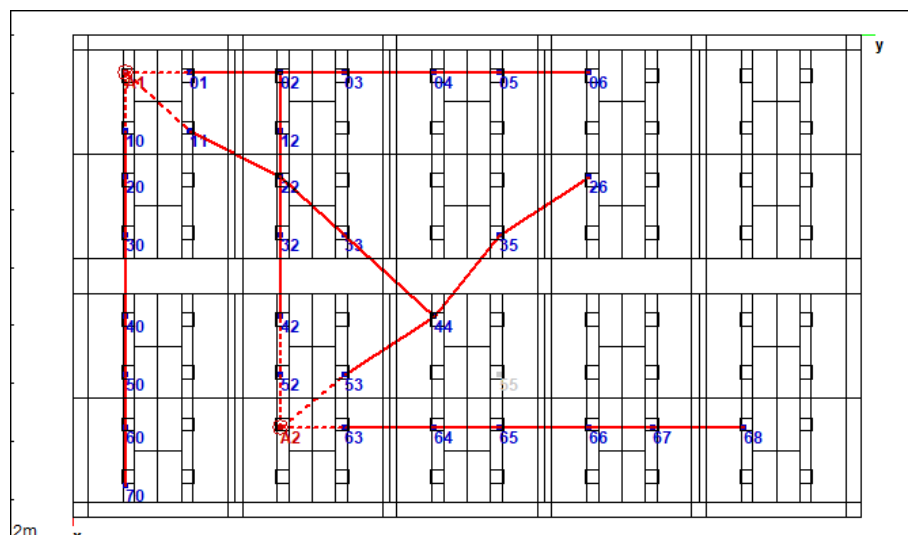


Abbildung 9: Messpfade am Beispiel der Geometrie 030

Manche der Büroflächen lassen gewisse Ausrichtungen nicht zu, weisen also beispielsweise in einer Raumrichtung nicht mindestens fünf Arbeitsplätze auf. Dann wurde ersatzmäßig von den beiden anderen möglichen Messpfad-Typen je ein Pfad gebildet, der sich möglichst noch einmal (z.B. in der Lage innerhalb der Geometrie) von den anderen unterscheidet, wie beispielhaft in Abbildung 10 gezeigt.

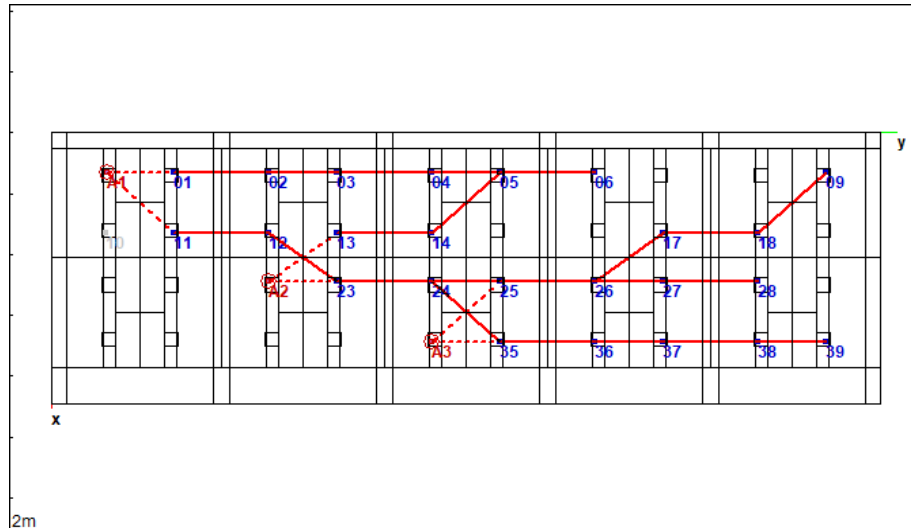


Abbildung 10: Messpfade am Beispiel der Geometrie 010

Bei der kleinsten der untersuchten Büroflächen ergeben sich zudem keine sechs unterschiedlichen Messpfade, sodass dafür abweichend nur drei gewählt wurden (s. auch Abbildung 11).

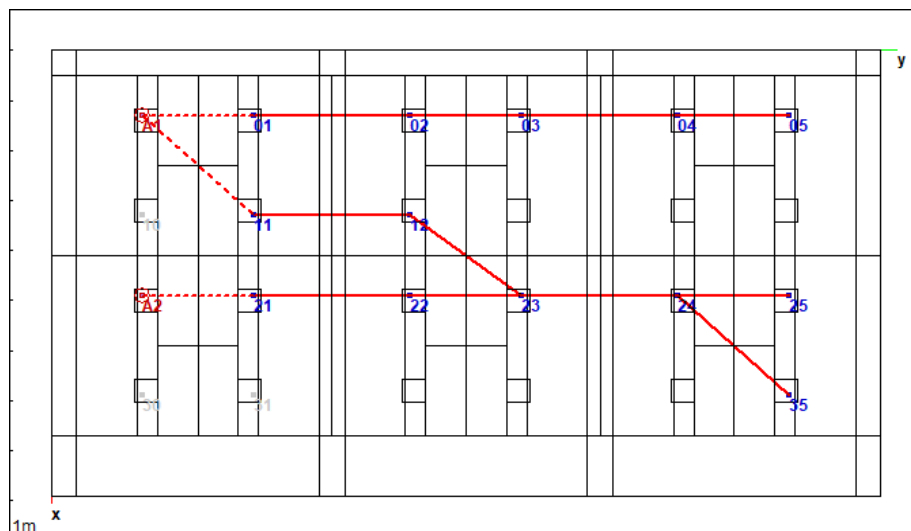


Abbildung 11: Messpfade der Geometrie 001

Alle einzelnen Messpfade zu jeder der untersuchten Geometrien können im Detail der Anlage 1 entnommen werden. Es konnten allerdings nie alle Vorgaben bzw. Empfehlungen der DIN EN ISO 3382-3 bzw. der VDI 2569 eingehalten werden. Diese Einschränkungen sind auch in anderen Untersuchungen bereits adressiert worden (z.B. in Nocke, Victora 2019). Die Forderung, dass der erste Messpunkt vor einer Abschirmung liegen soll, kollidiert beispielsweise mit der Vorgabe, dass an allen Arbeitsplätzen entlang des Messpfades eine Messposition sein soll. Daher wurde immer konsequent der nächste Arbeitsplatz zur Quelle auch mit ausgewertet. Die Forderung wird nur erfüllt,

wenn das untersuchte Szenario z.B. keine Trenner oder nur aller zwei Arbeitsplätze Trenner aufweist.

Zudem wurde der geforderte Abstand von 2 m zwischen Messpunkt und Quelle z.T. leicht unterschritten. Dies ergab sich aus der Rasterung der Arbeitsplätze. Es ergibt sich aber keine wesentliche Änderung, wenn der erste Punkt bei z.B. 1,6 m Entfernung zur Quelle ausgewertet wird. Hingegen verzerrt aber ein vollständiger Wegfall dieses Punktes das Ergebnis des gesamten Messpfades erheblich.

6 Auswertung und Ergebnis

6.1 Nomenklatur zur Beschreibung der Auswertung

Für die Beschreibung der Geometrien sind an dieser Stelle noch zwei Hinweise zu geben, damit die nachfolgende Auswertung besser nachvollzogen werden kann (s. auch Abbildung 12).

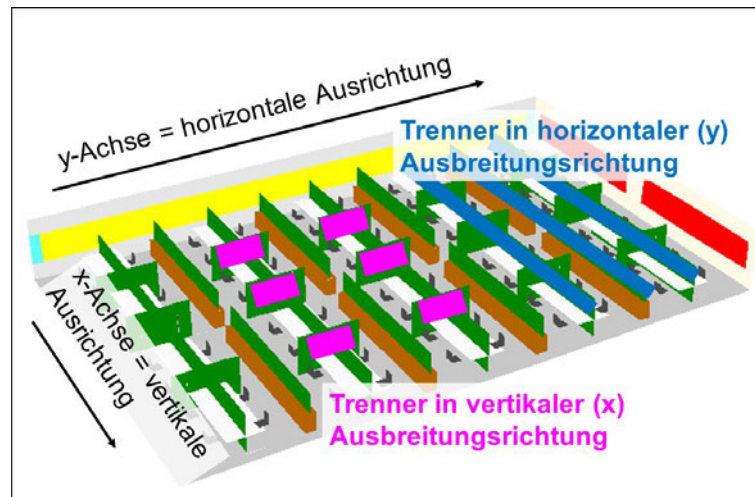


Abbildung 12: Geometrie 030 mit Beschreibung der Nomenklatur bzgl. der Trenner-Ausrichtung und Achsenbezeichnung des Modells

1. Aus Gründen der Modellierung verläuft die x-Achse in den Modellen vertikal und die y-Achse horizontal zu den jeweiligen Ansichten, d.h. die lange Seite der Modelle liegt horizontal, also parallel zur y-Achse. In den nachfolgenden Beschreibungen wird daher der Vollständigkeit halber immer in Klammern noch auf die geometrische Ausrichtung verwiesen, in der Form: „vertikal (x)“ und „horizontal (y)“.

2. Die Ausrichtung der Trenner muss für die Nachvollziehbarkeit der Auswertung eindeutig beschrieben werden. Daher wird festgelegt, dass sich die Bezeichnungen auf die Richtung, in welcher der Trenner die Schallausbreitung unterbrechen soll, bezieht (nicht auf die geometrische Ausrichtung). D.h. „Trenner entlang vertikaler (x) Ausbreitung“ bedeutet beispielsweise, dass die Trenner senkrecht zur vertikal verlaufenden x-Achse angeordnet sind und sich daher erwartungsgemäß besonders auf vertikale Messpfade auswirken sollten.

6.2 Auswertung der Simulationsergebnisse

Im Verlaufe der Simulationen und ihrer Auswertung konnte eine starke Abhängigkeit zwischen der resultierenden Einstufung nach VDI 2569 und der Messpfadausrichtung festgestellt werden. So gibt es Fälle, in denen innerhalb eines Modells Messpfade die Einstufung nach Klasse A erreichen und zugleich Pfade noch nicht einmal Klasse C erzielen. Aufgrund dieses starken Einflusses erfolgt die Auswertung messpfadbezogen und nicht auf die jeweils untersuchte gesamte Geometrie.

Mittels dieser Form der Auswertung können auch die daraus abgeleiteten Empfehlungen in allgemeinerer Form formuliert werden. Nicht in allen möglichen Konfigurationen kommen auch alle Messpfadrichtungen vor. Beispielsweise in längs orientierten Büroflächen ergeben sich in Richtung der kurzen Seite keine gültigen Messpfade aufgrund der zu geringen Zahl an Arbeitsplätzen in einer Linie. Für solche Flächen können in der Beurteilung dann auch nur die Aussagen für die tatsächlich vorhandenen Messpfade ausgewählt und entsprechende Maßnahmen entwickelt werden.

Durch die verschiedenen beteiligten Geometrien, kann aber gleichzeitig der Einfluss von Ausdehnung des Raumes und Volumen sowie der Zahl und Anordnung von Arbeitsplätzen mit beobachtet werden. Dadurch erleichtert sich die generalisierende Betrachtung erheblich, da der Vergleich eines Parameters auch z.B. im Unterschied zwischen unterschiedlichen Raumgrößen betrachtet werden kann. Außerdem werden auch Rückwirkungen von Maßnahmen, die für einen bestimmten Pfad gedacht waren, auf andere Messpfade vermutet. Dieser Umstand würde im direkten Vergleich der Geometrien u.U. nicht deutlich zu Tage treten.

Für die Auswertung der Ergebnisse richtete sich das Hauptaugenmerk auf generelle Abhängigkeiten, aus denen dann im letzten Schritt allgemeine Vorgaben für die unterschiedlichen Layouts abgeleitet werden können.

6.2.1 Trennerhöhen

Für den ersten Vergleich wurden die Trennerhöhen in vier Schritten variiert: keine Trenner, Trenner auf 1,40 m Höhe (also gerade so über 1,20 m „Kopfhöhe“), 1,60 m und 1,80 m. Dabei war die Position der Trenner wie folgt: an jedem Arbeitsplatz in horizontaler (y) Ausbreitung und an jedem zweiten in vertikaler (x) Ausbreitungsrichtung.

Da der größte Einfluss der Abschirmung dann zum Tragen kommt, wenn Reflexionen eine möglichst geringe Rolle spielen, waren alle Modelle mit der maximalen Absorption ausgestattet (Wandabsorber, Lamellenvorhänge vor Fenstern, Rasterdecke).

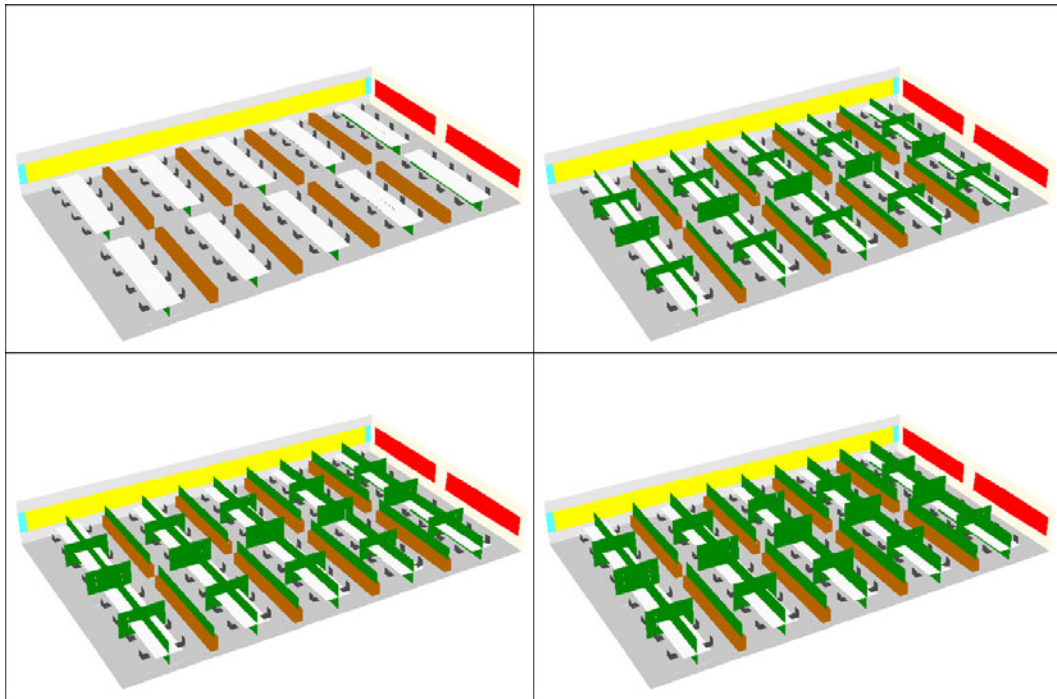


Abbildung 13: Varianten ohne Trenner und mit verschiedenen Trennerhöhen (1,4 m / 1,6 m / 1,8 m) am Beispiel von Geometrie 030

Auswertung der Schallausbreitungsparameter

Ohne Trenner erreichen die Schallausbreitungsparameter unabhängig von Größe der Bürofläche oder Ausrichtung bzw. Länge des Messpfades nicht einmal die niedrigste Kategorie Stufe 3. Insbesondere für $L_{p,A,S,4m}$ wird der Zielwert für Stufe 3 von 51 dB deutlich (ca. 2-5 dB) überschritten. Daher beziehen sich alle folgenden Ausführungen auf Messpfade mit Trennern.

Auch wenn es vereinzelt Ausnahmen gibt, ist überwiegend $L_{p,A,S,4m}$ der kritischere Wert und liegt vielfach eine ganze Stufe unter $D_{2,S}$, daher wird sich bei den nachfolgenden Vergleichen auf die Änderung des $L_{p,A,S,4m}$ bezogen.

Wandnahe (bzw. fensternahe) gerade Messpfade mit Trennern (z.B. MPF 1a, 1b, 2b) schneiden trotz raumakustischer Maßnahmen generell schlechter ab als mittig angeordnete (z.B. MPF 3a, 4b, 5b) und zwar um 1,3 bis 5,1 dB für $L_{p,A,S,4m}$. Damit liegen wandnahe gerade Messpfade mehrheitlich eine Kategorie unterhalb von auf der Fläche angeordneten Messpfaden. Ursache sind vermutlich verbleibende Reflexionen der nahen Wandflächen, da die Absorption nicht in allen Frequenzbereichen vollständig ist (Lamellenvorhänge vor Fenstern absorbierenden z.B. nur bei mittleren und hohen Frequenzen nennenswert) und außerdem verbleiben schallharte Wandflächen ober- und unterhalb der absorbierenden Flächen. Ähnliches zeigt sich bei diagonalen Messpfaden. Wenn diese wandnah beginnen (MPF 2a, 3b, 6a) sind sie 1,1 bis 3,1 dB schlechter als solche die auf der Fläche starten (MPF 4a, 6b), damit ist hier die Streuung

etwas größer. In der Geometrie 020 verhält es sich sogar umgedreht. Das liegt u.U. an der Kombination von Schirmanzahl und Verlauf des Messpfads.

Sind nur alle zwei Arbeitsplätze Trenner vorhanden, erreichen wandnahe Pfade unabhängig von der Trennerhöhe keine Einstufung (MPF 2b), bei Pfaden beginnend auf der Fläche ist dann wiederum die Trennerhöhe entscheidend. Sind nur alle drei Arbeitsplätze Trenner vorhanden (Geometrie 020, MPF 2b, 5b) ist für gerade verlaufende Messpfade generell keine Einstufung erzielbar.

Bzgl. der Trennerhöhen bestätigt sich, dass mit ansteigender Trennerhöhe auch eine prinzipielle Verbesserung der Schallausbreitungsparameter einhergeht. Je Erhöhung der Trenner um 20 cm (1,4 m / 1,6 m / 1,8 m) ergibt sich für $L_{p,A,S,4m}$ (bereinigt um einzelne Ausreiser):

- gerade Messpfade mit Trenner an jedem Arbeitsplatz, wandnah und im Raum:
0,8 bis 2,0 dB Verbesserung
- gerade Messpfade mit Trenner an jedem zweiten Arbeitsplatz, im Raum:
0,6 bis 1,2 dB Verbesserung
- diagonale Messpfade mit Trenner, wandnah und im Raum:
bis max. 1,0 dB Verbesserung

Für die kleinen Geometrien, die keine Messpfade in einer Richtung zulassen (bedeutete also bis max. vier Arbeitsplätze in einer Reihe) ist eine Unterteilung in der „kurzen“ Richtung nur aller zwei Arbeitsplätze notwendig (bzw. auch überhaupt keine wie die nachfolgende Untersuchung zeigt), damit auf den diagonalen Pfaden noch für ausreichend Abschirmung gesorgt ist. Mit den entsprechenden absorbierenden Flächen, wäre für Stufe 3 eine Trennerhöhe von 1,40 m ausreichend. Soll mind. Stufe 2 für alle Messpfade umgesetzt werden ist eine Höhe von 1,80 m notwendig.

Bei den großen Geometrien muss zum Erreichen von mindestens Stufe 3, die entsprechenden raumakustischen Maßnahmen umgesetzt und Trenner an jedem Arbeitsplatz mit einer Höhe von mindestens 1,40 m vorhanden sein. Damit auch die kritischeren, wandnahen und diagonalen Messpfade Stufe 2 erreichen, sollten Trenner auf mind. 1,80 m erhöht werden, wenngleich noch einzelne ungünstige Abweichungen auf diagonal verlaufenden Messpfaden bei dieser Konfiguration zu beobachten sind. Insgesamt ist damit aber eine Qualität entsprechend der Stufe 2 erreichbar.

| Messpfad MPF | | | 1a | | 2a | | 3a | | 4a | | 5a | | 6a | |
|-------------------------------|-----|---------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| Kurzbeschreibung d. Messpfads | | | wandnah horizontal | | aus Ecke diagonal | | im Raum horizontal | | im Raum diagonal | | flurnah horizontal | | von Flur diagonal | |
| Nr. | G. | Trennerhöhe | L _{pAS4m} | D _{2S} | L _{pAS4m} | D _{2S} | L _{pAS4m} | D _{2S} | L _{pAS4m} | D _{2S} | L _{pAS4m} | D _{2S} | L _{pAS4m} | D _{2S} |
| | | | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB |
| 001 | 001 | keine Trenner | 55,4 | 4,6 | 55,7 | 4,0 | 54,5 | 4,0 | | | | | | |
| 003 | 010 | keine Trenner | 55,2 | 4,7 | 55,7 | 4,2 | 54,3 | 3,6 | 55,7 | 5,1 | 54,6 | 3,4 | 55,3 | 3,9 |
| 007 | 001 | 1,4 m | 50,6 | 6,1 | 50,1 | 7,2 | 48,8 | 6,1 | | | | | | |
| 009 | 010 | 1,4 m | 50,2 | 6,1 | 50,1 | 7,5 | 48,3 | 6,0 | 47,7 | 6,7 | 49,9 | 5,8 | 49,8 | 7,8 |
| 013 | 001 | 1,6 m | 49,5 | 7,8 | 49,4 | 8,8 | 47,3 | 8,0 | | | | | | |
| 015 | 010 | 1,6 m | 49,2 | 8,3 | 49,6 | 10,0 | 46,7 | 8,7 | 47,4 | 8,7 | 48,9 | 7,7 | 49,7 | 10,1 |
| 019 | 001 | 1,8 m | 48,1 | 8,4 | 48,3 | 10,1 | 46,2 | 8,8 | | | | | | |
| 021 | 010 | 1,8 m | 48,0 | 8,9 | 48,3 | 10,9 | 45,8 | 9,5 | 46,5 | 11,1 | 48,1 | 8,2 | 48,5 | 11,2 |
| Messpfad MPF | | | 1b | | 2b | | 3b | | 4b | | 5b | | 6b | |
| Kurzbeschreibung d. Messpfads | | | wandnah horizontal | | wandnah vertikal | | aus Ecke diagonal | | im Raum horizontal | | im Raum vertikal | | im Raum diagonal | |
| 002 | 003 | keine Trenner | 55,1 | 4,7 | 54,7 | 2,9 | 55,9 | 4,5 | 52,5 | 3,9 | 54,6 | 2,9 | 53,0 | 3,5 |
| 004 | 020 | keine Trenner | 55,2 | 4,5 | 55,1 | 3,0 | 55,9 | 5,2 | 54,4 | 3,6 | 54,2 | 3,2 | 56,4 | 4,8 |
| 005 | 030 | keine Trenner | 55,1 | 4,4 | 54,4 | 3,1 | 56,0 | 4,9 | 54,3 | 3,7 | 53,8 | 3,2 | 54,3 | 4,4 |
| 006 | 043 | keine Trenner | 55,1 | 4,8 | 54,1 | 3,6 | 55,5 | 5,6 | 54,1 | 3,8 | 53,7 | 3,9 | 55,5 | 5,5 |
| 008 | 003 | 1,4 m | 50,0 | 6,4 | 52,8 | 5,4 | 50,1 | 7,5 | 47,1 | 5,3 | 49,4 | 5,6 | 47,6 | 6,3 |
| 010 | 020 | 1,4 m | 50,9 | 6,7 | 55,0 | 3,9 | 50,8 | 7,3 | 48,8 | 6,5 | 52,8 | 4,7 | 53,5 | 7,9 |
| 011 | 030 | 1,4 m | 49,9 | 6,7 | 52,9 | 4,7 | 50,1 | 7,8 | 48,1 | 6,6 | 48,4 | 4,4 | 47,2 | 6,7 |
| 012 | 043 | 1,4 m | 49,7 | 6,7 | 53,1 | 4,6 | 50,3 | 5,9 | 47,8 | 6,6 | 49,9 | 5,2 | 49,2 | 4,9 |
| 014 | 003 | 1,6 m | 48,9 | 8,5 | 52,6 | 5,5 | 49,5 | 8,9 | 46,2 | 6,0 | 48,6 | 6,0 | 46,6 | 7,1 |
| 016 | 020 | 1,6 m | 48,9 | 8,9 | 54,9 | 3,6 | 49,7 | 7,3 | 47,0 | 8,8 | 52,6 | 4,3 | 50,9 | 8,1 |
| 017 | 030 | 1,6 m | 48,5 | 9,1 | 52,8 | 4,9 | 49,4 | 8,2 | 46,8 | 9,7 | 47,7 | 5,4 | 46,3 | 9,0 |
| 018 | 043 | 1,6 m | 48,7 | 9,4 | 52,9 | 4,6 | 50,2 | 6,3 | 46,2 | 9,7 | 48,7 | 6,1 | 48,5 | 6,1 |
| 020 | 003 | 1,8 m | 47,3 | 9,2 | 52,7 | 5,6 | 48,4 | 9,9 | 45,4 | 8,2 | 47,8 | 6,2 | 45,7 | 8,5 |
| 022 | 020 | 1,8 m | 47,3 | 9,4 | 55,1 | 3,7 | 48,6 | 7,8 | 46,0 | 9,5 | 52,6 | 4,5 | 50,3 | 9,2 |
| 023 | 030 | 1,8 m | 47,1 | 9,9 | 52,9 | 5,1 | 48,3 | 9,1 | 45,3 | 10,6 | 47,0 | 5,1 | 45,8 | 10,7 |
| 024 | 043 | 1,8 m | 47,2 | 9,7 | 52,9 | 5,0 | 49,7 | 6,5 | 45,2 | 10,5 | 48,1 | 6,1 | 48,0 | 6,3 |

Nr. / G. lfd. Nummerierung Simulation / Nummerierung der Geometrie
L_{pAS4m} A-bewerteter Schalldruckpegel der Sprache in einem Abstand von 4 m [dB(A)]
D_{2S} räumliche Abklingrate der Sprache [dB]
farbliche Kennzeichnung für Einstufung der Schallausbreitungsparameter nach VDI 2569:
rot – < Stufe 3 / orange – Stufe 3 / gelb – Stufe 2 / grün – Stufe 1

Tabelle 8: Vergleich Trennerhöhen: Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter

Auswertung der Nachhallzeit

Da die Trenner schallabsorbierend angelegt sind, ergibt sich die signifikanteste Änderung zwischen dem Szenario ohne Trenner und ganz grundsätzlich mit Trennern. Ohne Trenner wird bei tiefen Frequenzen (125 und 250 Hz) die niedrigste Einstufung Klasse C noch verfehlt. Mit Einbringen der Trenner ergibt sich zu einem deutlichen Erhöhung der schallabsorbierenden Fläche im Raum, wenngleich die Richtqualität der verwendeten Trenner bei 125 Hz mit 0,10 keine besonders hohe Absorption aufweist. Zum anderen wird aber auch die Schallausbreitung im Raum stark verändert. Die möglichen Auswirkungen werden in einem späteren Kapitel im Vergleich zur analytisch berechneten Nachhallzeit diskutiert.

Für die prinzipielle Auslegung zeigt sich aber, dass ohne Trenner nicht nur wegen der Schallausbreitung, sondern auch wegen der Nachhallzeit ein Erreichen einer Einstufung nach VDI 2569 nicht realistisch ist. Sobald absorbierende Trenner vorhanden sind, hat nur die Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen (125 Hz) noch Optimierungsbedarf, sonst wird bereits in jedem Oktavband die Klasse A erreicht. Die eingesetzten raumakustischen Maßnahmen weisen alle in diesem Frequenzband die jeweils ge-

ringste Absorption auf. Hier kann also mit anderen Materialien bzw. speziell in diesem Bereich wirksamen Absorbern nachgesteuert werden. Ab einer Trennerhöhe von 1,40 m ist es aber in jedem Fall realistisch eine Einstufung in Klasse C zu erzielen, bei entsprechender Optimierung sind ist damit auch vermutlich eine Klasse B möglich. Für Klasse A ist im Besonderen auf tieffrequente Absorption zu achten und zumindest Trenner mit 1,60 m, besser 1,80 m Höhe zu empfehlen.

Generell ist anzumerken, dass die Wirkung tieffrequenter Absorption mit Simulationsmethoden der GA relativ ungenau vorherzusagen und daher in diesem Frequenzbereich mit den größten Unsicherheiten behaftet ist. Die Dimensionen der Geometrie und Objekte darin sind nicht mehr ausreichend groß gegenüber der Wellenlänge, somit ist die Näherung der Schallausbreitung als „Schallstrahl“ u.U. nicht mehr valide.

| | | | gemittelte Nachhallzeit T_{20} [s] | | | | | |
|-----|-----|---------------|--------------------------------------|------|------|------|------|------|
| | | | Oktavmittenfrequenz f [Hz] | | | | | |
| Nr. | G. | Trennerhöhe | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| 001 | 001 | keine Trenner | 0,90 | 0,55 | 0,38 | 0,33 | 0,31 | 0,30 |
| 002 | 003 | keine Trenner | 0,99 | 0,61 | 0,39 | 0,36 | 0,33 | 0,30 |
| 003 | 010 | keine Trenner | 0,98 | 0,56 | 0,46 | 0,44 | 0,45 | 0,47 |
| 004 | 020 | keine Trenner | 1,21 | 0,87 | 0,62 | 0,55 | 0,54 | 0,56 |
| 005 | 030 | keine Trenner | 1,28 | 0,93 | 0,63 | 0,58 | 0,55 | 0,55 |
| 006 | 043 | keine Trenner | 1,50 | 1,09 | 0,74 | 0,63 | 0,56 | 0,54 |
| 007 | 001 | 1,4 m | 0,73 | 0,48 | 0,31 | 0,28 | 0,25 | 0,23 |
| 008 | 003 | 1,4 m | 0,71 | 0,48 | 0,33 | 0,30 | 0,28 | 0,26 |
| 009 | 010 | 1,4 m | 0,67 | 0,46 | 0,30 | 0,26 | 0,24 | 0,25 |
| 010 | 020 | 1,4 m | 0,71 | 0,57 | 0,41 | 0,35 | 0,30 | 0,27 |
| 011 | 030 | 1,4 m | 0,66 | 0,51 | 0,40 | 0,36 | 0,32 | 0,31 |
| 012 | 043 | 1,4 m | 0,68 | 0,54 | 0,43 | 0,38 | 0,37 | 0,35 |
| 013 | 001 | 1,6 m | 0,68 | 0,45 | 0,29 | 0,25 | 0,22 | 0,19 |
| 014 | 003 | 1,6 m | 0,65 | 0,43 | 0,29 | 0,27 | 0,24 | 0,21 |
| 015 | 010 | 1,6 m | 0,61 | 0,40 | 0,27 | 0,24 | 0,20 | 0,18 |
| 016 | 020 | 1,6 m | 0,64 | 0,50 | 0,36 | 0,32 | 0,26 | 0,25 |
| 017 | 030 | 1,6 m | 0,59 | 0,43 | 0,31 | 0,29 | 0,26 | 0,22 |
| 018 | 043 | 1,6 m | 0,60 | 0,46 | 0,32 | 0,31 | 0,29 | 0,24 |
| 019 | 001 | 1,8 m | 0,66 | 0,43 | 0,28 | 0,24 | 0,21 | 0,18 |
| 020 | 003 | 1,8 m | 0,62 | 0,41 | 0,28 | 0,25 | 0,23 | 0,19 |
| 021 | 010 | 1,8 m | 0,59 | 0,39 | 0,25 | 0,22 | 0,19 | 0,17 |
| 022 | 020 | 1,8 m | 0,61 | 0,45 | 0,35 | 0,29 | 0,23 | 0,20 |
| 023 | 030 | 1,8 m | 0,60 | 0,43 | 0,32 | 0,30 | 0,28 | 0,21 |
| 024 | 043 | 1,8 m | 0,57 | 0,40 | 0,28 | 0,25 | 0,24 | 0,20 |

Nr. / G. lfd. Nummerierung Simulation / Nummerierung der Geometrie
 farbliche Kennzeichnung für Einstufung der Nachhallzeit nach VDI 2569:
 rot – < Klasse C / orange – Klasse C / gelb – Klasse B / grün – Klasse A

Tabelle 9: Vergleich Trennerhöhen: Ergebnisse der simulierten Nachhallzeiten T_{20}

6.2.2 Trennerdichte

Mit der ersten Untersuchung ergeben sich bereits Tendenzen bzgl. der erforderlichen Rasterung von Trennwänden. In der nachfolgenden Auswertung soll daher systematisch auf die Anordnung eingegangen werden. Dafür wurden an den Geometrien des vorangegangenen Szenarios entlang der Ausbreitungsrichtung in vertikaler (x) Richtung variiert, aller wieviel Arbeitsplätze ein Trenner angeordnet wurde. Diese Ausbreitungsrichtung ist die kritischste, da hier der Abstand zum nächsten Arbeitsplatz am geringsten ist. Die Trenner hatten dabei eine Höhe von 1,80 m und einen Überstand (Abstand zwischen Kante der Tischplatte bis zur Kante des Trenners) von 0,60 m. In einem zweiten Schritt wurde der Überstand um 0,50 m auf insgesamt 1,10 m erhöht.

Wie die Geometrien bei der Untersuchung der Trennerhöhe, war auch hier jeweils die maximale raumakustische Ausstattung vorhanden (Lamellenvorhänge, Wandabsorber, Mineralfaser-Rasterdecke). Abbildung 14 zeigt die Variationen am Beispiel von Geometrie 001.

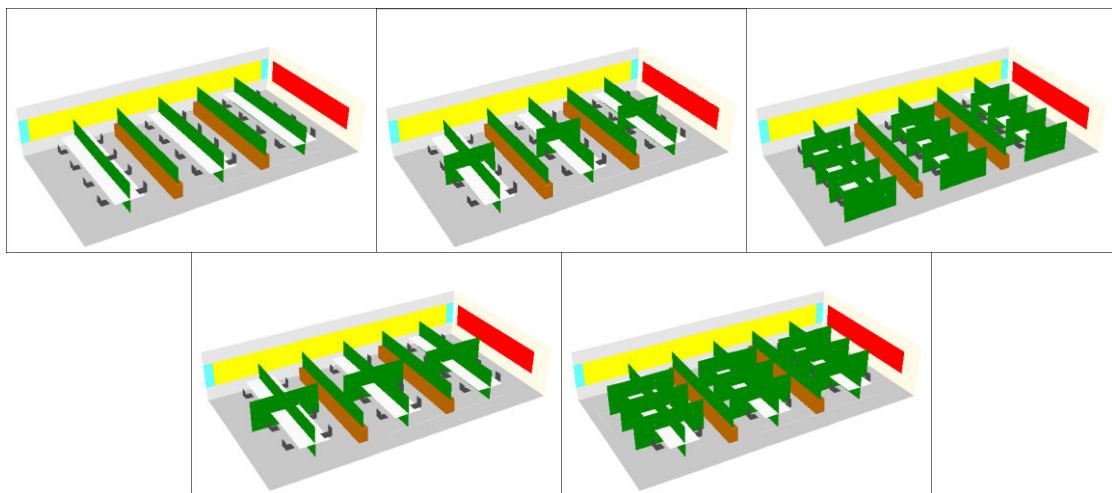


Abbildung 14: untersuchte Variationen der Trenner in vertikaler (x) Ausbreitungsrichtung, beispielhaft an Geometrie 001 (oben v.l.n.r.: keine Trenner, Trenner an jedem zweiten Arbeitsplatz, Trenner an jedem Arbeitsplatz / unten: jeweils die Trennerbreite um 0,5 m vergrößert)

Auswertung der Schallausbreitungsparameter

Die Auswertung erfolgt mit Fokus auf die Messpfade in vertikaler (x) und diagonaler Ausbreitungsrichtung, da die variierten Trenner den größten Einfluss für diese Pfade aufweisen.

Die raumakustische Ertüchtigung wie zuvor beschrieben, sowie Trenner an jedem Arbeitsplatz in einer Raumrichtung (hier: horizontal (y)) vorausgesetzt, können folgende Aussagen über die Anordnung der Trenner in der anderen Richtung (hier: vertikal (x)) und die akustischen Auswirkungen gemacht werden:

- wie bereits zuvor festgestellt können Trenner nur für Raumrichtungen entfallen, in denen keine Messpfade möglich sind (Arbeitsplatzzahl in einer Reihe < 5), Messpfade in deren Ausbreitung keine Trenner vorhanden sind erhalten keine Einstufung nach VDI 2569 (Nr. 094, 096, 097, 098)
- unzureichend für eine Einstufung ist auch der Einsatz von Trennern an jedem vierten (Nr. 091, 092) oder jedem dritten Arbeitsplatz (Nr. 022, 102), der Wechsel von keinen Trennern auf alle vier Arbeitsplätze bzw. von alle vier auf alle drei Arbeitsplätze bewirkt maximal nur eine geringfügige (mehrheitlich unter 1 dB) Minderung der Schallausbreitung
- für ungünstigste Messpfade (wandnah und gerade) ist an jedem Arbeitsplatz ein Trenner erforderlich zum Erreichen der Stufe 3, für Stufe 2 wäre zusätzlich die Vergrößerung des Überstandes von 0,60 m auf 1,10 m notwendig, Stufe 1 wird damit zumeist nur noch knapp ($< 0,5$ dB für $L_{p,A,S,4m}$ bzw. $D_{2,S}$) verfehlt
- auf geraden Messpfaden ergibt sich durch den Wechseln von Trennern aller zwei Arbeitsplätze zu Trennern an jedem Platz eine Verbesserung von $L_{p,A,S,4m}$ von 1,2 bis 3,9 dB (ohne zusätzlichen Überstand) bzw. 3,2 bis 5,2 dB (mit zusätzlichem Überstand), auf diagonalen Pfaden bis zu 2,5 dB (bzw. 3,4 dB mit zusätzlichem Überstand)
- die Vergrößerung des Überstandes von 0,60 m auf 1,10 m ergibt eine Verbesserung von $L_{p,A,S,4m}$ von 0,8 bis 4,9 dB auf geraden Pfaden, auf diagonalen Pfaden von 0,2 bis 2,5 dB

Für die kleinen Geometrien, mit Trennern an jedem Arbeitsplatz in horizontaler (y) Richtung, ist eine Einstufung in Stufe 2 bereits ohne Trenner in vertikaler (x) Richtung möglich, wegen der fehlenden Messpfade in dieser Richtung. Erst wenn auch diagonale Messpfade Stufe 1 erreichen sollen sind Trenner an jedem Arbeitsplatz in vertikaler (x) Richtung erforderlich, im besten Falle dann auch mit vergrößertem Überstand.

| Messpfad MPF | | | 1a | | 2a | | 3a | | 4a | | 5a | | 6a | |
|-------------------------------|-----|--|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| Kurzbeschreibung d. Messpfads | | | wandnah horizontal | | aus Ecke diagonal | | im Raum horizontal | | im Raum diagonal | | flur nah horizontal | | von Flur diagonal | |
| Nr. | G. | Trenner entlang vertikaler (x) Ausbreitung | L _{pAS4m} | D _{2S} | L _{pAS4m} | D _{2S} | L _{pAS4m} | D _{2S} | L _{pAS4m} | D _{2S} | L _{pAS4m} | D _{2S} | L _{pAS4m} | D _{2S} |
| | | | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB |
| 093 | 001 | keine Trenner | 48,0 | 8,1 | 48,8 | 9,8 | 46,7 | 8,3 | | | | | | |
| 095 | 010 | keine Trenner | 47,9 | 8,9 | 48,7 | 10,4 | 45,8 | 9,0 | 48,2 | 10,4 | 48,1 | 8,0 | 48,8 | 10,5 |
| 019 | 001 | an jedem 2. AP | 48,1 | 8,4 | 48,3 | 10,1 | 46,2 | 8,8 | | | | | | |
| 021 | 010 | an jedem 2. AP | 48,0 | 8,9 | 48,3 | 10,9 | 45,8 | 9,5 | 46,5 | 11,1 | 48,1 | 8,2 | 48,5 | 11,2 |
| 085 | 001 | an jedem AP | 48,3 | 8,9 | 46,7 | 10,4 | 45,1 | 9,3 | | | | | | |
| 087 | 010 | an jedem AP | 48,1 | 9,3 | 46,9 | 10,7 | 44,8 | 10,0 | 46,7 | 13,2 | 48,0 | 8,2 | 46,6 | 10,5 |
| 099 | 001 | jeder 2. AP + 0,5 m | 48,0 | 8,4 | 48,2 | 10,3 | 46,4 | 8,7 | | | | | | |
| 101 | 010 | jeder 2. AP + 0,5 m | 47,8 | 8,9 | 48,2 | 10,9 | 45,8 | 9,7 | 45,8 | 11,2 | 48,1 | 8,0 | 48,4 | 11,0 |
| 105 | 001 | jeder AP + 0,5 m | 48,4 | 9,2 | 46,2 | 10,5 | 45,0 | 9,5 | | | | | | |
| 107 | 010 | jeder AP + 0,5 m | 48,1 | 9,5 | 46,6 | 11,7 | 44,4 | 10,5 | 46,5 | 13,1 | 46,9 | 8,3 | 46,1 | 11,1 |
| Messpfad MPF | | | 1b | | 2b | | 3b | | 4b | | 5b | | 6b | |
| Kurzbeschreibung d. Messpfads | | | wandnah horizontal | | wandnah vertikal | | aus Ecke diagonal | | im Raum horizontal | | im Raum vertikal | | im Raum diagonal | |
| 094 | 003 | keine Trenner | 47,5 | 8,9 | 55,4 | 3,1 | 48,6 | 9,6 | 45,1 | 7,6 | 55,0 | 3,4 | 45,9 | 8,2 |
| 096 | 020 | keine Trenner | 47,8 | 9,4 | 55,8 | 2,5 | 49,1 | 7,3 | 46,3 | 9,5 | 54,9 | 3,1 | 50,2 | 8,9 |
| 097 | 030 | keine Trenner | 47,3 | 9,8 | 55,5 | 2,9 | 48,6 | 8,5 | 45,3 | 9,4 | 54,6 | 3,1 | 47,7 | 7,5 |
| 098 | 043 | keine Trenner | 47,4 | 9,6 | 55,1 | 3,6 | 50,5 | 4,8 | 45,5 | 9,9 | 54,6 | 3,8 | 50,9 | 5,0 |
| 020 | 003 | an jedem 2. AP | 47,3 | 9,2 | 52,7 | 5,6 | 48,4 | 9,9 | 45,4 | 8,2 | 47,8 | 6,2 | 45,7 | 8,5 |
| 022 | 020 | an jedem 3. AP | 47,3 | 9,4 | 55,1 | 3,7 | 48,6 | 7,8 | 46,0 | 9,5 | 52,6 | 4,5 | 50,3 | 9,2 |
| 023 | 030 | an jedem 2. AP | 47,1 | 9,9 | 52,9 | 5,1 | 48,3 | 9,1 | 45,3 | 10,6 | 47,0 | 5,1 | 45,8 | 10,7 |
| 024 | 043 | an jedem 2. AP | 47,2 | 9,7 | 52,9 | 5,0 | 49,7 | 6,5 | 45,2 | 10,5 | 48,1 | 6,1 | 48,0 | 6,3 |
| 086 | 003 | an jedem AP | 47,8 | 9,5 | 49,3 | 4,2 | 46,6 | 10,7 | 44,3 | 8,5 | 46,4 | 7,0 | 45,2 | 9,3 |
| 088 | 020 | an jedem AP | 48,2 | 10,2 | 49,4 | 4,6 | 47,3 | 10,6 | 44,4 | 10,5 | 46,4 | 7,5 | 47,3 | 11,8 |
| 089 | 030 | an jedem AP | 47,9 | 10,4 | 49,3 | 5,5 | 46,7 | 9,9 | 44,3 | 10,4 | 45,8 | 7,4 | 45,8 | 12,3 |
| 090 | 043 | an jedem AP | 48,0 | 10,5 | 49,0 | 5,2 | 47,2 | 6,2 | 44,4 | 11,2 | 45,7 | 8,7 | 47,8 | 7,7 |
| 100 | 003 | jeder 2. AP + 0,5 m | 47,3 | 9,1 | 51,0 | 6,6 | 48,0 | 10,8 | 45,7 | 7,8 | 44,9 | 7,9 | 45,2 | 9,4 |
| 102 | 020 | jeder 3. AP + 0,5 m | 47,8 | 9,7 | 55,1 | 4,0 | 48,5 | 8,0 | 46,0 | 9,6 | 51,3 | 5,2 | 50,2 | 9,4 |
| 103 | 030 | jeder 2. AP + 0,5 m | 47,3 | 10,6 | 52,1 | 6,2 | 47,8 | 9,1 | 45,4 | 10,6 | 44,5 | 6,4 | 45,3 | 11,3 |
| 104 | 043 | jeder 2. AP + 0,5 m | 47,2 | 10,1 | 51,8 | 6,2 | 49,5 | 6,5 | 45,4 | 10,6 | 45,8 | 7,3 | 47,7 | 7,5 |
| 106 | 003 | jeder AP + 0,5 m | 48,2 | 9,5 | 46,6 | 7,8 | 46,4 | 12,5 | 42,2 | 8,1 | 41,5 | 10,2 | 43,0 | 8,5 |
| 108 | 020 | jeder AP + 0,5 m | 48,0 | 10,3 | 47,4 | 7,9 | 46,9 | 11,1 | 44,2 | 11,1 | 42,6 | 9,7 | 46,7 | 12,6 |
| 109 | 030 | jeder AP + 0,5 m | 48,0 | 10,3 | 47,0 | 7,8 | 46,1 | 10,0 | 44,1 | 11,5 | 41,3 | 9,1 | 45,6 | 12,9 |
| 110 | 043 | jeder AP + 0,5 m | 47,9 | 10,4 | 46,6 | 8,1 | 46,1 | 8,0 | 44,0 | 11,4 | 41,9 | 9,8 | 45,3 | 10,9 |
| 091 | 030 | an jedem 4. AP | 47,4 | 10,0 | 55,0 | 3,8 | 48,4 | 8,9 | 45,2 | 9,5 | 53,9 | 4,6 | 46,9 | 8,5 |
| 092 | 043 | an jedem 4. AP | 47,3 | 9,8 | 54,4 | 5,7 | 50,6 | 6,3 | 45,2 | 10,5 | 52,0 | 6,8 | 50,4 | 6,4 |

Nr. / G. lfd. Nummerierung Simulation / Nummerierung der Geometrie
AP Arbeitsplatz
L_{pAS4m} A-bewerteter Schalldruckpegel der Sprache in einem Abstand von 4 m [dB(A)]
D_{2S} räumliche Abklingrate der Sprache [dB]
farbliche Kennzeichnung für Einstufung der Schallausbreitungsparameter nach VDI 2569:
rot – < Stufe 3 / orange – Stufe 3 / gelb – Stufe 2 / grün – Stufe 1

Tabelle 10: Vergleich Trennerdichte: Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter

Es wurden nachfolgend noch ein paar spezielle Fälle untersucht. In Tabelle 11 wird verglichen, entlang welcher Ausbreitungsrichtung der Einfluss der Trennerdichte schwerwiegender ist. Dazu wurden zwei Varianten an Geometrie 030 untersucht. Für beide Varianten war jeweils in einer Richtung alle zwei Arbeitsplätze ein Trenner angeordnet und in der anderen Richtung an jedem Arbeitsplatz ein Trenner.

Die Erhöhung des L_{p,A,S,4m} bei Wegfall der Trenner auf dem jeweiligen Messpfad fällt bei den Pfaden in horizontaler (y) Richtung deutlich geringer aus (bis 2,2 dB) als für die vertikalen (y) Pfade (bis 5,1 dB) jeweils im Vergleich zur vollen Ausstattung (Nr. 109). Die Abschirmung in horizontaler (y) Richtung, also über die lange Seite der Arbeitsplätze, ist demnach wirksamer, vermutlich da die Ausdehnung der Trennelemente dort einen größeren Überstand in Bezug auf die Quelle aufweisen.

Gegen das intuitive Verständnis ist der Umstand, dass manche Messpfade z.T. geringfügig besser abschneiden, wenn Schirme für die jeweils andere Ausbreitungsrichtung entfallen. Beispielsweise ist Messpfad 1 (horizontal (y) ausgerichtet) etwas besser, wenn die Trenner in vertikaler (x) Ausrichtung nur aller zwei Arbeitsplätze (Nr. 103) vorhanden sind als mit voller Trennerausstattung (Nr. 109). Das liegt am Verfahren wie die Beugung in CATT-Acoustic berechnet wird. Mit mehr Beugungskanten werden auch mehr Kantenquellen gebildet, die einen Beitrag zum Gesamtschalldruckpegel liefern können. Die Beugung wird aber nur für nahe Punkte berücksichtigt (Beugung wird nur bis zur 2. Ordnung berechnet), folglich kann sich je nach Lage der Pegel an nahen Messpunkten etwas erhöhen, bei fernen Punkten bleibt er aber unverändert. Je nach dem welchen Einfluss die ersten Punkte auf das Gesamtergebnis haben, können die Schallausbreitungsparameter dadurch etwas ungünstiger ausfallen. Im vorliegenden Fall liegt der Einfluss dieses Effekts allerdings immer unter 0,5 dB. Der Fehler bei Nicht-Beachtung der Beugung an sich wäre um ein Vielfaches höher.

| Messpfad MPF | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|-----|--|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Kurzbeschreibung d. Messpfads | | | wandnah horizontal | wandnah vertikal | aus Ecke diagonal | im Raum horizontal | im Raum vertikal | im Raum diagonal |
| Nr. | G. | Trenner entlang Ausbreitung... | L _{pAS4m} D _{2S} | L _{pAS4m} D _{2S} | L _{pAS4m} D _{2S} | L _{pAS4m} D _{2S} | L _{pAS4m} D _{2S} | L _{pAS4m} D _{2S} |
| | | | dB(A) dB | dB(A) dB | dB(A) dB | dB(A) dB | dB(A) dB | dB(A) dB |
| 109 | 030 | horizontal (y) jeder AP / vertikal (x) jeder AP | 48,0 10,3 | 47,0 7,8 | 46,1 10,0 | 44,1 11,5 | 41,3 9,1 | 45,6 12,9 |
| 103 | 030 | horizontal (y) jeder AP / vertikal (x) jeder 2. AP | 47,6 10,6 | 52,1 6,2 | 47,8 9,1 | 45,4 10,6 | 44,5 6,4 | 45,3 11,3 |
| 113 | 030 | horizontal (y) jeder 2. AP / vertikal (x) jeder AP | 48,9 8,9 | 46,8 8,1 | 47,0 9,7 | 46,3 10,2 | 43,0 6,3 | 46,8 9,4 |
| Nr. / G. lfd. Nummerierung Simulation / Nummerierung der Geometrie | | | | | | | | |
| AP Arbeitsplatz | | | | | | | | |
| L _{pAS4m} A-bewerteter Schalldruckpegel der Sprache in einem Abstand von 4 m [dB(A)] | | | | | | | | |
| D _{2S} räumliche Abklingrate der Sprache [dB] | | | | | | | | |
| farbliche Kennzeichnung für Einstufung der Schallausbreitungsparameter nach VDI 2569: rot – < Stufe 3 / orange – Stufe 3 / gelb – Stufe 2 / grün – Stufe 1 | | | | | | | | |

Tabelle 11: Vergleich Trennerdichte, Gegenüberstellung der Ausbreitungsrichtung: Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter für Geometrie 030

In Tabelle 12 sind Fälle dargestellt, wenn die Abtrennung nur zwischen Arbeitsplatzgruppen erfolgt. Hier lässt sich relativ kurz zusammenfassen, dass diese Varianten keine sinnvolle Option darstellen, da die jeweils betroffenen Messpfade eine Einstufung nach VDI 2569 deutlich verfehlen.

| Messpfad MPF | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | | | | | |
|-------------------------------|-----|---|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|------|-----|
| Kurzbeschreibung d. Messpfads | | | wandnah horizontal | wandnah vertikal | aus Ecke diagonal | im Raum horizontal | im Raum vertikal | im Raum diagonal | | | | | | |
| Nr. | G. | Trenner entlang Ausbreitung... | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | | |
| 091 | 030 | horizontal (y) jeder AP / vertikal (x) nur zw. Gruppen | 47,4 | 10,0 | 55,0 | 3,8 | 48,4 | 8,9 | 45,2 | 9,5 | 53,9 | 4,6 | 46,9 | 8,5 |
| 111 | 030 | horizontal (y) nur zw. Gruppen / vertikal (x) nur zw. Gruppen | 52,9 | 8,7 | 54,0 | 4,3 | 53,6 | 8,9 | 51,2 | 8,8 | 51,6 | 5,5 | 51,8 | 8,9 |

Nr. / G. lfd. Nummerierung Simulation / Nummerierung der Geometrie
 AP Arbeitsplatz
 L_{pAS4m} A-bewerteter Schalldruckpegel der Sprache in einem Abstand von 4 m [dB(A)]
 D_{2S} räumliche Abklingrate der Sprache [dB]
 farbliche Kennzeichnung für Einstufung der Schallausbreitungsparameter nach VDI 2569:
 rot – < Stufe 3 / orange – Stufe 3 / gelb – Stufe 2 / grün – Stufe 1

Tabelle 12: Vergleich Trennerdichte, Trenner nur zwischen Arbeitsplatzgruppen: Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter für Geometrie 030

Auswertung der Nachhallzeit

Es lässt sich wie zuvor beobachten, dass bei Einbringen von Trennern in einer Ausbreitungsrichtung (hier vertikal (x)) eine deutliche Reduzierung der Nachhallzeit bewirken lässt, da damit gegenüber der Variante ohne Trenner in vertikaler (x) Richtung deutlich mehr absorbierende Fläche sowie eine zusätzliche Unterbrechung der Direkt-schallwege zwischen Quelle und Empfänger einhergeht. Ohne Trenner lässt sich in den untersuchten Konfigurationen zumindest Klasse C erreichen. Beschränkend wirken wie zuvor die Oktaven bei tiefen Frequenzen.

Ansonsten ist bereits ab der Variante mit Trennern an jedem zweiten Arbeitsplatz (vertikal (x)) die Nachhallzeit weitestgehend im Bereich von Klasse A. Lediglich bei 125 Hz gibt es noch geringfügige Überschreitungen (bis 0,06 s) des Anforderungswertes für Klasse A in diesem Oktavband.

| | | | gemittelte Nachhallzeit T_{20} [s] | | | | | |
|------------------------------|-----|--|--------------------------------------|------|------|------|------|------|
| | | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Oktavmittelfrequenz f [Hz] | | | | | | | | |
| Nr. | G. | Trenner entlang vertikaler (x) Ausbreitung | | | | | | |
| 093 | 001 | keine Trenner | 0,68 | 0,51 | 0,36 | 0,31 | 0,27 | 0,24 |
| 094 | 003 | keine Trenner | 0,71 | 0,52 | 0,40 | 0,35 | 0,32 | 0,27 |
| 095 | 010 | keine Trenner | 0,64 | 0,46 | 0,32 | 0,29 | 0,25 | 0,22 |
| 096 | 020 | keine Trenner | 0,72 | 0,69 | 0,58 | 0,42 | 0,35 | 0,28 |
| 097 | 030 | keine Trenner | 0,69 | 0,69 | 0,56 | 0,52 | 0,38 | 0,35 |
| 098 | 043 | keine Trenner | 0,80 | 0,80 | 0,76 | 0,62 | 0,51 | 0,50 |
| 019 | 001 | an jedem 2. AP | 0,66 | 0,43 | 0,28 | 0,24 | 0,21 | 0,18 |
| 020 | 003 | an jedem 2. AP | 0,62 | 0,41 | 0,28 | 0,25 | 0,23 | 0,19 |
| 021 | 010 | an jedem 2. AP | 0,59 | 0,39 | 0,25 | 0,22 | 0,19 | 0,17 |
| 022 | 020 | an jedem 2. AP | 0,61 | 0,45 | 0,35 | 0,29 | 0,23 | 0,20 |
| 023 | 030 | an jedem 2. AP | 0,60 | 0,43 | 0,32 | 0,30 | 0,28 | 0,21 |
| 024 | 043 | an jedem 2. AP | 0,57 | 0,40 | 0,28 | 0,25 | 0,24 | 0,20 |
| 085 | 001 | an jedem AP | 0,59 | 0,37 | 0,23 | 0,18 | 0,16 | 0,13 |
| 086 | 003 | an jedem AP | 0,59 | 0,36 | 0,23 | 0,18 | 0,15 | 0,14 |
| 087 | 010 | an jedem AP | 0,57 | 0,34 | 0,20 | 0,16 | 0,15 | 0,14 |
| 088 | 020 | an jedem AP | 0,56 | 0,35 | 0,21 | 0,16 | 0,14 | 0,14 |
| 089 | 030 | an jedem AP | 0,53 | 0,34 | 0,22 | 0,16 | 0,13 | 0,12 |
| 090 | 043 | an jedem AP | 0,55 | 0,36 | 0,23 | 0,21 | 0,19 | 0,16 |
| 099 | 001 | jeder 2. AP + 0,5 m | 0,64 | 0,41 | 0,26 | 0,22 | 0,20 | 0,16 |
| 100 | 003 | jeder 2. AP + 0,5 m | 0,58 | 0,37 | 0,23 | 0,18 | 0,17 | 0,16 |
| 101 | 010 | jeder 2. AP + 0,5 m | 0,58 | 0,37 | 0,23 | 0,19 | 0,17 | 0,16 |
| 102 | 020 | jeder 2. AP + 0,5 m | 0,60 | 0,45 | 0,31 | 0,28 | 0,22 | 0,19 |
| 103 | 030 | jeder 2. AP + 0,5 m | 0,54 | 0,36 | 0,24 | 0,20 | 0,16 | 0,16 |
| 104 | 043 | jeder 2. AP + 0,5 m | 0,53 | 0,36 | 0,23 | 0,19 | 0,18 | 0,16 |
| 105 | 001 | jeder AP + 0,5 m | 0,60 | 0,35 | 0,20 | 0,15 | 0,14 | 0,11 |
| 106 | 003 | jeder AP + 0,5 m | 0,54 | 0,32 | 0,18 | 0,14 | 0,12 | 0,11 |
| 107 | 010 | jeder AP + 0,5 m | 0,54 | 0,31 | 0,17 | 0,13 | 0,13 | 0,11 |
| 108 | 020 | jeder AP + 0,5 m | 0,53 | 0,32 | 0,18 | 0,13 | 0,11 | 0,11 |
| 109 | 030 | jeder AP + 0,5 m | 0,49 | 0,30 | 0,16 | 0,13 | 0,11 | 0,10 |
| 110 | 043 | jeder AP + 0,5 m | 0,51 | 0,32 | 0,18 | 0,18 | 0,16 | 0,14 |
| 091 | 030 | an jedem 4. AP | 0,60 | 0,46 | 0,39 | 0,33 | 0,30 | 0,28 |
| 092 | 043 | an jedem 4. AP | 0,59 | 0,48 | 0,38 | 0,36 | 0,35 | 0,31 |

Nr. / G. lfd. Nummerierung Simulation / Nummerierung der Geometrie
 farbliche Kennzeichnung für Einstufung der Nachhallzeit nach VDI 2569:
 rot – < Klasse C / orange – Klasse C / gelb – Klasse B / grün – Klasse A

Tabelle 13: Vergleich Trennerdichte: Ergebnisse der simulierten Nachhallzeiten T_{20}

6.2.3 Trennerbreite

Es wurde im Rahmen dieser Szenarien geprüft, welche Auswirkungen eine Lücke aller zwei Arbeitsplätze (z.B. als Durchgang) zwischen den Trennern auf den Schränken hat (s. auch Abbildung 15).

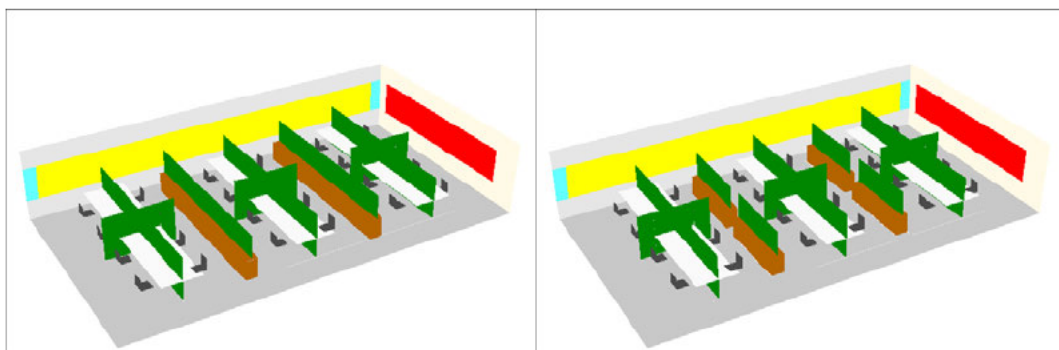


Abbildung 15: untersuchte Variation der Trennerbreiten entlang der horizontalen (y) Ausbreitungsrichtung am Beispiel von Geometrie 001 und 004

Durch die Lücke in der Abschirmung fallen die Schallausbreitungsparameter der Messpfade in horizontaler (y) und diagonaler Richtung in der Tendenz etwas ungünstiger aus, für die vorliegenden Varianten aber nicht in einem Umfang, dass sich die Einstufung ändert. Ausnahme bilden dabei die diagonalen Messpfade, insbesondere bei den großen Geometrien. Dort ist für Messpfad 3b (Geometrien 033, 045) eine deutliche Erhöhung von $L_{p,A,S,4m}$ um bis zu 1,6 dB festzustellen und womit z.T. auch eine geringere Einstufung nach VDI 2569 verbunden ist. Insbesondere bei Geometrie 033, da dort die Lücke in direkter Linie zwischen Schallquelle und dem zweiten Messpunkt liegt, sodass vermehrt Beugungsanteile der ersten Abschirmung zu diesem Punkt gelangen.

| Messpfad MPF | | | 1a | | 2a | | 3a | | 4a | | 5a | | 6a | |
|-------------------------------|-----|--|---|----------|-------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|----------|--------------------|----------|-------------------|----------|
| Kurzbeschreibung d. Messpfads | | | wandnah horizontal | | aus Ecke diagonal | | im Raum horizontal | | im Raum diagonal | | flurnah horizontal | | von Flur diagonal | |
| Nr. | G. | Trenner entlang horizontaler (y) Ausbreitung | L_{pAS4m} | D_{2S} | L_{pAS4m} | D_{2S} | L_{pAS4m} | D_{2S} | L_{pAS4m} | D_{2S} | L_{pAS4m} | D_{2S} | L_{pAS4m} | D_{2S} |
| | | | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB |
| 019 | 001 | alle geschlossen | 48,1 | 8,4 | 48,3 | 10,1 | 46,2 | 8,8 | | | | | | |
| 021 | 010 | alle geschlossen | 48,0 | 8,9 | 48,3 | 10,9 | 45,8 | 9,5 | 46,5 | 11,1 | 48,1 | 8,2 | 48,5 | 11,2 |
| 080 | 004 | zw. Gruppen mit 0,5 m Lücke | 48,1 | 7,7 | 48,3 | 8,8 | 46,4 | 8,2 | | | | | | |
| 082 | 012 | zw. Gruppen mit 0,5 m Lücke | 48,1 | 8,4 | 48,5 | 10,4 | 45,9 | 9,2 | 46,9 | 10,9 | 48,1 | 8,0 | 48,6 | 10,7 |
| Messpfad MPF | | | 1b | | 2b | | 3b | | 4b | | 5b | | 6b | |
| Kurzbeschreibung d. Messpfads | | | wandnah horizontal | | wandnah vertikal | | aus Ecke diagonal | | im Raum horizontal | | im Raum vertikal | | im Raum diagonal | |
| 020 | 003 | alle geschlossen | 47,3 | 9,2 | 52,7 | 5,6 | 48,4 | 9,9 | 45,4 | 7,7 | 47,8 | 6,2 | 45,7 | 8,5 |
| 023 | 030 | alle geschlossen | 47,1 | 9,9 | 52,9 | 5,1 | 48,3 | 9,1 | 45,3 | 10,6 | 47,0 | 5,1 | 45,8 | 10,7 |
| 024 | 043 | alle geschlossen | 47,2 | 9,7 | 52,9 | 5,0 | 49,7 | 6,5 | 45,2 | 10,5 | 48,1 | 6,1 | 48,0 | 6,3 |
| 081 | 005 | zw. Gruppen mit 0,5 m Lücke | 48,0 | 8,9 | 52,7 | 5,7 | 49,7 | 10,0 | 46,9 | 7,6 | 48,0 | 6,1 | 47,3 | 9,0 |
| 083 | 033 | zw. Gruppen mit 0,5 m Lücke | 47,9 | 9,6 | 52,9 | 5,2 | 49,4 | 9,1 | 45,5 | 10,1 | 47,0 | 5,1 | 45,8 | 10,9 |
| 084 | 045 | zw. Gruppen mit 0,5 m Lücke | 47,9 | 9,7 | 52,9 | 4,9 | 49,7 | 6,4 | 45,6 | 10,6 | 48,1 | 6,0 | 48,3 | 5,5 |
| Nr. / G. | | | lfd. Nummerierung Simulation / Nummerierung der Geometrie | | | | | | | | | | | |
| L_{pAS4m} | | | A-bewerteter Schalldruckpegel der Sprache in einem Abstand von 4 m [dB(A)] | | | | | | | | | | | |
| D_{2S} | | | räumliche Abklingrate der Sprache [dB] | | | | | | | | | | | |
| | | | farbliche Kennzeichnung für Einstufung der Schallausbreitungsparameter nach VDI 2569: rot – < Stufe 3 / orange – Stufe 3 / gelb – Stufe 2 / grün – Stufe 1 | | | | | | | | | | | |

Tabelle 14: Vergleich Trennerbreiten: Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter

Auf die Nachhallzeit lässt sich kein wesentlicher Einfluss beobachten. Die Änderung in der totalen Absorptionsfläche ist auch vergleichsweise gering. Die geringfügigen Abweichungen in Tabelle 15 resultieren aller Wahrscheinlichkeit nach aus den Varianzen der Rechendurchgänge.

| | | | gemittelte Nachhallzeit T_{20} [s] | | | | | |
|-----|-----|--|--------------------------------------|------|------|------|------|------|
| | | | Oktavmittenfrequenz f [Hz] | | | | | |
| Nr. | G. | Trenner entlang horizontaler (y) Ausbreitung | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| 019 | 001 | alle geschlossen | 0,66 | 0,43 | 0,28 | 0,24 | 0,21 | 0,18 |
| 020 | 003 | alle geschlossen | 0,62 | 0,41 | 0,28 | 0,25 | 0,23 | 0,19 |
| 021 | 010 | alle geschlossen | 0,59 | 0,39 | 0,25 | 0,22 | 0,19 | 0,17 |
| 023 | 030 | alle geschlossen | 0,60 | 0,43 | 0,32 | 0,28 | 0,28 | 0,21 |
| 024 | 043 | alle geschlossen | 0,59 | 0,40 | 0,28 | 0,25 | 0,24 | 0,20 |
| 080 | 004 | zw. Gruppen mit 0,5 m Lücke | 0,69 | 0,44 | 0,29 | 0,25 | 0,21 | 0,19 |
| 081 | 005 | zw. Gruppen mit 0,5 m Lücke | 0,63 | 0,41 | 0,28 | 0,24 | 0,21 | 0,20 |
| 082 | 012 | zw. Gruppen mit 0,5 m Lücke | 0,60 | 0,39 | 0,24 | 0,21 | 0,19 | 0,17 |
| 083 | 033 | zw. Gruppen mit 0,5 m Lücke | 0,59 | 0,41 | 0,28 | 0,25 | 0,27 | 0,19 |
| 084 | 045 | zw. Gruppen mit 0,5 m Lücke | 0,62 | 0,44 | 0,31 | 0,24 | 0,25 | 0,21 |

Nr. / G. lfd. Nummerierung Simulation / Nummerierung der Geometrie
 farbliche Kennzeichnung für Einstufung der Nachhallzeit nach VDI 2569:
 rot – < Klasse C / orange – Klasse C / gelb – Klasse B / grün – Klasse A

Tabelle 15: Vergleich Trennerbreite: Ergebnisse der simulierten Nachhallzeiten T_{20}

6.2.4 Akustisch wirksame Wandflächen

Für die Ausstattung an raumakustischen Maßnahmen gibt es zahlreiche Varianten. Für den Vergleich im Rahmen dieses Kapitels wurde sich auf prinzipielle Maßnahmen konzentriert. Die Fragestellung ist, welche Auswirkungen eine Reduktion der raumakustischen Maßnahmen mit sich bringt. Dazu sind drei Varianten an sechs Modellen untersucht worden. Eine Variante vollständig ohne spezielle raumakustische Maßnahmen an Wandflächen, in der zweiten Variante sind nur Lamellenvorhänge vor den Fensterflächen berücksichtigt und in der dritten dann zusätzlich noch Wandabsorber an allen Wandflächen die keine Fensterfläche sind.

Wie bereits bei der Beschreibung der Geometrie-Modelle erläutert, sind in allen Modellen die kurzen Seiten Wandflächen mit potenziellen Absorberflächen. In Modell 001 und 003 ist zusätzlich eine Längsseite eine Wandfläche mit potenziellem Wandabsorber. In den übrigen Modellen sind beide Längsseiten Fensterfronten.

Die Decke ist wie in allen Grundvarianten als Mineralfaser-Rasterdecke mit hoher Absorption angelegt und die Trenner mit einer Höhe von 1,80 m in folgender Konfiguration: an jedem Arbeitsplatz in horizontaler (y) Richtung und an jedem zweiten Arbeitsplatz entlang der vertikalen (x) Ausbreitungsrichtung.

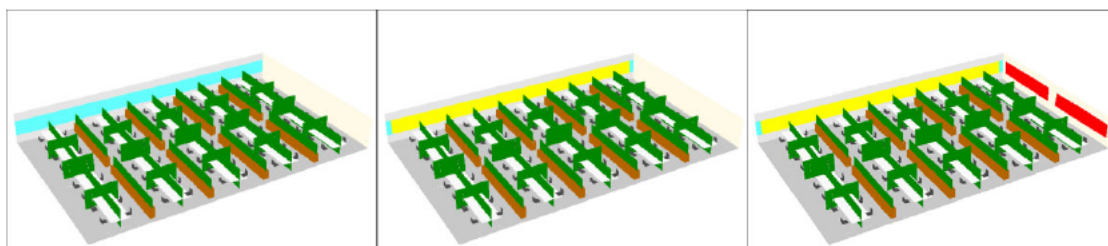


Abbildung 16: untersuchte Variation der Wandmaterialien (rot = Wandabsorber, gelb = Lamellenvorhang, hellblau = Fenster, beige = Wandfläche schallhart) am Beispiel von Geometrie 030

Auswertung der Schallausbreitungsparameter

Aus der Variation der Absorptionsfläche an den Wänden wird deutlich, dass je höher das Absorptionsvermögen der Wandflächen ist, die Schallausbreitungsparameter auch umso günstiger ausfallen. Dieser generelle Trend ist über alle Messpfade und Geometrien beobachtbar. Es gibt aber auch Messpfade bei denen kaum Auswirkungen feststellbar sind, neben wenigen Ausreißern, bei denen ungünstigere Werte (um max. 0,2 dB) mit mehr Absorption auftreten. Dieser Umstand resultiert sehr wahrscheinlich aus der stochastischen Streuung des Berechnungsverfahrens. Die Abweichungen liegen aber noch im Bereich der ermittelten Unsicherheiten. Aus dem Vergleich der Daten ergeben sich folgende Beobachtungen:

- Lamellenvorhänge: Verbesserung des $L_{p,A,S,4m}$ gegenüber der Situation ohne Vorhänge und Wandabsorber liegt bei maximal 1,1 dB, überwiegend aber 0,5 dB, es ist im Besonderen keine signifikant höhere Pegelminderung entlang der am Fenster liegenden Messpfade zu beobachten
- Wandabsorber (+ Lamellenvorhänge): Verbesserung des $L_{p,A,S,4m}$ gegenüber der Situation ohne Vorhänge und Wandabsorber liegt bei maximal 1,9 dB, es ergibt sich für die wandnahen Pfade, oder solche die zumindest am Wandabsorber beginnen (MPF 1b, 2b), eine deutlich höhere Verbesserung mit bis zu 1,5 dB als für Pfade auf der Fläche mit maximal 0,8 dB

Die Verbesserung durch die Lamellenvorhänge ist insgesamt als relativ gering zu bewerten. Auch an der generellen Einstufung ändert sich im Vergleich zum Raum ohne Vorhänge wenig.

Die Wandabsorber sind insgesamt etwas effektiver, die Einstufung ändert sich aber dadurch auch nur bei einzelnen Messpfaden. Dennoch können die raumakustischen Maßnahmen, beim Ziel höhere Einstufungen (Stufe 1 oder 2) zu erreichen unterstützend wirken, gerade bei bereits ungünstig gelegenen Messpfaden (z.B. wandnahe Pfade). Auch wenn Pfade gerade an der Grenze eines Zielwertes liegen, kann über absorbierende Maßnahmen die ausschlaggebende Verbesserung erzielt werden. In den kleinen Geometrien machen die Lamellenvorhänge im untersuchten Beispiel etwa den Unterschied zwischen Stufe 3 und 2 (MPF 2a).

| Messpfad MPF | | | 1a | | 2a | | 3a | | 4a | | 5a | | 6a | |
|--|-----|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Kurzbeschreibung d. Messpfads | | | wandnah horizontal | | aus Ecke diagonal | | im Raum horizontal | | im Raum diagonal | | flurnah horizontal | | von Flur diagonal | |
| Nr. | G. | Wandabsorber | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB |
| 047 | 001 | keine | 48,8 | 6,4 | 49,1 | 7,8 | 48,1 | 6,8 | | | | | | |
| 049 | 010 | keine | 48,5 | 7,5 | 49,2 | 9,1 | 46,4 | 8,8 | 46,8 | 10,5 | 49,3 | 6,8 | 49,0 | 9,5 |
| 053 | 001 | Lamellenvorhänge | 48,9 | 7,0 | 48,9 | 9,0 | 47,0 | 7,4 | | | | | | |
| 055 | 010 | Lamellenvorhänge | 48,5 | 8,1 | 48,9 | 10,3 | 45,8 | 9,3 | 46,6 | 11,2 | 48,1 | 7,7 | 48,3 | 10,4 |
| 019 | 001 | Lamellenvorhänge + Wandabsorber | 48,1 | 8,4 | 48,3 | 10,1 | 46,2 | 8,8 | | | | | | |
| 021 | 010 | Lamellenvorhänge + Wandabsorber | 48,0 | 8,9 | 48,3 | 10,9 | 45,8 | 9,5 | 46,5 | 11,1 | 48,1 | 8,2 | 48,5 | 11,2 |
| Messpfad MPF | | | 1b | | 2b | | 3b | | 4b | | 5b | | 6b | |
| Kurzbeschreibung d. Messpfads | | | wandnah horizontal | | wandnah vertikal | | aus Ecke diagonal | | im Raum horizontal | | im Raum vertikal | | im Raum diagonal | |
| 048 | 003 | keine | 48,6 | 6,9 | 54,2 | 4,9 | 48,9 | 7,8 | 46,0 | 6,8 | 48,0 | 5,8 | 46,1 | 7,6 |
| 050 | 020 | keine | 48,4 | 8,4 | 56,0 | 3,4 | 49,3 | 7,6 | 46,0 | 9,2 | 52,8 | 4,4 | 50,4 | 9,1 |
| 051 | 030 | keine | 47,9 | 9,3 | 54,2 | 4,8 | 48,8 | 8,7 | 45,5 | 10,0 | 47,2 | 5,0 | 45,8 | 10,7 |
| 052 | 043 | keine | 47,7 | 8,7 | 53,9 | 4,6 | 50,1 | 5,9 | 45,4 | 10,2 | 48,5 | 4,7 | 48,8 | 5,7 |
| 054 | 003 | Lamellenvorhänge | 48,2 | 7,6 | 54,0 | 5,3 | 48,8 | 9,0 | 45,3 | 6,8 | 47,9 | 6,1 | 45,6 | 7,8 |
| 056 | 020 | Lamellenvorhänge | 48,2 | 8,9 | 55,9 | 3,5 | 49,2 | 7,7 | 46,0 | 9,4 | 52,5 | 4,5 | 50,2 | 9,2 |
| 057 | 030 | Lamellenvorhänge | 48,0 | 9,4 | 54,1 | 5,0 | 48,7 | 8,8 | 45,4 | 10,4 | 47,1 | 5,1 | 45,5 | 10,8 |
| 058 | 043 | Lamellenvorhänge | 47,9 | 9,1 | 54,0 | 4,9 | 50,0 | 5,8 | 45,3 | 10,7 | 48,2 | 6,1 | 48,4 | 5,9 |
| 020 | 003 | Lamellenvorhänge + Wandabsorber | 47,3 | 9,2 | 52,7 | 5,6 | 48,4 | 9,9 | 45,4 | 7,7 | 47,8 | 6,2 | 45,7 | 8,5 |
| 022 | 020 | Lamellenvorhänge + Wandabsorber | 47,3 | 9,4 | 55,1 | 3,7 | 48,6 | 7,8 | 46,0 | 9,5 | 52,6 | 4,5 | 50,3 | 9,2 |
| 023 | 030 | Lamellenvorhänge + Wandabsorber | 47,1 | 9,9 | 52,9 | 5,1 | 48,3 | 9,1 | 45,3 | 10,6 | 47,0 | 5,1 | 45,8 | 10,7 |
| 024 | 043 | Lamellenvorhänge + Wandabsorber | 47,2 | 9,7 | 52,9 | 5,0 | 49,7 | 6,5 | 45,2 | 10,5 | 48,1 | 6,1 | 48,0 | 6,3 |
| Nr. / G. lfd. Nummerierung Simulation / Nummerierung der Geometrie L _{pAS4m} A-bewerteter Schalldruckpegel der Sprache in einem Abstand von 4 m [dB(A)] D _{2S} räumliche Abklingrate der Sprache [dB] farbliche Kennzeichnung für Einstufung der Schallausbreitungsparameter nach VDI 2569: rot – < Stufe 3 / orange – Stufe 3 / gelb – Stufe 2 / grün – Stufe 1 | | | | | | | | | | | | | | |

Tabelle 16: Vergleich Absorption an Wandflächen: Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter

Auswertung der Nachhallzeit

Bei voller Ausstattung der Bürofläche mit hohen Trennern (hier 1,80 m) machen schallabsorbierende Wandflächen keinen wesentlichen Unterschied in der simulierten Nachhallzeit. Das mag zum einen daran liegen, dass große Anteile des Schalls aufgrund der Abschirmungen im Raum ohnehin nicht wieder im Nahbereich um eine Quelle ankommen und zur Quelle ferne Positionen werden aufgrund der Vorgaben in VDI 2569 nicht mit ausgewertet. Zum anderen handelt es sich bei den Nachhallzeiten um über die verschiedenen Sende- und Empfangspositionen gemittelte Werte. In diesen haben kleinere Änderungen einzelner Positionen, die sich z.B. nah an einer Absorberfläche befinden, keine wesentliche Auswirkung auf den Mittelwert.

Insgesamt kann auch ohne Wandabsorber zumindest die Klasse B erreicht werden, wenngleich wie bei den Auswertungen zuvor die Oktave bei 125 Hz die kritischste ist. In Kombination mit Materialien mit erhöhter tieffrequenter Absorption (wenn auch schwierig in der Simulation abzubilden) ist auch das Erreichen der Klasse A ohne Wandabsorber als durchaus realistisch einzuschätzen.

| | | | gemittelte Nachhallzeit T_{20} [s] | | | | | |
|-----|-----|---------------------------------|--------------------------------------|------|------|------|------|------|
| | | | Oktavmittelfrequenz f [Hz] | | | | | |
| | | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Nr. | G. | Wandabsorber | | | | | | |
| 047 | 001 | keine | 0,68 | 0,55 | 0,43 | 0,42 | 0,38 | 0,34 |
| 048 | 003 | keine | 0,67 | 0,51 | 0,39 | 0,33 | 0,38 | 0,33 |
| 049 | 010 | keine | 0,64 | 0,48 | 0,35 | 0,34 | 0,34 | 0,32 |
| 050 | 020 | keine | 0,63 | 0,49 | 0,38 | 0,40 | 0,41 | 0,36 |
| 051 | 030 | keine | 0,58 | 0,42 | 0,32 | 0,33 | 0,40 | 0,36 |
| 052 | 043 | keine | 0,58 | 0,43 | 0,31 | 0,33 | 0,36 | 0,33 |
| 053 | 001 | Lamellenvorhänge | 0,67 | 0,46 | 0,30 | 0,24 | 0,21 | 0,20 |
| 054 | 003 | Lamellenvorhänge | 0,64 | 0,44 | 0,31 | 0,26 | 0,23 | 0,19 |
| 055 | 010 | Lamellenvorhänge | 0,60 | 0,40 | 0,26 | 0,22 | 0,19 | 0,17 |
| 056 | 020 | Lamellenvorhänge | 0,63 | 0,49 | 0,35 | 0,33 | 0,26 | 0,22 |
| 057 | 030 | Lamellenvorhänge | 0,67 | 0,53 | 0,44 | 0,44 | 0,38 | 0,31 |
| 058 | 043 | Lamellenvorhänge | 0,57 | 0,43 | 0,28 | 0,25 | 0,24 | 0,20 |
| 019 | 001 | Lamellenvorhänge + Wandabsorber | 0,66 | 0,43 | 0,28 | 0,24 | 0,21 | 0,18 |
| 020 | 003 | Lamellenvorhänge + Wandabsorber | 0,62 | 0,41 | 0,28 | 0,25 | 0,23 | 0,19 |
| 021 | 010 | Lamellenvorhänge + Wandabsorber | 0,59 | 0,39 | 0,25 | 0,22 | 0,19 | 0,17 |
| 022 | 020 | Lamellenvorhänge + Wandabsorber | 0,61 | 0,45 | 0,35 | 0,29 | 0,23 | 0,20 |
| 023 | 030 | Lamellenvorhänge + Wandabsorber | 0,60 | 0,43 | 0,32 | 0,30 | 0,28 | 0,21 |
| 024 | 043 | Lamellenvorhänge + Wandabsorber | 0,57 | 0,40 | 0,28 | 0,25 | 0,24 | 0,20 |

Nr. / G. lfd. Nummerierung Simulation / Nummerierung der Geometrie
 farbliche Kennzeichnung für Einstufung der Nachhallzeit nach VDI 2569:
 rot – < Klasse C / orange – Klasse C / gelb – Klasse B / grün – Klasse A

Tabelle 17: Vergleich Absorption an Wandflächen: Ergebnisse der simulierten Nachhallzeiten T_{20}

6.2.5 Akustisch wirksame Deckenflächen

Im Folgenden wurde der Einfluss unterschiedlicher Deckentypen auf die Akustik der Büroflächen untersucht. Dazu wurden drei verschiedene akustisch wirksame Deckenvarianten mit den sechs Grundmodellen simuliert. Es wurde eine Decke mit hoher Absorption (Mineralfaser-Rasterdecke), eine Decke mit mittlerer Absorption (gelochte Gipskarton-Decke) und eine Decke mit mittlerer Absorption und reduzierter Deckenfläche (Deckensegel) untersucht. Die ersten beiden wurden vollflächig (akustisch wirksame Fläche ca. 80 % der gesamten Deckenfläche) über den Nutzungsflächen angesetzt, mit Ausnahme der Randbereiche zur Fassade (Abstand des nicht akustisch wirksamen Randfrieses 0,50 m) und der Decke über den Flurflächen. Die Deckensegel belegten mit jeweils 8,64 m² Fläche nur 50% des Bereichs unmittelbar über den Tischen einer Arbeitsplatzgruppe (jeweils 17,28 m² bestehend aus vier Arbeitsplätzen). Die jeweils übrigen Flächen wurden als schallhart angesetzt.

Für die Schallabsorption wurden Richtqualitäten gewählt, die eine relativ große Bandbreite möglicher Produkte abdecken (s. Kapitel zu den Eingangsdaten). Spezielle bzw. unübliche Produkte oder Materialien kommen aufgrund des generalisierenden Ansatzes dieser Untersuchung nicht in Frage.

Die sonstige Ausstattung bestand wie zuvor aus Vorhängen und Wandabsorbern an den jeweiligen Flächen und einer Trennerhöhe von 1,80 m, an jedem Arbeitsplatz in horizontaler (y) und an jedem zweiten Arbeitsplatz in vertikaler (x) Richtung.

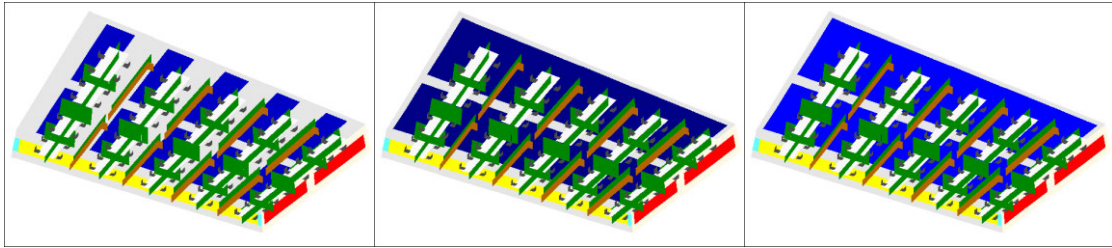


Abbildung 17: untersuchte Variation der Deckentypen am Beispiel von Geometrie 030 (v.l.n.r.: Deckensegel, gelochte GK-Decke, Mineralfaser-Rasterdecke, jeweils blaue Flächen), Ansicht von unten

Auswertung der Schallausbreitungsparameter

Jeweils im Vergleich zur Ausstattung mit Deckensegeln ergibt sich:

- Ausstattung mit gelochter GK-Decke: Verbesserung des $L_{p,A,S,4m}$ um 0,6 bis 3,0 dB
- Ausstattung mit Mineralfaser-Rasterdecke: Verbesserung des $L_{p,A,S,4m}$ um 0,7 bis 3,4 dB

Durch die Absorption an der Decke können deutliche Unterschiede für die Schallausbreitungsparameter bewirkt werden. Auf ungünstigeren (wandnahen) Messpfaden, aber mit hinreichender Abschirmung (z.B. MPF 1a, 1b) ist mit Deckensegeln die Stufe 3 erreichbar, bei günstigeren Messpfaden (z.B. im Raum, MPF 3a, 4b) auch Stufe 2. Die Decke mit mittlerer Absorption ist ein guter Startpunkt und kann je nach Zieleinstufung und Wirksamkeit der Abschirmung für Stufe 3 und 2 hinreichend sein. Noch einmal eine deutliche Optimierung ist mit einer hochabsorbierenden Decke möglich, gerade wenn auch für ungünstigere Messpfade Stufe 1 angestrebt wird, ist diese unerlässlich.

Letztlich ist eine funktionierende Abschirmung aber entscheidend. Auch mit einer hochabsorbierenden Decke wird ohne hinreichende Abschirmung (z.B. MPF 2b) keine Einstufung nach VDI 2569 erreicht. Im Umkehrschluss gilt aber auch, wie sich an den Ergebnissen für die Deckensegel zeigt, dass in jedem Fall eine akustisch wirksame Decke einzusetzen ist. Sie bestimmt maßgeblich wie gut die Abschirmung funktionieren kann, indem sie direkte (starke) Reflexionen über die Decke unterbindet.

| Messpfad MPF | | | 1a | | 2a | | 3a | | 4a | | 5a | | 6a | |
|-------------------------------|-----|-------------------|---|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Kurzbeschreibung d. Messpfads | | | wandnah horizontal | | aus Ecke diagonal | | im Raum horizontal | | im Raum diagonal | | flurnah horizontal | | von Flur diagonal | |
| Nr. | G. | Akustkdecke | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB | L _{pAS4m} dB(A) | D _{2S} dB |
| 025 | 001 | Deckensegel | 50,3 | 6,6 | 50,8 | 8,6 | 48,8 | 6,9 | | | | | | |
| 027 | 010 | Deckensegel | 50,3 | 7,5 | 50,9 | 9,5 | 48,1 | 7,5 | 49,0 | 9,1 | 49,6 | 6,6 | 50,4 | 9,0 |
| 031 | 001 | gelochte GK-Decke | 48,7 | 7,8 | 49,1 | 9,8 | 47,1 | 8,3 | | | | | | |
| 033 | 010 | gelochte GK-Decke | 48,6 | 8,6 | 49,3 | 10,6 | 46,5 | 9,1 | 47,6 | 11,0 | 48,6 | 7,7 | 49,2 | 10,5 |
| 019 | 001 | MiWo-Rasterdecke | 48,1 | 8,4 | 48,3 | 10,1 | 46,2 | 8,8 | | | | | | |
| 021 | 010 | MiWo-Rasterdecke | 48,0 | 8,9 | 48,3 | 10,9 | 45,8 | 9,5 | 46,5 | 11,1 | 48,1 | 8,2 | 48,5 | 11,2 |
| Messpfad MPF | | | 1b | | 2b | | 3b | | 4b | | 5b | | 6b | |
| Kurzbeschreibung d. Messpfads | | | wandnah horizontal | | wandnah vertikal | | aus Ecke diagonal | | im Raum horizontal | | im Raum vertikal | | im Raum diagonal | |
| 026 | 003 | Deckensegel | 49,8 | 7,0 | 54,3 | 4,6 | 50,9 | 8,6 | 48,8 | 7,9 | 49,9 | 4,7 | 49,6 | 8,9 |
| 028 | 020 | Deckensegel | 50,0 | 7,9 | 56,1 | 3,1 | 51,2 | 6,9 | 48,4 | 8,1 | 53,8 | 3,8 | 51,0 | 7,3 |
| 029 | 030 | Deckensegel | 49,7 | 8,4 | 54,3 | 4,2 | 51,0 | 7,3 | 48,2 | 9,1 | 49,2 | 3,8 | 48,4 | 8,2 |
| 030 | 043 | Deckensegel | 49,7 | 8,0 | 54,2 | 4,1 | 51,6 | 5,0 | 47,9 | 9,0 | 49,9 | 4,9 | 49,7 | 5,1 |
| 032 | 003 | gelochte GK-Decke | 48,2 | 8,5 | 53,2 | 5,5 | 49,4 | 9,6 | 46,1 | 7,6 | 48,2 | 6,0 | 46,6 | 8,6 |
| 034 | 020 | gelochte GK-Decke | 48,3 | 9,1 | 55,5 | 3,6 | 49,6 | 7,7 | 46,8 | 9,6 | 52,7 | 4,3 | 50,3 | 8,5 |
| 035 | 030 | gelochte GK-Decke | 48,1 | 9,7 | 53,4 | 5,0 | 48,9 | 8,4 | 46,2 | 10,4 | 47,4 | 5,0 | 46,6 | 10,2 |
| 036 | 043 | gelochte GK-Decke | 48,1 | 9,5 | 53,5 | 4,8 | 50,4 | 6,1 | 46,3 | 10,4 | 48,6 | 5,9 | 49,2 | 6,0 |
| 020 | 003 | MiWo-Rasterdecke | 47,3 | 9,2 | 52,7 | 5,6 | 48,4 | 9,9 | 45,4 | 7,7 | 47,8 | 6,2 | 45,7 | 8,5 |
| 022 | 020 | MiWo-Rasterdecke | 47,3 | 9,4 | 55,1 | 3,7 | 48,6 | 7,8 | 46,0 | 9,5 | 52,6 | 4,5 | 50,3 | 9,2 |
| 023 | 030 | MiWo-Rasterdecke | 47,1 | 9,9 | 52,9 | 5,1 | 48,3 | 9,1 | 45,3 | 10,6 | 47,0 | 5,1 | 45,8 | 10,7 |
| 024 | 043 | MiWo-Rasterdecke | 47,2 | 9,7 | 52,9 | 5,0 | 49,7 | 6,5 | 45,2 | 10,5 | 48,1 | 6,1 | 48,0 | 6,3 |
| Nr. / G. | | | lfd. Nummerierung Simulation / Nummerierung der Geometrie | | | | | | | | | | | |
| L _{pAS4m} | | | A-bewerteter Schalldruckpegel der Sprache in einem Abstand von 4 m [dB(A)] | | | | | | | | | | | |
| D _{2S} | | | räumliche Abklingrate der Sprache [dB] | | | | | | | | | | | |
| | | | farbliche Kennzeichnung für Einstufung der Schallausbreitungsparameter nach VDI 2569: rot – < Stufe 3 / orange – Stufe 3 / gelb – Stufe 2 / grün – Stufe 1 | | | | | | | | | | | |

Tabelle 18: Vergleich Absorption an der Decke: Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter

Auswertung der Nachhallzeit

Für die Nachhallzeit ergibt sich zwischen gelochter GK-Decke und der Mineralfaser-Rasterdecke kein wesentlicher Unterschied, da die Absorption im mittel- und hochfrequenten Bereich i.W. durch die Trenner geleistet wird. Bei Verwendung der Deckensegel fehlt dann aber die notwendige Schallabsorption im tieffrequenten Bereich, sodass insbesondere bei 125 Hz jegliche Einstufung verfehlt wird. Es sind auch Deckensegel oder andere teilflächige Akustikdecken mit besserer Absorption zu tiefen Frequenzen einsetzbar, was zumindest das Erreichen von Klasse C möglich machen sollte. Diese entsprechen aber eher nicht mehr den üblicherweise vorgesehenen Deckensegelkonstruktionen, die beispielsweise auch integrierte Heiz- und Kühlsysteme beinhalten können.

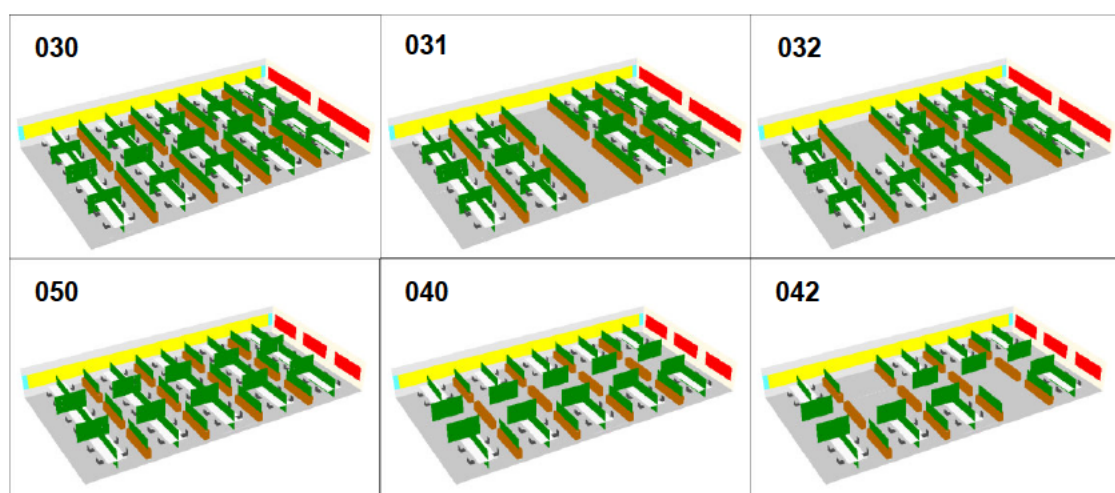
| | | | gemittelte Nachhallzeit T_{20} [s] | | | | | |
|-----|-----|-------------------|--------------------------------------|------|------|------|------|------|
| | | | Oktavmittelfrequenz f [Hz] | | | | | |
| | | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Nr. | G. | Akustikdecke | | | | | | |
| 025 | 001 | Deckensegel | 1,07 | 0,58 | 0,38 | 0,31 | 0,25 | 0,20 |
| 026 | 003 | Deckensegel | 1,09 | 0,61 | 0,44 | 0,38 | 0,31 | 0,25 |
| 027 | 010 | Deckensegel | 1,01 | 0,54 | 0,35 | 0,30 | 0,24 | 0,20 |
| 028 | 020 | Deckensegel | 1,08 | 0,65 | 0,48 | 0,39 | 0,30 | 0,25 |
| 029 | 030 | Deckensegel | 1,00 | 0,57 | 0,40 | 0,34 | 0,27 | 0,23 |
| 030 | 043 | Deckensegel | 1,05 | 0,59 | 0,39 | 0,32 | 0,27 | 0,22 |
| 031 | 001 | gelochte GK-Decke | 0,66 | 0,42 | 0,30 | 0,24 | 0,21 | 0,19 |
| 032 | 003 | gelochte GK-Decke | 0,63 | 0,40 | 0,30 | 0,27 | 0,23 | 0,19 |
| 033 | 010 | gelochte GK-Decke | 0,58 | 0,36 | 0,26 | 0,23 | 0,20 | 0,18 |
| 034 | 020 | gelochte GK-Decke | 0,61 | 0,43 | 0,35 | 0,30 | 0,25 | 0,23 |
| 035 | 030 | gelochte GK-Decke | 0,61 | 0,41 | 0,35 | 0,30 | 0,30 | 0,22 |
| 036 | 043 | gelochte GK-Decke | 0,57 | 0,38 | 0,30 | 0,26 | 0,24 | 0,20 |
| 019 | 001 | MiWo-Rasterdecke | 0,66 | 0,43 | 0,28 | 0,24 | 0,21 | 0,18 |
| 020 | 003 | MiWo-Rasterdecke | 0,62 | 0,41 | 0,28 | 0,25 | 0,23 | 0,19 |
| 021 | 010 | MiWo-Rasterdecke | 0,59 | 0,39 | 0,25 | 0,22 | 0,19 | 0,17 |
| 022 | 020 | MiWo-Rasterdecke | 0,61 | 0,45 | 0,35 | 0,29 | 0,23 | 0,20 |
| 023 | 030 | MiWo-Rasterdecke | 0,60 | 0,43 | 0,32 | 0,30 | 0,28 | 0,21 |
| 024 | 043 | MiWo-Rasterdecke | 0,57 | 0,40 | 0,28 | 0,25 | 0,24 | 0,20 |

Nr. / G. lfd. Nummerierung Simulation / Nummerierung der Geometrie
 farbliche Kennzeichnung für Einstufung der Nachhallzeit nach VDI 2569:
 rot – < Klasse C / orange – Klasse C / gelb – Klasse B / grün – Klasse A

Tabelle 19: Vergleich Absorption an der Decke: Ergebnisse der simulierten Nachhallzeiten T_{20}

6.2.6 Abstand und Anordnung von Arbeitsplätzen

Um die Auswirkungen von Abständen zwischen Arbeitsplatzgruppen zu erfassen, wurden in den Grundmodellen bestimmte Gruppen entfernt um freie Zonen zu schaffen. Diese können beispielsweise gemeinschaftlich genutzte Flächen oder Flächen mit generell anderer Nutzung (Lobbys, Pausenbereiche, Besprechungsbereiche usw.) aufnehmen. Damit entfallen diese Flächen für die Auswertung der Messpfade, da sich dort keine ständigen Arbeitsplätze mehr befinden. Die sonstige Ausstattung ist wie in den Grundmodellen zuvor (Wandabsorber, Vorhänge, Trenner in 1,80 m Höhe).



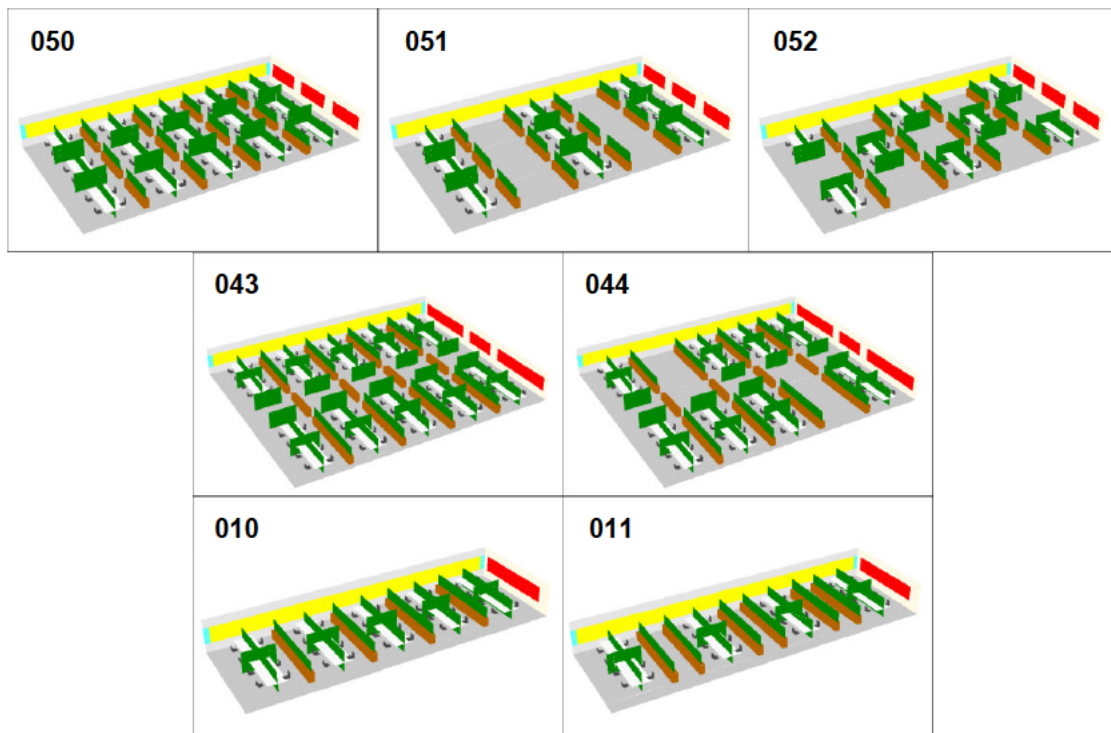


Abbildung 18: Vergleich Anordnung: Grundversionen 030, 050, 043, 010 und ihre Abwandlungen mit erhöhtem Abstand zwischen den Arbeitsplätzen

Auswertung der Schallausbreitungsparameter

Der Vergleich erfolgt immer in Bezug auf die Grundversion der Geometrie, um zu ermitteln welche Änderungen in der Schallausbreitung sich durch das Einbringen zusätzlicher Abstände zwischen den Arbeitsplätzen ergeben. Anders als in den vorangegangenen Vergleichen sind die Messpfade hier nicht immer direkt vergleichbar, da sich durch die Anordnung der AP auch die möglichen Pfade ändern. Genau dieser Umstand kann sich aber ggf. bei bestimmten Layouts zunutze gemacht werden.

Alle Varianten wurden einmal ohne Trenner berechnet. Es zeigt sich, dass durch bloße Erhöhung des Abstandes keine signifikante Verbesserung der Schallausbreitungsparameter erzielen lässt. Keiner der Messpfade ohne Trenner erreicht auch nur Stufe 3 nach VDI 2569. Trenner also durch größeren Abstand zu ersetzen ist keine valide Möglichkeit für die Optimierung der akustischen Situation. Die Abstände müssten vermutlich sehr groß gewählt werden, was aber deutlichen Flächenverlust bedeuten würde. Das wird damit bereits aus wirtschaftlichen Gründen i.d.R. nicht umsetzbar sein.

Für das Modell 030 und die entsprechenden Variationen des Layouts ergeben sich mit Lücken keine Verbesserung, sondern überwiegend noch ungünstigere Werte für die Schallausbreitungsparameter und damit verbunden auch niedrigere Einstufungen.

Bei den Varianten 040 und 042 ergibt sich durch die Mittelzone der Wegfall sämtlicher diagonalen und vertikaler (x) Messpfade gegenüber dem Ursprungsmodell 050. Damit entfällt der Einfluss der geringeren Abschirmung in diesen Ausbreitungsrichtungen und die generelle Einstufung verbessert sich. In dieser Konfiguration ist dann die Stufe 2 erreichbar, obwohl zuvor entweder gar keine Stufe oder nur Stufe 3 erreicht wurde. Wird also durch die Bildung von Flächen ohne Arbeitsplätze eine Messpfadausrichtungen unterbunden (weniger als fünf Arbeitsplätze in einer Reihe), kann sich die Gesamteinstufung der Bürofläche verbessern. Auch können ggf. Abschirmungsmaßnahmen in dieser Richtung verringert werden, ohne dass die Einstufung nach VDI 2569 ungünstiger wird.

Bei 051 sind nur diagonale und vertikale Messpfade möglich, beim ungünstigsten (wandnah und gerade verlaufenden) Messpfad 1 ist die Abschirmung aller zwei Arbeitsplätze nicht ausreichend. Auf den übrigen Messpfaden reicht diese Konfiguration zumindest für Stufe 3. Bei Modell 052 sind ausschließlich diagonale Messpfade zu bilden, bei den Ergebnissen dominieren aber der wandnahe Start (MPF 1) bzw. die fehlende Abschirmung des ersten Messpunktes (MPF 3).

Für die Variante 044 können gegenüber des Grundmodells 043 z.T. günstigere Messpfade gebildet werden (MPF 5, 6), welche entsprechend bessere Einstufungen bekommen. Messpfade die in beiden Modellen identisch sind (MPF 1, 2) erzielen auch die gleichen Werte. Es gibt also durch das Einbringen von größeren Flächen ohne direkte Arbeitsplätze durchaus das Potenzial für eine verbesserte Einstufung nach VDI 2569. Das hängt allerdings sehr von den individuell gebildeten Messpfaden ab und obliegt damit auch zu großen Teilen des jeweiligen Raumakustikplaners.

Im Vergleich von Modell 010 und 011 ist die Ausrichtung und Anordnung der Messpfade jeweils gleich. Lediglich der Abstand zwischen den Messpunkten ist erhöht und damit auch die Anzahl beteiligter Messpunkte bei Modell 011 auf jeweils vier beschränkt. Das ist zugleich der größtmögliche Abstand der Arbeitsplätze, damit noch valide Messpfade zustande kommen. Durch Vergrößerung des Abstandes wird $L_{p,A,S,4m}$ um bis zu 2,3 dB höher (bei manchen Pfaden aber auch um bis zu 0,7 dB geringer), $D_{2,S}$ verbessert sich um bis 3,4 dB (einzelne Pfade sind aber auch hier schlechter). Insgesamt schneidet die Geometrie mit vergrößerten Abständen etwas schlechter ab. Für den Nachweis und die akustische Optimierung ergeben sich aus der Vergrößerung der Abstände somit auch hier keine Vorteile.

| Messpfad | | | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | |
|----------|-----|------------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| Nr. | G. | Konfiguration (MZ = Mittelzone) | L _{pAS4m} | D _{2S} | L _{pAS4m} | D _{2S} | L _{pAS4m} | D _{2S} | L _{pAS4m} | D _{2S} | L _{pAS4m} | D _{2S} | L _{pAS4m} | D _{2S} |
| | | | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB | dB(A) | dB |
| 005 | 030 | keine MZ, keine Trenner | 55,1 | 4,4 | 54,4 | 3,1 | 56,0 | 4,9 | 54,3 | 3,7 | 53,8 | 3,2 | 54,3 | 4,4 |
| 037 | 031 | MZ, keine Trenner | 55,1 | 5,0 | 54,4 | 3,0 | 55,6 | 6,3 | 54,2 | 4,4 | 53,7 | 3,1 | 52,6 | 3,9 |
| 038 | 032 | MZ, keine Trenner | 54,8 | 4,9 | 54,3 | 3,0 | 54,2 | 4,0 | 54,2 | 4,3 | 54,2 | 4,4 | 52,7 | 3,9 |
| 023 | 030 | keine MZ, Trenner | 47,1 | 9,9 | 52,9 | 5,1 | 48,3 | 9,1 | 45,3 | 10,6 | 47,0 | 5,1 | 45,8 | 10,7 |
| 042 | 031 | MZ, Trenner | 49,7 | 8,3 | 54,3 | 4,2 | 51,6 | 5,5 | 48,1 | 8,0 | 49,4 | 3,8 | 49,2 | 5,7 |
| 043 | 032 | MZ, Trenner | 49,8 | 7,3 | 54,3 | 4,2 | 53,5 | 6,5 | 48,2 | 8,9 | 48,4 | 8,2 | 49,5 | 5,8 |
| 059 | 050 | Abstand, keine Trenner | 55,2 | 4,5 | 54,6 | 2,4 | 56,5 | 4,8 | 54,3 | 3,6 | 53,7 | 2,0 | 54,0 | 3,7 |
| 060 | 051 | Abstand, keine Trenner | 54,6 | 2,5 | 56,4 | 5,5 | 53,5 | 2,1 | 54,4 | 4,3 | 54,2 | 2,2 | 53,1 | 3,9 |
| 061 | 052 | Abstand, keine Trenner | 56,5 | 4,9 | 54,3 | 3,7 | 53,9 | 3,5 | | | | | | |
| 039 | 040 | MZ, kein Abstand, keine Trenner | 55,3 | 4,5 | 54,3 | 3,7 | 52,9 | 3,8 | | | | | | |
| 040 | 042 | MZ, Abstand, keine Trenner | 54,9 | 4,9 | 54,2 | 4,3 | 52,7 | 3,9 | | | | | | |
| 067 | 050 | Abstand, Trenner | 47,6 | 9,5 | 54,8 | 5,0 | 50,9 | 7,9 | 47,1 | 9,2 | 50,2 | 3,9 | 49,1 | 9,2 |
| 068 | 051 | Abstand, Trenner | 54,8 | 5,0 | 51,0 | 7,0 | 49,9 | 4,2 | 49,7 | 7,9 | 49,7 | 4,5 | 48,6 | 4,7 |
| 069 | 052 | Abstand, Trenner | 51,0 | 7,2 | 47,8 | 7,3 | 53,5 | 7,9 | | | | | | |
| 044 | 040 | MZ, kein Abstand, Trenner | 48,4 | 8,4 | 47,5 | 8,0 | 47,3 | 6,1 | | | | | | |
| 045 | 042 | MZ, Abstand, Trenner | 48,6 | 8,1 | 47,4 | 7,9 | 47,6 | 6,7 | | | | | | |
| 006 | 043 | MZ, kein Abstand, keine Trenner | 55,1 | 4,8 | 54,1 | 3,6 | 55,5 | 5,6 | 54,1 | 3,8 | 53,7 | 3,9 | 55,5 | 5,5 |
| 041 | 044 | MZ, Abstand, keine Trenner | 54,6 | 5,2 | 54,0 | 3,6 | 53,9 | 4,5 | 55,4 | 5,4 | 53,5 | 4,2 | 54,6 | 4,0 |
| 024 | 043 | MZ, kein Abstand, Trenner | 47,2 | 9,7 | 52,9 | 5,0 | 49,7 | 6,5 | 45,2 | 10,5 | 48,1 | 6,1 | 48,0 | 6,3 |
| 046 | 044 | MZ, Abstand, Trenner | 47,2 | 9,5 | 52,9 | 4,8 | 45,4 | 10,1 | 48,5 | 5,8 | 46,0 | 8,8 | 46,8 | 11,0 |
| 003 | 010 | kein Abstand, keine Trenner | 55,2 | 4,7 | 55,7 | 4,2 | 54,3 | 3,6 | 55,7 | 5,1 | 54,6 | 3,4 | 55,3 | 3,9 |
| 066 | 011 | Abstand, keine Trenner | 55,0 | 5,0 | 56,2 | 5,4 | 54,6 | 4,1 | 55,8 | 5,2 | 52,7 | 3,9 | 53,8 | 4,2 |
| 021 | 010 | kein Abstand, Trenner | 48,0 | 8,9 | 48,3 | 10,9 | 45,8 | 9,5 | 46,5 | 11,1 | 48,1 | 8,2 | 48,5 | 11,2 |
| 074 | 011 | Abstand, Trenner | 47,3 | 8,9 | 48,6 | 11,2 | 47,5 | 8,5 | 48,8 | 11,6 | 49,3 | 11,6 | 50,2 | 12,6 |

Nr. / G. lfd. Nummerierung Simulation / Nummerierung der Geometrie
L_{pAS4m} A-bewerteter Schalldruckpegel der Sprache in einem Abstand von 4 m [dB(A)]
D_{2S} räumliche Abklingrate der Sprache [dB]
farbliche Kennzeichnung für Einstufung der Schallausbreitungsparameter nach VDI 2569:
rot – < Stufe 3 / orange – Stufe 3 / gelb – Stufe 2 / grün – Stufe 1

Tabelle 20: Vergleich Abstand und Anordnung: Ergebnisse der Schallausbreitungsparameter

6.2.7 Allgemeine Zusammenhänge

Grundlegend war das Ziel die Untersuchung prinzipieller Maßnahmen, dennoch lohnt sich ein Blick auf möglicherweise allgemeinere Zusammenhänge, die sich aus den Daten ergeben könnten.

Betrachtet man die Gesamteinstufungen aus jeweils allen Messpfaden der einzelnen Geometrien sind keine generellen Abhängigkeiten zu beobachten. Da die Ausstattung der Büroflächen z.T. deutliche Unterschiede in horizontaler und vertikaler Schallausbreitungsrichtung aufweisen, verfehlen einige Messpfade eine Einstufung vollständig bzw. liegen deutlich unter anderen der gleichen Geometrie. Damit lässt sich auch keine Korrelation zwischen der erreichten Raumakustikklasse und einzelnen Parametern

herstellen. Bezogen auf einzelne Ausrichtungen der Messpfade, mit den jeweils untersuchten Variationen im Ausbreitungsweg, können sich aber gewisse Tendenzen abbilden.

Für die erste Gegenüberstellung in Abbildung 19 wurden gerade Messpfade herangezogen, in deren Ausbreitungsweg sich unterschiedliche Trennerhöhen befinden. Es wird deutlich, dass sich kein Zusammenhang zwischen der Grundfläche und den Schallausbreitungsparametern ergibt (gezeigt am Beispiel des $L_{p,A,S,4m}$). Die Ausdehnung der Bürofläche hat somit keine entscheidende Bedeutung bei der raumakustischen Auslegung oder Optimierung. Man erkennt hingegen deutlich die schon fast parallele Verschiebung durch die Erhöhung der Trenner. Es ist auch keine systematische Auswirkung der Arbeitsplatzdichte (also Grundfläche S pro Arbeitsplatz) zu erkennen (s. rechte Abbildung). Die Messpfade erreichen unabhängig von der Belegungsichte einen relativ vergleichbaren Wert für $L_{p,A,S,4m}$.

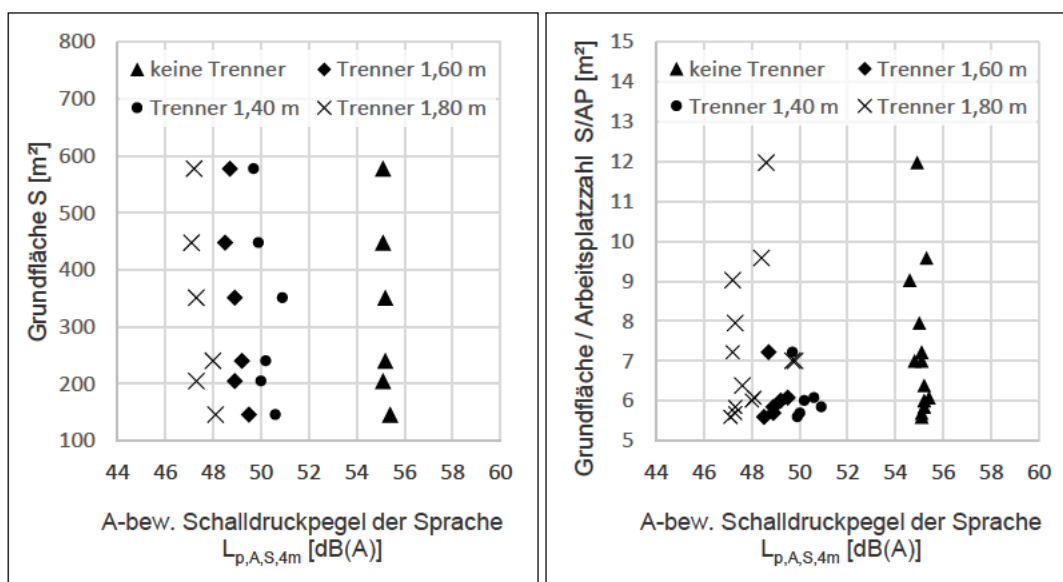


Abbildung 19: gerade Messpfade mit unterschiedlichen Trennerkonfigurationen, links: gegen Grundfläche, rechts: gegen Fläche pro Arbeitsplatz

In Abbildung 20 sind die Auswirkungen der Trennerhöhe, als Differenz aus der Höhe der Messpunkte h_{MP} ($= 1,20$ m) und der Höhe der Schirme (h) über dem jeweiligen Schallausbreitungsparameter dargestellt. Der Wert $-0,40$ m entspricht der Variante ohne Trenner (Tischhöhe von $0,80$ m). Horizontale Messpfade sind hierbei jene Pfade in deren Ausbreitungsrichtung an jedem Arbeitsplatz ein Trenner vorhanden war und sich die Änderung der Höhe auch am signifikantesten auswirkt. Die Streuung der Werte ist daher auch etwas geringer als bei den diagonal verlaufenden Pfaden. Der grundlegende Trend wird deutlich: wie zu erwarten ist mit steigender Trennerhöhe eine Minderung der Schallausbreitung zu beobachten.

Eine einfache lineare Regression unterstützt den Trend zahlenmäßig: Demnach ist mit einer Erhöhung der Schirme von 0,10 m entlang eines Messpfades mit einer Verbesserung von $L_{p,A,S,4m}$ von ca. 1 dB und von $D_{2,S}$ von ca. 0,5 dB zu rechnen. Für letzteres ist der lineare Zusammenhang schon nicht mehr ganz so stark, zu sehen am geringeren Bestimmtheitsmaß R^2 und der größer werdenden Streuung der Ergebnisse. Darüber hinaus ist für beide Werte zu erwarten, dass sich dieser Trend nicht unendlich fortsetzt. Spätestens im Bereich des Grenzfalles vollständiger Abschirmung wird kein linearer Zusammenhang mehr gelten. Zudem wurde auch nicht der Grenzbereich untersucht (Trennerhöhe von 1,00 m oder 1,20 m). Es könnte also auch sein, dass die Verbesserung ab einer gewissen Höhe sprunghaft eintritt, was sogar stark zu vermuten ist.

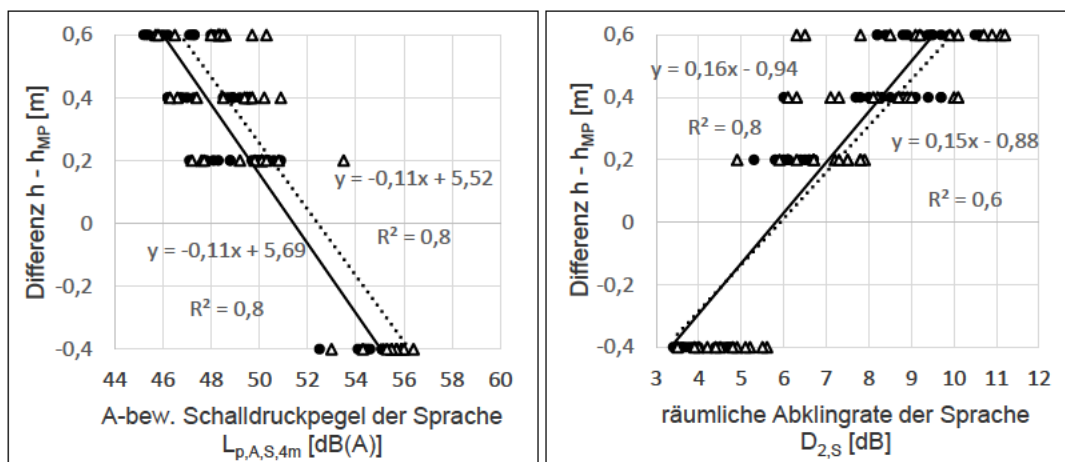


Abbildung 20: Messpfade mit unterschiedlichen Trennerhöhen,
Punkt, Volllinie: horizontale MPF / Dreieck, Punktlinie: vertikale MPF

Die Streuung der Daten ist auf andere Unterschiede zwischen den Modellen, insbesondere die Lage der jeweiligen Messpfade in der Geometrie zurückzuführen. Das zeigt sich relativ deutlich in Abbildung 21 am $L_{p,A,S,4m}$. Hier sind grundlegende Konfigurationen der Trenner nach ihrer akustischen Qualität sortiert (höhere Zahl ist besser) und über den Schallausbreitungsparametern aufgetragen. Es bilden sich zwei separate, einigermaßen parallel verlaufende Datenmengen aus. Die weiter links gelegenen Punkte sind Messpfade auf der Fläche, die rechten verlaufen an einer Wand. Es bestätigt sich die Feststellung aus der Auswertung, dass wandnahe Pfade tendenziell schlechter abschneiden als Pfade auf der Fläche. Darüber hinaus ist auch der Trend sichtbar, dass mit Vergrößerung der Trenner bzw. mit einer Erhöhung der Anzahl im Ausbreitungsweg sich eine deutliche Minderung der Schallausbreitung ergibt.

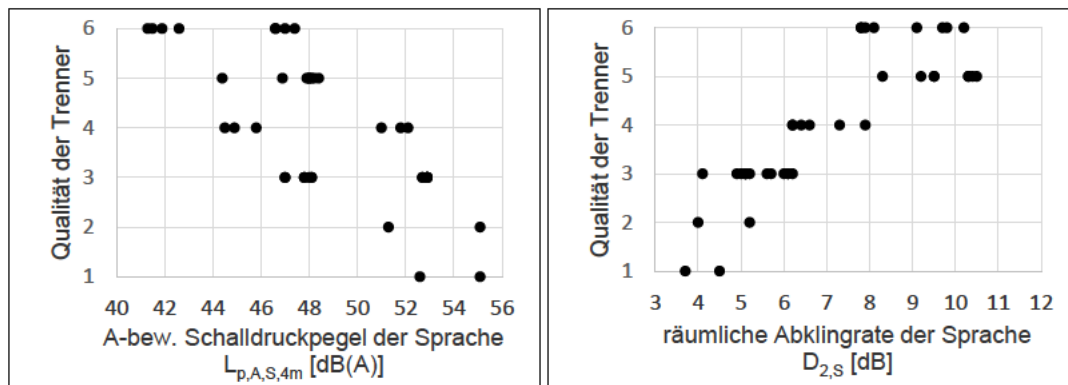


Abbildung 21: gerade verlaufende Messpfade Ausrichtung mit unterschiedlichen Konfigurationen, 1 – Trenner aller 3 AP / 2 – Trenner aller 3 AP + 0,6 m Überstand / 3 – Trenner aller 2 AP / 4 – Trenner aller 2 AP + 0,6 m Überstand / 5 – Trenner an jedem AP / 6 – Trenner an jedem AP + 0,6 m Überstand

Aus den Daten der Nachhallzeit wird sichtbar, dass die Grundfläche (bzw. das Volumen) mit der Nachhallzeit korrelieren, sobald keine Trenner im Modell sind. Dabei handelt es sich um einen bekannten raumakustischen Zusammenhang der bereits in der SABINEschen Formel abgebildet ist und hier keiner weiteren Erläuterung bedarf.

Zusammenfassend lässt sich sagen, die stärkste Korrelation ergibt sich zwischen den Schallausbreitungsparametern und der Anzahl und Höhe der Trenner, auch über unterschiedliche Geometrien hinweg. Das unterlegt, dass die Abschirmung einer der wichtigsten, wenn nicht gar der wichtigste Mechanismus für die raumakustische Auslegung von Mehrpersonenbüros großer Fläche ist. Eine generalisierende Aussage anhand eines einzelnen, einfachen Parameters wie Fläche, Arbeitsplatzzahl oder auch Schirmhöhe lässt sich aber nicht treffen, dafür bestehen zu große Abhängigkeiten zu anderen Faktoren.

6.2.8 Vergleich der Nachhallzeit zw. Simulation und Sabine

In Tabelle 21 sind die simulierten Nachhallzeiten für ausgewählte Szenarien den analytisch berechneten Nachhallzeiten (n. SABINE) gegenübergestellt.

Die größten Abweichungen ergeben sich für die Geometrien ohne Trenner, hier liegt die simulierte Nachhallzeit bei mittleren und hohen Frequenzen (500 bis 4000 Hz) um bis zu 0,29 s höher, bei tiefen Frequenzen (125 und 250 Hz) um bis zu 0,50 s. Die Geometrie der Räume genügt nicht den Bedingungen, die für die Berechnung nach SABINE gelten müssen. Es handelt sich um Flachräume, bei denen der Abstand zu den Wandflächen im Mittel deutlich größer ist als zu Boden und Decke. Daher sind die Laufzeiten (und somit auch die Nachhallzeit) für horizontale Reflexionen deutlich länger. Erst wenn durch die Trenner die freie Schallausbreitung in der horizontalen Ebene unterbrochen wird, liegen die simulierten Werte deutlich dichter an den berechneten.

In den übrigen Szenarien lassen sich die größten Abweichungen bei den Varianten ohne Wandabsorber bzw. nur mit Lamellenvorhängen feststellen. In diesen Fällen liegt die simulierte Nachhallzeit vereinzelt bis 0,20 s über dem Wert berechnet nach SABINE. Vor allem für wandnahe Messpunkte, ist die Absorption folglich nicht mehr gleichmäßig über den Raum verteilt, was aber Bedingung für die Anwendbarkeit der Formel nach SABINE ist. Damit kommt es zu Abweichungen gegenüber der analytisch berechneten Nachhallzeit, was sich dann auch in den gemittelten Werten niederschlägt. Teilweise liegt die simulierte Nachhallzeit aber auch geringfügig (bis 0,11 s) unter der Nachhallzeit nach SABINE. Da sich die Trenner immer verhältnismäßig nah an den Messpunkten bzw. der Quelle befinden, nimmt die Schallintensität schneller ab als durch die SABINESche Formel unterstellt und nähert sich damit den Werten nach EYRING an (vgl. Stephenson 2012, S. 5). Damit ist eine Abschätzung der Nachhallzeit mittels SABINE zumindest für Szenarien mit Trennern prinzipiell möglich und gemessen am Aufwand einer Simulation der Fehler vergleichsweise gering. Die Limitierungen der analytischen Berechnung (insbesondere die Gleichverteilung der Absorptionsfläche) müssen dabei aber immer bedacht werden.

| | | | gemittelte Nachhallzeit T_{20} [s] | | | | | | Nachhallzeit nach SABINE T_{Sabine} [s] | | | | | |
|--------------------------|-----|-----------------------------------|--------------------------------------|------|------|------|------|------|---|------|------|------|------|------|
| Oktavmittelfrequenz [Hz] | | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Nr. | G. | Konfiguration | | | | | | | | | | | | |
| 001 | 001 | keine Trenner | 0,90 | 0,55 | 0,38 | 0,33 | 0,31 | 0,30 | 0,79 | 0,57 | 0,39 | 0,34 | 0,29 | 0,25 |
| 003 | 010 | Wandabsorber, Lamellenvorhänge | 0,98 | 0,56 | 0,46 | 0,44 | 0,45 | 0,47 | 0,78 | 0,57 | 0,39 | 0,35 | 0,29 | 0,25 |
| 005 | 030 | MiWo-Raster-Decke | 1,28 | 0,93 | 0,63 | 0,58 | 0,55 | 0,55 | 0,78 | 0,60 | 0,41 | 0,36 | 0,31 | 0,26 |
| 007 | 001 | Trenner 1,4 m | 0,73 | 0,48 | 0,31 | 0,28 | 0,25 | 0,23 | 0,73 | 0,49 | 0,32 | 0,27 | 0,24 | 0,21 |
| 009 | 010 | Wandabsorber, Lamellenvorhänge | 0,67 | 0,46 | 0,30 | 0,26 | 0,24 | 0,25 | 0,72 | 0,49 | 0,32 | 0,27 | 0,24 | 0,21 |
| 011 | 030 | MiWo-Raster-Decke | 0,66 | 0,51 | 0,40 | 0,36 | 0,32 | 0,31 | 0,71 | 0,49 | 0,31 | 0,26 | 0,23 | 0,20 |
| 013 | 001 | Trenner 1,6 m | 0,68 | 0,45 | 0,29 | 0,25 | 0,22 | 0,19 | 0,72 | 0,47 | 0,30 | 0,26 | 0,23 | 0,20 |
| 015 | 010 | Wandabsorber, Lamellenvorhänge | 0,61 | 0,40 | 0,27 | 0,24 | 0,20 | 0,18 | 0,71 | 0,47 | 0,30 | 0,26 | 0,23 | 0,20 |
| 017 | 030 | MiWo-Raster-Decke | 0,59 | 0,43 | 0,31 | 0,29 | 0,26 | 0,22 | 0,69 | 0,46 | 0,30 | 0,25 | 0,22 | 0,19 |
| 019 | 001 | Trenner 1,8 m | 0,66 | 0,43 | 0,28 | 0,24 | 0,21 | 0,18 | 0,70 | 0,45 | 0,29 | 0,24 | 0,22 | 0,19 |
| 021 | 010 | Wandabsorber, Lamellenvorhänge | 0,59 | 0,39 | 0,25 | 0,22 | 0,19 | 0,17 | 0,70 | 0,45 | 0,29 | 0,24 | 0,22 | 0,19 |
| 023 | 030 | MiWo-Raster-Decke | 0,60 | 0,43 | 0,32 | 0,30 | 0,28 | 0,21 | 0,67 | 0,44 | 0,28 | 0,23 | 0,21 | 0,18 |
| 047 | 001 | Trenner 1,8 m | 0,68 | 0,55 | 0,43 | 0,42 | 0,38 | 0,34 | 0,75 | 0,52 | 0,33 | 0,28 | 0,25 | 0,22 |
| 049 | 010 | keine Wandabsorber | 0,64 | 0,48 | 0,35 | 0,34 | 0,34 | 0,32 | 0,73 | 0,50 | 0,32 | 0,27 | 0,24 | 0,21 |
| 051 | 030 | MiWo-Raster-Decke | 0,58 | 0,42 | 0,32 | 0,33 | 0,40 | 0,36 | 0,68 | 0,46 | 0,29 | 0,25 | 0,22 | 0,20 |
| 053 | 001 | Trenner 1,8 m | 0,67 | 0,46 | 0,30 | 0,24 | 0,21 | 0,20 | 0,71 | 0,48 | 0,31 | 0,26 | 0,23 | 0,20 |
| 055 | 010 | nur Lamellenvor- hänge | 0,60 | 0,40 | 0,26 | 0,22 | 0,19 | 0,17 | 0,70 | 0,47 | 0,30 | 0,25 | 0,22 | 0,20 |
| 057 | 030 | MiWo-Raster-Decke | 0,67 | 0,53 | 0,44 | 0,44 | 0,38 | 0,31 | 0,68 | 0,46 | 0,29 | 0,24 | 0,21 | 0,19 |
| 025 | 001 | Trenner 1,8 m | 1,07 | 0,58 | 0,38 | 0,31 | 0,25 | 0,20 | 1,11 | 0,57 | 0,37 | 0,30 | 0,26 | 0,23 |
| 027 | 010 | Wandabsorber, Lamellenvorhänge | 1,01 | 0,54 | 0,35 | 0,30 | 0,24 | 0,20 | 1,10 | 0,57 | 0,37 | 0,30 | 0,26 | 0,23 |
| 029 | 030 | Deckensegel | 1,00 | 0,57 | 0,40 | 0,34 | 0,27 | 0,23 | 1,10 | 0,57 | 0,36 | 0,29 | 0,25 | 0,22 |
| 031 | 001 | Trenner 1,8 m | 0,66 | 0,42 | 0,30 | 0,24 | 0,21 | 0,19 | 0,71 | 0,44 | 0,31 | 0,26 | 0,23 | 0,20 |
| 033 | 010 | Wandabsorber, Lamellenvorhänge | 0,58 | 0,36 | 0,26 | 0,23 | 0,20 | 0,18 | 0,69 | 0,44 | 0,31 | 0,26 | 0,23 | 0,20 |
| 035 | 030 | gelochte GK-Decke | 0,61 | 0,41 | 0,35 | 0,30 | 0,30 | 0,22 | 0,68 | 0,43 | 0,30 | 0,25 | 0,22 | 0,19 |

Nr. / G. ifd. Nummerierung Simulation / Nummerierung der Geometrie
 farbliche Kennzeichnung für Einstufung der Nachhallzeit nach VDI 2569:
 rot – < Klasse C / orange – Klasse C / gelb – Klasse B / grün – Klasse A

Tabelle 21: Vergleich Simulation und rechnerische Ermittlung der Nachhallzeit

6.3 Zusammenfassung und Designempfehlungen

Aus den Untersuchungen konnten die wichtigsten Maßnahmen für die raumakustische Ertüchtigung von Büroflächen ermittelt werden und welchen Einfluss sie im Rahmen bestimmter Layouts im Hinblick auf die Einstufung nach VDI 2569 haben. Die Zusammenstellung soll wie bereits eingangs erläutert den nachfolgenden fünf Punkten dienen:

- Präsentationsmaterial zur Information über notwendige Maßnahmen zur Einstufung nach VDI 2569
- Entscheidungsvorlage für Fachfremde zur Festlegung des Planungsziels
- Ermöglichen einer übersichtlichen Bewertung bestehender bzw. geplanter Layouts
- Vorlage für mögliche Maßnahmen zur Ertüchtigung
- Startpunkt für vertiefte raumakustische Auslegung bzw. Planung konkreter Layouts

Es können nachfolgend nur wesentliche Punkte abgehandelt werden. Einzelne Detailscheidungen müssen aufgrund der Vielzahl der Einflussparameter immer am konkreten Objekt getroffen werden, unterstützt von Simulationsmethoden der geometrischen Akustik. Gerade im Planungsprozess sind weitergehende Simulationen der konkreten Geometrie zur Validierung der Maßnahmen und insbesondere beim Nachweis im Rahmen einer Zertifizierung ohnehin erforderlich.

Aus den Untersuchungen konnten einige allgemeine Erkenntnisse abgeleitet werden, die nachfolgend noch einmal stichpunktartig zusammengefasst sind. Dabei bezieht sich die Angabe von Verbesserung immer auf den Sprachpegel $L_{p,A,S,4m}$, da dieser überwiegend der kritischere Parameter ist. Eine „Verbesserung“ meint damit eine Senkung von $L_{p,A,S,4m}$. Es gilt zu bedenken, dass die Beobachtungen für einzelne Messpfade und bei abweichenden Bedingungen anders ausfallen können.

Generelles:

- die Maßnahmen können nach ihrer Wirksamkeit wie folgt sortiert werden (von „am stärksten wirksam“ zu „am geringsten wirksam“): Trennerhöhe > Trennerdichte > Deckenabsorber > Wandabsorber > Abstand / Anordnung der Arbeitsplätze
- die Ausdehnung der Bürofläche und die Dichte der Arbeitsplätze hat keine maßgebliche Auswirkung auf die erzielte Raumakustikklasse (nur in Sonderfällen, s. „Abstand / Anordnung der Arbeitsplätze“)

- Wahl der Messpfade hat erhebliche Auswirkungen auf die Ergebnisse, wandnahe oder an Wand beginnende Messpfade sind überwiegend ungünstiger (1-5 dB) als Messpfade im Raum
- im ersten Schritt sollte immer die Schallausbreitung optimiert werden, die Nachhallzeit ist i.A. wesentlich unkritischer und lässt sich für die meisten Layouts entsprechend der Anforderungen anpassen
- für die überschlägige Auslegung der Nachhallzeit kann sich der Berechnung nach SABINE bedient werden, insbesondere dann, wenn Trenner vorhanden sind

Trenner:

- Trenner sind für eine Einstufung nach VDI 2569 immer notwendig, auch hohe raumakustische Maßnahmen ersetzen keine Abschirmung, Höhe und Anordnung der Trenner bestimmen dann die erzielte Klasse
- in Verbindung mit ausreichend schallabsorbierenden Decken sind keine raumhohen Trenner zum Erreichen der Raumakustikklasse A notwendig, eine Höhe von 1,80 m kann hier bereits ausreichen
- im Bereich von 1,20 bis 1,80 m Trennerhöhe führt jede Erhöhung um 20 cm zu einer Verbesserung von 1-2 dB
- Vergrößerung des Überstands der Trenner zwischen seitlich aneinandergrenzenden Arbeitsplätzen von 0,60 m auf 1,10 m ergibt eine Verbesserung von bis zu 4 dB (gerade Messpfade) oder bis 2 dB (diagonale Messpfade)
- sind in einer Richtung weniger als 5 Arbeitsplätze in einer Reihe angeordnet, sind in dieser Richtung Trenner nur für Klasse A notwendig (wegen sonst zu schlechter diagonalen Messpfade)
- wandnahe Messpfade erfordern häufig einen Trenner an jedem Arbeitsplatz, sonst wird keine Einstufung erzielt
- Erhöhung der Trennerdichte (von „aller zwei Arbeitsplätze“ zu „an jedem Arbeitsplatz“) führt zu einer Verbesserung um 1-3 dB (gerade Messpfade) bzw. bis 2 dB (diagonale Messpfade)

Deckenabsorber:

- hochabsorbierende ($\alpha_w \geq 0,80$) und vollflächige (ca. 80% Deckenfläche) Decke ist notwendig zum Erreichen der Raumakustikklasse A
- Wechsel von Deckensegel ($\alpha_w \geq 0,65$, 50% Deckenfläche) zu gelochter GK-Decke ($\alpha_w \geq 0,65$, 80 % Deckenfläche): Verbesserung bis 2 dB

- Wechsel von Deckensegel ($\alpha_w \geq 0,65$, 50% Deckenfläche) zu Mineralfaser-Rasterdecke ($\alpha_w \geq 0,80$, 80 % Deckenfläche): Verbesserung bis 3 dB
- Deckenabsorber sind grundlegend notwendig, damit Abschirmung hinreichend funktionieren kann, Optimierungen bei den Deckenabsorbern haben aber nicht so großes Potenzial wie eine Anpassung der Trenner

Wandabsorber:

- Einfluss von Lamellenvorhängen ($\alpha_w \geq 0,20$) vor Fenstern: Verbesserung bis 0,5 dB
- Einfluss von Wandabsorbern ($\alpha_w \geq 0,75$): Verbesserung bis 1,5 dB (Messpfad wandnah) bzw. 1 dB (Messpfad im Raum)
- in kleinen Geometrien sind Wandabsorber tendenziell etwas wirkungsvoller
- Wandabsorber können ausschlaggebend sein, bei z.B. knappen Unterschreitungen eines Zielwertes

Abstand / Anordnung der Arbeitsplätze:

- Wirkung von Abstand der Arbeitsplätze ist relativ gering, ohne Abschirmung lässt sich über Abstand generell keine Einstufung nach VDI 2569 erzielen
- durch spezifische Anordnung von Arbeitsplätzen können bestimmte (z.B. ungünstige) Messpfade entfernt werden, sodass höhere Gesamt-Einstufungen erzielt oder ggf. Trenner reduziert werden können (Hinweis: insgesamt ist dieses Vorgehen aber stark vom individuellen Layout abhängig, es wird zudem keine „echte“ Verbesserung der raumakustischen Situation erreicht, sondern lediglich das Auswerteverfahren der VDI 2569 zum Vorteil einer besseren Einstufung ausgenutzt)

Aus den Untersuchungen wurden für verschiedene Flächen Steckbriefe entwickelt, welche die notwendigen Maßnahmen zum Erreichen einer bestimmten Raumakustikklasse zusammenfassen. Diese sind aus Gründen der Übersicht in Anlage 2 dargestellt.

Verschiedene Grundlayouts, die sich von der Einstufung her ähnlich verhalten, wurden entsprechend in einem Steckbrief zusammengefasst. Die beschriebenen Ausstattungen sind möglichst auf effiziente (und möglichst geringe) Maßnahmen optimiert. Es werden in den Steckbriefen auch gewisse Wahlmöglichkeiten bzgl. der Ausstattung dargestellt. Für die Raumakustikklasse A sind i.A. alle Maßnahmen notwendig, im Falle von Raumakustikklasse B und C können aber gezielt bestimmte Maßnahmen optimiert

und dafür andere reduziert werden, sodass z.B. keine Wandabsorber oder nur eine Akustikdecke in Teilbereichen der Deckenfläche notwendig wird.

In dieser Form können die Steckbriefe genutzt werden, um konkrete Fragen im Planungsprozess zu klären. Zur Verdeutlichung werden nachfolgend zwei Beispiele angeführt.

Fragestellung für Beispiel 1: Eine Bürofläche (4 x 6 Arbeitsplätze) soll für die Zertifizierung Raumakustikklasse B erreichen, vom Nutzer sind möglichst niedrige Trennwände gewünscht. Mit welchen Maßnahmen ist zu rechnen?

Antwort: Gemäß Anlage 2: Steckbrief 1, Klasse B – Variante 3 können Trenner mit 1,60 m Höhe für Klasse B eingesetzt werden. Zusätzlich ist es notwendig, Lamellenvorhänge vor Fenstern sowie Wandabsorber und eine vollflächig absorbierende Decke einzusetzen.

Fragestellung für Beispiel 2: Es können auf einer Bürofläche (6 x 8 Arbeitsplätze) nur Deckensegel als akustisch wirksame Decke eingesetzt werden. Was ist notwendig um dennoch eine Einstufung nach VDI 2569 zu erreichen?

Antwort: Nach Anlage 2: Steckbrief 3, Klasse C – Variante 2 sollte unter Berücksichtigung der Deckensegel in Verbindung mit 1,80 m hohen Trennern, Wandabsorbern und Lamellen vor Fensterflächen zumindest die Raumakustikklasse C erreichbar sein.

Alle Designempfehlungen können in ihrer Gesamtheit der Anlage 2 entnommen werden. Da eine große Abhängigkeit der Ergebnisse von der Wahl der Messpfade festgestellt werden konnte, wird für die allgemeinen Vorgaben davon ausgegangen, dass die Messpfade ähnlich ausgewogen wie in den Simulationen im Rahmen dieser Arbeit gewählt werden.

7 Diskussion und Fazit

Aus der Untersuchung der unterschiedlichen Bürolayouts und ihrer jeweiligen Varianten konnten einige allgemein gültige Mechanismen identifiziert und in einem gewissen Rahmen auch quantifiziert werden. Entsprechende Designansätze um die Zielwerte der VDI 2569 umzusetzen konnten entwickelt werden. Der dabei entstandene Katalog kann zu Präsentationszwecken und als Startpunkt für Auslegung oder Optimierung von Büroflächen sowie als Entscheidungsvorlage dienen.

Grundsätzlich ist durch die hohe Zahl an möglichen Einflussfaktoren der potenziell vielfältigen Kombinationen aus Geometrie, Messpfadwahl und unterschiedlicher Ausstattung eine endgültige und grundlegende Systematisierung kaum erreichbar. Der Fokus dieser Arbeit lag nicht darauf, die Berechnung mittels geometrischer Akustik als Werkzeug für die Planung zu ersetzen, sondern eine Begleitung an verschiedenen Stellen des Planungsprozesses mittels allgemeiner Richtlinien zu schaffen. Für das endgültige Konzept bzw. im Rahmen einer Zertifizierung ist in jedem Fall ein Nachweis durch Simulation zu führen.

Es ist zudem denkbar, dass konkrete Planungen keine ausreichende Übereinstimmung mit den Layouts dieser Arbeit haben und somit nicht verglichen werden können oder sich vermeintlich passende Layouts als unzureichende Näherung herausstellen. Am Ende ist daher immer die konkrete raumakustische Simulation maßgeblich für die Beurteilung einer spezifischen Planung.

Generell muss immer beachtet werden, dass der systematische Fehler durch Simulation mit Methoden der geometrischen Akustik je nach Qualität der Eingangsdaten auch größer ausfallen kann. Im Rahmen dieser Arbeit wurde nicht untersucht, mit welcher Präzision die Ergebnisse auf reale Situationen übertragbar sind. Diese Form der raumakustischen Planung hat sich in der Praxis als anerkanntes Mittel durchgesetzt, kann aber nur bei sorgfältiger Ausführung zu hinreichend genauen Ergebnissen führen.

Die Arbeit hat zudem Ausblick auf weitere Schwerpunkte der raumakustischen Planung von Büroräumen gegeben. Gerade eine systematische Untersuchung zur Auswahl der Messpfadwahl und ihrer Auswirkungen auf das Ergebnis erscheint sinnvoll. Dabei könnten auch alternative Auswerteverfahren zur VDI 2569 eine Rolle spielen, wie etwa eine rasterförmige Auswertung der Schallausbreitungsparameter für alle Arbeitsplätze, um den Einfluss einzelner Messpfade zu verringern. In dieser Hinsicht besteht noch Potenzial zur Optimierung und für weiterführende Untersuchungen.

Literaturverzeichnis

- Aspöck u.a. 2020 Aspöck, L., Ackermann, D., Brinkmann, Vorländer, M. & Weinzierl, S. (2020) Benchmark for Room Acoustical Simulation (BRAS)– Documentation of the database, Berlin, Technische Universität Berlin.
- Aspöck u.a. 2022 Aspöck, L., Brinkmann, F., Ackerman, D., Weinzierl, S., Vorländer, M. (2022) GRAS—Ground truth for room acoustical simulation, abrufbar unter: <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/7506.3> (letzter Aufruf 25.06.2022), Technische Universität Berlin.
- ASR A1.2 Arbeitsstättenverordnung, Technische Regeln für Arbeitsstätten (2022) A1.2 - Raumabmessungen und Bewegungsflächen, Dortmund, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).
- ASR A1.8 Arbeitsstättenverordnung, Technische Regeln für Arbeitsstätten (2022) A1.8 - Verkehrswege, Dortmund, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).
- ASR A2.3 Arbeitsstättenverordnung, Technische Regeln für Arbeitsstätten (2022) A2.3 - Fluchtwege und Notausgänge, Dortmund, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).
- ASR A3.7 Arbeitsstättenverordnung, Technische Regeln für Arbeitsstätten (2022) A3.7 - Lärm, Dortmund, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).
- Beranek u.a. 1998 Beranek, L. L., Okano, T., Hidaka, T. (1998) Relations among interaural cross-correlation coefficient (IACCE), lateral fraction (LFE), and apparent source width (ASW) in concert halls, *J. Acoust. Soc. Am.* 104, 255-265.
- Brinkmann u.a. 2019 Brinkmann, F., Aspöck, L., Ackermann, D., Lepa, S., Vorländer, M. & Weinzierl, S. (2019) A round robin on room acoustical simulation and auralization, Aachen, Universitätsbibliothek der RWTH Aachen.
- CATT-A 2022 CATT-Acoustic v9.1g (2022) User's Manual CATT-Acoustic, Gothenburg.
- Cox u.a. 2006 Cox, T. J., Dalenbäck, B.-I., D'Antonio, P. J., Embrechts, J., Jeon, J. Y., Mommertz., E., Vorländer, M. (2006) A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces, *Acta Acustica* 95, 1-15.
- Dalenbäck 2010 Dalenbäck, B.-I. (2010) Engineering principles and techniques in room acoustics prediction, Proceedings of the Baltic-Nordic Acoustic Meeting, Bergen, BNAM.
- Dalenbäck 2016 Dalenbäck, B.-I. (2016) Whitepaper regarding diffraction, Gothenburg.
- Dalenbäck 2021 Dalenbäck, B.-I. (2016) Whitepaper: What ist Geometrical Acoustics (GA), Gothenburg.

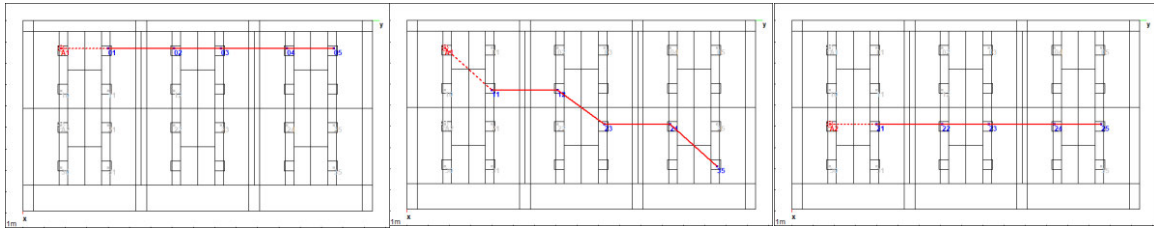
-
- DEGA
BR 0107 Nocke, C. (2021) Memorandum zur ASR A3.7 "Lärm" und den anerkannten Regeln der Technik in der Raumakustik, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.
- DGNB 2022 Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2022) Das DGNB-System, abrufbar unter: <https://www.dgnb-system.de/de/> (letzter Aufruf: 27.12.2022).
- DGNB
SOC 1.3 Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2018) SOC 1.3 Akustischer Komfort, DGNB.
- DGUV 2016 Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2016) Büroraumplanung - Hilfen für das systematische Planen und Gestalten von Büros, DGUV Information 215-441.
- DIN 18041 Deutscher Normenausschuss (2016) Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung: DIN 18041, Berlin, Beuth.
- DIN EN
12354-6 Deutscher Normenausschuss (2004) Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 6: Schallabsorption in Räumen: DIN EN 12354-6, Berlin, Beuth.
- DIN EN ISO
3382-1 Deutscher Normenausschuss (2009) Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 1: Aufführungsräume: DIN EN ISO 3382-1, Berlin, Beuth.
- DIN EN ISO
3382-2 Deutscher Normenausschuss (2008) Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen: DIN EN ISO 3382-2, Berlin, Beuth.
- DIN EN ISO
3382-3 Deutscher Normenausschuss (2022) Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 3: Großraumbüros: DIN EN ISO 3382-3, Berlin, Beuth.
- DIN EN ISO
354 Deutscher Normenausschuss (2003) Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen: DIN EN ISO 354, Berlin, Beuth.
- Fuchs,
Muschiol
2013 Fuchs, W. and Muschiol, R. (2013) Büroarchitektur im globalen Wettbewerb, In: Schittich, C., Lenzen, S., Karst, S., Linder, M. and Schönbrunner, E. ed. best of Detail: Büro/Office: Ausgewählte Büro-Highlights aus DETAIL, München, DETAIL, 27-31
- Gasser 2013 Gasser, M. (2013) Wie weiter im Bürobau? Zwölf Thesen, In: Schittich, C., Lenzen, S., Karst, S., Linder, M. and Schönbrunner, E. ed. best of Detail: Büro/Office: Ausgewählte Büro-Highlights aus DETAIL / Selected office highlights from DETAIL. München: DETAIL, pp. 20-26.
- Ingerslev,
Petersen
1953 Ingerslev, F., Petersen, J. (1953) Lydabsorberende Materialer, Arkitekstens Ugehefteno 3.

- Klaffke 2016 Klaffke, M (Hg.) (2016) Arbeitsplatz der Zukunft: Gestaltungsansätze und Good-Practice-Beispiele, Wiesbaden, Springer Gabler.
- Kristensen 1984 Kristensen, J. (1984) Sound Absorption Coefficients - Measurement, evaluation, application, Note no. 45, Hørsholm, Statens Byggeforskningsinstitut.
- Krokstad u.a. 1968 Krokstad, A., Strom, S., Sørsdal, S. (1968) Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique, Journal of Sound and Vibration v8 Issue 1, 118-125.
- Kuttruff 2000 Kuttruff, H. (2000) Room Acoustics, Aachen, Institut für Technische Akustik, Technische Hochschule Aachen.
- Lokki u.a. 2008 Lokki, T., Pulkki, V., Calamia, P. T. (2008) Technical note, Measurement and modeling of diffraction from an edge of a thin panel, Applied Acoustics 69, 824–832.
- Müller, Möser 2004 Müller, G. Möser, M. (Hg.) (2004) Taschenbuch der Technischen Akustik, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin.
- Neufert u.a. 2019 Neufert, E., Kister, J., Lohmann, M., Merkel, P. & Brockhaus, M. (2019) Bauentwurfslehre: Grundlagen, Normen, Vorschriften über Anlage, Bau, Gestaltung, Raumbedarf, Raumbeziehungen, Maße für Gebäude, Räume, Einrichtungen, Geräte mit dem Menschen als Maß und Ziel : Handbuch für den Baufachmann, Bauherrn, Lehrenden und Lernenden, Wiesbaden, Springer Vieweg.
- Nocke 2017 Nocke, C. (2017) Akustikmöbel - Modellierung zur Simulation, Lärmbekämpfung 12/6, 199-202.
- Nocke, Victora 2019 Nocke, C., Victora, J. (2019) VDI 2569:2019 Neue Klassifizierung für Büro-Raumakustik, Lärmbekämpfung 14/6, 190-197.
- Oswald 2013 Oswald, A. (2013) Bürobauten: Handbuch und Planungshilfe, Berlin, DOM.
- Pierce 2019 Pierce, A. D. (2019) Acoustics An Introduction to Its Physical Principles and Applications, Cham, Springer Nature Switzerland AG.
- Probst 2015 Probst, W. (2015) Neue Techniken bei der schalltechnischen Planung von Bürolandschaften, DAGA 2015.
- PTB 2022 Physikalisch-Technische Bundesanstalt (2022) Absorption Coefficient Database, abrufbar unter: <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt1/fb-16/ag-163/absorption-coefficient-database.html> (letzter Aufruf: 27.12.2022).
- Radoi 2011 Radoi, N. (2011) Einfluss des Mobiliars auf die Nachhallzeit eines Raumes, Diplomarbeit, Mittweida, Hochschule Mittweida University of Applied Sciences.

- Savioja 2016 Savioja, L. (2016) Interactiveacoustics, abrufbar unter: <http://interactiveacoustics.info/html> (letzter Aufruf: 27.12.2022).
- Savioja, Svensson 2015 Savioja, L., Svensson, U. P. (2015) Overview of geometrical room acoustic modeling techniques, J. Acoust. Soc. Am. 138, 708.
- Savioja, Xiang 2019 Savioja, L., Xiang, N. (2019) Introduction to the Special Issue on Room Acoustic Modeling and Auralization, J. Acoust. Soc. Am. 145, 2597.
- Schanda u.a. 2009 Schanda, U., Schröder, E., Wulff, S. (2009) Schallschutz u. Raumakustik in Großraumbüros, Bauphysik Kalender, Berlin, Ernst&Sohn.
- Schroeder, Pohl 2013 Schroeder, D., Pohl, A. (2013) Modeling (Non-)uniform scattering distributions in geometrical acoustics, Proc. Meet. Acoust. 19.
- Simmons 2016 Simmons, C. (2016) New ratings in ISO 11654 of plane sound absorbers made for speech communication in classrooms and meeting rooms, InterNoise 2016.
- Sinambari, Sentpali 2014 Sinambari, G. R., Sentpali, S. (2014) Ingenieurakustik: Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele, Wiesbaden, Springer Vieweg.
- Smardzewski u.a. 2015 Smardzewski, J., Kamisiński, T., Dziurka, D., Mirski, R., Majewski, A., Flach, A., Pilch, A. (2015) Sound absorption of wood-based materials, Holzforschung 04/15.
- Staniek 2005 Staniek, B., Staniek, C. (2013) Typologie der Büroorganisationsformen, In: Schittich, C., Lenzen, S., Karst, S., Linder, M. and Schönbrunner, E. ed. best of Detail: Büro/Office: Ausgewählte Büro-Highlights aus DETAIL / Selected office highlights from DETAIL. München: DETAIL, pp. 32-51.
- Stephenson 2012 Stephenson, U. M. (2012) Different assumptions - different reverberation formulae, Hamburg, InterNoise 2012.
- Svensson u.a. 1999 Svensson, U. P., Fred, R. I., Vanderkoy, J. (1999) An Analytical Secondary Source Model of Edge Diffraction Impulse Responses J. Acoust. Soc. Am. 106, 2331-2344.
- TUCT 2022 TUCT TM v2.0g:1 (2022) User's Manual TUCT, Gothenburg.
- VDI 2569 Verein Deutscher Ingenieure (2019) VDI 2569, Schallschutz und akustische Gestaltung in Büros, Berlin, Beuth Verlag GmbH.
- Vorländer 2013 Vorländer, M. (2013) Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties, J. Acoust. Soc. Am. 133, 1203.
- Vorländer 2020 Vorländer, M. (2020) Auralization: Fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality, Cham, Springer Nature Switzerland AG.

-
- Weigand, Stephenson 2016 Weigand, S., Stephenson, U. M. (2016) On the influence of different scattering implementations on the sound level distribution and reverberation time within sound particle simulations, DAGA 2016.
- Zwicker 1982 Zwicker, E. (1982) Psychoakustik, Berlin, Springer.

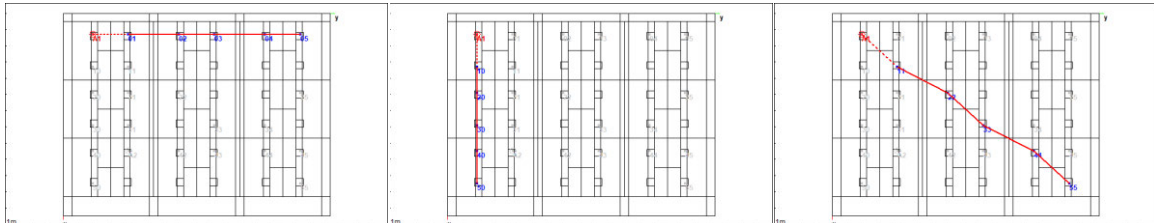
Anlage 1 – Übersicht der Messpfade



Geometrie 001: Messpfad 1

Geometrie 001: Messpfad 2

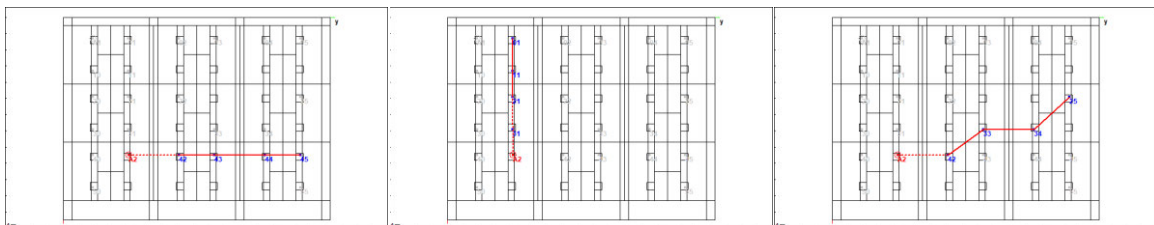
Geometrie 001: Messpfad 3



Geometrie 003: Messpfad 1

Geometrie 003: Messpfad 2

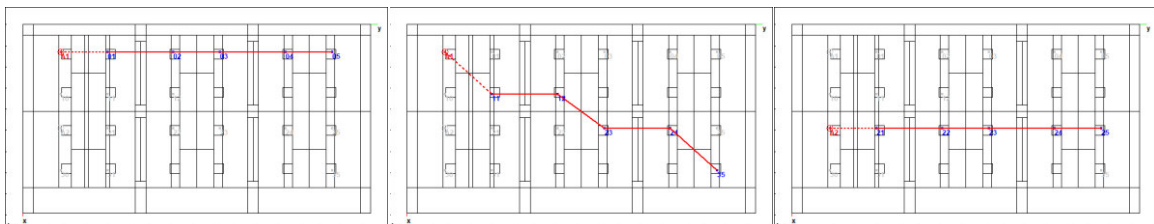
Geometrie 003: Messpfad 3



Geometrie 003: Messpfad 4

Geometrie 003: Messpfad 5

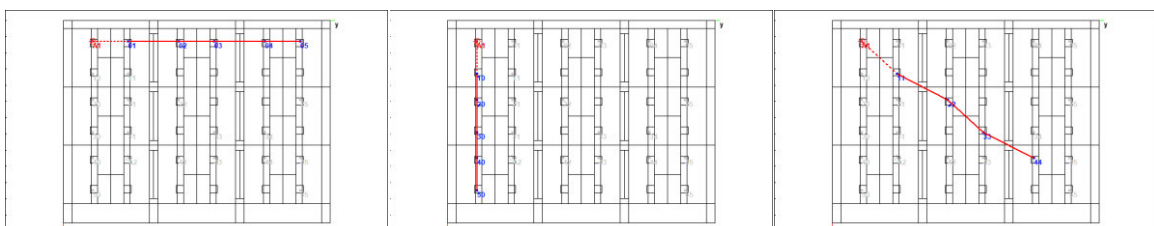
Geometrie 003: Messpfad 6



Geometrie 004: Messpfad 1

Geometrie 004: Messpfad 2

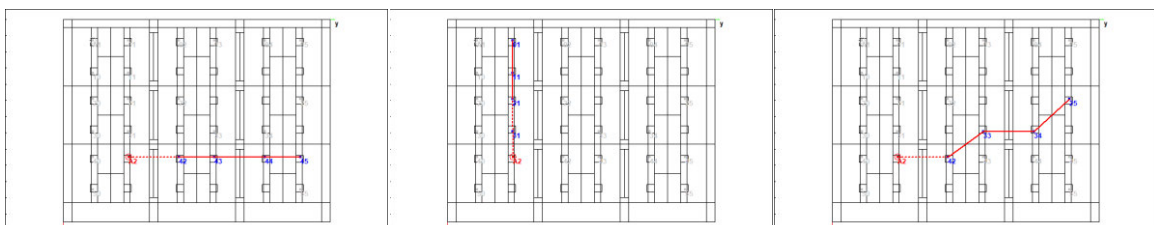
Geometrie 004: Messpfad 3



Geometrie 005: Messpfad 1

Geometrie 005: Messpfad 2

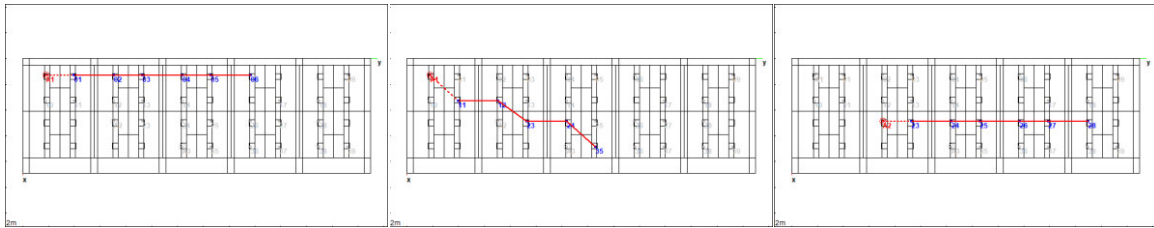
Geometrie 005: Messpfad 3



Geometrie 005: Messpfad 4

Geometrie 005: Messpfad 5

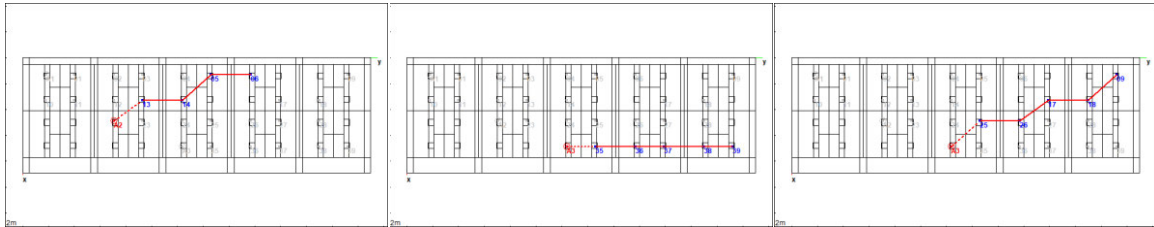
Geometrie 005: Messpfad 6



Geometrie 010: Messpfad 1

Geometrie 010: Messpfad 2

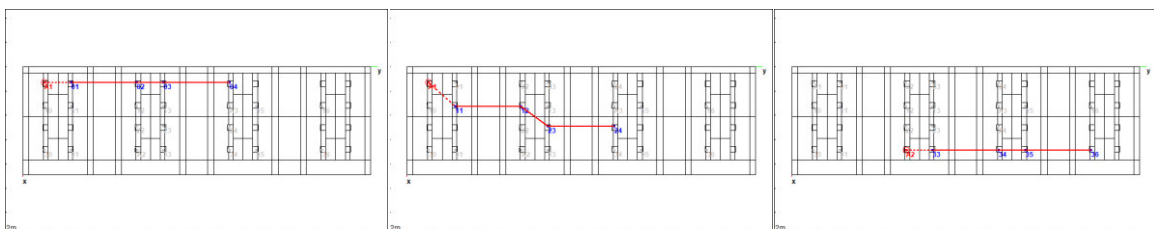
Geometrie 010: Messpfad 3



Geometrie 010: Messpfad 4

Geometrie 010: Messpfad 5

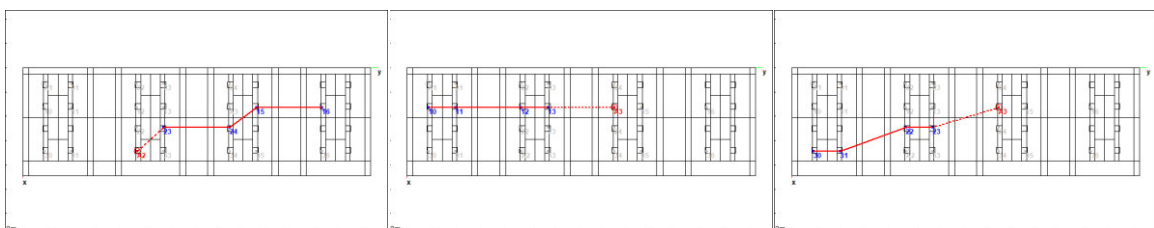
Geometrie 010: Messpfad 6



Geometrie 011: Messpfad 1

Geometrie 011: Messpfad 2

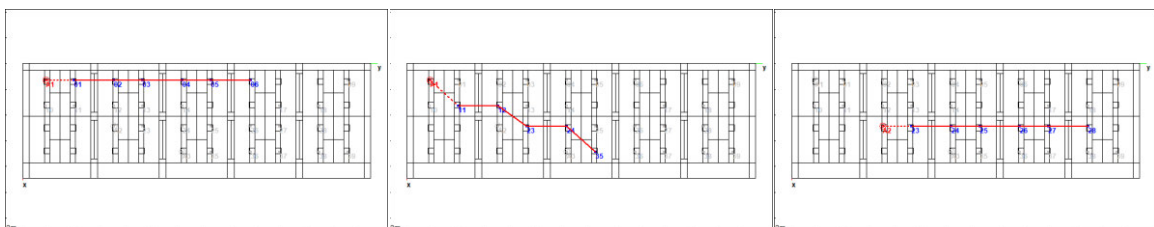
Geometrie 011: Messpfad 3



Geometrie 011: Messpfad 4

Geometrie 011: Messpfad 5

Geometrie 011: Messpfad 6



Geometrie 012: Messpfad 1

Geometrie 012: Messpfad 2

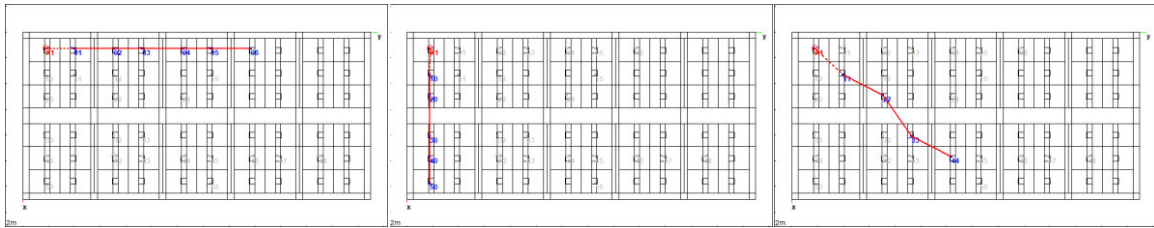
Geometrie 012: Messpfad 3



Geometrie 012: Messpfad 4

Geometrie 012: Messpfad 5

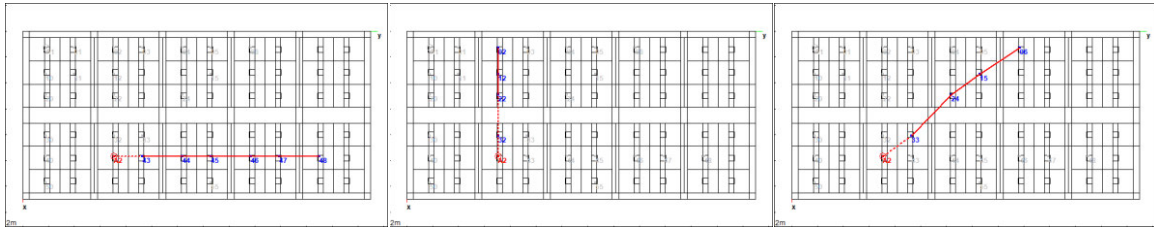
Geometrie 012: Messpfad 6



Geometrie 020: Messpfad 1

Geometrie 020: Messpfad 2

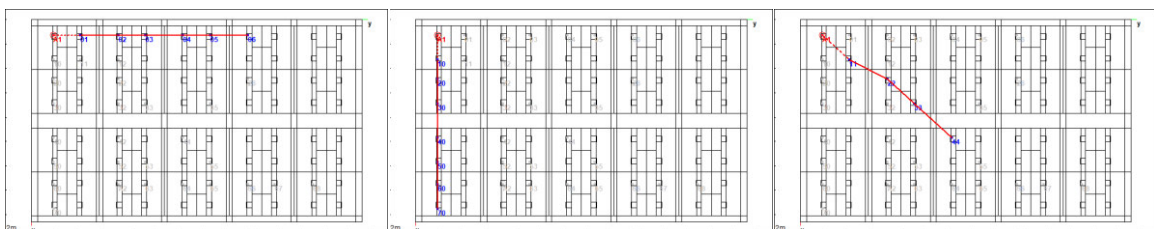
Geometrie 020: Messpfad 3



Geometrie 020: Messpfad 4

Geometrie 020: Messpfad 5

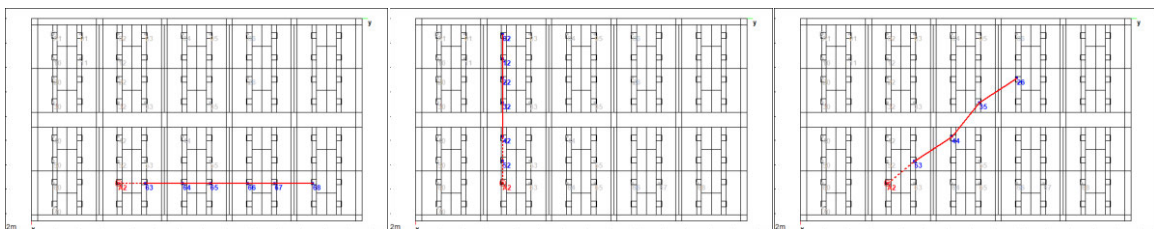
Geometrie 020: Messpfad 6



Geometrie 030: Messpfad 1

Geometrie 030: Messpfad 2

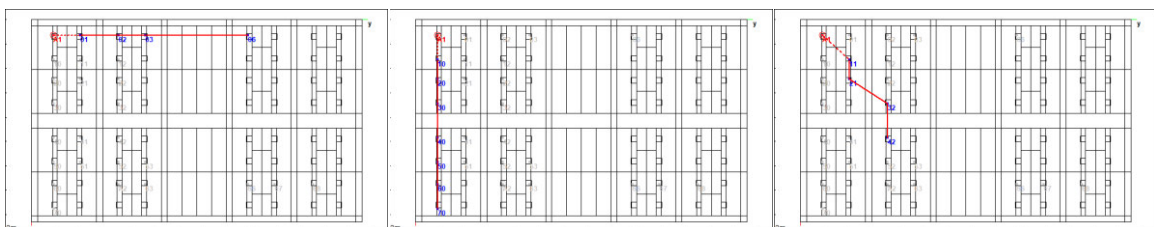
Geometrie 030: Messpfad 3



Geometrie 030: Messpfad 4

Geometrie 030: Messpfad 5

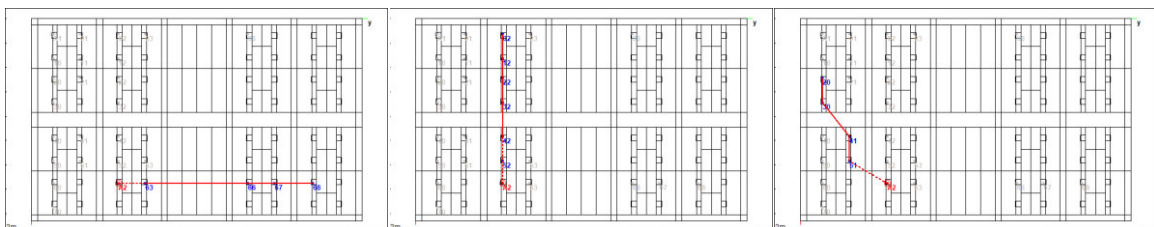
Geometrie 030: Messpfad 6



Geometrie 031: Messpfad 1

Geometrie 031: Messpfad 2

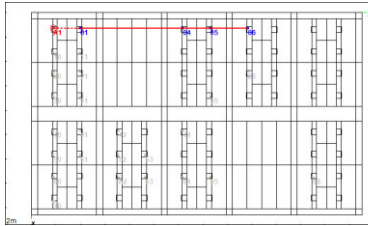
Geometrie 031: Messpfad 3



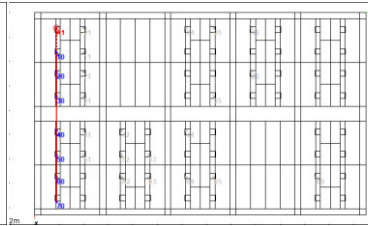
Geometrie 031: Messpfad 4

Geometrie 031: Messpfad 5

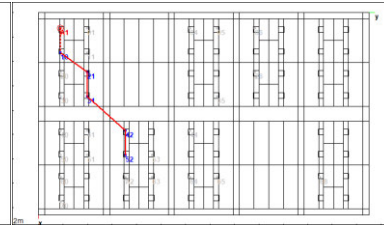
Geometrie 031: Messpfad 6



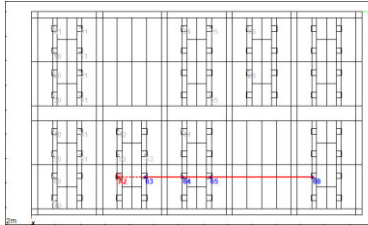
Geometrie 032: Messpfad 1



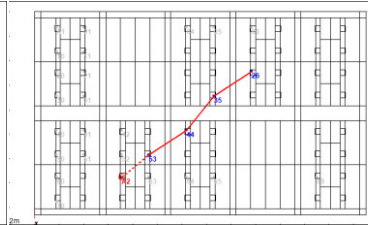
Geometrie 032: Messpfad 2



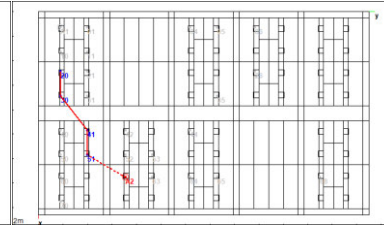
Geometrie 032: Messpfad 3



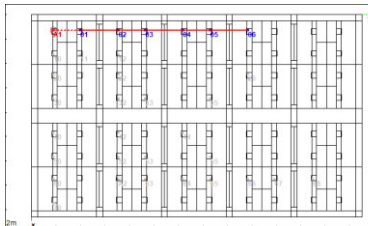
Geometrie 032: Messpfad 4



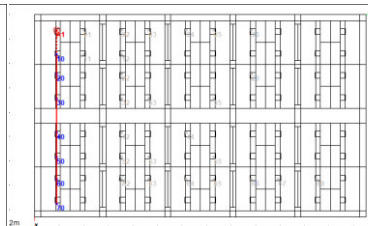
Geometrie 032: Messpfad 5



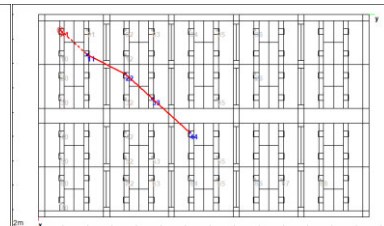
Geometrie 032: Messpfad 6



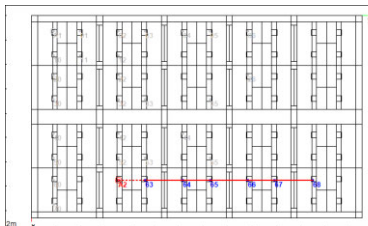
Geometrie 033: Messpfad 1



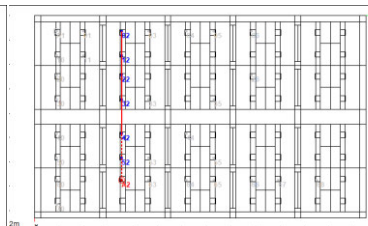
Geometrie 033: Messpfad 2



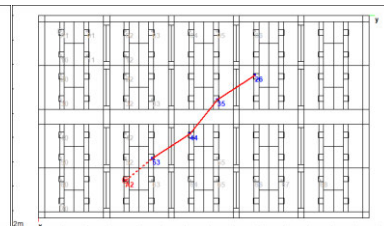
Geometrie 033: Messpfad 3



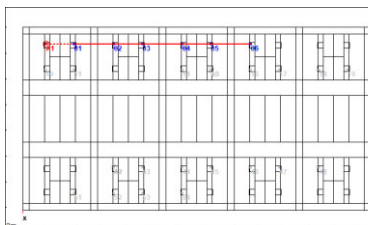
Geometrie 033: Messpfad 4



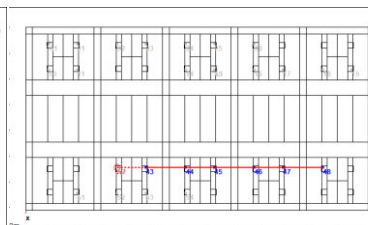
Geometrie 033: Messpfad 5

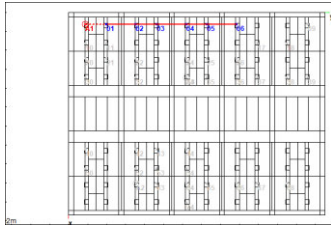


Geometrie 033: Messpfad 6

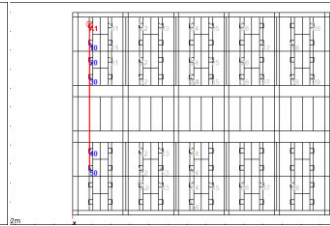


Geometrie 040: Messpfad 1

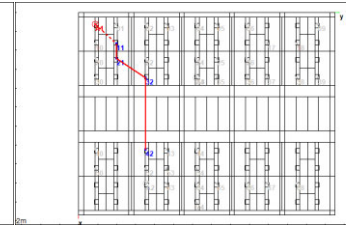




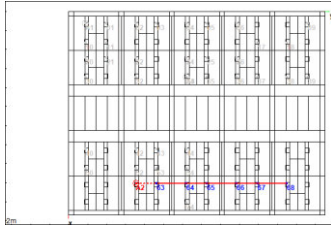
Geometrie 043: Messpfad 1



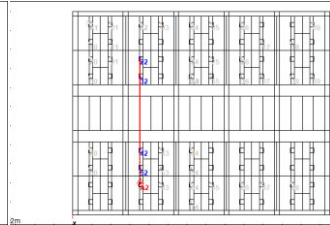
Geometrie 043: Messpfad 2



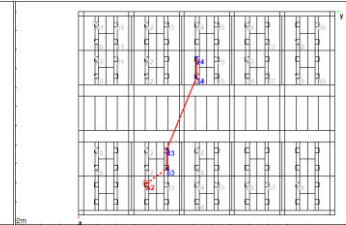
Geometrie 043: Messpfad 3



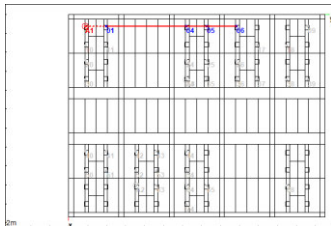
Geometrie 043: Messpfad 4



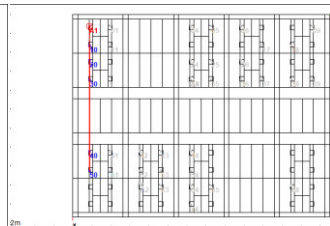
Geometrie 043: Messpfad 5



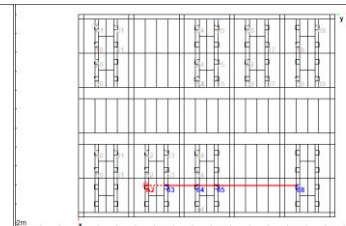
Geometrie 043: Messpfad 6



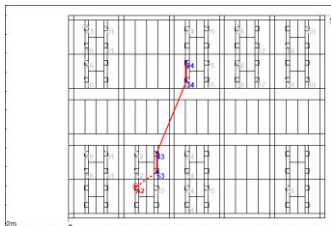
Geometrie 044: Messpfad 1



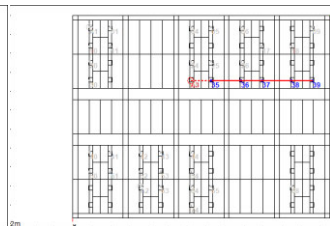
Geometrie 044: Messpfad 2



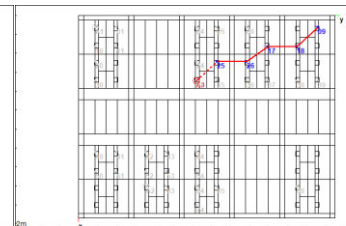
Geometrie 044: Messpfad 3



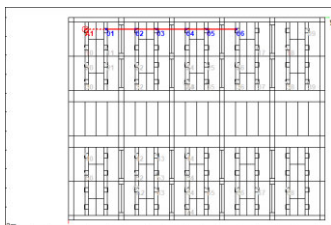
Geometrie 044: Messpfad 4



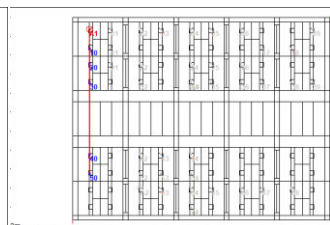
Geometrie 044: Messpfad 5



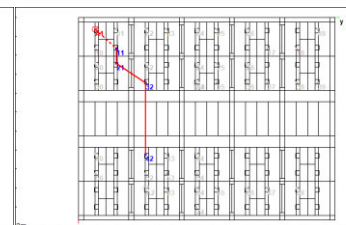
Geometrie 044: Messpfad 6



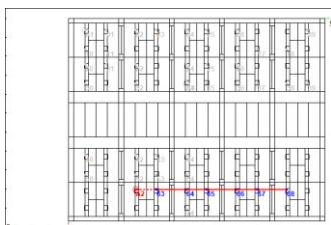
Geometrie 045: Messpfad 1



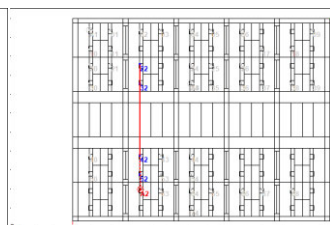
Geometrie 045: Messpfad 2



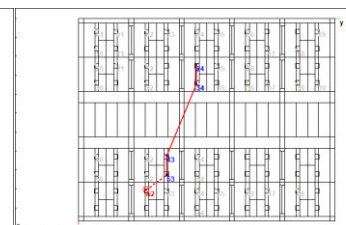
Geometrie 045: Messpfad 3



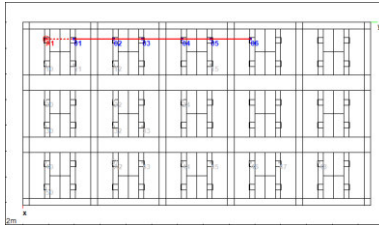
Geometrie 045: Messpfad 4



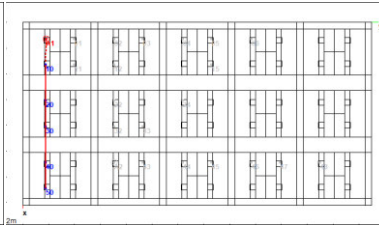
Geometrie 045: Messpfad 5



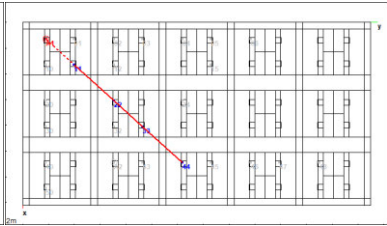
Geometrie 045: Messpfad 6



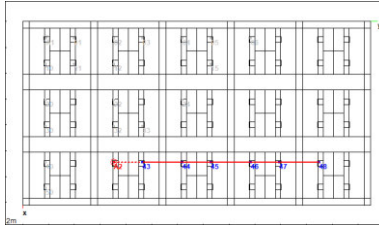
Geometrie 050: Messpfad 1



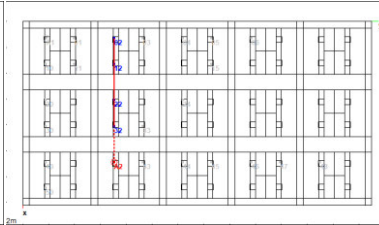
Geometrie 050: Messpfad 2



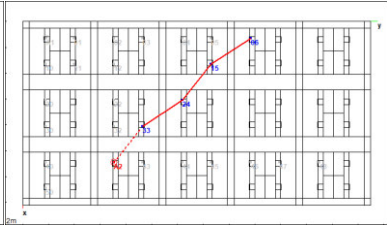
Geometrie 050: Messpfad 3



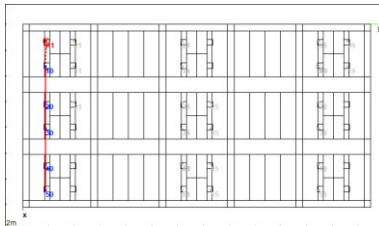
Geometrie 050: Messpfad 4



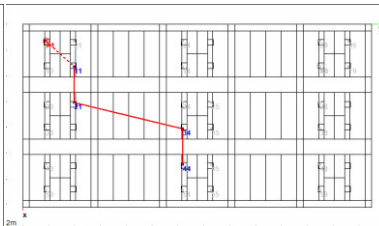
Geometrie 050: Messpfad 5



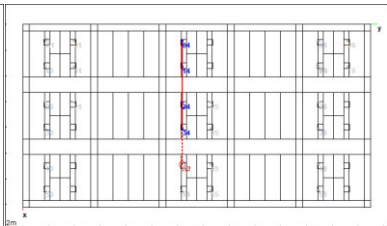
Geometrie 050: Messpfad 6



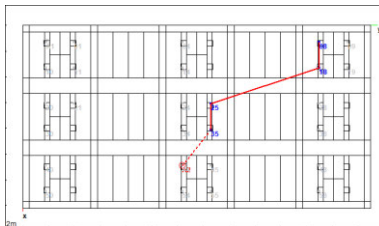
Geometrie 051: Messpfad 1



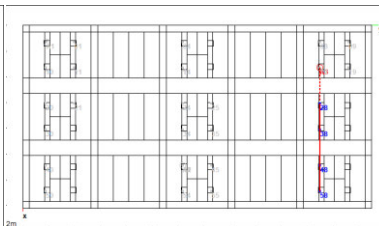
Geometrie 051: Messpfad 2



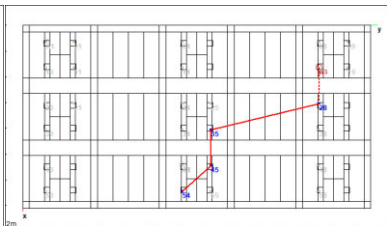
Geometrie 051: Messpfad 3



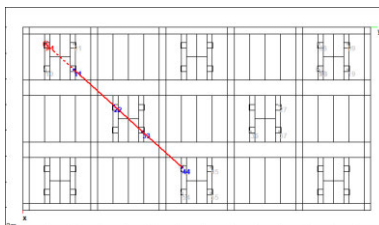
Geometrie 051: Messpfad 4



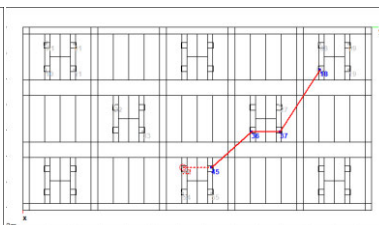
Geometrie 051: Messpfad 5



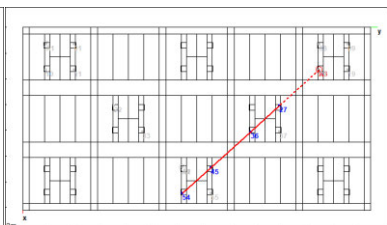
Geometrie 051: Messpfad 6



Geometrie 052: Messpfad 1



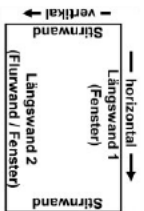
Geometrie 052: Messpfad 2



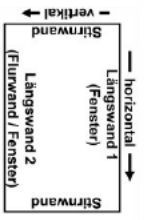
Geometrie 052: Messpfad 3

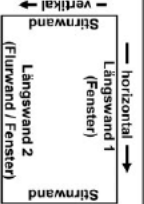
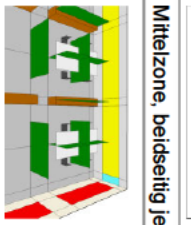
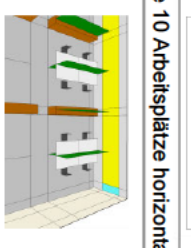
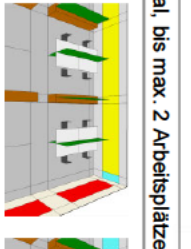
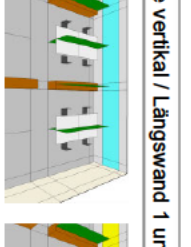
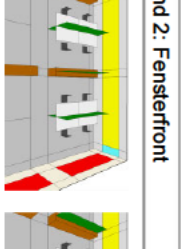
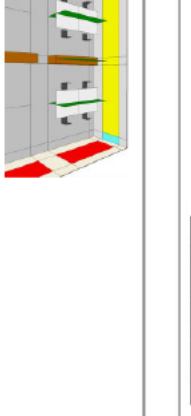
Anlage 2 – Steckbriefe für Bürolayouts

| Steckbrief 1: Kleine Büroflächen | | | | | | | |
|--|--|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Beschreibung | 6 bis 10 Arbeitsplätze horizontal / bis max. 4 Arbeitsplätze vertikal / Längswand 1: Fensterfront / Längswand 2: Flurwand mit Erschließungsfür | | | | | | |
| Prinzipdarstellung der Ausstattung | | | | | | | |
| Einstufung | Klasse A | Klasse B (Variante 1) | Klasse B (Variante 2) | Klasse B (Variante 3) | Klasse C (Variante 1) | Klasse C (Variante 2) | Klasse C (Variante 3) |
| Trennerhöhe | 1,80 m | 1,80 m | 1,80 m | 1,60 m | 1,60 | 1,80 | 1,40 m |
| Anzahl, horizontal Anzahl, vertikal | an jedem AP an jedem AP | an jedem AP | an jedem AP | an jedem AP an jedem AP | an jedem AP | an jedem AP | an jedem AP |
| Überstand, vertikal | 0,60 m | - | - | 0,60 m | - | - | - |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,60$ | $\alpha_w \geq 0,60$ | $\alpha_w \geq 0,60$ | $\alpha_w \geq 0,60$ | $\alpha_w \geq 0,60$ | $\alpha_w \geq 0,60$ | $\alpha_w \geq 0,60$ |
| Decke | MIWo-Rasterdecke | MIWo-Rasterdecke | gelochte GK-Decke | MIWo-Rasterdecke | MIWo-Rasterdecke | Deckensegel | MIWo-Rasterdecke |
| Fläche | 80% der Deckenfläche | 80% der Deckenfläche | 80% der Deckenfläche | 80% der Deckenfläche | 80% der Deckenfläche | 50% der Deckenfläche | 80% der Deckenfläche |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,80$ | $\alpha_w \geq 0,80$ | $\alpha_w \geq 0,65$ | $\alpha_w \geq 0,80$ | $\alpha_w \geq 0,80$ | $\alpha_w \geq 0,65$ | $\alpha_w \geq 0,80$ |
| Längswand 1 | Lamellenvorhänge vor Fensterfläche | Fenster | Lamellenvorhänge vor Fensterfläche | Lamellenvorhänge vor Fensterfläche | Fenster | Lamellenvorhänge vor Fensterfläche | Lamellenvorhänge vor Fensterfläche |
| Position | - | - | - | - | - | - | - |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,20$ | - | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ | - | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ |
| Längswand 2 | Wandabsorber | schallhart | Wandabsorber | Wandabsorber | schallhart | Wandabsorber | Wandabsorber |
| Position | zw. 0,8...2,2 OKFFB | - | zw. 0,8...2,2 OKFFB | zw. 0,8...2,2 OKFFB | - | zw. 0,8...2,2 OKFFB | zw. 0,8...2,2 OKFFB |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,75$ | - | $\alpha_w \geq 0,75$ | $\alpha_w \geq 0,75$ | - | $\alpha_w \geq 0,75$ | $\alpha_w \geq 0,75$ |
| Stirnwände | Wandabsorber | schallhart | Wandabsorber | Wandabsorber | schallhart | Wandabsorber | Wandabsorber |
| Position | zw. 0,8...2,2 OKFFB | - | zw. 0,8...2,2 OKFFB | zw. 0,8...2,2 OKFFB | - | zw. 0,8...2,2 OKFFB | zw. 0,8...2,2 OKFFB |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,75$ | - | $\alpha_w \geq 0,75$ | $\alpha_w \geq 0,75$ | - | $\alpha_w \geq 0,75$ | $\alpha_w \geq 0,75$ |
| Bodenbelag | Teppich | Teppich | Teppich | Teppich | Teppich | Teppich | Teppich |
| Fläche | vollflächig | vollflächig | vollflächig | vollflächig | vollflächig | vollflächig | vollflächig |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ |



| Steckbrief 3: Große Büroflächen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|---|--|--|--------------------------|--|--|--------------------------|--|--|--------------------------|--|--|--------------------------|--|--|--------------------------|--|--|--------------------------|--|--|
| Beschreibung | mittiger Erschließungsgang bzw. Mittelzone, mit beidseitig je 3 bis 4 Arbeitsplätzen vertikal, 10 Arbeitsplätzen horizontal / Längswand 1 und 2: Fensterfront | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Prinzipdarstellung der Ausstattung | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Einstufung | Klasse A | | | Klasse B (Variante 1) | | | Klasse B (Variante 2) | | | Klasse B (Variante 3) | | | Klasse C (Variante 1) | | | Klasse C (Variante 2) | | | Klasse C (Variante 3) | | |
| Trennerhöhe | 1,80 m | | | 1,80 m | | | 1,80 m | | | 1,60 m | | | 1,60 | | | 1,80 m | | | 1,40 m | | |
| Anzahl, horizontal | an jedem AP | | | an jedem AP | | | an jedem AP | | | an jedem AP | | | an jedem AP | | | an jedem AP | | | an jedem AP | | |
| Anzahl, vertikal | an jedem AP | | | an jedem AP | | | an jedem AP | | | an jedem AP | | | an jedem AP | | | an jedem AP | | | an jedem AP | | |
| Überstand, vertikal | 1,10 m | | | 0,60 m | | | 0,60 m | | | 0,60 m | | | 0,60 m | | | 0,60 m | | | 0,60 m | | |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,60$ | | | $\alpha_w \geq 0,60$ | | | $\alpha_w \geq 0,60$ | | | $\alpha_w \geq 0,60$ | | | $\alpha_w \geq 0,60$ | | | $\alpha_w \geq 0,60$ | | | $\alpha_w \geq 0,60$ | | |
| Decke | MIWo-Rasterdecke | | | MIWo-Rasterdecke | | | gelochte GK-Decke | | | MIWo-Rasterdecke | | | MIWo-Rasterdecke | | | Deckensegel | | | MIWo-Rasterdecke | | |
| Fläche | 80% der Deckenfläche | | | 80% der Deckenfläche | | | 80% der Deckenfläche | | | 80% der Deckenfläche | | | 80% der Deckenfläche | | | 50% der Deckenfläche | | | 80% der Deckenfläche | | |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,80$ | | | $\alpha_w \geq 0,80$ | | | $\alpha_w \geq 0,65$ | | | $\alpha_w \geq 0,80$ | | | $\alpha_w \geq 0,80$ | | | $\alpha_w \geq 0,65$ | | | $\alpha_w \geq 0,80$ | | |
| Längswand 1 | Lamellenvorhänge | | | Fenster | | | Fenster | | | Lamellenvorhänge | | | Fenster | | | Lamellenvorhänge | | | Lamellenvorhänge | | |
| Position | vor Fensterfläche | | | - | | | - | | | vor Fensterfläche | | | - | | | vor Fensterfläche | | | vor Fensterfläche | | |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,20$ | | | - | | | - | | | $\alpha_w \geq 0,20$ | | | - | | | $\alpha_w \geq 0,20$ | | | $\alpha_w \geq 0,20$ | | |
| Längswand 2 | Lamellenvorhänge | | | schallhart | | | Lamellenvorhänge | | | Lamellenvorhänge | | | schallhart | | | Lamellenvorhänge | | | Lamellenvorhänge | | |
| Position | vor Fensterfläche | | | - | | | vor Fensterfläche | | | vor Fensterfläche | | | - | | | vor Fensterfläche | | | vor Fensterfläche | | |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,20$ | | | - | | | $\alpha_w \geq 0,20$ | | | $\alpha_w \geq 0,20$ | | | - | | | $\alpha_w \geq 0,20$ | | | $\alpha_w \geq 0,20$ | | |
| Stirnwände | Wandabsorber | | | schallhart | | | Wandabsorber | | | Wandabsorber | | | schallhart | | | Wandabsorber | | | Wandabsorber | | |
| Position | zw. 0,8...2,2 OKFFB | | | - | | | zw. 0,8...2,2 OKFFB | | | zw. 0,8...2,2 OKFFB | | | - | | | zw. 0,8...2,2 OKFFB | | | zw. 0,8...2,2 OKFFB | | |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,75$ | | | - | | | $\alpha_w \geq 0,75$ | | | $\alpha_w \geq 0,75$ | | | - | | | $\alpha_w \geq 0,75$ | | | $\alpha_w \geq 0,75$ | | |
| Bodenbelag | Teppich | | | Teppich | | | Teppich | | | Teppich | | | Teppich | | | Teppich | | | Teppich | | |
| Fläche | vollflächig | | | vollflächig | | | vollflächig | | | vollflächig | | | vollflächig | | | vollflächig | | | vollflächig | | |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,20$ | | | $\alpha_w \geq 0,20$ | | | $\alpha_w \geq 0,20$ | | | $\alpha_w \geq 0,20$ | | | $\alpha_w \geq 0,20$ | | | $\alpha_w \geq 0,20$ | | | $\alpha_w \geq 0,20$ | | |



| Steckbrief 4: Große Büroflächen | Mittelzone, beidseitig je 10 Arbeitsplätze horizontal, bis max. 2 Arbeitsplätze vertikal / Längswand 1 und 2: Fensterfront | | | | | |  | |
|--|--|--|---|---|---|--------------------------|---|--|
| Prinzipdarstellung der Ausstattung  |  |  |  |  |  | | | |
| Einstufung | Klasse A | Klasse B (Variante 1) | Klasse B (Variante 2) | Klasse C (Variante 1) | Klasse C (Variante 2) | Klasse C (Variante 3) | | |
| Trenner | 1,80 m | 1,80 m | 1,80 m | 1,80 m | 1,80 m | 1,60 m | | |
| Anzahl, horizontal | an jedem AP | an jedem AP | an jedem AP | an jedem AP | an jedem AP | an jedem AP | | |
| Anzahl, vertikal | an jedem AP | - | - | - | - | - | | |
| Überstand, vertikal | 0,60 m | - | - | - | - | - | | |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,60$ | $\alpha_w \geq 0,60$ | $\alpha_w \geq 0,60$ | $\alpha_w \geq 0,60$ | $\alpha_w \geq 0,60$ | $\alpha_w \geq 0,60$ | | |
| Decke | MIWo-Rasterdecke | MIWo-Rasterdecke | gelochte GK-Decke | MIWo-Rasterdecke | Deckensegel | MIWo-Rasterdecke | | |
| Fläche | 80% der Deckenfläche | 80% der Deckenfläche | 80% der Deckenfläche | 80% der Deckenfläche | 50% der Deckenfläche | 80% der Deckenfläche | | |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,80$ | $\alpha_w \geq 0,80$ | $\alpha_w \geq 0,65$ | $\alpha_w \geq 0,80$ | $\alpha_w \geq 0,65$ | $\alpha_w \geq 0,80$ | | |
| Längswand 1 | Lamellenvorhänge | Lamellenvorhänge | Lamellenvorhänge | Lamellenvorhänge | Lamellenvorhänge | Lamellenvorhänge | | |
| Position | vor Fensterfläche | vor Fensterfläche | vor Fensterfläche | - | vor Fensterfläche | vor Fensterfläche | | |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ | - | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ | | |
| Längswand 2 | Lamellenvorhänge | schallhart | Lamellenvorhänge | schallhart | Lamellenvorhänge | Lamellenvorhänge | | |
| Position | vor Fensterfläche | - | vor Fensterfläche | - | vor Fensterfläche | vor Fensterfläche | | |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,20$ | - | $\alpha_w \geq 0,20$ | - | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ | | |
| Stirnwände | Wandabsorber | schallhart | Wandabsorber | schallhart | Wandabsorber | Wandabsorber | | |
| Position | zw. 0,8...2,2 OKFFB | - | zw. 0,8...2,2 OKFFB | - | zw. 0,8...2,2 OKFFB | zw. 0,8...2,2 OKFFB | | |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,75$ | - | $\alpha_w \geq 0,75$ | - | $\alpha_w \geq 0,75$ | $\alpha_w \geq 0,75$ | | |
| Bodenbelag | Teppich | Teppich | Teppich | Teppich | Teppich | Teppich | | |
| Fläche | vollflächig | vollflächig | vollflächig | vollflächig | vollflächig | vollflächig | | |
| Qualität | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ | $\alpha_w \geq 0,20$ | | |

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Leipzig, 12.02.2023

Andreas Türk



Ort, Datum

Vorname Nachname