

Hochschule für Technik Stuttgart

Studiengang Gebäudephysik

Raumakustische Optimierung eines denkmalgeschützten Atriums: Messtechni- sche und simulationsbasierte Untersuchung zur Entwicklung akustischer Maßnahmen

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Engineering

vorgelegt von	Laura Antonia Dürholz
Matrikelnummer	1005200
Eingereicht am	24.01.2025

Erstgutachter	Prof. Dr.-Ing. Berndt Zeitler
Zweitgutachter	Prof. Dr. Ulrich Schanda

Kurzfassung

Diese Masterarbeit widmet sich der raumakustischen Analyse und Optimierung des denkmalgeschützten Atriums von Bau 1 der Hochschule für Technik Stuttgart. Im Kontext des Innovations-Labors (HFT.LAB) wird angestrebt, die Nutzung des Campusgeländes zu optimieren, was auch eine Umgestaltung des Atriums umfasst. Ein zentraler Bestandteil dieser Umplanung ist die Verbesserung der akustischen Bedingungen, um den Raum funktional und vielseitig nutzbar zu machen.

Eine besondere Herausforderung bestand darin, Lösungen zu entwickeln, die die akustischen Eigenschaften des Raums optimieren und gleichzeitig den denkmalpflegerischen sowie baulichen Einschränkungen gerecht werden. Da permanente bauliche Eingriffe nicht möglich sind, mussten die meisten Maßnahmen mobil und variabel gestaltet werden. Zusätzlich werden noch zwei weitere Varianten untersucht, die alternative Lösungsansätze zur Verbesserung der Akustik bieten und dabei die bestehenden Restriktionen nicht berücksichtigen.

Es werden messtechnische Untersuchungen durchgeführt, die sich auf die Identifikation der akustischen Herausforderungen konzentrieren, die vor allem durch lange Nachhallzeiten geprägt sind. Messungen zeigen, dass die mittlere Nachhallzeit des Atriums bei 4,25 Sekunden liegt. Zusätzlich weisen die Ergebnisse eine starke Ortsabhängigkeit der Schallverteilung auf, was sowohl die Sprachverständlichkeit als auch den akustischen Komfort erheblich beeinträchtigt.

Zur Analyse und Optimierung der akustischen Bedingungen wurden geometrische Akustikmodelle in der Software CATT-Acoustic erstellt und mit den vor Ort erhobenen Messdaten kalibriert. Mithilfe dieser Simulationsmodelle konnten verschiedene Maßnahmen getestet werden, darunter der Einsatz von Wandabsorbern, mikroperforierten Akustiksegeln, Deckensegeln und Vorhängen. Besonders erfolgversprechend war eine Kombination dieser Maßnahmen, die sowohl die Schallabsorption als auch die Diffusität im Raum signifikant erhöht. Abschirmung ist hierbei ebenfalls eine effiziente Methode. Ergänzend dazu erwies sich die Abschirmung bestimmter Bereiche durch mobile Vorhänge als eine effiziente Methode zur weiteren Verbesserung der akustischen Bedingungen, insbesondere zur Reduzierung von störenden Reflexionen und zur Förderung der Sprachverständlichkeit. Kombiniert führte dies zu einer durchschnittlichen Reduzierung der Nachhallzeiten um 1,59 Sekunden und zu einer spürbaren Verbesserung der Sprachverständlichkeit, wodurch die Funktionalität des Atriums erheblich gesteigert werden kann.

Die Arbeit zeigt, dass eine gezielte Kombination aus mobilen und reversiblen Maßnahmen die akustischen Bedingungen des denkmalgeschützten Atriums erheblich verbessern kann. Die Ergebnisse bieten nicht nur konkrete Lösungsansätze für das untersuchte Atrium, sondern können auch als Grundlage für die Optimierung akustischer Bedingungen in vergleichbaren Räumen dienen.

Abstract

This master's thesis is dedicated to the room-acoustic analysis and optimisation of the listed atrium of building 1 of the Stuttgart University of Applied Sciences. In the context of the innovation laboratory (HFT.LAB), the aim is to optimise the use of the campus, which also includes redesigning the atrium. A central component of this redesign is the improvement of the acoustic conditions in order to make the room functionally and versatile usable.

A particular challenge was to develop solutions that optimise the room's acoustic properties while also meeting the requirements of the preservation order and the structural limitations. Since permanent structural interventions are not possible, most of the measures had to be designed to be mobile and variable. In addition, two further variants are being investigated that offer alternative solutions for improving the acoustics without taking the existing restrictions into account.

Measurements are carried out that focus on identifying the acoustic challenges, which are mainly characterised by long reverberation times. Measurements show that the mean reverberation time of the atrium is 4.25 seconds. In addition, the results show a strong spatial dependency of the sound distribution, which significantly affects both speech intelligibility and acoustic comfort.

To analyse and optimise the acoustic conditions, geometric acoustic models were created in the CATT-Acoustic software and calibrated with the measurement data collected on site. With the help of these simulation models, various measures could be tested, including the use of wall absorbers, micro-perforated acoustic sails, ceiling sails and curtains. Particularly promising was a combination of these measures, which significantly increased both sound absorption and diffusivity in the room. Screening is also an efficient method here. In addition, screening certain areas with mobile curtains proved to be an efficient way of further improving acoustic conditions, in particular to reduce disturbing reflections and to promote speech intelligibility. Combined, this led to an average reduction in reverberation times of 1.59 seconds and a noticeable improvement in speech intelligibility, significantly increasing the functionality of the atrium.

The work shows that a targeted combination of mobile and reversible measures can significantly improve the acoustic conditions of the listed atrium. The results not only offer concrete solutions for the atrium under investigation, but can also serve as a basis for optimising acoustic conditions in comparable spaces.

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung.....	II
Kurzfassung.....	III
Abstract.....	IV
Danksagung.....	V
Inhaltsverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Symbolverzeichnis.....	IX
1 Einführung.....	1
1.1 Zielsetzung.....	1
1.2 Methodik	2
2 Grundlagen	3
2.1 Raumakustische Grundlagen.....	3
2.1.1 Schallausbreitung in Räumen.....	3
2.1.2 Schallabsorber.....	10
2.2 Raumakustik in Atrien.....	12
2.3 Berechnungsmodelle in der Raumakustik.....	15
2.3.1 Spiegelschallquellenverfahren (Image Source Method)	16
2.3.2 Strahlen- / Kegelverfolgung (Ray- / Conetracing)	17
2.4 Simulationssoftware Catt-Acoustics	19
3 Untersuchungsobjekt	22
3.1 Ausgangssituation	22
3.2 Geplante Umnutzung	24
4 Durchführung der Messungen und Auswertung der Ergebnisse	26
4.1 Nachhallzeitmessung.....	26
4.1.1 Messverfahren	26
4.1.2 Nachhallzeitmessung im getrennten Zustand	27

4.1.3	Nachhallzeitmessung im offenen Zustand	31
4.2	Messergebnisse.....	35
4.2.1	Messergebnisse: getrennter Zustand.....	35
4.2.2	Messergebnisse: offener Zustand	43
4.3	Bewertung der Messungen	55
5	Raumakustische Simulationen	57
5.1	Simulationsmodell.....	57
5.2	Kalibrierung der Simulation	61
5.3	Simulationen mit akustischen Optimierungen.....	79
5.3.1	Simulationsvariante 1: Reduktion der Nachhallzeit durch Wandabsorber	82
5.3.2	Simulationsvariante 2: Abschirmung durch Vorhänge	83
5.3.3	Simulationsvariante 3: Mikroperforierte Akustiksegel	84
5.3.4	Simulationsvariante 4: Erhöhung der Schallabsorption durch eine Akustikdecke	85
5.3.5	Simulationsvariante 5: Mikroperforierte Folien vor Glasflächen.....	86
5.3.6	Simulationsvariante 6: Berücksichtigung von Deckensegeln.....	86
5.3.7	Simulationsvariante 7: Kombination der Varianten 1-4	87
5.3.8	Simulationsvariante 8: Kombination der Varianten 2,5 und 6	87
5.4	Simulationsergebnisse	88
5.4.1	Nachhallzeit	88
5.4.2	Sprachverständlichkeit	89
6	Diskussion der Simulationsergebnisse	95
7	Fazit und Ausblick.....	97
	Literaturverzeichnis.....	98
	Abbildungsverzeichnis	102
	Tabellenverzeichnis.....	109
	Anlagenverzeichnis	110

Abkürzungsverzeichnis

A	Aufstellung (Relevant für die Messungen)
BEM	Boundary Element Method
CATT	Computer Aided Theater Technique
DAGA	Tagung der Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Akustik
DEGA	Deutsche Gesellschaft für Akustik
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Normung
Fa.	Firma
FEM	Finite-Element-Methode
GA	Geometrische Akustik
HFT	Hochschule für Technik Stuttgart
ISO	Internationale Organisation für Normung
JND	Just noticeable difference (dt. Unterscheidungsschwelle)
M	Mikrofonposition (Relevant für die Messungen)
S	Schallquellposition (Relevant für die Messungen)
SNR	Signal-Rausch-Abstand
TUCT	The Universal Cone Tracer

Symbolverzeichnis

$\bar{\alpha}$	[-]	mittlerer Schallabsorptionsgrad
A_{eq}	[m ²]	Äquivalente Schallabsorptionsfläche
EDT	[s]	Early Decay Time (Frühe Abklingzeit) Gemessene Nachhallzeit bei einem Pegelabfall von 10 dB
f	[Hz]	Frequenz
f_s	[Hz]	Schröder-Grenzfrequenz
p	[dB]	Schalldruck
r_H	[m]	Hallradius
S	[m ²]	Bauteiloberfläche
S_{ges}	[m ²]	gesamte Raumboberfläche
STI	[-]	Sprachübertragungsindex
T_{20}	[s]	Gemessene Nachhallzeit bei einem Pegelabfall von 20 dB
T_{30}	[s]	Gemessene Nachhallzeit bei einem Pegelabfall von 30 dB
T_{60}	[s]	Nachhallzeit
T_{eyr}	[s]	Nachhallzeit nach Eyring
T_{sab}	[s]	Nachhallzeit nach Sabine
V	[m ³]	Raumvolumen
α	[-]	Schallabsorptionsgrad
α_p	[-]	praktischer Schallabsorptionsgrad

2.2 Raumakustik in Atrien

Wie bereits in Kapitel 1 erläutert, dienen Atrien heute nicht mehr ausschließlich als Verkehrszonen, sondern werden zunehmend als multifunktionale Räume genutzt. Diese erweiterte Nutzung geht jedoch häufig mit akustischen Defiziten einher, da die ursprüngliche Planung und Gestaltung der Atrien primär durch architektonische Gesichtspunkte bestimmt wurden. [23] Solche Defizite treten insbesondere bei Veranstaltungen auf, wenn hohe Lautstärken zu akustischen Beeinträchtigungen führen. Ein bekanntes Phänomen in diesem Zusammenhang ist der sogenannte Lombard-Effekt: Menschen in lauten Umgebungen heben ihre Stimme sowohl in der Lautstärke als auch in der Frequenz an, wodurch der Lärmpegel weiter steigt und sich die akustischen Bedingungen zusätzlich verschlechtern. [24]

Ein wesentliches akustisches Problem vieler Atrien liegt in der Wahl der Baumaterialien. Sie zeichnen sich häufig durch den Einsatz harter, stark reflektierender Materialien wie Glas, Beton, Stahl und Stein aus. Diese Materialien weisen eine geringe Schallabsorption auf, was zu ausgeprägten Schallreflexionen und somit zu langen Nachhallzeiten führt. Solche akustischen Eigenschaften stellen insbesondere in großen Räumen mit komplexen Geometrien eine Herausforderung dar, da sie die Sprachverständlichkeit und den akustischen Komfort beeinträchtigen. Die geometrische Gestaltung von Atrien variiert meist von rechteckigen bis hin zu unregelmäßigen Formen und ist durch hohe Decken sowie große Raumvolumina geprägt. Diese architektonischen Merkmale schränken den akustischen Komfort weiter ein, indem sie eine diffuse Schallausbreitung erschweren und lange Nachhallzeiten begünstigen. [1]

In zahlreichen Studien wurde nachgewiesen, dass Nachhallzeiten in Atrien häufig mehrere Sekunden erreichen. Eine kanadische Untersuchung aus dem Jahr 1998, in der akustische Messungen in zehn Atrien mit Volumina zwischen 3.100 m³ und 45.000 m³ durchgeführt wurden, lieferte detaillierte Erkenntnisse zu den akustischen Eigenschaften solcher Räume. Ziel der Studie war es, die akustischen Bedingungen in Atrien zu charakterisieren und potenzielle Probleme zu identifizieren. Ein zentraler Fokus lag dabei auf der Analyse der Nachhallzeit (RT) als wichtigen raumakustischen Parameter. Die Ergebnisse zeigten, dass Atrien ohne schallabsorbierende Maßnahmen die höchsten Nachhallzeiten bei mittleren Frequenzen (500 und 1000 Hz) aufwiesen, was die Sprachverständlichkeit erheblich beeinträchtigen kann. Gleichzeitig wurden bei tiefen Frequenzen geringere Nachhallzeiten festgestellt, die auf die Absorption durch große Glasflächen zurückzuführen sind. Dieses Frequenzverhalten ist charakteristisch für Räume, die überwiegend aus schallharten und reflektierenden Materialien bestehen.[25]

Moderne Studien, darunter die Arbeiten von O. Rosenheinrich und Kornadt [3], A. Mahdavi; J. Pak und J. Lechleitner [23], H. Mei und J.Kang [26], C. Rubino, S.Liuzzi und F. Martellotta [27], M. Rychtáriková; V. Chmelík; D. Urbán; A. Vargová [28] sowie R. Naeemae und Z. Sü Gül [2], bestätigen diese Erkenntnisse und dokumentieren vergleichbare Verläufe der Nachhallzeit in Atrien.

Darüber hinaus variiert die Nachhallzeit mit der Position des Empfängers im Raum. Empfänger mit direkten Sichtkontakt zur Schallquelle messen kürzere Nachhallzeiten als Empfänger die beispielsweise in anderen Geschossen oder seitlichen Bereichen angeordnet sind. Diese räumliche Abhängigkeit unterstreicht, wie stark die Akustik eines Atriums von seiner Geometrie und den verwendeten Materialien beeinflusst wird. [23, 26]

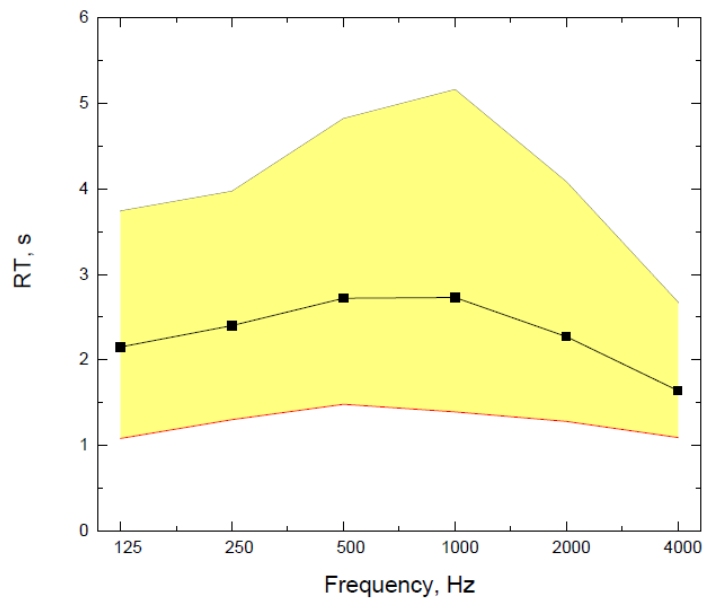


Abbildung 4: Die Grafik aus der kanadischen Studie von 1989 zeigt den Verlauf der Nachhallzeit (RT) in Sekunden über die Oktavbänder an. Der gelb markierte Bereich repräsentiert die Spannweite der gemessenen Nachhallzeiten in verschiedenen Atrien, wobei die schwarze Linie die mittlere Nachhallzeit darstellt.

Zusätzlich zeigt sich, dass die Schallverteilung in Atrien oft unregelmäßig ist. Obwohl die Schalldruckpegel mit zunehmender Entfernung zur Schallquelle abnehmen, erfolgt dies in nicht-linearen Mustern, insbesondere in Seitengängen oder bei niedrigen Frequenzen. Diese Uneinheitlichkeit erschwert eine gleichmäßige akustische Gestaltung und erfordert gezielte Maßnahmen, um die akustischen Bedingungen zu optimieren. [23, 25, 26].

Für große Räume wie Atrien existieren keine standardisierten Zielvorgaben zur akustischen Gestaltung, wie sie beispielsweise in der DIN 18041:2016 für kleine bis mittelgroße Räume im Bereich von Sprache und Musik festgelegt sind [9]. Daher ist es erforderlich, spezifische akustische Parameter zu definieren, die den Anforderungen einer vielseitigen Mehrzwecknutzung gerecht werden. Daher untersuchten R. Naeemae und Z. Sü Gül [2] in ihrer Studie mögliche optimale Nachhallzeiten für Atrien. Sie schlagen einen Bereich von 2,05 bis 2,15 Sekunden vor, um den akustischen Komfort zu fördern. Dieser Bereich ermöglicht es, eine angemessene Balance zwischen akustischer Qualität und einem moderaten Materialeinsatz zu erreichen, was insbesondere in multifunktionalen Räumen von Bedeutung ist.

H. Rosenheinrich und O. Kornadt [3] betonen in ihrer Ausarbeitung wiederum, dass bei der Planung der Raumakustik in Atrien unbedingt ein ausgeglichener Nachhallzeitverlauf über alle Oktavbänder angestrebt werden sollte. Dies ist besonders wichtig, da es in einigen Fällen, beispielsweise aufgrund von Denkmal- oder Brandschutzanforderungen, nicht immer möglich ist, niedrige Nachhallzeiten zu erzielen. Ein harmonischer Verlauf der Nachhallzeit über das Frequenzspektrum trägt dazu bei, die akustischen Bedingungen zu optimieren, selbst wenn die Nachhallzeit nicht auf ein ideales Niveau reduziert werden kann. Die Studien zeigen deutlich, dass die akustische Gestaltung von Atrien nicht allein auf die Reduktion der Nachhallzeit abzielt, sondern ebenso auf eine gleichmäßige Verteilung der Schallenergie über das gesamte Frequenzspektrum. Ein effektives Mittel zur Verbesserung der akustischen Qualität in Atrien,

insbesondere in langen oder hohen Räumen, ist die gezielte Streuung des Schalls. Streuelemente tragen dazu bei, die Nachhallzeit zu reduzieren und gleichzeitig eine homogenere Verteilung des Schalldruckpegels im Raum zu erzielen. Dies fördert sowohl die Sprachverständlichkeit als auch den akustischen Komfort. [1, 3]

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in der aktuellen Fachliteratur häufig auf die akustischen Herausforderungen von Atrien hingewiesen wird. In den meisten Fällen hat sich gezeigt, dass eine zufriedenstellende Raumakustik in Atrien nicht erreicht wird. [3]

Einige Fallstudien dokumentieren jedoch, dass durch den Einsatz innovativer Akustiklösungen und Simulationen, geeignete Sanierungsmaßnahmen ergriffen werden konnten. Somit konnte zum Beispiel in dem von Glas umschlossenen Foyer und Atrium der Fraunhofer-Zentralverwaltung in München, die Nachhallzeit sowie die Sprachverständlichkeit verbessert werden. Trotz einer Nachhallzeit von rund 2 Sekunden führten Verbundplattenresonanzmodule in den umlaufenden Kanten des Deckenbereichs zu einer effektiven Bedämpfung der Tiefen, was einen angenehmen akustischen Gesamteindruck erzeugte. [9]

Trotzdem existiert keine universelle Lösung für die akustische Optimierung von Atrien, insbesondere bei denkmalgeschützten Gebäuden. Vielmehr sind spezifische Vorgehensweisen, Methoden und Maßnahmen erforderlich, um den besonderen Anforderungen von Atrien oder Lichthöfen gerecht zu werden und um eine behagliche, der Situation angepassten, Raumakustik zu erzielen.

3 Untersuchungsobjekt

Das Untersuchungsobjekt ist das Atrium im Bau 1 der Hochschule für Technik in Stuttgart. Der Bau 1, ursprünglich als Egle-Bau bezeichnet, wurde in den Jahren 1867 bis 1873 errichtet und steht heute unter Denkmalschutz. [38]

3.1 Ausgangssituation

Das Atrium gliedert sich in zwei Lichthöfe, die durch einen Verbindungsgang mit einer im Erdgeschoss gelegenen Cafeteria voneinander getrennt sind. Im Bereich der Cafeteria befindet sich ein Brandschutzabschnitt aus Glas (siehe Abbildung 9 und Abbildung 10, rot markiert), der sich vom Erdgeschoss bis ins oberste Geschoss erstreckt.

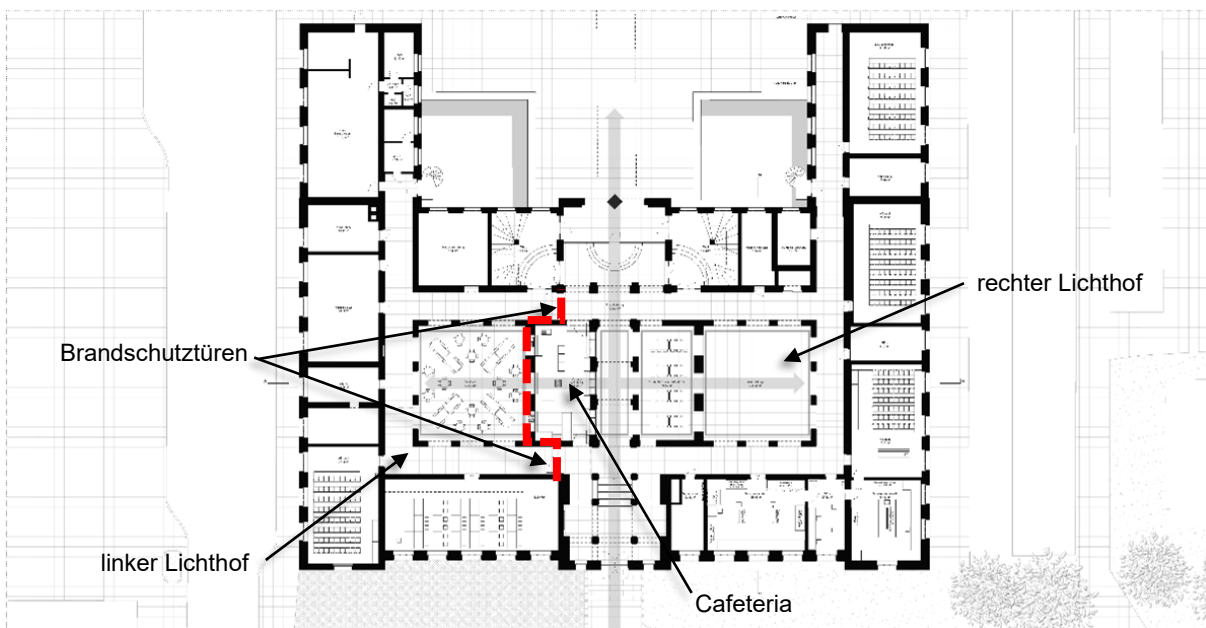


Abbildung 9: Hochschule für Technik Stuttgart, Bau 1, Ausschnitt aus dem Grundriss Erdgeschoss Bestand; Maßstabslos; in Rot: Brandschutzabschnitt (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)



Abbildung 10: Hochschule für Technik, Bau 1, Ausschnitt aus dem Schnitt Bestand; Maßstabslos; in Rot: Brandschutzabschnitt; in Grün: Grenzen des Atriums (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)

Im Brandfall schließen sich die Brandschutztüren in den Gängen über alle Geschosse automatisch. Während des regulären Betriebs bleiben diese Türen jedoch dauerhaft geöffnet. Im linken Lichthof befinden sich aktuell studentische Arbeitsplätze. Der rechte Lichthof wird zu bestimmten Anlässen für Ausstellungen oder Veranstaltungen, wie das alljährliche stattfindende Bauphysikertreffen der HFT oder Studieninfotage, genutzt. Eine Vor-Ort-Begehung ergab, dass das Atrium sehr hallig ist, da Stimmen und Geräusche deutlich nachklingen. Beim Testen mit klatschen oder einer Starterklappe sind jedoch keine markanten Flatterechos wahrnehmbar. Gespräche sind schwer verständlich, insbesondere bei Veranstaltungen wird die Verständigung zunehmend schwieriger, da die teilnehmenden Personen versuchen, durch lauterer Sprechen den akustischen Gegebenheiten entgegenzuwirken. Im Laufe der Jahre wurden wiederholt Renovierungsmaßnahmen durchgeführt, zuletzt im Jahr 2022. Dabei wurde im Verbindungsgang, im Bereich der Sitzplätze, gegenüber der Cafeteria, sowie im Deckenbereich des zweiten Obergeschosses eine vollflächige Akustikdecke angebracht (siehe auch Abbildungen in Anlage I und Anlage II). Zudem wurden in beiden Lichthöfen jeweils ein großformatiges Ringlicht mit einem Durchmesser von etwa 6 m in einer Höhe von 5 m installiert. Für deren Befestigung wurden im Dachbereich zusätzliche Tragkonstruktionen errichtet, da das vorhandene Dach weder über ausreichende Lastreserven noch über geeignete Befestigungspunkte verfügte.

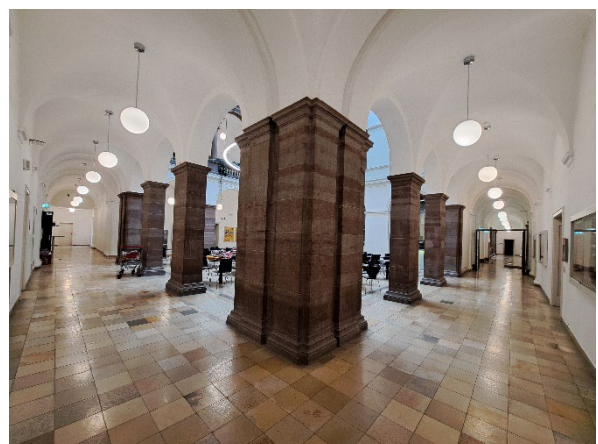
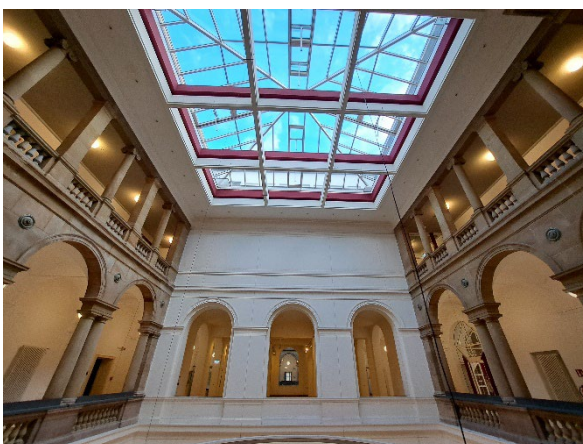
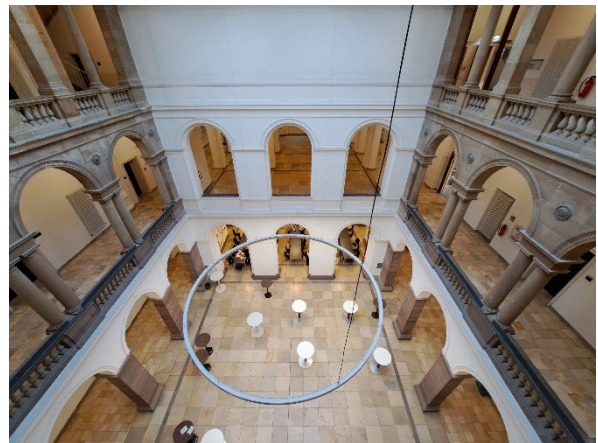
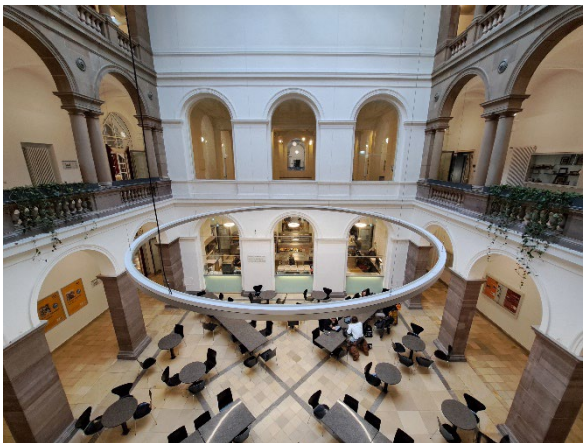


Abbildung 11: Gezeigt werden verschiedene Perspektiven des Atriums; Oben links: Blick vom ersten Obergeschoss in den linken Lichthof; oben rechts: Blick vom zweiten Obergeschoss in den rechten Lichthof; unten links: Blick vom ersten Obergeschoss auf das Glasdach; unten rechts: Blick in die Nebenflure vom linken Lichthof (Bildquellen: Eigene Aufnahmen)

Das Atrium erstreckt sich über insgesamt drei Geschosse, vom Erdgeschoss bis zum 2. Obergeschoss. Die Lichthöfe weisen eine Höhe von 13,9 m bis 16,7 m, gemessen vom Boden bis zu den pyramidenförmigen Glasdächern auf. Das Volumen des Atriums, ohne den Bereich der Cafeteria, beträgt etwa 10.370 m³. Die Abbildung 11 veranschaulicht, dass die Innenflächen überwiegend aus den Materialien Stein, Mauerwerk, Glas und Putz bestehen.

3.2 Geplante Umnutzung

Im Rahmen des Innovations-Labors der HFT Stuttgart sind unter anderem für das Atrium im Bau 1 bauliche sowie strukturelle Maßnahmen geplant, um neue Partizipationsformate an der HFT zu ermöglichen [4]. Das Projekt der Umgestaltung von Bau 1 läuft unter dem Projektnamen HFT.Venue, bei dem Yonca Inci die Projektplanerin ist. Angesichts der zuvor beschriebenen Herausforderungen hinsichtlich der Raumakustik, soll im Zuge der Planung auch eine Verbesserung der akustischen Eigenschaften des Atriums angestrebt werden.

Zu Beginn dieser Arbeit Mitte 2024, wurde seitens der Projektplanung, eine Genehmigung eines Bauantrags sowie eine Nutzungsänderung erwartet. Geplant war, den rechten Lichthof mit studentischen Arbeitsplätzen und einem Loungebereich auszustatten. Die Cafeteria sollte vollständig umgestaltet werden. Der linke Lichthof sollte künftig ausschließlich als Veranstaltungsfläche, beispielsweise für Frontalvorträge oder Studieninfotage, genutzt werden. Hierfür mussten die Anforderungen des Denkmalschutzes und des Brandschutzes eingehalten werden. Dabei war es wichtig zu beachten, dass das ursprüngliche Erscheinungsbild des Atriums nicht wesentlich verändert wird und alle Umbaumaßnahmen reversibel umgesetzt werden. Die für den Umbau eingesetzten Materialien mussten lediglich die Baustoffklasse B1 (schwerentflammbare Baustoffe) erfüllen. Wichtig war es zudem, dass die bestehenden Ringlichter erhalten bleiben. Eine zusätzliche Last an der Tragkonstruktion oder an den Ringlichter ist nicht zulässig.

Ende November 2024 wurde jedoch deutlich, dass der Bauantrag sowie die Nutzungsänderung höchstwahrscheinlich nicht genehmigt werden würden. Daher wurde entschieden, die Planung so anzupassen, dass weder ein Bauantrag noch eine Nutzungsänderung erforderlich ist. Dies führt jedoch zu einer Verschärfung der Randbedingungen, die bei der weiteren architektonischen Planung aber auch der akustischen Planung berücksichtigt werden müssen. Die Verschärfung stellen eine zusätzliche Herausforderung dar. Folgende Randbedingungen müssen nun ebenfalls beachtet werden:

- Denkmalschutzanforderung:
 - Das Erscheinungsbild des Atriums darf nicht maßgeblich beeinträchtigt werden.
 - Arbeiten an den Putzoberflächen, Säulen und Bögen sind nicht zulässig.
- Brandschutzanforderung:
 - Alle verwendeten Materialien müssen der Brandschutzklasse A1 – nichtbrennbare Baustoffe (ohne Nachweis) - oder der Brandschutzklasse A2 – nichtbrennbare Baustoffe (mit besonderem Prüfnachweis) - entsprechen.
- Genehmigungsanforderungen:
 - Invasive bauliche Maßnahmen sind nicht erlaubt.
 - Die ursprüngliche Nutzung der beiden Lichthöfe muss beibehalten werden.
 - Wird in Teilzeit eine andere Nutzung vorgesehen, müssen alle Maßnahmen und Möblierungen mobil, reversibel und verstaubar sein.
 - Das Tageslichtangebot darf nicht beeinträchtigt werden.

Aufgrund der zuvor genannten Einschränkungen bleibt nun die gegenwärtige Nutzung des Atriums erhalten. Im linken Lichthof werden sich weiterhin studentische Arbeitsplätze befinden, während das rechte Atrium ebenso als Ausstellungsfläche genutzt werden soll. Die Projektplanung hat jedoch beschlossen, dass zukünftig im linken Atrium auch Frontalvorträge stattfinden sollen, wobei die hierfür benötigte Möblierung, wie Stühle und Bühne, mobil und vollständig verstaubar gestaltet sein müssen. Im Verbindungsgang des 1. Obergeschosses soll die Fläche zukünftig als Ausstellungsfläche oder Cateringbereich vorgesehen werden. Auch in diesem Bereich wird die Umsetzung ausschließlich durch mobile Elemente, wie Stellwände und einer mobilen Bar, realisiert.

4.2 Messergebnisse

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der Nachhallzeitmessungen getrennt für den geschlossenen und offenen Zustand beschrieben, um eine klare und übersichtliche Darstellung zu ermöglichen. Die Ergebnisse wurden bereits einer ersten Bereinigung unterzogen. Dabei wurden extreme Ausreißer, die die Standardabweichung von ± 3 überschritten, sowie Daten aus offensichtlichen Messfehlern entfernt.

Besondere Herausforderungen zeigten sich bei Frequenzen von 50 Hz und 10.000 Hz, da in diesen Bereichen nicht immer ein ausreichender Signal-Rausch-Pegel erzielt werden konnte. Da der für Sprache relevante Frequenzbereich ohnehin zwischen 63 Hz und 8.000 Hz (siehe Abbildung 20) liegt, konzentriert sich die Auswertung auf diesen Bereich. Hier liefern die Messergebnisse eine solide Grundlage für die weitere Analyse.

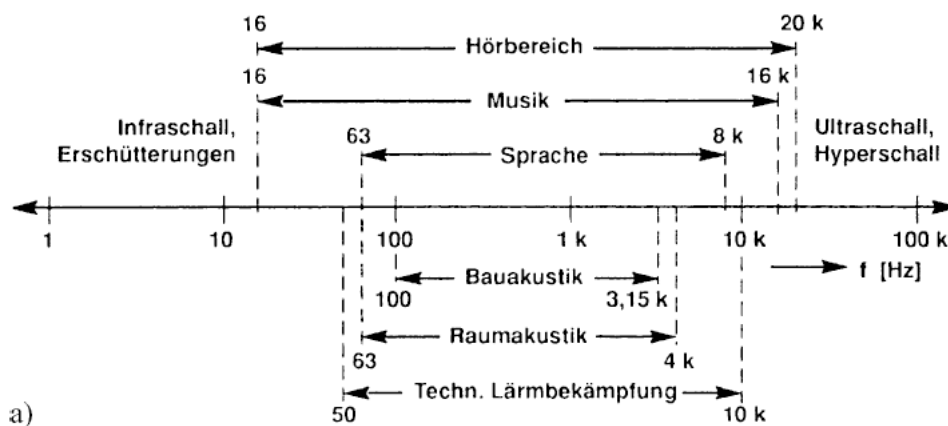


Abbildung 20: Relevante Frequenzbereiche für das Hören (Bildquelle: [9])

4.2.1 Messergebnisse: getrennter Zustand

4.2.1.1 Linker Lichthof

Das Diagramm in Abbildung 21 zeigt die gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten in Abhängigkeit der Frequenz für verschiedene Messpunkte, die den Sendern 1 bis 3 im linken Lichthof zugeordnet sind. Die schwarze Linie stellt den Mittelwert der Nachhallzeiten für jede Frequenz dar. Im tieffrequenten Bereich unterhalb von 100 Hz treten die längsten Nachhallzeiten auf, die teilweise über 8 Sekunden liegen. In diesem Bereich zeigt sich eine deutliche Variabilität zwischen den verschiedenen Messpunkten. Im mittleren Frequenzbereich stabilisieren sich die Nachhallzeitverläufe und variieren zwischen den Messpunkten nicht mehr so stark. Die Nachhallzeit liegt hier etwa bei 4 Sekunden. Im hochfrequenten Bereich (> 2500 Hz) sinke die Nachhallzeiten etwa auf 2 Sekunden ab. Auch hier zeigt sich eine geringere Streuung. Die mittlere Nachhallzeit $T_{m,125\text{Hz}-4000\text{ Hz}}$ liegt hier bei 3,87 s.

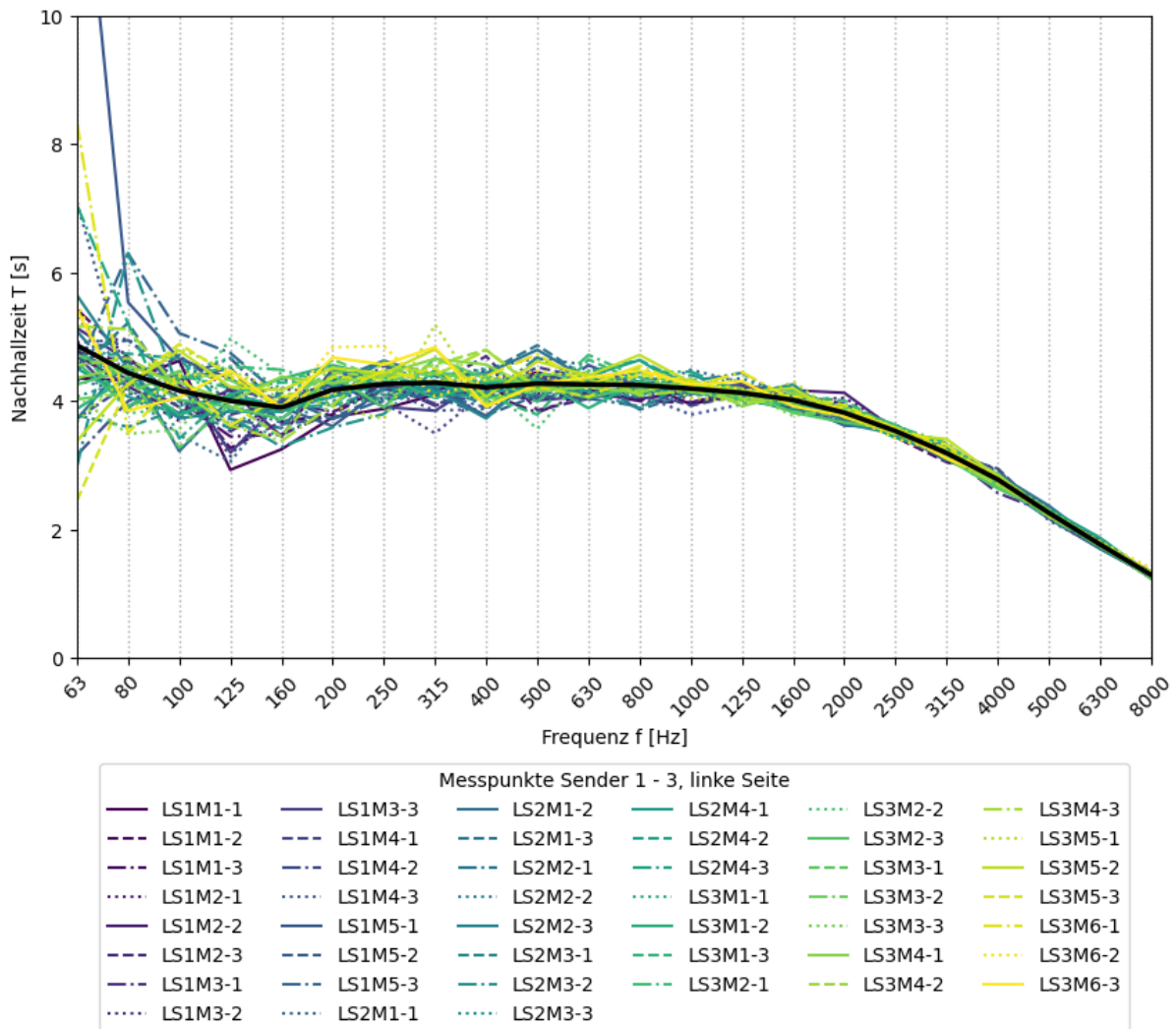


Abbildung 21: Gemessene frequenzabhängige Nachhallzeiten T [s] in geschlossenen Zustand für Sender 1–3 im linken Lichthof: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den Nachhallzeitverlauf für eine spezifische Kombination aus Sender, Messposition und Wiederholung. Die Legende folgt dem Schema: L (linker Lichthof), S (Sendernummer: 1–3) und M (Messposition mit Wiederholung: 1–3). Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert der Nachhallzeit T für jede Frequenz.

Abbildung 22 zeigt die Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten in Abhängigkeit von der Frequenz in Form von Box-Plots. Im tieffrequenten Bereich unter 100 Hz sind die Nachhallzeiten am längsten. In diesem Frequenzbereich zeigt sich zudem eine hohe Variabilität der Messwerte. Im mittleren Frequenzbereich von 125 Hz bis 2000 Hz stabilisieren sich die Nachhallzeiten. Hier sind die Boxen schmäler, was auf eine geringere Streuung der Messwerte hinweist. Im hochfrequenten Bereich oberhalb von 2000 Hz sinken die Nachhallzeiten kontinuierlich und erreichen bei 8000 Hz Werte unter 2 Sekunden. Gleichzeitig nimmt die Variabilität der Messwerte weiter ab.

Der allgemeine Verlauf zeigt, dass die Nachhallzeit mit zunehmender Frequenz abnimmt, während auch die Streuung der Messwerte deutlich reduziert wird. Tiefe Frequenzen weisen verlängerte Nachhallzeiten und größere Variabilität auf.

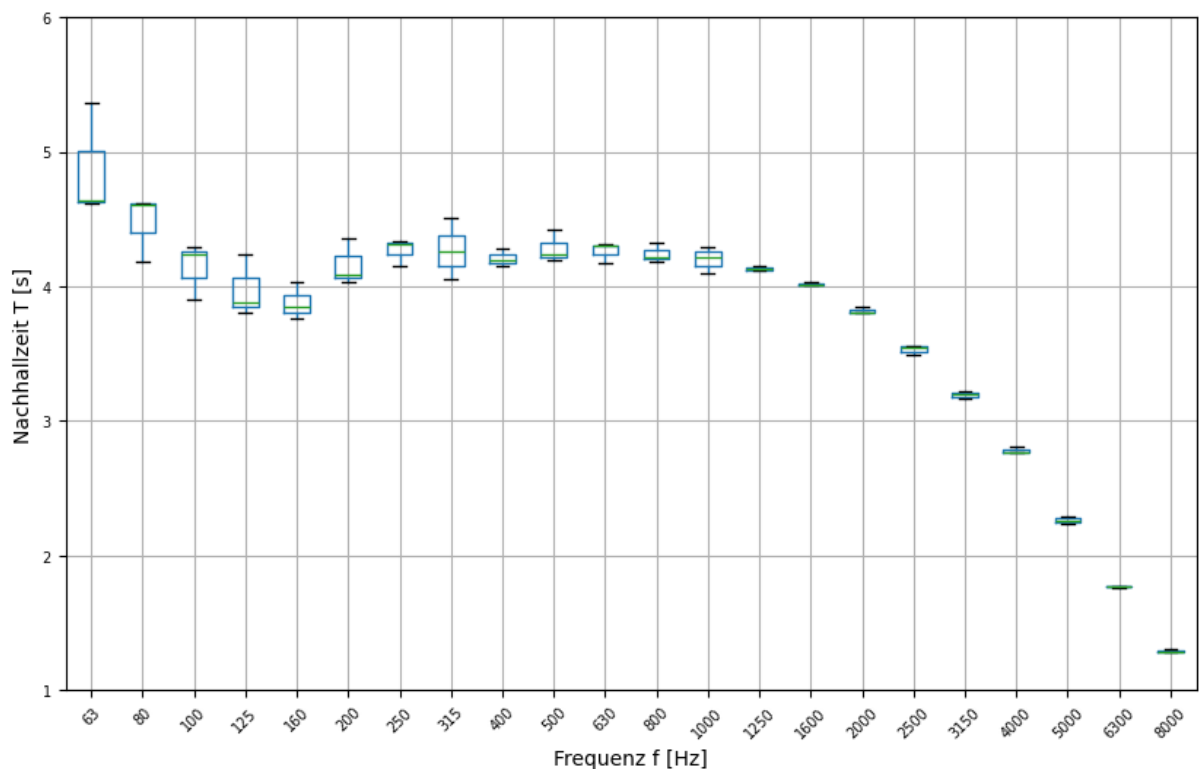


Abbildung 22: Box-Plots der gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten T [s] für Sendern 1-3 (linker Lichthof): Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede Frequenz umfasst die Nachhallzeitmessungen der Sender 1 bis 3. Der Median wird durch die grüne Linie innerhalb der Box dargestellt, während der Interquartilsabstand (IQR) durch die Box begrenzt wird: der untere Rand repräsentiert das erste Quartil und der obere Rand das dritte Quartil. Die Whisker erstrecken sich bis maximal 1,5-fachen des Interquartilsabstands.

Abbildung 23 zeigt die absolute Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten in Form von Histogrammen für jede Frequenz zwischen 63 Hz und 8000 Hz. Im tieffrequenten Bereich (z. B. bei 63 Hz) sind die Nachhallzeiten am höchsten, wobei der Mittelwert über 5 Sekunden liegt. Die Streuung ist in diesem Bereich besonders groß, was durch breitere Histogramme und größere Standardabweichungen sichtbar wird. Im mittleren Frequenzbereich (125 Hz bis 2000 Hz) stabilisieren sich die Nachhallzeiten zwischen 4 und 4,5 Sekunden, mit einer geringeren Streuung und einer engeren Verteilung der Messwerte. In den höheren Frequenzen (>2000 Hz) nehmen die Nachhallzeiten weiter ab und erreichen bei 8000 Hz Werte unter 2 Sekunden zudem wird die Verteilung deutlich schmäler.



Abbildung 23: Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten T [s] in Abhängigkeit der Frequenz f [Hz] für Sender 1- 3 (linker Lichthof): Die Abbildung zeigt Histogramme der gemessenen Nachhallzeiten T für jede Frequenz von 63 Hz bis 8000 Hz. Die X-Achse stellt die Nachhallzeiten T in Sekunden dar, während die Y-Achse die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Werte zeigt. Der Mittelwert ist als rote gestrichelte Linie markiert, die grüne und lila gestrichelten Linien stellen das 95%-Vertrauensintervall oberhalb bzw. unterhalb des Mittelwerts dar. Die Bereiche der Standardabweichung werden farblich hervorgehoben: Gelb zeigt ± 1 , Orange ± 2 und Rot ± 3 Standardabweichungen.

4.2.1.2 Rechter Lichthof

Das Diagramm in Abbildung 24 zeigt die gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten für die Sender 1 bis 3 auf der rechten Seite des Atriums. Die schwarze Linie stellt den Mittelwert der Nachhallzeiten für jede Frequenz dar. Im tieffrequenten Bereich unterhalb von 100 Hz sind die Nachhallzeiten am längsten, und liegen teilweise über 6 Sekunden. Sie weisen zudem eine starke Variabilität zwischen den Messpunkten auf. Im mittleren Frequenzbereich stabilisieren sich die Nachhallzeitverläufe und variieren zwischen den Messpunkten nicht mehr so stark. Die Nachhallzeit liegt hier etwa bei 4 bis 4,5 Sekunden. Der Nachhallzeitverlauf hat seinen Höhepunkt bei 500 bis 630 Hz. Im hochfrequenten Bereich oberhalb von 2000 Hz sinken die Nachhallzeiten kontinuierlich auf Werte unter 2 Sekunden, begleitet von einer geringeren Streuung zwischen den Messpunkten. Die mittlere Nachhallzeit $T_{m,125\text{Hz}-4000\text{ Hz}}$ liegt hier bei 4,07 Sekunden.

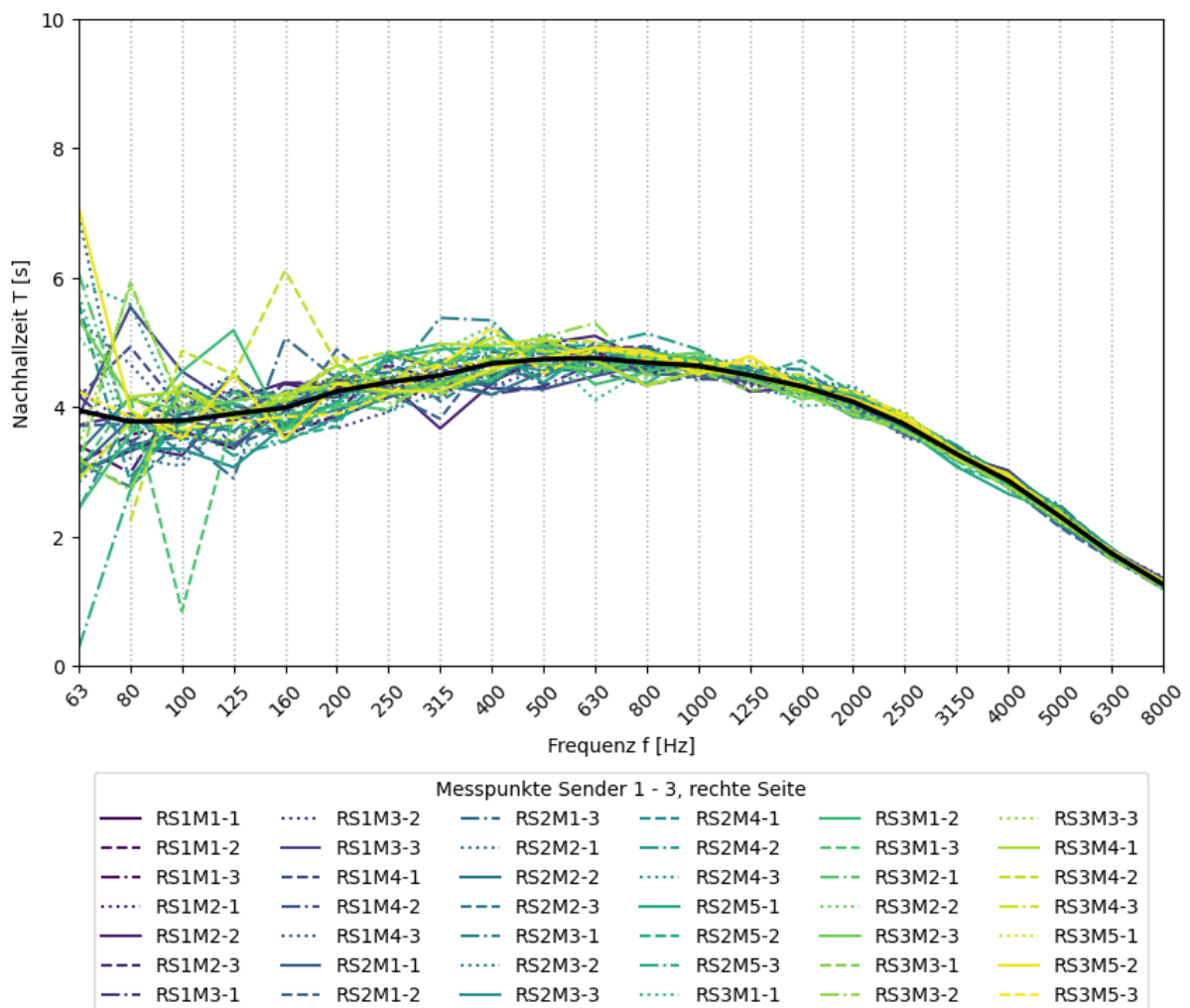


Abbildung 24: Gemessene frequenzabhängige Nachhallzeiten T [s] in geschlossenen Zustand für Sender 1–3 im rechten Lichthof: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den Nachhallzeitverlauf für eine spezifische Kombination aus Sender, Messposition und Wiederholungsvorgang. Die Legende folgt dem Schema: L (linker Lichthof), S (Sendernummer: 1–3) und M (Messposition mit Wiederholung: 1–3). Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert der Nachhallzeit T für jede Frequenz.

Die nachfolgende Diagramm in Abbildung 25 zeigt die Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten in Abhängigkeit von der Frequenz in Form von Box-Plots

Im tieffrequenten Bereich (≤ 150 Hz) sind die Nachhallzeiten am längsten. Dieser Frequenzbereich zeigt eine hohe Variabilität der Messwerte, welches durch den Interquartilsabstand dargestellt wird. Im mittleren Frequenzbereich von 160 Hz bis 2000 Hz nimmt die Variabilität ab. Hier sind die Boxen schmalere, was auf eine geringere Streuung der Messwerte hinweist. Ab etwa 2000 Hz sinken die Nachhallzeiten, wobei die Werte bei 8000 Hz unter 2 Sekunden erreichen. Gleichzeitig ist eine deutliche Reduktion der Variabilität zu beobachten, was durch schmalere Boxen und kürzere Whisker ersichtlich wird.

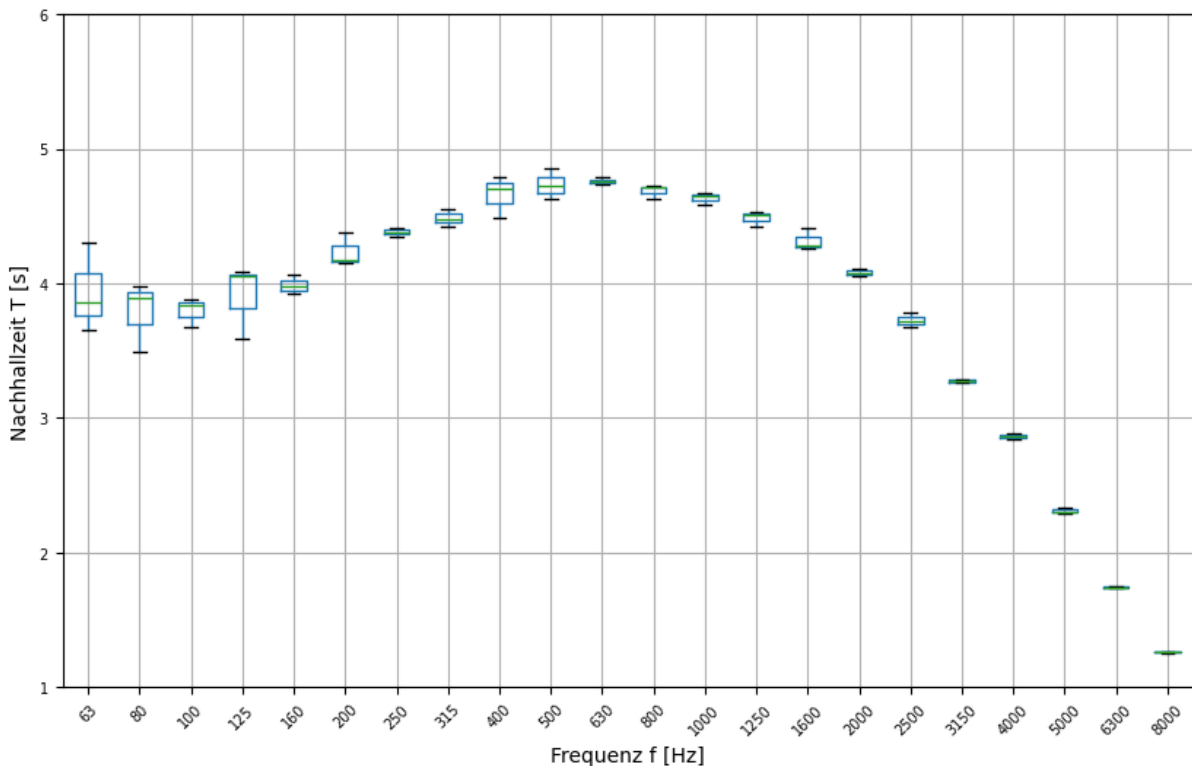


Abbildung 25: Box-Plots der gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten T [s] für Sendern 1-3 (rechter Lichthof): Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede Frequenz umfasst die Nachhallzeitmessungen der Sender 1 bis 3. Der Median wird durch die grüne Linie innerhalb der Box dargestellt, während der Interquartilsabstand (IQR) durch die Box begrenzt wird: der untere Rand repräsentiert das erste Quartil und der obere Rand das dritte Quartil. Die Whisker erstrecken sich bis maximal 1,5-fachen des Interquartilsabstands.

4 Durchführung der Messungen und Auswertung der Ergebnisse

Abbildung 26 zeigt die absolute Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten im rechten Lichthof in Form von Histogrammen für jede Frequenz zwischen 63 Hz und 8000 Hz. Im tieffrequenten Bereich (63 Hz bis 125 Hz) liegen die Nachhallzeiten zwischen 4 und 6 Sekunden, mit einer breiteren Verteilung, was durch die größere Spannweite des Histogramme sichtbar wird. Im mittleren Frequenzbereich (200 Hz bis 2000 Hz) stabilisieren sich die Nachhallzeiten zwischen 4 und 4,5 Sekunden, und die Verteilung wird schmäler, was auf eine geringere Variabilität hinweist. Ab 2500 Hz nehmen die Nachhallzeiten stetig ab und erreichen bei 8000 Hz Werte unter 2 Sekunden, wobei die Verteilung nochmals enger wird.

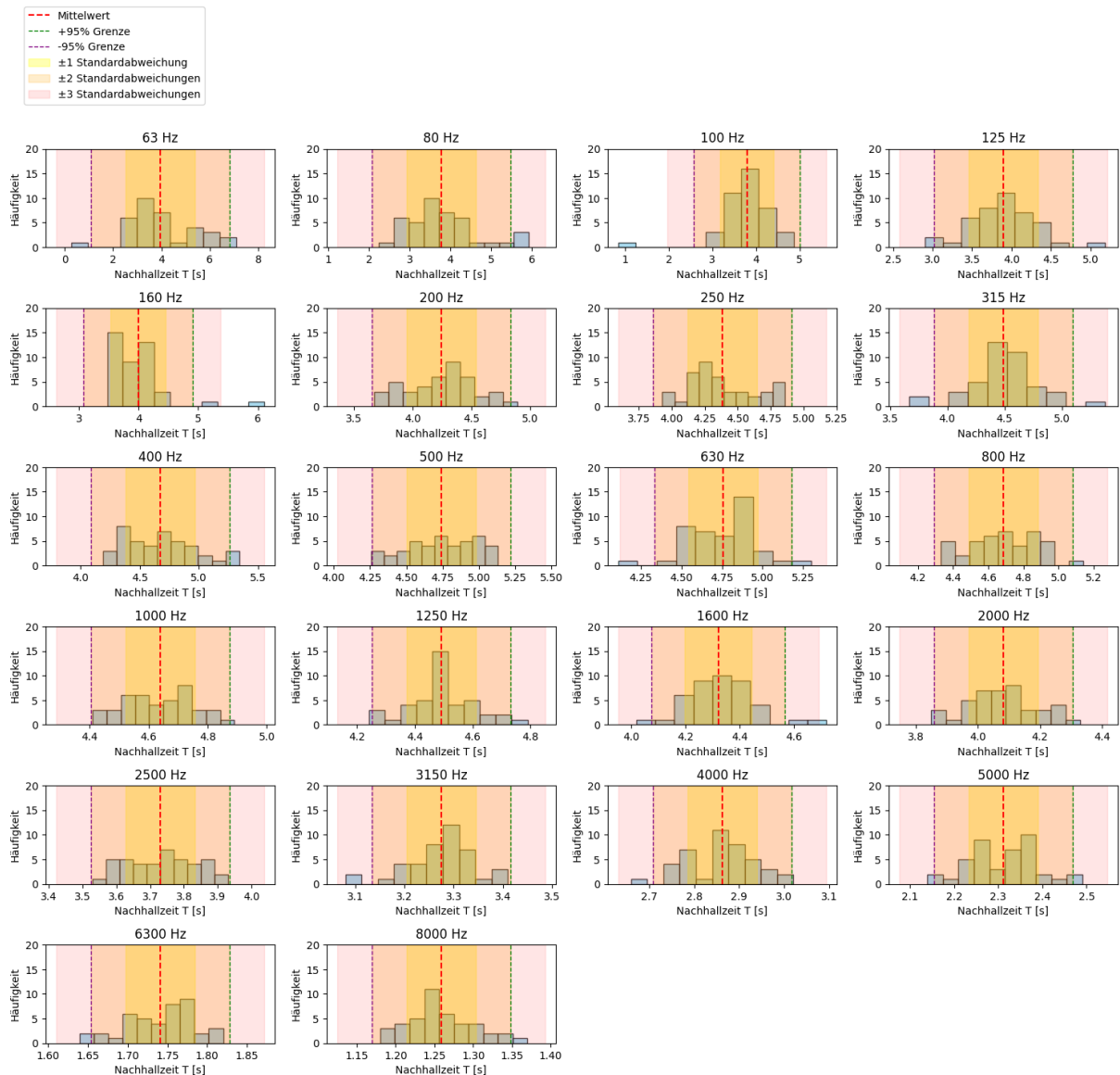


Abbildung 26: Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten T [s] in Abhängigkeit der Frequenz f [Hz] für Sender 1- 3 (rechter Lichthof): Die Abbildung zeigt Histogramme der gemessenen Nachhallzeiten T für jede Frequenz von 63 Hz bis 8000 Hz. Die X-Achse stellt die Nachhallzeiten T in Sekunden dar, während die Y-Achse die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Werte zeigt. Der Mittelwert ist als rote gestrichelte Linie markiert, die grüne und lila gestrichelten Linien stellen das 95%-Vertrauensintervall oberhalb bzw. unterhalb des Mittelwerts dar. Die Bereiche der Standardabweichung werden farblich hervorgehoben: Gelb zeigt ± 1 , Orange ± 2 und Rot ± 3 Standardabweichungen. Gelb zeigt ± 1 , Orange ± 2 und Rot ± 3 Standardabweichungen.

In Abbildung 27 sind die mittleren Nachhallzeitverläufe für die Senderpositionen im linken (LS1, LS2, LS3) und rechten Lichthof (RS1, RS2, RS3) dargestellt. Jede Linie repräsentiert den Verlauf der Nachhallzeit für eine spezifische Senderposition, wie in der Legende beschrieben. Im tieffrequenten Bereich unterhalb von 160 Hz weisen alle Senderpositionen die höchsten Nachhallzeiten auf. Dieser Frequenzbereich ist durch stärkere Schwankungen gekennzeichnet. Ab 160 Hz steigen die Nachhallzeiten weiter an und erreichen ihren Höhepunkt bei etwa 630 Hz. In diesem Bereich zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den beiden Lichthöfen: Die Nachhallzeiten im rechten Lichthof (RS1, RS2, RS3) liegen etwa 0,5 Sekunden über den Werten des linken Lichthofs (LS1, LS2, LS3).

Ab 800 Hz beginnen die Nachhallzeiten kontinuierlich zu sinken und erreichen bei 8000 Hz Werte unter 2 Sekunden. In diesem hochfrequenten Bereich gleichen sich die Nachhallzeitverläufe der Senderpositionen beider Lichthöfe nahezu vollständig an.

Die mittleren Nachhallzeiten für die unterschiedlichen Senderpositionen liegen bei:

- LS1: $T_{m,125\text{Hz}-4000\text{ Hz}} = 3,82\text{ s}$
- LS2: $T_{m,125\text{Hz}-4000\text{ Hz}} = 3,85\text{ s}$
- LS3: $T_{m,125\text{Hz}-4000\text{ Hz}} = 3,93\text{ s}$
- RS1: $T_{m,125\text{Hz}-4000\text{ Hz}} = 4,05\text{ s}$
- RS2: $T_{m,125\text{Hz}-4000\text{ Hz}} = 4,05\text{ s}$
- RS3: $T_{m,125\text{Hz}-4000\text{ Hz}} = 4,11\text{ s}$

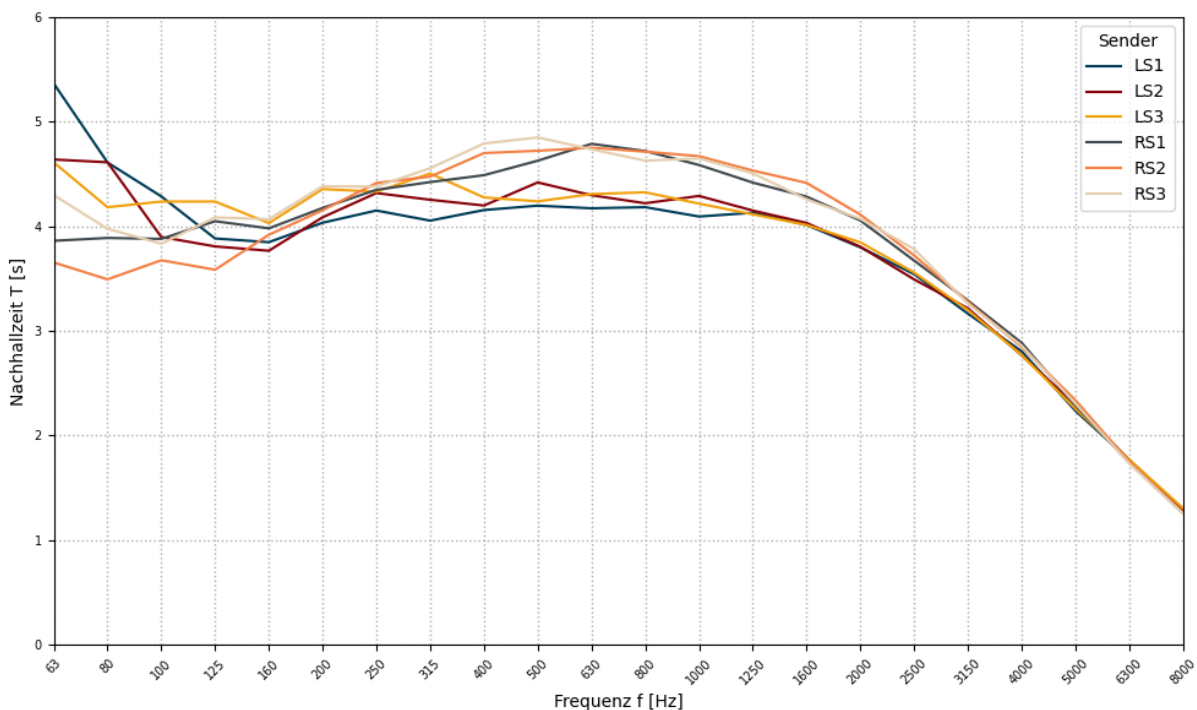


Abbildung 27: Mittlere Nachhallzeiten T [s] in Abhängigkeit der Frequenz, für die Messpunkte von Sender 1 bis 3 jeweils für den linken(L) und rechten Lichthof (R): Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den gemittelten Nachhallzeitverlauf für einen Sender.

4.2.2 Messergebnisse: offener Zustand

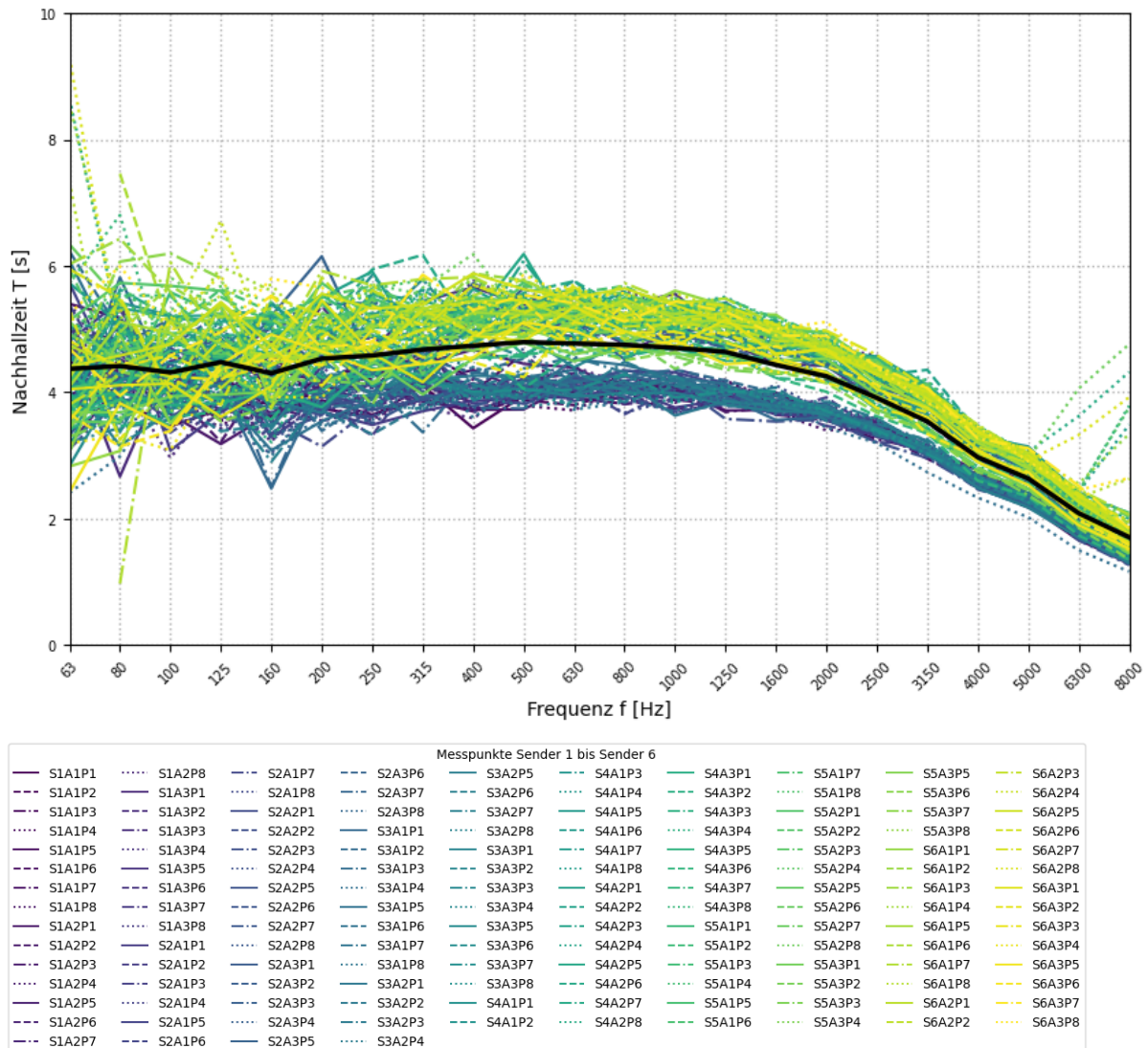


Abbildung 28: Gemessene frequenzabhängige Nachhallzeiten T [s] im offenen Zustand für Sender 1–6 gemittelt nach den Abklingvorgängen: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den Nachhallzeitverlauf für eine spezifische Kombination aus Sender, Aufstellkombination und Messposition innerhalb dieser Aufstellkombination. Die Legende folgt dem Schema: S (Sendernummer: 1–6), A (Aufstellkombination: A1–A3) und M (Messposition innerhalb dieser Aufstellkombination: 1–8). Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert der Nachhallzeit T für jede Frequenz.

Abbildung 28 zeigt die Nachhallzeitverläufe im offenen Zustand für die Sender 1 bis 6, gemittelt über die Abklingvorgänge an verschiedenen Messpositionen. Im tieffrequenten Bereich ist die Streuung der Nachhallzeiten besonders ausgeprägt. Im tieffrequenten Bereich, unterhalb von 160 Hz, weisen die Nachhallzeiten die höchste Streuung auf. Mit zunehmender Frequenz steigen die Nachhallzeiten zunächst an und erreichen ihren Höhepunkt im Bereich von etwa 500 Hz bis 600 Hz, mit mittleren Werten von etwa 4,5 bis 5 Sekunden. Ab diesem Punkt nehmen die Nachhallzeiten kontinuierlich ab und fallen im hochfrequenten Bereich oberhalb von 2000 Hz auf Werte unter 2 Sekunden. Ein auffälliges Merkmal des Diagramms ist die Differenzie-

rung der Nachhallzeitverläufe in zwei klar unterscheidbare Bereiche. Die helleren Linien repräsentieren die Senderpositionen 4 bis 6, während die dunkleren Linien den Senderpositionen 1 bis 3 zugeordnet sind.

Abbildung 29 zeigt die Box-Plots der gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten im offenen Zustand für die Sender 1 bis 6. Im tieffrequenten Bereich, insbesondere unterhalb von 200 Hz, weisen die Whisker die größte Streuung auf. Mit zunehmender Frequenz nimmt die Streuung allmählich ab. Im mittleren Frequenzbereich (200–800 Hz) erreichen die Nachhallzeiten ihren Höhepunkt bei etwa 630 Hz. In diesem Bereich sind die Boxen groß, was auf eine breitere Verteilung der Werte im Interquartilsabstand (IQR) hinweist. Gleichzeitig sind die Whisker weniger ausgeprägt als im tieffrequenten Bereich, was auf eine Verringerung der Variabilität außerhalb des IQRs deutet. Im hochfrequenten Bereich (ab 1000 Hz) sinken die Nachhallzeiten kontinuierlich und erreichen bei 8000 Hz Werte von etwa 1,5 bis 2 Sekunden. In diesem Frequenzbereich werden sowohl die Boxen als auch die Whisker sehr schmal.

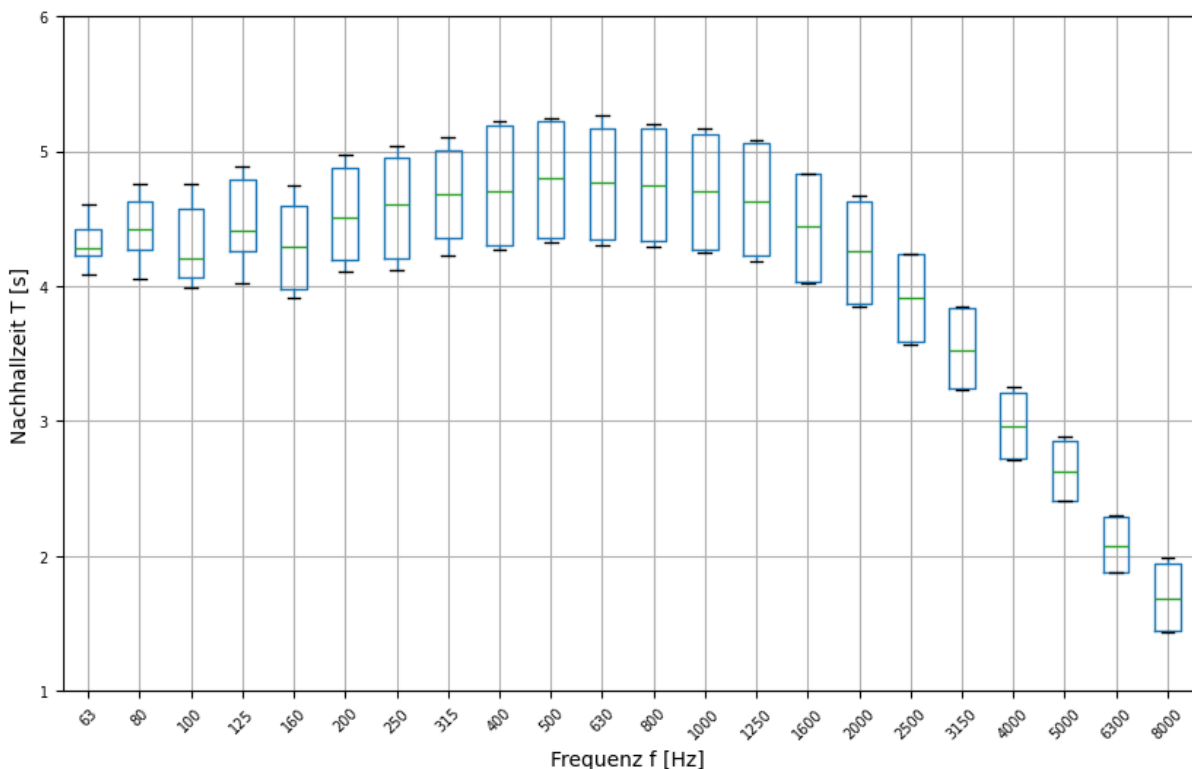


Abbildung 29: Box-Plots der gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten T [s] im offenen Zustand für Sendern 1-6: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede Frequenz umfasst die Nachhallzeitmessungen der Sender 1 bis 6. Der Median wird durch die grüne Linie innerhalb der Box dargestellt, während der Interquartilsabstand (IQR) durch die Box begrenzt wird: der untere Rand repräsentiert das erste Quartil und der obere Rand das dritte Quartil. Die Whisker erstrecken sich bis maximal 1,5-fachen des Interquartilsabstands. Diese Darstellung visualisiert die Verteilung und Streuung der Nachhallzeiten über den gesamten Frequenzbereich.

4 Durchführung der Messungen und Auswertung der Ergebnisse

Abbildung 30 zeigt die absolute Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten im offenen Zustand für die Sender 1 -6. Im tieffrequenten Bereich von 63 Hz bis 200 Hz zeigt die Verteilung eine deutlich größere Streuung, die sich in breiteren Histogrammbalken und einer erhöhten Standardabweichung äußert. Die Verteilung der Messwerte ist in diesem Bereich um den Mittelwert tendenziell normalverteilt. Mit zunehmender Frequenz nimmt die Streuung weiter ab. Allerdings zeichnen sich ab 500 Hz zwei getrennte Verteilungsgruppen um den Mittelwert ab (zwei Höhepunkte) die auf zwei akustische Cluster hindeuten. Im hochfrequenten Bereich, ab etwa 2000 Hz, nimmt die Streuung weiter ab.

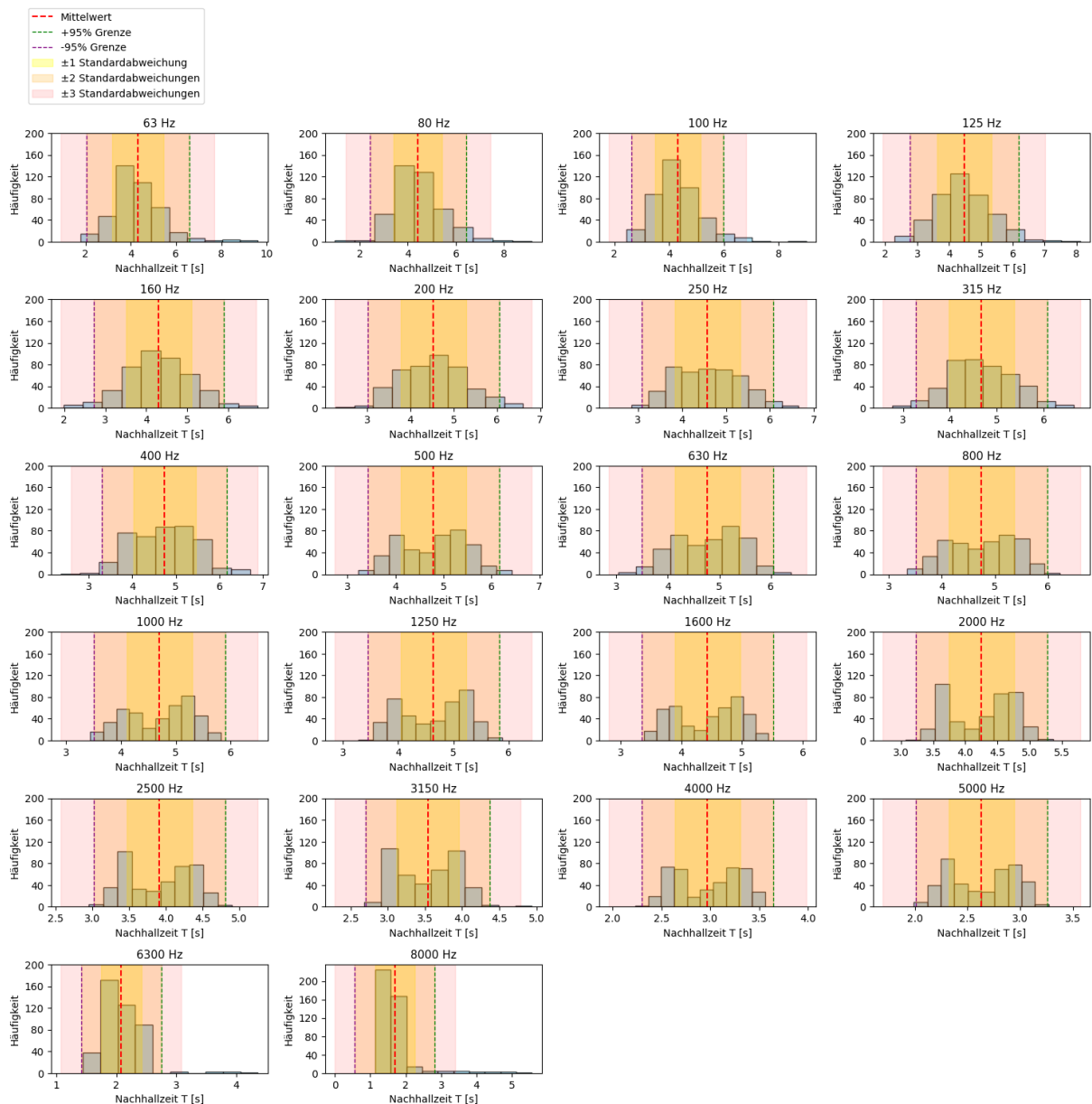


Abbildung 30: Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten T [s] in Abhängigkeit der Frequenz f [Hz] im offenen Zustand für Sender 1- 6: Die Abbildung zeigt Histogramme der gemessenen Nachhallzeiten T für jede Frequenz von 63 Hz bis 8000 Hz. Die X-Achse stellt die Nachhallzeiten T in Sekunden dar, während die Y-Achse die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Werte zeigt. Der Mittelwert ist als rote gestrichelte Linie markiert, die grüne und lila gestrichelten Linien stellen das 95%-Vertrauensintervall oberhalb bzw. unterhalb des Mittelwerts dar. Die Bereiche der Standardabweichung werden farblich hervorgehoben: Gelb zeigt ± 1 , Orange ± 2 und Rot ± 3 Standardabweichungen.

Abbildung 31 zeigt die mittleren Nachhallzeitverläufe für die Senderpositionen S1 bis S6 im offenen Zustand. Im tieffrequenten Bereich unterhalb von 160 Hz treten starke Schwankungen und bereits hohe Nachhallzeiten auf. Ab 160 Hz steigen die Nachhallzeiten weiter an und erreichen ihren Höhepunkt im Frequenzbereich von etwa 500 Hz bis 630 Hz. In diesem Bereich werden klare Unterschiede zwischen den beiden Lichthöfen sichtbar, wobei sich zwei deutlich unterscheidbare Sendergruppen abzeichnen: Die Sendergruppe S1–S3 liegt konstant unter den Nachhallzeitverläufen der Sendergruppe S4–S6. Ab 800 Hz beginnen die Nachhallzeiten kontinuierlich zu sinken, wobei die Differenzen zwischen den Sendergruppen zwar abnehmen, jedoch weiterhin deutlich erkennbar bleiben.

Die mittleren Nachhallzeiten für die unterschiedlichen Senderpositionen liegen bei:

- LS1: $T_{m,125\text{Hz}-4000\text{ Hz}} = 3,90\text{ s}$
- LS2: $T_{m,125\text{Hz}-4000\text{ Hz}} = 3,88\text{ s}$
- LS3: $T_{m,125\text{Hz}-4000\text{ Hz}} = 3,91\text{ s}$
- RS1: $T_{m,125\text{Hz}-4000\text{ Hz}} = 4,56\text{ s}$
- RS2: $T_{m,125\text{Hz}-4000\text{ Hz}} = 4,60\text{ s}$
- RS3: $T_{m,125\text{Hz}-4000\text{ Hz}} = 4,63\text{ s}$

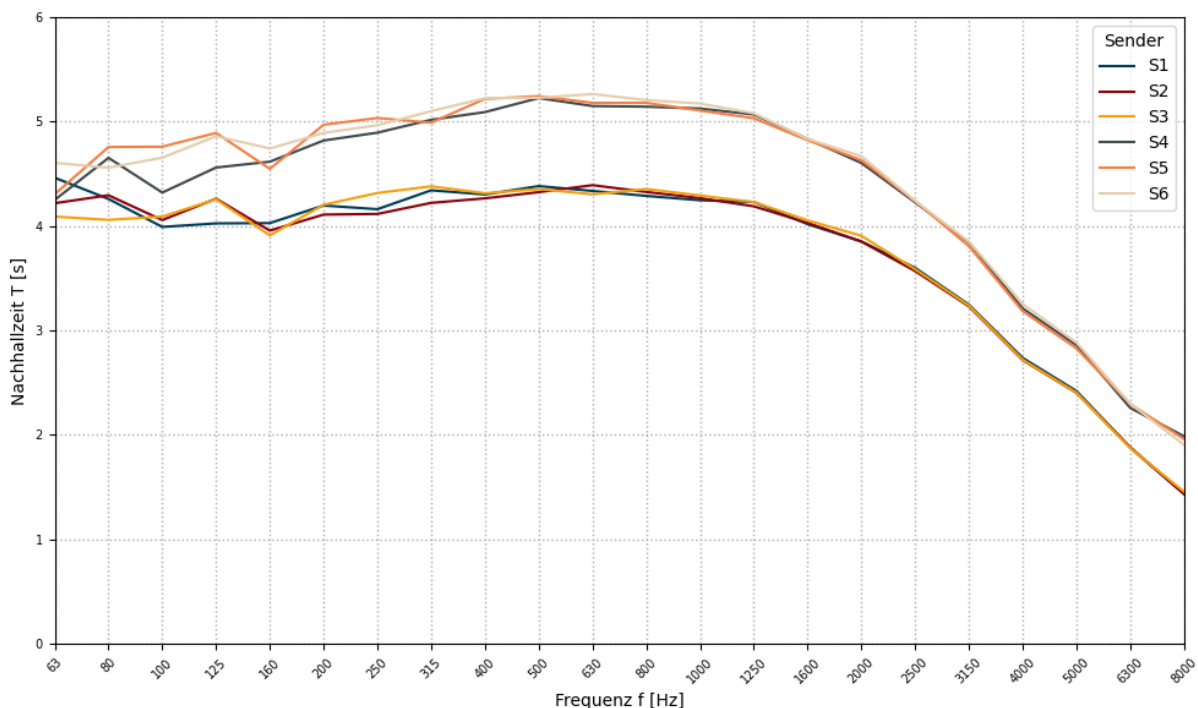


Abbildung 31: Mittlere Nachhallzeiten T [s] in Abhängigkeit der Frequenz, für die Messpunkte von Sender 1 bis Sender 6: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den gemittelten Nachhallzeitverlauf für einen Sender.

Das Diagramm in Abbildung 32 zeigt die gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten im offenen Zustand für die Sendergruppe 1-3, gemittelt über die Abklingvorgängen.

Im tieffrequenten Bereich unterhalb von 250 Hz sind deutliche Schwankungen zwischen den Verläufen erkennbar. Diese Schwankungen nehmen mit steigender Frequenz ab, wodurch die Nachhallzeitverläufe homogener werden. Der mittlere Nachhallzeitverlauf erreicht seinen Höhepunkt im Frequenzbereich von etwa 500 Hz bis 630 Hz.

Ein auffälliges Merkmal ist wieder die Abzeichnung von zwei Gruppen innerhalb der Nachhallzeitverläufe. Anders als bei den Sendergruppen sind es diesmal spezifische Mikrofonpositionen, die sich durch längere Nachhallzeiten hervorheben. Diese Positionen befinden sich im mittleren Bereich des Verbindungsgangs im Atrium (siehe Abbildung 17: Position 9, 10, 11, 12, 17 und 18).

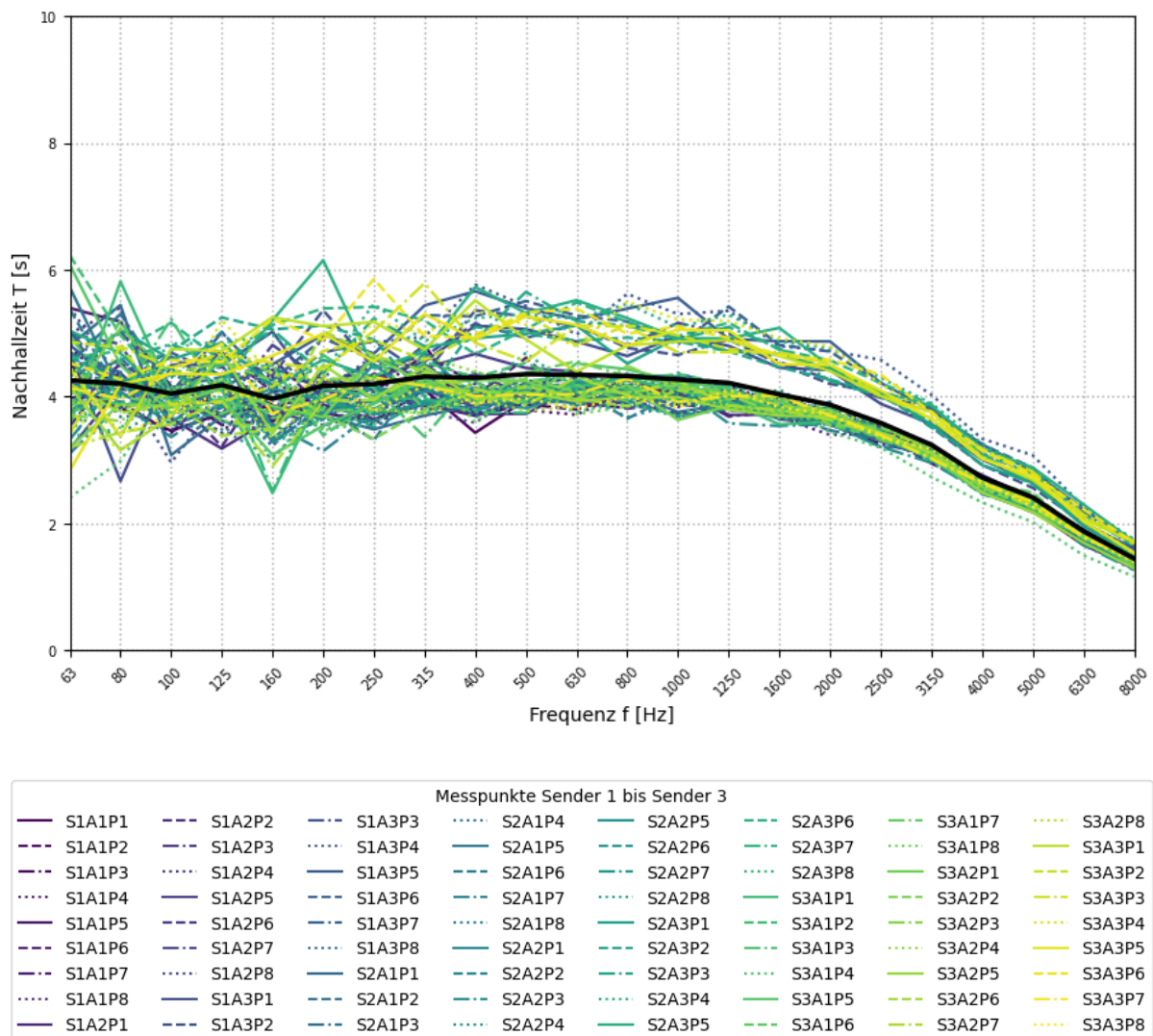


Abbildung 32: Gemessene frequenzabhängige Nachhallzeiten T [s] im offenen Zustand für Sender 1–3 gemittelt nach den Abklingvorgängen: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den Nachhallzeitverlauf für eine spezifische Kombination aus Sender, Aufstellkombination und Messposition innerhalb dieser Aufstellkombination. Die Legende folgt dem Schema: S (Sendernummer: 1–6), A (Aufstellkombination: A1–A3) und M (Messposition innerhalb dieser Aufstellkombination: 1–8). Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert der Nachhallzeit T für jede Frequenz.

Abbildung 33 zeigt die Box-Plots der gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten für die Sendergruppe 1 – 3. Im tieffrequenten Bereich weisen die Boxen und Whisker die größte Streuung auf. Die Streuung nimmt mit steigender Frequenz ab. Im mittleren Frequenzbereich bleibt die Verteilung relativ konstant. Ab 1000 Hz werden die Boxen schmale rund die Whisker verkürzen sich. Die Variabilität ist in den hohen Frequenzen seh gering.

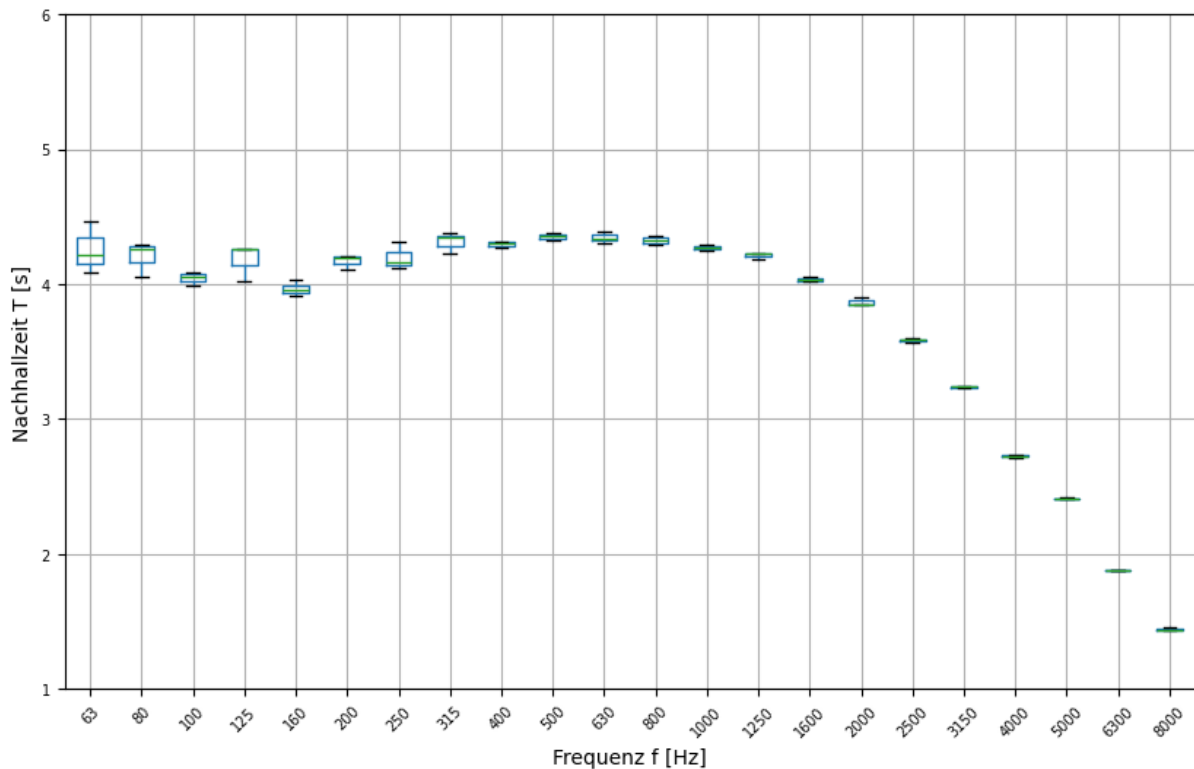


Abbildung 33: Box-Plots der gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten T [s] im offenen Zustand für Sendern 1-3: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede Frequenz umfasst die Nachhallzeitmessungen der Sender 1 bis 6. Der Median wird durch die grüne Linie innerhalb der Box dargestellt, während der Interquartilsabstand (IQR) durch die Box begrenzt wird: der untere Rand repräsentiert das erste Quartil und der obere Rand das dritte Quartil. Die Whisker erstrecken sich bis maximal 1,5-fachen des Interquartilsabstands. Diese Darstellung visualisiert die Verteilung und Streuung der Nachhallzeiten über den gesamten Frequenzbereich.

4 Durchführung der Messungen und Auswertung der Ergebnisse

Die Histogramme in Abbildung 34 veranschaulichen die Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten in Abhängigkeit von der Frequenz für die Sender 1 bis 3 im offenen Zustand.. In den tiefen Frequenzen weisen die Verteilungen eine größere Streuung auf als in hohen Frequenzen. Im Vergleich zu den Histogrammen in Abbildung 30 ,die alle Senderpositionen berücksichtigen, zeichnen sich die doppelten Höhepunkte in den Histogrammen ab 400 Hz hier nicht mehr so deutlich ab. Ab 400 Hz zeigen die Verteilungen zudem eine linkssteile Form, was darauf hinweist, dass die gemessenen Nachhallzeiten tendenziell unter dem Mittelwert liegen.

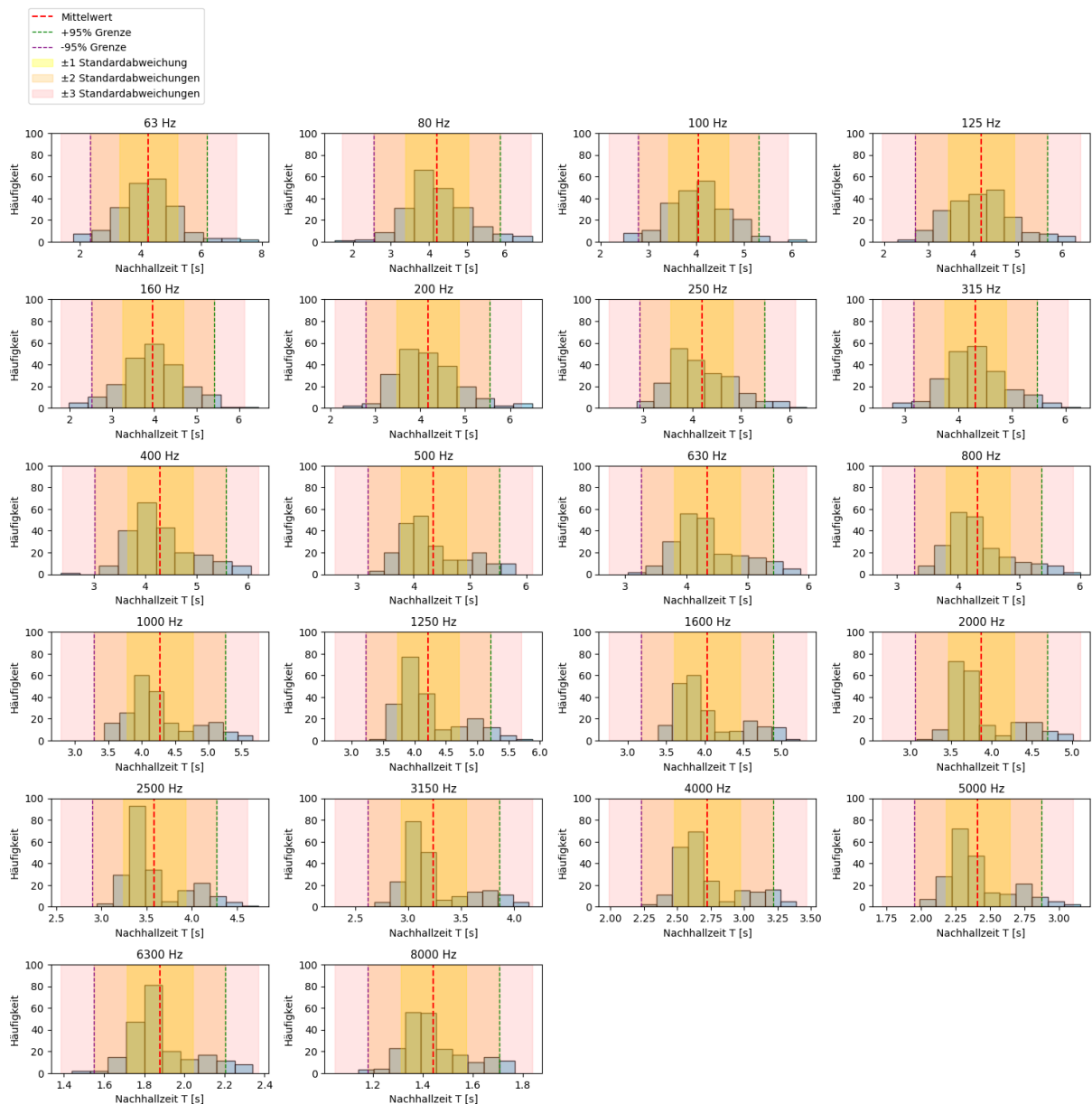


Abbildung 34: Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten T [s] in Abhängigkeit der Frequenz f [Hz] im offenen Zustand für Sender 1- 3: Die Abbildung zeigt Histogramme der gemessenen Nachhallzeiten T für jede Frequenz von 63 Hz bis 8000 Hz. Die X-Achse stellt die Nachhallzeiten T in Sekunden dar, während die Y-Achse die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Werte zeigt. Der Mittelwert ist als rote gestrichelte Linie markiert, die grüne und lila gestrichelten Linien stellen das 95%-Vertrauensintervall oberhalb bzw. unterhalb des Mittelwerts dar. Die Bereiche der Standardabweichung werden farblich hervorgehoben: Gelb zeigt ± 1 , Orange ± 2 und Rot ± 3 Standardabweichungen.

Das Diagramm in Abbildung 35 zeigt die gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten im offenen Zustand für die Sendergruppe 4-6, gemittelt über die Abklingvorgängen. Im tieffrequenten Bereich unterhalb von 250 Hz sind auch in dieser Darstellung ausgeprägte Schwankungen zwischen den Verläufen der Nachhallzeiten erkennbar. Mit zunehmender Frequenz nimmt die Streuung der Nachhallzeiten jedoch deutlich ab. Der mittlere Nachhallzeitverlauf erreicht seinen Höhepunkt im Frequenzbereich von etwa 500 Hz bis 630 Hz. Im Vergleich zu Abbildung 32 sind keine spezifischen Mikrofonpositionen eindeutig als Ausreißer oder besondere Verläufe erkennbar. Auffällig ist jedoch, dass die Mikrofonpositionen im mittleren Bereich des Atriums, die in Abbildung 32 überdurchschnittliche Nachhallzeiten zeigten, in dieser Darstellung unterhalb der mittleren Nachhallzeit liegen. Diese Positionen weisen nun die kürzesten Nachhallzeiten für die Senderpositionen 4-6 auf.

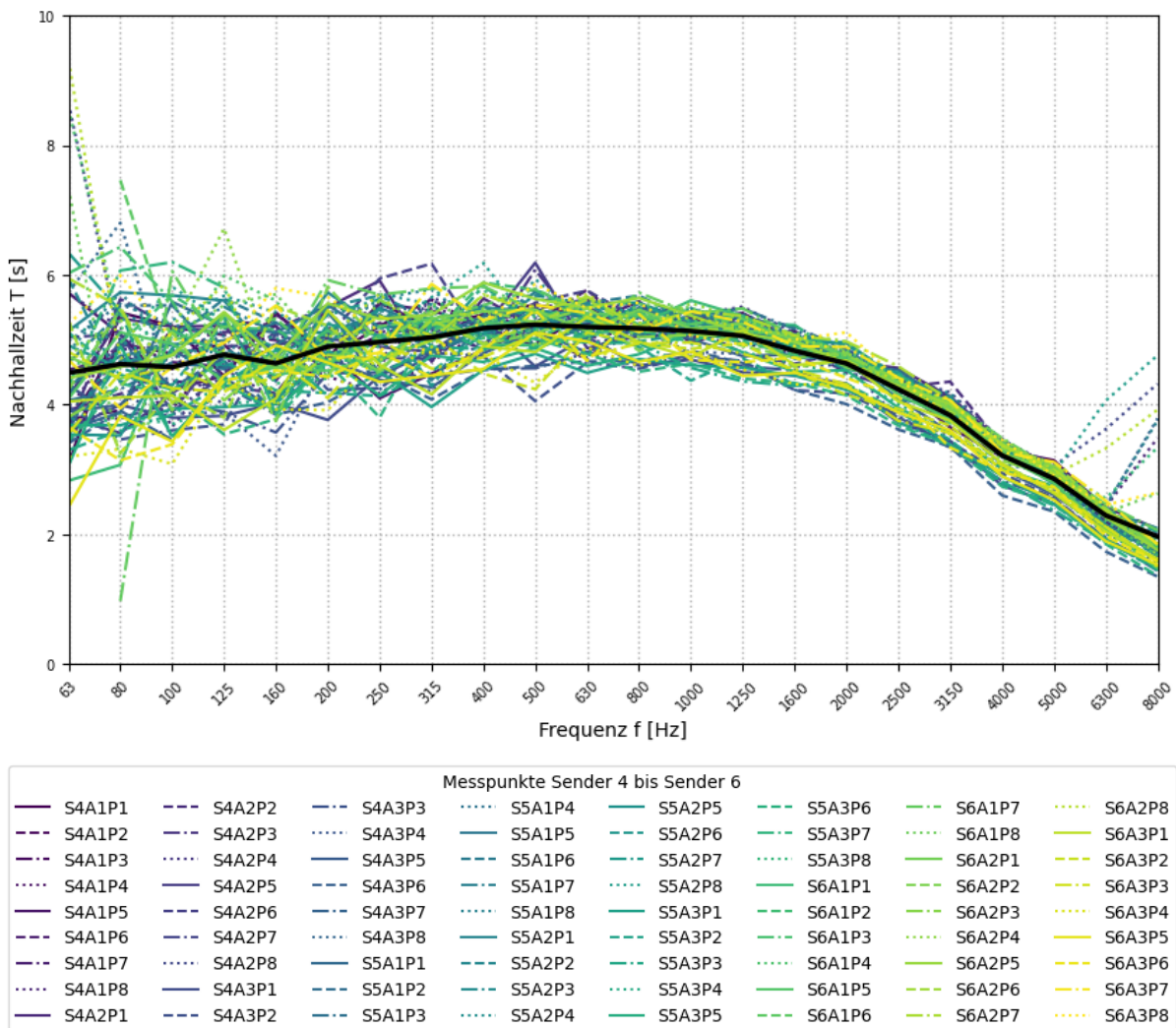


Abbildung 35: Gemessene frequenzabhängige Nachhallzeiten T [s] im offenen Zustand für Sender 4–6 gemittelt nach den Abklingvorgängen: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den Nachhallzeitverlauf für eine spezifische Kombination aus Sender, Aufstellungskombination und Messposition innerhalb dieser Aufstellungskombination. Die Legende folgt dem Schema: S (Sendernummer: 1–6), A (Aufstellkombination: A1–A3) und P (Messposition innerhalb dieser Aufstellungskombination: 1–8). Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert der Nachhallzeit T für jede Frequenz.

Abbildung 36 zeigt die Box-Plots der gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten für die Sendergruppe 4 – 6. Wie bei den Sendern 1-3 weisen die Boxen und Whisker im tieffrequenten Bereich die größte Streuung auf. Die Streuung nimmt auch hier mit steigender Frequenz ab. Im mittleren Frequenzbereich bleibt die Verteilung relativ konstant. Ab 1000 Hz werden die Boxen schmaler und die Whisker verkürzen sich. Die Variabilität ist hier ebenfalls in den hohen Frequenzen sehr gering.

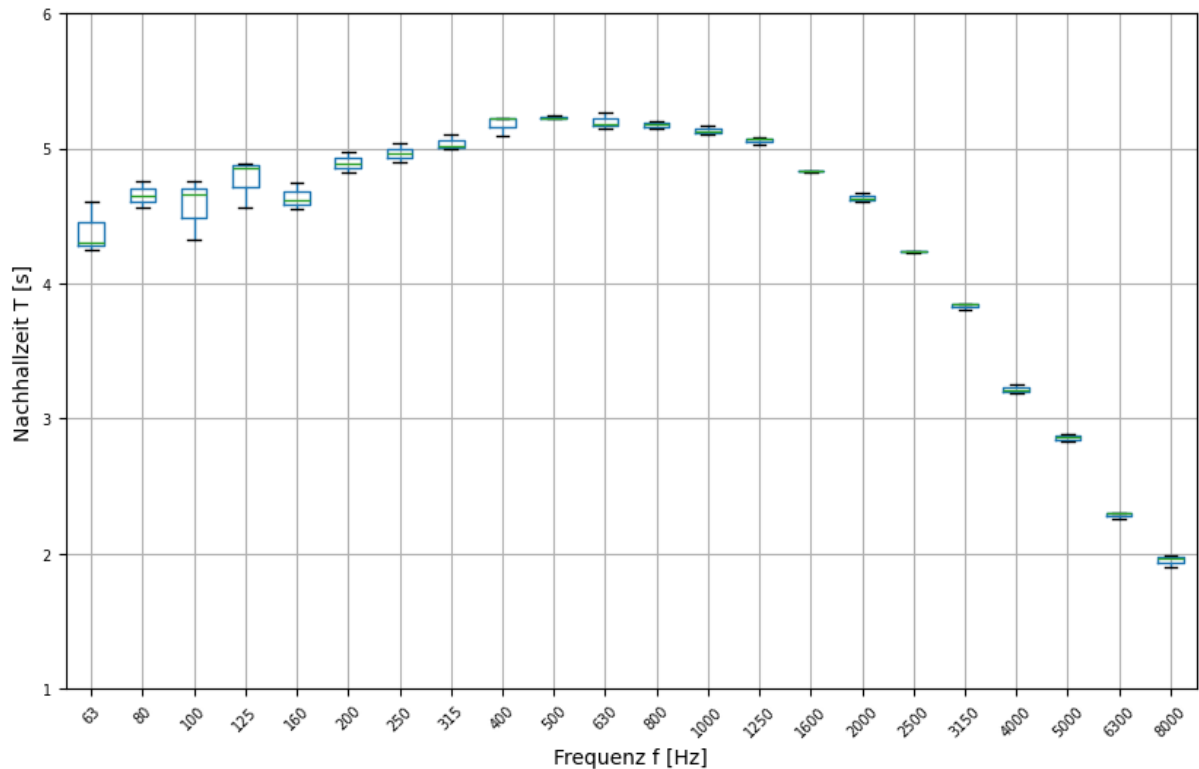


Abbildung 36: Box-Plots der gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten T [s] im offenen Zustand für Sender 4-6: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede Frequenz umfasst die Nachhallzeitmessungen der Sender 4 bis 6. Der Median wird durch die grüne Linie innerhalb der Box dargestellt, während der Interquartilsabstand (IQR) durch die Box begrenzt wird: der untere Rand repräsentiert das erste Quartil und der obere Rand das dritte Quartil. Die Whisker erstrecken sich bis maximal 1,5-fachen des Interquartilsabstands. Diese Darstellung visualisiert die Verteilung und Streuung der Nachhallzeiten über den gesamten Frequenzbereich.

4 Durchführung der Messungen und Auswertung der Ergebnisse

Die Histogramme in Abbildung 37 zeigen die Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten in Abhängigkeit von der Frequenz für die Sender 4 bis 6 im offenen Zustand. Im tieffrequenten Bereich, von 63 Hz bis etwa 200 Hz, weisen die Verteilungen eine größere Streuung auf, was sich in breiteren Histogrammbalken und einer größeren Standardabweichung zeigt. Diese Streuung nimmt mit steigender Frequenz kontinuierlich ab. Ab 400 Hz zeigen die Verteilungen im Vergleich zu Abbildung 30 keine klaren doppelten Höhepunkte mehr. Zudem sind die Verteilungen ab 400 Hz rechtssteil, was darauf hindeutet, dass die gemessenen Nachhallzeiten in diesen Frequenzbereichen tendenziell über dem Mittelwert liegen.

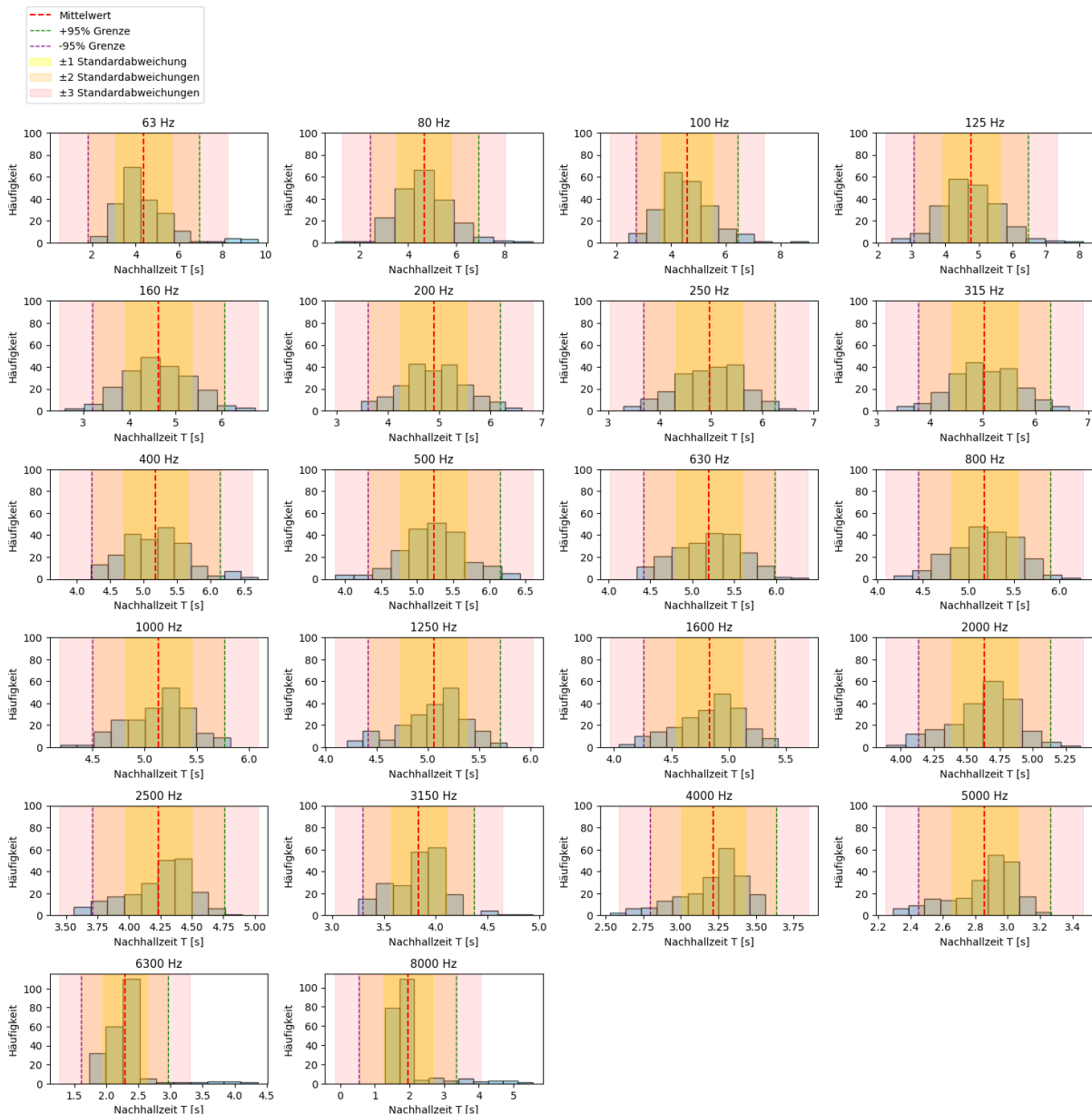


Abbildung 37: Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten T [s] in Abhängigkeit der Frequenz f [Hz] im offenen Zustand für Sender 4- 6: Die Abbildung zeigt Histogramme der gemessenen Nachhallzeiten T für jede Frequenz von 63 Hz bis 8000 Hz. Die X-Achse stellt die Nachhallzeiten T in Sekunden dar, während die Y-Achse die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Werte zeigt. Der Mittelwert ist als rote gestrichelte Linie markiert, die grüne und lila gestrichelten Linien stellen das 95%-Vertrauensintervall oberhalb bzw. unterhalb des Mittelwerts dar. Die Bereiche der Standardabweichung werden farblich hervorgehoben: Gelb zeigt ± 1 , Orange ± 2 und Rot ± 3 Standardabweichungen.

Abbildung 38 zeigt die gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten im offenen Zustand für den Sender 1, gemittelt über die Abklingvorgänge. Im tieffrequenten Bereich unterhalb von 250 Hz sind deutliche Schwankungen zwischen den Nachhallzeitverläufen erkennbar. Mit zunehmender Frequenz nimmt die Streuung der Nachhallzeiten jedoch deutlich ab. Der mittlere Nachhallzeitverlauf erreicht seinen Höhepunkt im Frequenzbereich von etwa 500 Hz bis 630 Hz.

In diesem Diagramm werden die Unterschiede zwischen den Nachhallzeitverläufen der Mikrofonpositionen klar sichtbar. Mikrofone, die deutlich weiter von der Schallquelle entfernt sind, weisen auch höhere Nachhallzeiten auf. Mikrofonpositionen im mittleren Bereich des Atriums (siehe Abbildung 17: Position 9, 10, 11, 12, 17 und 18) liegen dabei konstant über dem mittleren Nachhallzeitverlauf.

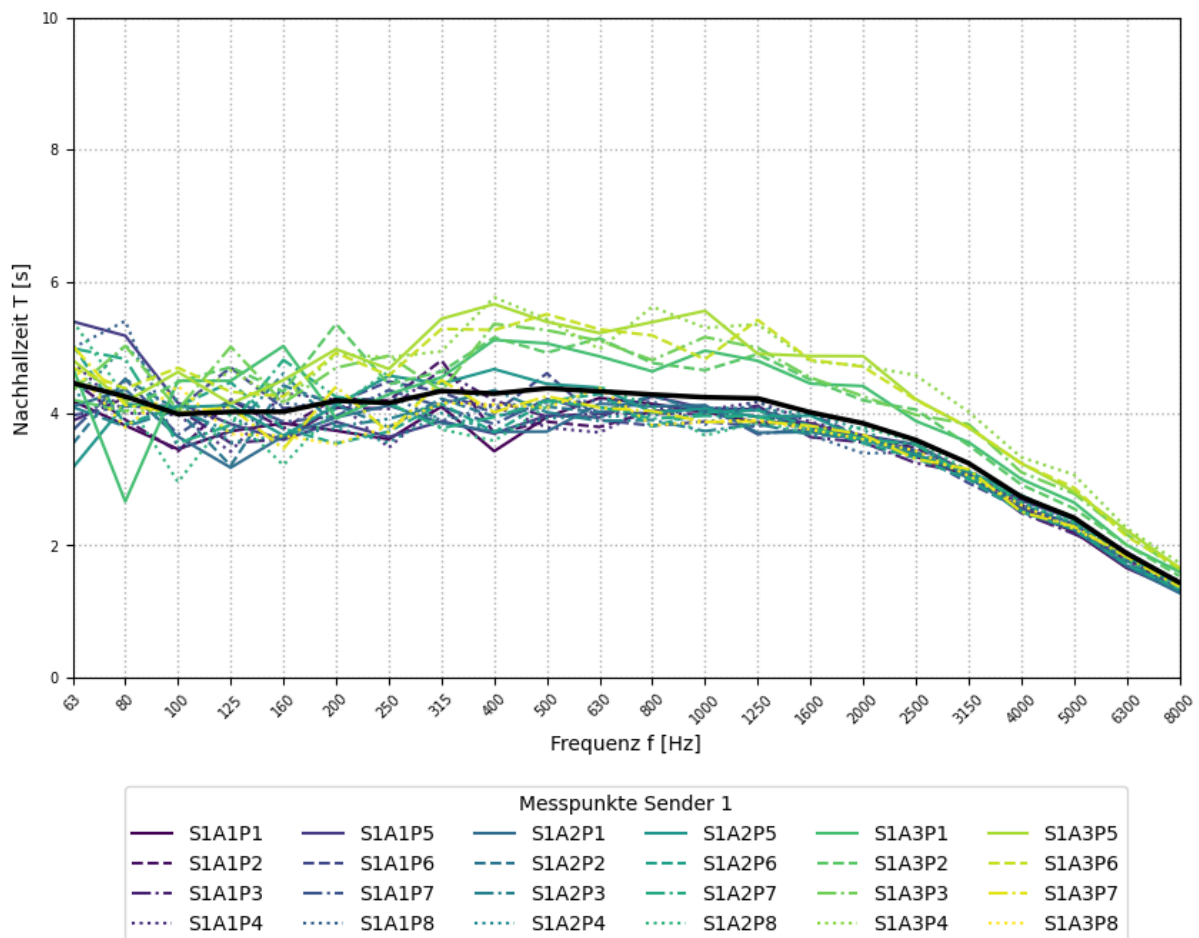


Abbildung 38: Gemessene frequenzabhängige Nachhallzeiten T [s] im offenen Zustand für Sender 1 gemittelt nach den Abklingvorgängen: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den Nachhallzeitverlauf für eine spezifische Kombination aus Sender, Aufstellungskombination und Messposition innerhalb dieser Aufstellungskombination. Die Legende folgt dem Schema: S (Sendernummer: 1), A (Aufstellkombination: A1-A3) und P (Messposition innerhalb dieser Aufstellungskombination: 1–8). Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert der Nachhallzeit T für jede Frequenz.

Abbildung 39 präsentiert abschließend die gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten im offenen Zustand für den Sender 5, gemittelt über die Abklingvorgänge. Auch in diesem Fall zeigt sich eine deutliche Streuung der Messwerte im tieffrequenten Bereich. Auffällig ist jedoch, dass die Mikrofonpositionen bei dieser Senderposition im Gegensatz zur vorherigen Abbildung nun unterhalb des mittleren Nachhallzeitverlaufs liegen und die kürzesten Nachhallzeiten aufweisen.

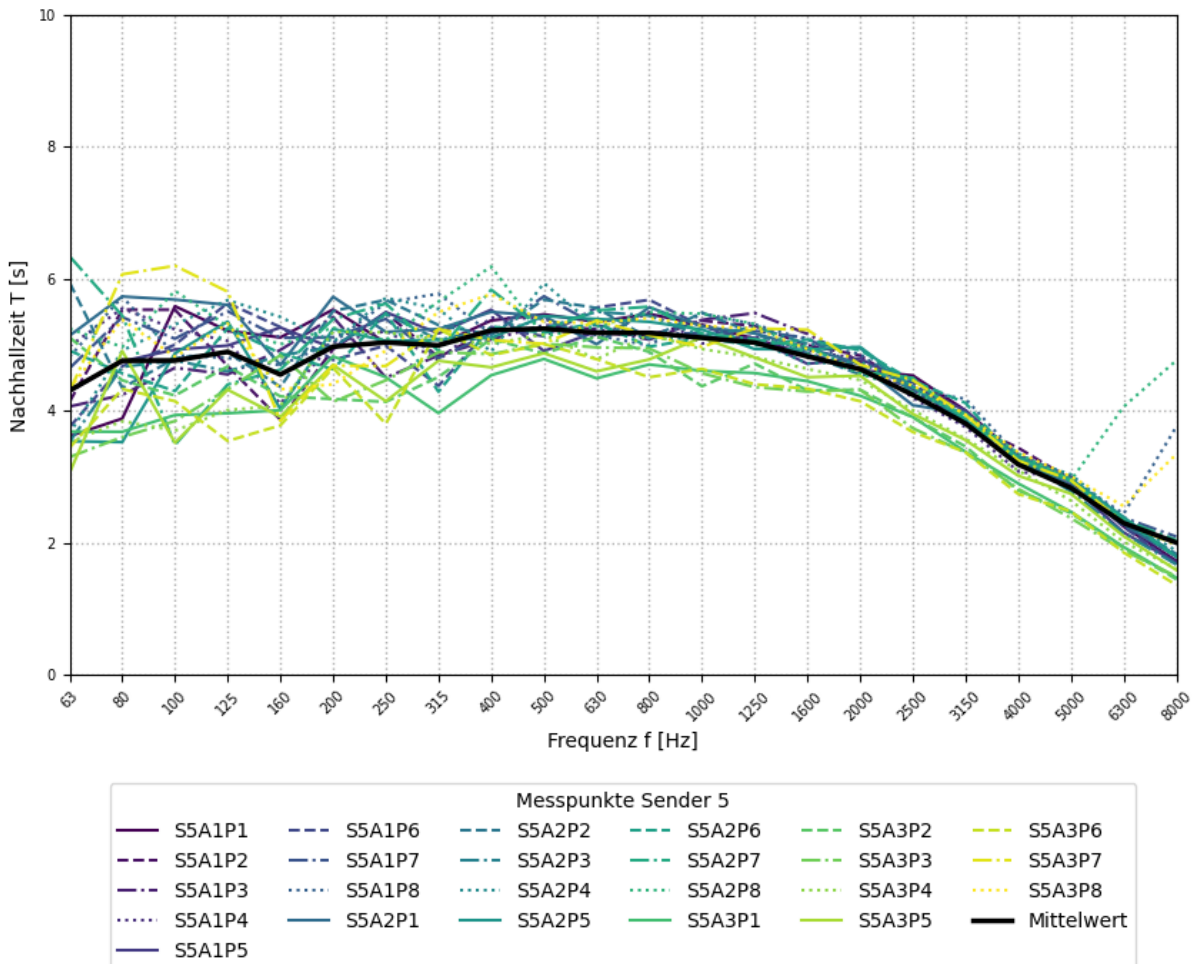


Abbildung 39: Gemessene frequenzabhängige Nachhallzeiten T [s] im offenen Zustand für Sender 5 gemittelt nach den Abklingvorgängen: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den Nachhallzeitverlauf für eine spezifische Kombination aus Sender, Aufstellungskombination und Messposition innerhalb dieser Aufstellungskombination. Die Legende folgt dem Schema: S (Sendernummer: 5), A (Aufstellungskombination: A1-A3) und p (Messposition innerhalb dieser Aufstellungskombination: 1–8). Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert der Nachhallzeit T für jede Frequenz.

Die Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten in Abhängigkeit von der Frequenz für jede einzelnen Sender ist in den Anlage VII - XI dargestellt und kann dort eingesehen werden.

4.3 Bewertung der Messungen

Die Nachhallzeitmessungen lieferten aufschlussreiche Ergebnisse über das akustische Verhalten im Atrium. Im geschlossenen Zustand wurde im linken Lichthof, dessen Volumen etwa 3.999 m^3 beträgt, eine mittlere Nachhallzeit von $T_{m,125\text{Hz}-4000 \text{ Hz}} = 3,87 \text{ s}$ gemessen. Der rechte Lichthof, mit einem Volumen von rund 6.371 m^3 , wies eine mittlere Nachhallzeit von $T_{m,125\text{Hz}-4000 \text{ Hz}} = 4,07 \text{ s}$ auf. Im offenen Zustand erhöhte sich die mittlere Nachhallzeit auf $T_{m,125\text{Hz}-4000 \text{ Hz}} = 4,24 \text{ s}$. Die Nachhallzeiten befinden sich in einem für Atrien typischen Bereich [25].

Die Verläufe der gemessenen Nachhallzeiten zeigen in allen Fällen ein ähnliches Muster, das für Atrien charakteristisch ist [25]. Sie sind durch kürzere Nachhallzeiten im tieffrequenten Bereich, einen Höhepunkt bei etwa 500 Hz im mittleren Frequenzbereich und einen konstanten Abfall in den höheren Frequenzen geprägt. Besonders bemerkenswert ist die signifikante Reduktion der Nachhallzeiten bei niedrigen Frequenzen, die auf die starke Absorption durch die großen Glasflächen der Lichthöfe zurückzuführen ist. Diese Eigenschaft ist typisch für Atrien und unterscheidet sie von anderen großen Innenräumen, in denen solche Effekte normalerweise nicht auftreten. [26]

Bei allen Messungen fiel auf, dass die Nachhallzeiten im tieffrequenten Bereich besonders hohe Streuungen aufweisen. Aufgrund der großen Wellenlängen tieffrequenter Schallwellen bilden sich in großen Räumen wie Atrien häufig stehende Wellen, die lokale Unterschiede in der Schallenergieverteilung erzeugen. Die komplexe Geometrie solcher Räume verstärkt diesen Effekt, da tieffrequente Wellen längere Reflexionswege benötigen, um ein diffuses Schallfeld zu erzeugen. Gleichzeitig weisen viele Oberflächenmaterialien eine geringe Absorptionseigenschaft für tieffrequente Schallwellen auf, was die Reflexionen und Schwankungen begünstigt. Zusätzlich beeinflusst die Platzierung der Messmikrofone, insbesondere in Nähe von Schallknoten oder -bäuchen, die Messergebnisse. Die Kombination aus akustischen und geometrischen Effekten macht tieffrequente Nachhallzeiten besonders anfällig für Schwankungen. [1, 26]

Es wurde für jede Messung die Verteilung der frequenzabhängigen Nachhallzeiten in Histogrammen dargestellt. Für den offenen Zustand zeigte sich in den mittleren Frequenzbereichen eine charakteristische Verteilung mit zwei Maxima (siehe Abbildung 30). Eine detaillierte Betrachtung der Nachhallzeitverläufe für jede einzelne Sender-Empfänger-Kombination offenbarte zwei deutlich unterscheidbare Nachhallzeitbereiche, die auf die unterschiedlichen Positionen der Sender zurückzuführen sind. Aus diesem Grund wurden die Nachhallzeitverläufe und Histogramme getrennt für die Sendergruppen 1–3 sowie 4–6 ausgewertet. Dabei kristallisierten sich erneut zwei „Gruppen“ von Nachhallzeiten heraus (Abbildung 32), die auf die spezifischen Empfängerpositionen hinweisen. Dies führte zu einer noch detaillierteren Analyse der Messungen. Im Rahmen der Untersuchung wurden insbesondere zwei Senderpositionen detailliert analysiert. Senderposition 1, die im linken Lichthof platziert war, zeigte, dass die Empfängerpositionen im mittleren Bereich des Atriums deutlich längere Nachhallzeiten aufweisen (vergl. Abbildung 38). Im Gegensatz dazu befand sich Senderposition 5 im rechten Lichthof in unmittelbarer Nähe zu den Empfängerpositionen im mittleren Bereich des Atriums, was zu merklich kürzeren Nachhallzeiten führte (vergl. Abbildung 39).

Die Analyse der Messdaten zeigte, dass mit zunehmendem Abstand zwischen Quelle und Empfänger die Nachhallzeit signifikant ansteigt, und zwar nicht nur horizontal, sondern auch vertikal mit zunehmender Höhe in jedem Geschoss. So wurde für die Senderposition 1 im

Erdgeschoss eine mittlere Nachhallzeit von $T_{m,125\text{Hz}-4000\text{ Hz}} = 3,69$ Sekunden festgestellt, während die mittlere Nachhallzeit der Empfängerpositionen im zweiten Obergeschoss bereits $T_{m,125\text{Hz}-4000\text{ Hz}} = 4,28$ Sekunden betrug. Dieses Verhalten wird in mehreren wissenschaftlichen Arbeiten bestätigt, darunter die Studien von [1, 26, 28]. Das Verhalten ist ein deutlicher Hinweis auf ein nicht-diffuses Schallfeld, da die Schallenergie nicht gleichmäßig im Raum verteilt wird [26]. Ursache hierfür sind die geometrischen Eigenschaften des Atriums sowie die stark reflektierenden Oberflächen aus Materialien wie Glas und Stein, die dazu führen, dass frühe Reflexionen nicht gleichmäßig an den Empfängerpositionen ankommen. Insbesondere in höheren Geschossen bewirken längere Reflexionswege und die Interaktion mit komplexen Raumstrukturen eine Verzögerung des Schalls, wodurch die Nachhallzeit merklich ansteigt [18].

Die Untersuchung zeigt, dass die Nachhallzeiten in allen analysierten Fällen deutlich zu lang sind, wodurch das Atrium als Aufenthaltsraum akustisch ungeeignet erscheint. Dabei wird die zentrale Bedeutung der Raumgeometrie und der Oberflächenmaterialien für die akustischen Eigenschaften großer Innenräume hervorgehoben. Insbesondere die ungleichmäßige Verteilung der Nachhallzeit beeinträchtigt die Sprachverständlichkeit und die allgemeine akustische Qualität erheblich.

Die Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit, Geometrie und Materialwahl gezielt auf die akustischen Anforderungen abzustimmen, um ein homogenes Schallfeld zu realisieren. Die Analyse zeigt zudem eine deutliche Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeiten sowie signifikante Variationen in Abhängigkeit von Sender- und Messposition. Diese räumliche Variabilität, unterstreicht die komplexe Dynamik der Schallausbreitung in solchen Räumen.

Diese Erkenntnisse sind entscheidend für die Optimierung der akustischen Gestaltung von Atrien und vergleichbaren Räumen. Sie zeigen, dass eine präzise Planung und Anpassung der verwendeten Materialien erforderlich sind, um die akustische Qualität und Funktionalität im Atrium zu verbessern.

5.3 Simulationen mit akustischen Optimierungen

Aufgrund der in Kapitel 3.2 beschriebenen Einschränkungen gestaltet sich ein Eingriff in die Akustik des Atriums als äußerst schwierig. Die strikte Einhaltung der Denkmalschutz- sowie Brandschutzanforderungen sind zwingend erforderlich. Zwar existieren einige Forschungsarbeiten, wie beispielsweise die BBSR-Online-Publikation [49], die eine Vielzahl von Konzepten und Lösungen zur Verbesserung der Akustik in denkmalgeschützten Gebäuden vorstellen. Dennoch dürfen aufgrund der Genehmigungsrestriktionen nur sehr wenige permanente Maßnahmen umgesetzt werden, weshalb solche Forschungsarbeiten nur eine kleine Hilfestellung für die Entwicklung von Maßnahmen waren.

Aus diesem Grund wurden in zeitintensiven Meetings gemeinsam mit der Projektplanung Maßnahmen entwickelt, die sowohl die Akustik verbessern als auch die geltenden Anforderungen erfüllen und sich in das architektonische Konzept integrieren lassen. Dabei wurden insgesamt vier Maßnahmen erarbeitet, die alle definierten Anforderungen berücksichtigen. Diese Maßnahmen werden im weiteren Verlauf des Kapitels detaillierter beschrieben. Zusätzlich wurde in Absprache mit den Betreuern dieser Arbeit entschieden, zwei weitere Simulationsvarianten zu entwickeln, die sich bewusst von den bestehenden Beschränkungen lösen.

Die entwickelten Maßnahmen werden zunächst einzeln simuliert, um einen klaren Vergleich zu ermöglichen. Auf diese Weise kann die Wirkung jeder einzelnen Maßnahme auf die Nachhallzeit einzeln betrachtet und unabhängig voneinander evaluiert werden. Abschließend wurden zwei weitere Simulationsvarianten durchgeführt, bei denen die einzelnen Maßnahmen teilweise miteinander kombiniert wurden, um eine gemeinschaftliche Wirkung auf die Akustik zu untersuchen.

Die Projektplanung sieht verschiedene Nutzungsmöglichkeiten für das Atrium vor. Dabei wurden zwei Nutzungsszenarien ausgewählt, die voraussichtlich am häufigsten umgesetzt werden. Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, unterscheiden sich die vorgesehenen Nutzungen zwischen dem linken und dem rechten Lichthof.

Im rechten Lichthof ist hauptsächlich eine Nutzung als Ausstellungsfläche vorgesehen, während im ersten Obergeschoss, zwischen den beiden Lichthöfen, Empfänge oder ebenfalls Ausstellungen stattfinden sollen. Der linke Lichthof hingegen wird flexibel genutzt, wobei die Nutzung zwischen studentischen Arbeiten und Vorträgen variieren.

Die Projektplanung hat diese beiden Nutzungskonzepte im Grundriss visualisiert und sind in Abbildung 56 und Abbildung 57 dargestellt.

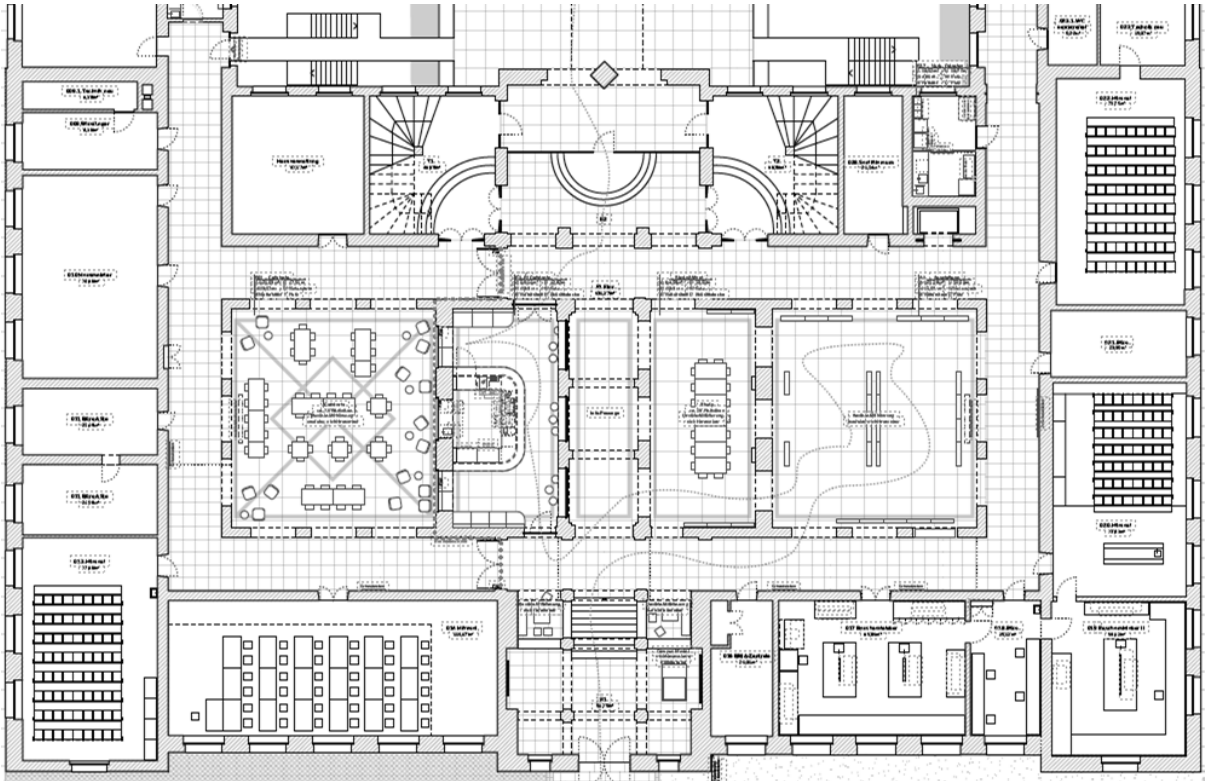


Abbildung 56: Ausschnitt aus dem Grundriss des Erdgeschosses mit dem Nutzungskonzept: Unialltag im linken Lichthof und Ausstellung im rechten Lichthof (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue)

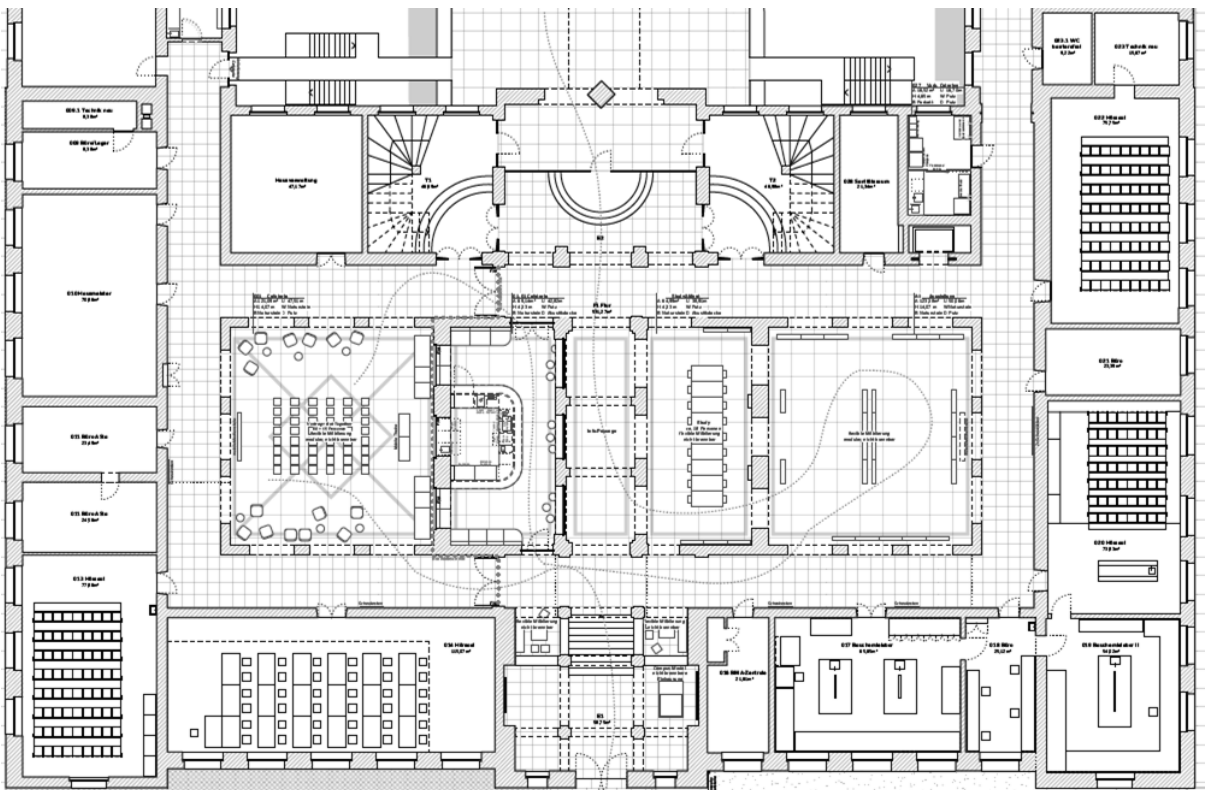


Abbildung 57: Ausschnitt aus dem Grundriss des Erdgeschosses mit dem Nutzungskonzept: Vortrag im linken Lichthof und Ausstellung im rechten Lichthof (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue)

Die im Folgenden beschriebenen Maßnahmen werden für beide Nutzungsszenarien gleichermaßen angewendet. Aus diesem Grund sind die Maßnahmen nur in einem der Grundrisse gekennzeichnet, gelten jedoch analog auch für das andere Nutzungsszenario. Lediglich bei der zweiten Maßnahme gibt es geringfügige Unterschiede in der Anordnung der akustischen Elemente.

Die Auswirkungen auf die Nachhallzeit sind für beide Szenarien identisch und werden im Ergebnisteil aus Gründen der Übersichtlichkeit nur einmal dargestellt, um Wiederholungen zu vermeiden. Die Bewertung der Sprachverständlichkeit erfolgt hingegen spezifisch für das Nutzungsszenario „Vortrag“, da die Sprachverständlichkeit für diese Art der Nutzung von besonderer Bedeutung ist.

Die Grundlage für die weiteren Simulationen bildet das kalibrierte Simulationsmodell mit den Schallabsorptionsgraden aus Tabelle 6. Die Grundeinstellungen des Modells werden bei allen Simulationen unverändert beibehalten, um eine konsistente Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Um die Berechnungszeiten zu reduzieren wurde entschieden, die Simulationen auf eine Senderposition in Kombination mit ausgewählten Empfängerpositionen zu beschränken. Die Kalibrierung hat gezeigt, dass die Empfängerpositionen 03 und 11 die Nachhallzeit des Atriums im Mittel repräsentativ abbilden.

Würden alle Sender- und Mikrofonpositionen in den Simulationen berücksichtigt, lägen die Berechnungszeiten selbst mit dem zeiteffizientesten Algorithmus bei etwa einer Woche. Aus diesem Grund wurden die beiden Positionen für die weiteren Simulationen ausgewählt, um eine angemessene Balance zwischen Rechenzeit und Aussagekraft der Ergebnisse zu erreichen.

Ziel ist es, die Nachhallzeit im Rahmen der bestehenden Beschränkungen so weit wie möglich zu reduzieren und gleichzeitig eine verbesserte Sprachverständlichkeit für das Nutzungsszenario „Vortrag“ zu erreichen. Zu lange Nachhallzeiten haben Einfluss auf konzentriertes Arbeiten sowie auf die Aufnahme von Informationen und führen zu einer deutlich schnelleren Ermüdung des Zuhörers. [50]

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, existieren keine normativen Anforderungen an die Nachhallzeit in Atrien. Stattdessen dienen lediglich Vorschläge für geeignete Nachhallzeiten als Orientierung. Für eine hohe akustische Qualität wurde festgestellt, dass ein diffuses Schallfeld in Atrien von zentraler Bedeutung ist. Dabei sollte darauf geachtet werden, die Nachhallzeit gleichmäßig über alle Frequenzbereiche hinweg zu reduzieren, um eine ausgewogene und angenehme akustische Umgebung zu schaffen. Besonders für die Nutzung als Vortragsraum ist die Sprachverständlichkeit ein entscheidender Faktor. Hierbei sollte ein Speech Transmission Index (STI, siehe Definition in Kapitel 2.1.1.7) von rund 0,6 für alle Zuhörenden erreicht werden, um eine ausreichende Verständlichkeit der gesprochenen Inhalte sicherzustellen. [20]

5.3.1 Simulationsvariante 1: Reduktion der Nachhallzeit durch Wandabsorber

In einem der ersten Meetings mit der Projektplanung wurden die potenziellen Oberflächen identifiziert, an denen theoretisch Absorber angebracht werden könnten. Dabei stellte sich heraus, dass ausschließlich die Wandflächen in den Gängen für die Installation von Absorbern genutzt werden dürfen. Der erste Ansatz konzentrierte sich daher darauf, Wandabsorber an den verfügbaren Flächen anzubringen.

Die Kalibrierungssimulation zeigte, dass lange Reflexionen zwischen den gegenüberliegenden Wandflächen durch die Bögen entstehen. Aus diesem Grund wurde bei der Anordnung der Wandabsorber darauf geachtet, diese gezielt gegenüber großen reflektierenden Flächen zu platzieren, um diese Reflexionen effektiv zu minimieren.

Die Integration der Wandabsorber musste zudem in das architektonische Gesamtkonzept passen, was die nachfolgende Anordnung der Absorber bestimmte. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass die Wandabsorber den Brandschutzanforderungen entsprechen und daher aus nicht brennbaren Materialien bestehen. Insgesamt konnten 86 m² Wandabsorber berücksichtigt werden. Detaillierte Produktinformationen und die zugehörigen Schallabsorptionswerte sind in Anlage XVIII dokumentiert.

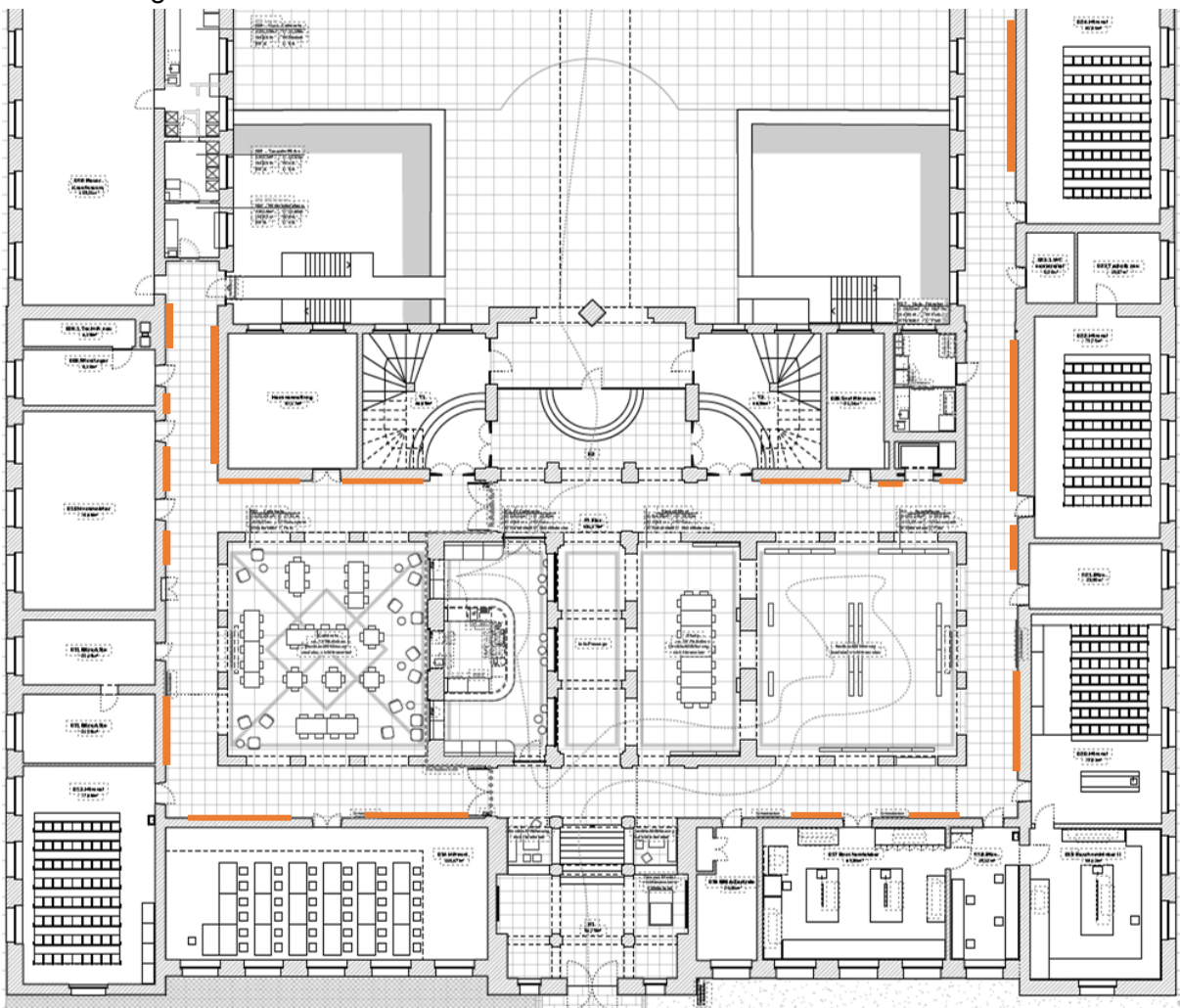


Abbildung 58: Gezeigt wird ein Grundrissausschnitt des Atriums, in dem die Verteilung der Wandabsorber durch orange Markierungen dargestellt ist; erste Maßnahme der akustischen Optimierung (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)

5.3.2 Simulationsvariante 2: Abschirmung durch Vorhänge

Abschirmung kann ein effektives Mittel zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit und Lärmreduzierung in Teilbereichen sein [9]. Aufgrund dessen wurde entschieden, die Lichthöfe im Erdgeschoss etwas abzuschirmen, in dem mobile Vorhänge zwischen den Bögen eingesetzt werden. Da nicht alle Bögen zu den Lichthöfen mit Vorhängen ausgestattet werden können, um die Zugänglichkeit nicht einzuschränken, wurde gemeinsam mit der Projektplanung eine geeignete Positionierung der Vorhänge für die beiden Nutzungsszenarien entwickelt. Dabei wurde berücksichtigt, dass bestimmte Laufwege frei bleiben und Vorhänge so angeordnet werden, dass gegenüber von offenen Bögen geschlossene Bögen mit Vorhängen entstehen. Im Szenario „Vortrag“ wurden im Bereich des Redners alle Bögen mit Vorhängen ausgestattet. Diese Maßnahme dient dazu, störende Reflexionen zwischen der Wand hinter dem Publikum und der Wand hinter dem Redner zu minimieren. Zudem wird die Vortragssituation weniger durch Bewegungen von Personen in den Fluren um die Lichthöfe beeinträchtigt. Im Szenario „Vortrag“ konnte insgesamt eine Vorhangfläche von rund 83 m² und im Szenario „Uni-Alltag“ eine Fläche von etwa 62 m² berücksichtigt werden. Vorhänge werden den porösen Absorbern zu geordnet und haben besonders bei mittleren und hohen Frequenzbereichen eine schallabsorbierende Wirkung. Bei der Wahl der Vorhänge wurde besonders darauf geachtet, dass sie die erforderlichen Brandschutzanforderungen erfüllen. Detaillierte Produktinformationen, die zugehörigen Schallabsorptionswerte sowie die prozentuale Verteilung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche für diese Simulationsvariante, sind in Anlage XIX dokumentiert.

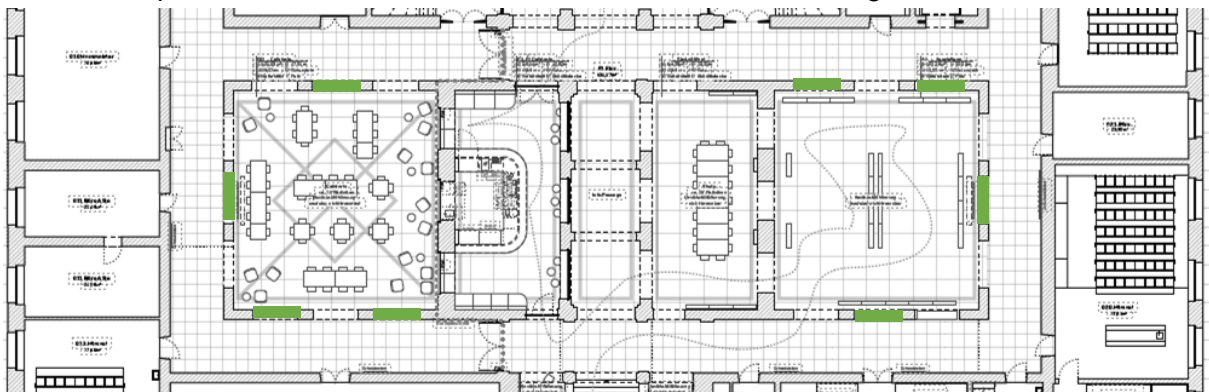


Abbildung 59: Gezeigt wird ein Grundrissausschnitt des Atriums, in dem die Verteilung der Vorhänge durch grüne Markierungen für das Szenario „Uni-Alltag“ dargestellt ist; zweite Maßnahme der akustischen Optimierung (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)

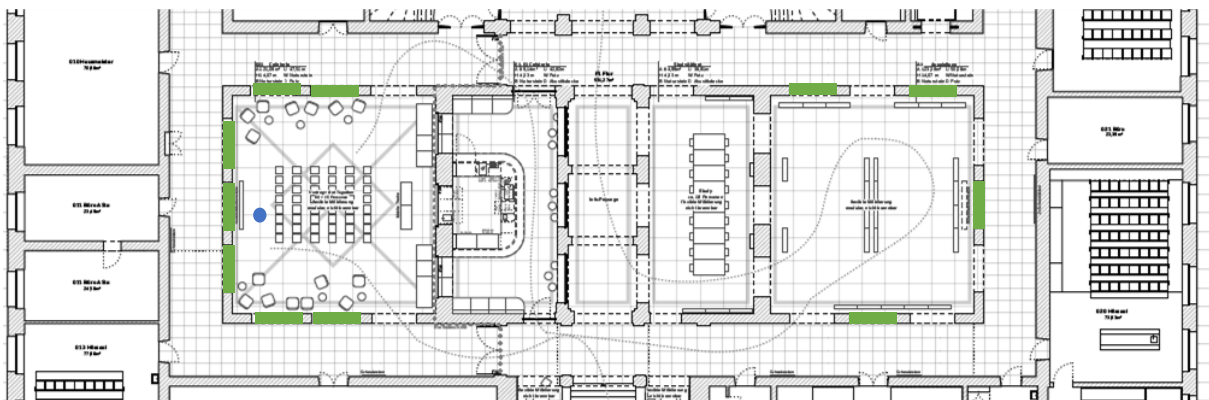


Abbildung 60: Gezeigt wird ein Grundrissausschnitt des Atriums, in dem die Verteilung der Vorhänge durch grüne Markierungen für das Szenario „Vortrag“ dargestellt ist; zweite Maßnahme der akustischen Optimierung, blauer Punkt: Redner (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)

5.3.3 Simulationsvariante 3: Mikroperforierte Akustiksegel

In einigen wissenschaftlichen Ausarbeitungen, wie beispielsweise in [24] wird der Einsatz von transparenten mikroperforierten Absorbern zwischen schallharten Begrenzungsflächen als eine effektive Maßnahme zur Reduzierung von multiplen Reflexionen, insbesondere zwischen Boden und Glasdach beschrieben, welche zu einer signifikanten Verbesserung der Raumakustik führen können.

Aufgrund ihrer Transparenz und der Möglichkeit einer unauffälligen Integration, werden mikroperforierte Absorber häufig in denkmalgeschützten Gebäuden eingesetzt [9, 49]. Unter Berücksichtigung der bestehenden Einschränkungen bieten sich in diesem Fall die Ringlichter als geeignete Positionierungsorte für die mikroperforierten Absorber an (Funktionsweise wurde in Kapitel 2.1.2.3 erläutert). Die Ringlichter haben einen Durchmesser von etwa 6 m und sind in einer Höhe von rund 5 m angebracht. In dieser Simulationsvariante werden in den Ringlichtern doppelagige mikroperforierte Folienabsorber vorgesehen, die in einem Abstand von etwa 15 cm zueinander angebracht werden. Diese Anordnung ermöglicht eine effektive akustische Wirkung, ohne die ästhetische und architektonische Gestaltung des Atriums zu beeinträchtigen. Die Schallabsorptionsgrade für diese Variante wurden aus einem vergleichbaren Fallbeispiel übernommen [51], da von den Herstellern keine spezifischen Werte für eine freihängende Anordnung mikroperforierter Absorber angegeben werden. Detaillierte Produktinformationen, die zugehörigen Schallabsorptionswerte sowie die prozentuale Verteilung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche für diese Simulationsvariante, sind in Anlage XX dokumentiert.

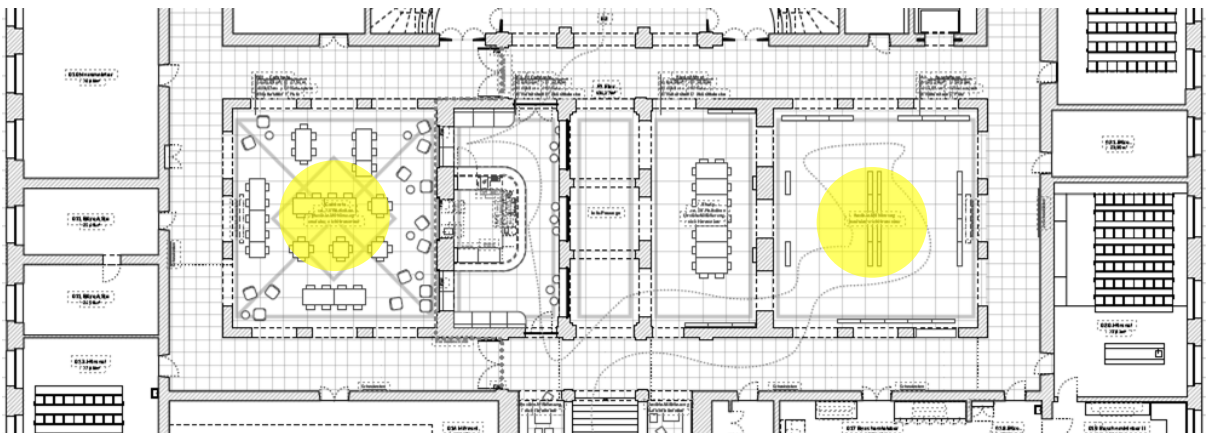


Abbildung 61: Gezeigt wird ein Grundrissausschnitt des Atriums, in dem die Position der mikroperforierten Folie in den Ringlichtern durch gelbe Markierungen dargestellt ist; dritte Maßnahme der akustischen Optimierung (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)

5.3.4 Simulationsvariante 4: Erhöhung der Schallabsorption durch eine Akustikdecke

Ein weiterer potenzieller Bereich für die Platzierung von Absorptionsflächen ist der Deckenbereich im ersten Obergeschoss zwischen den beiden Lichthöfen (siehe Abbildung 62). Aufgrund der begrenzten möglichen Abhanghöhe, die mit derjenigen der bereits vorhandenen Abhangdecke im zweiten Obergeschoss vergleichbar ist, wird diese Fläche in dieser Simulationsvariante mit derselben Akustikdecke ausgestattet. Es wurden ungefähr 168 m² Akustikdecke berücksichtigt. Detaillierte Produktinformationen, die zugehörigen Schallabsorptionswerte sowie die prozentuale Verteilung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche für diese Simulationsvariante, sind in Anlage XXI dokumentiert.

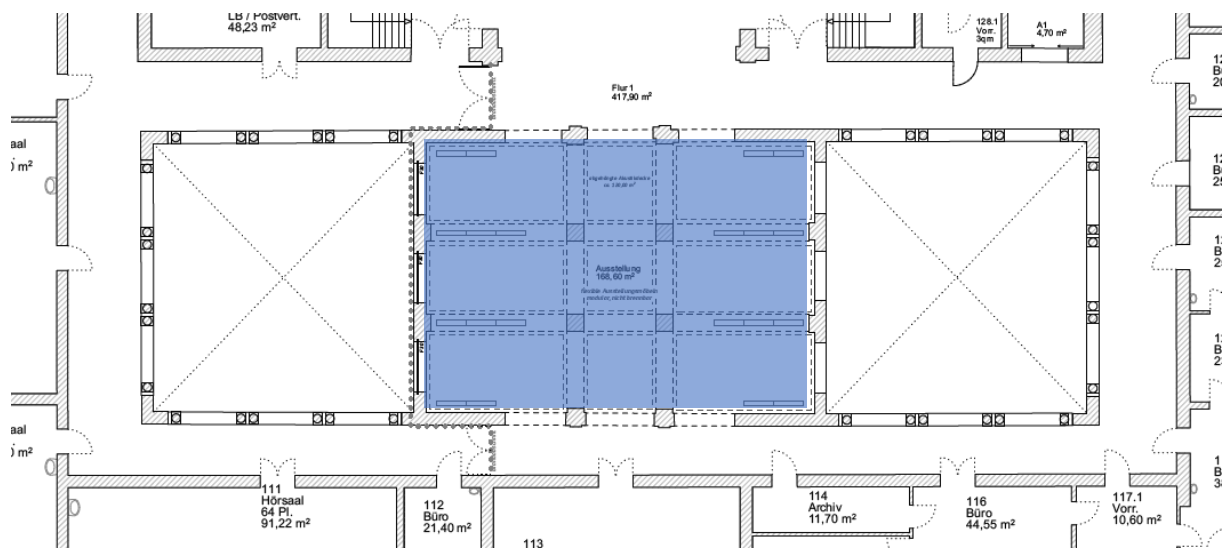


Abbildung 62: Gezeigt wird ein Grundrissausschnitt vom ersten Obergeschoss des Atriums, in dem die Position der Abhangdecke durch eine blaue Markierung dargestellt ist; vierte Maßnahme der akustischen Optimierung (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)

5.3.5 Simulationsvariante 5: Mikroperforierte Folien vor Glasflächen

Diese Simulationsvariante löst sich von den vorgegebenen Einschränkungen und untersucht eine freiere Gestaltung der Maßnahmen. Basierend auf der in Simulationsvariante 3 beschriebenen Wirksamkeit mikroperforierter Folien sowie deren unauffälliger Integrationsmöglichkeit, wird diese Maßnahme auf die Glasfläche angewendet, die sich im Erdgeschoss vor der Cafeteria im linken Atrium befindet und den Mittelgang im ersten Obergeschoss zum linken Lichthof abgrenzt. Die mikroperforierte Folie wird in einem Abstand von 10 cm vor der Glasfläche angebracht. In dieser Variante wird das Prinzip auch auf die rechte Seite des Atriums übertragen. Dies dient nicht nur der akustischen Abschirmung des Ausstellungsbereichs im ersten Obergeschoss zum rechten Lichthof, sondern sorgt gleichzeitig dafür, dass die Verbindung zwischen rechtem und linkem Lichthof weiter eingeschränkt wird. Dadurch werden Störgeräusche, die im rechten Lichthof entstehen, stärker abgeschirmt und der Einfluss auf den linken Lichthof wird minimiert. Es wurde eine Fläche von ca. 90 m² berücksichtigt. Detaillierte Produktinformationen, die zugehörigen Schallabsorptionswerte sowie die prozentuale Verteilung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche für diese Simulationsvariante, sind in Anlage XXII dokumentiert.

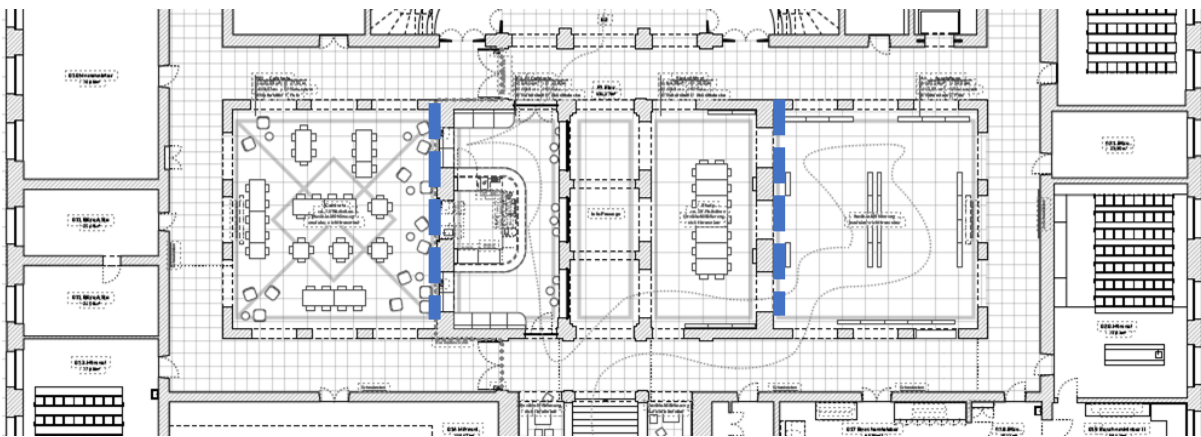


Abbildung 63: Gezeigt wird ein Grundrissausschnitt vom Erdgeschoss des Atriums, in dem die Position der mikroperforierten Absorber vor eine Glasfläche gekennzeichnet ist (blaue gestrichelte Linie); fünfte Maßnahme der akustischen Optimierung (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)

5.3.6 Simulationsvariante 6: Berücksichtigung von Deckensegeln

Die Simulationsvariante 6 löst sich ebenfalls von den vorgegebenen Einschränkungen. Es konnte festgestellt werden, dass in großen Atrien oft, wie auch im vorliegenden Fall, kein diffuses Schallfeld vorliegt. Die Studie von W. Zhao, J. Kang und H. Jim [1] untersucht die Auswirkungen verschiedener geometrischer Parameter auf die Akustik in Atrien. Die Ergebnisse zeigen, dass eine erhöhte Streuung in Kombination mit einer gesteigerten Schallabsorption effektiv zur Verbesserung der akustischen Qualität beiträgt und insbesondere in großen Atrien die Diffusität des Schallfeldes erhöht. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse, werden in dieser Simulationsvariante Deckensegel zwischen Boden und Dach in beiden Lichthöfen willkürlich angeordnet. Ziel dieser Maßnahme ist es, sowohl die Diffusität als auch die Schallabsorption im Raum zu erhöhen und dadurch die akustische Qualität zu verbessern.

In Abbildung 64 wird die Maßnahme piktografisch dargestellt. Es wurden in dieser Simulationsvariante ungefähr 432 m² Deckensegelfläche berücksichtigt. Detaillierte Produktinformationen, die zugehörigen Schallabsorptionswerte sowie die prozentuale Verteilung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche für diese Simulationsvariante, sind in Anlage XXIII dokumentiert.

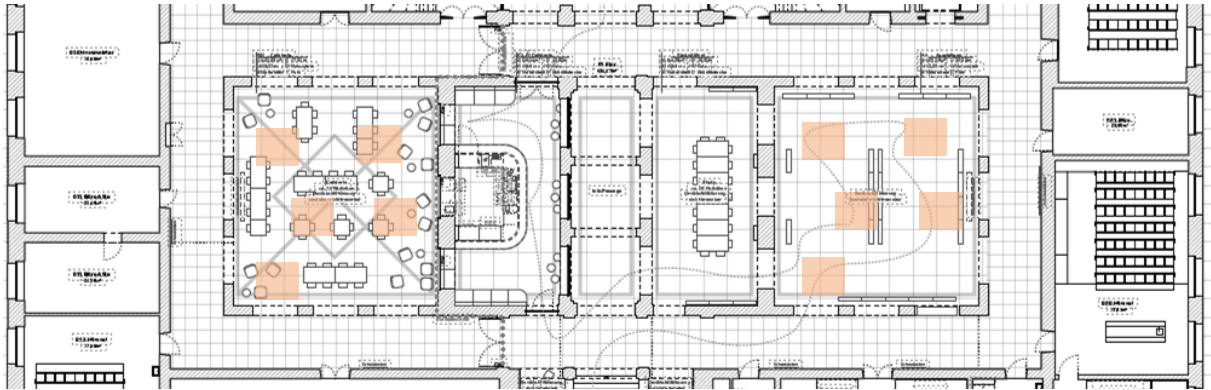


Abbildung 64: Gezeigt wird ein Grundrissausschnitt vom Erdgeschoss des Atriums, in dem die Deckensegel in orange gekennzeichnet sind, sechste Maßnahme der akustischen Optimierung (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)

Diese Variante wurde von einem Fallbeispiel aus Klosterneuburg, Österreich inspiriert (siehe Abbildung 65). Im Empfangsbereich des Institute of Science and Technology wurden Deckensegel sowohl in senkrechter als auch in waagrechter Abhängung installiert.



Abbildung 65: Anordnung Deckenabsorber im Empfangsbereich des Institute of Science and Technology in Österreich (Bildquelle: [52], Fotos von Franz Pfluegl)

5.3.7 Simulationsvariante 7: Kombination der Varianten 1-4

In dieser Simulationsvariante werden die gemeinsam mit der Projektplanung entwickelten Maßnahmen kombiniert, um ihre gemeinsame Wirkung auf die Akustik des Atriums zu bewerten.

5.3.8 Simulationsvariante 8: Kombination der Varianten 2,5 und 6

Abschließend wird eine Kombination der Maßnahmen aus den Simulationsvarianten 2, 5 und 6 untersucht, um deren gemeinsame Wirkung auf die Akustik zu bewerten.

5.4 Simulationsergebnisse

5.4.1 Nachhallzeit

In Tabelle 7 sind die Simulationsergebnisse für die frequenzabhängigen Nachhallzeit der zuvor beschriebenen Varianten aufgelistet. Die frequenzabhängigen Nachhallzeiten werden ergänzt durch die mittlere Nachhallzeit T_m und die Differenz ΔT zur mittleren Nachhallzeit des Ausgangszustandes. Die Ergebnisse werden zusätzlich in Abbildung 66 in Form eines Diagramms veranschaulicht.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Nachhallzeit durch unterschiedliche Maßnahmen bereits signifikant reduziert werden konnte. Der Ausgangszustand weist eine mittlere Nachhallzeit von $T_m = 3,98$ s auf. Variante 1 (Wandabsorber) reduziert diese auf $T_m = 3,62$ s, während Variante 2, abhängig vom Nutzungsszenario weitere Reduktion erzielt. Im Szenario „Unialltag“ liegt die mittlere Nachhallzeit $T_m = 3,40$ s und im Szenario „Vortrag“ bei $T_m = 3,30$ s. Die Simulationsergebnisse unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Anordnung der Vorhänge und der Berücksichtigung einer größeren Vorhangfläche im Szenario „Vortrag“. Die stärkste Reduktion wird in Variante 8 erzielt, mit einer mittleren Nachhallzeit von $T_m = 2,52$ s ($\Delta T = -1,46$ s).

Tabelle 7: Übersicht der Simulationsergebnisse der frequenzabhängigen Nachhallzeit für den Ausgangszustand und den Varianten 1 – 8. Variante 2 wird in Unialltag und Vortrag unterteilt, da für diese beiden Szenarien unterschiedliche Positionierungen der Vorhänge vorgesehen wurden- Ergänzend werden für jede Simulation die mittlere Nachhallzeit T_m und die Differenz ΔT zur mittleren Nachhallzeit des Ausgangszustandes angegeben.

Simulationsvariante	Nachhallzeit T_{20} [s] je Oktavmittelfrequenz f [Hz]						Mittlere Nachhallzeit T_m [s]	Differenz ΔT [s]
	125	250	500	1k	2k	4k		
Ausgangszustand	4,21	4,42	4,47	4,32	3,83	2,98	3,98	-
Variante 1	4,06	4,01	4,00	3,79	3,43	2,43	3,62	- 0,36
Variante 2 - Unialltag	4,05	3,98	3,63	3,40	3,09	2,28	3,40	- 0,58
Variante 2 - Vortrag	3,97	3,88	3,50	3,30	2,98	2,15	3,30	- 0,68
Variante 3	3,98	3,72	3,80	3,57	3,38	2,39	3,46	- 0,52
Variante 4	3,86	4,08	4,11	3,98	3,64	2,56	3,70	- 0,28
Variante 5	4,19	4,03	3,76	3,61	3,25	2,37	3,53	- 0,45
Variante 6	3,67	3,33	3,08	2,83	2,60	1,96	2,91	- 1,07
Variante 7	3,45	3,08	2,75	2,60	2,48	1,88	2,71	- 1,27
Variante 8	3,58	2,95	2,47	2,36	2,10	1,64	2,52	- 1,46

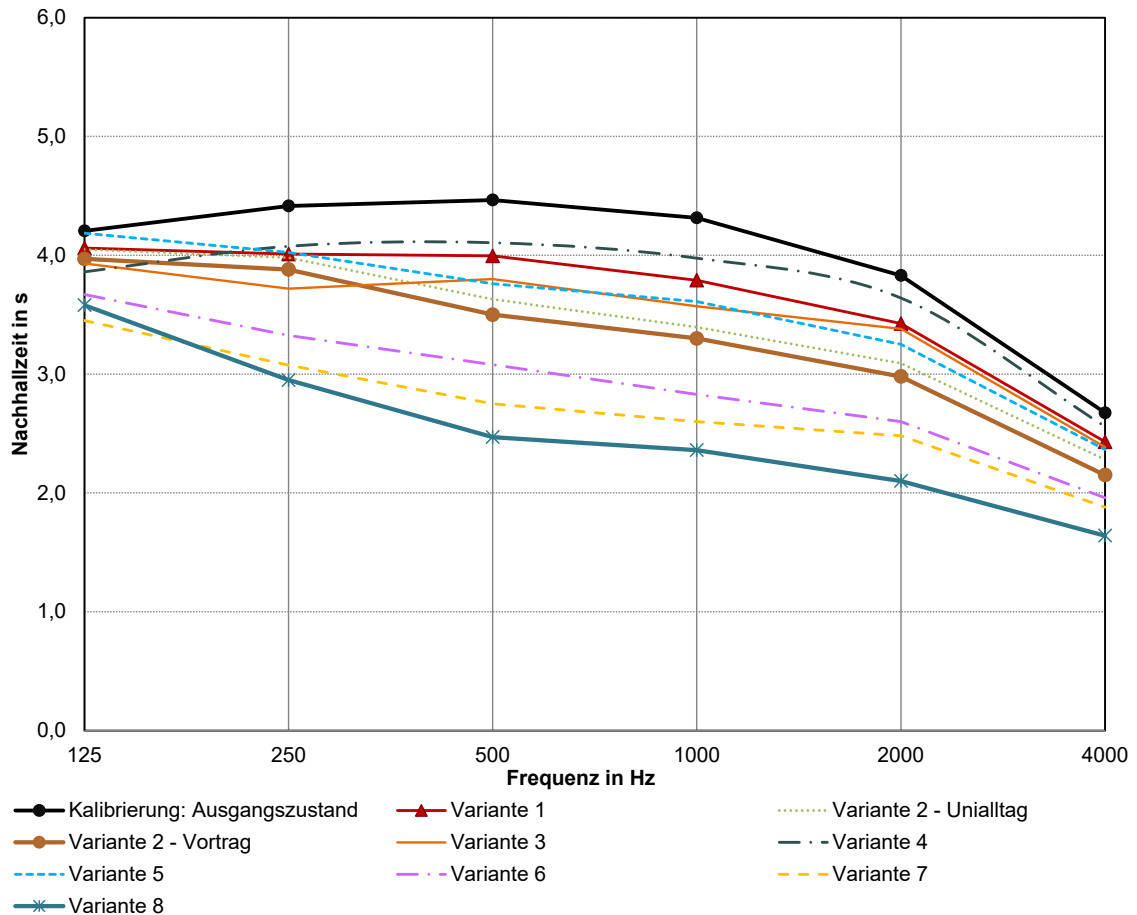


Abbildung 66: Vergleich der simulierten Nachhallzeitverläufe für den Ausgangszustand und die Simulationsvarianten 1 – 8 in Abhängigkeit von der Frequenz.

5.4.2 Sprachverständlichkeit

Abbildung 67 bis Abbildung 75 zeigen die Simulationsergebnisse der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) für die Ausgangssituation sowie für die Simulationsvarianten 1 – 8. Die Darstellung der Verteilung erfolgt ausschließlich für den linken Lichthof, da dort die relevante Nutzung „Vortrag“ stattfindet und der STI insbesondere für diese Anwendung von zentraler Bedeutung ist. Zur besseren Vergleichbarkeit werden die STI-Werte immer an zwei identischen Positionen im Atrium abgelesen. Eine detaillierte Erläuterung der Bedeutung der STI-Werte ist in Kapitel 2.1.1.6 nachzulesen.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass im Ausgangszustand die Sprachverständlichkeit im linken Atrium mit STI-Werten von 0,35 bis 0,38 als schwach einzustufen ist. Variante 1 zeigt bereits erste positive Effekte mit STI-Werten im Bereich von 0,37 bis 0,44. In Variante 2, in der durch die gezielte Anordnung von Vorhängen Reflexionen reduziert werden, wird eine weitere Verbesserung erreicht, mit STI-Werten von 0,41 bis 0,50. Die signifikantesten Verbesserungen werden in den Varianten 7 und 8 erzielt. Der höchste STI-Wertebereich konnte in Variante 8 mit 0,53 bis 0,61 ermittelt werden.

Ausgangszustand

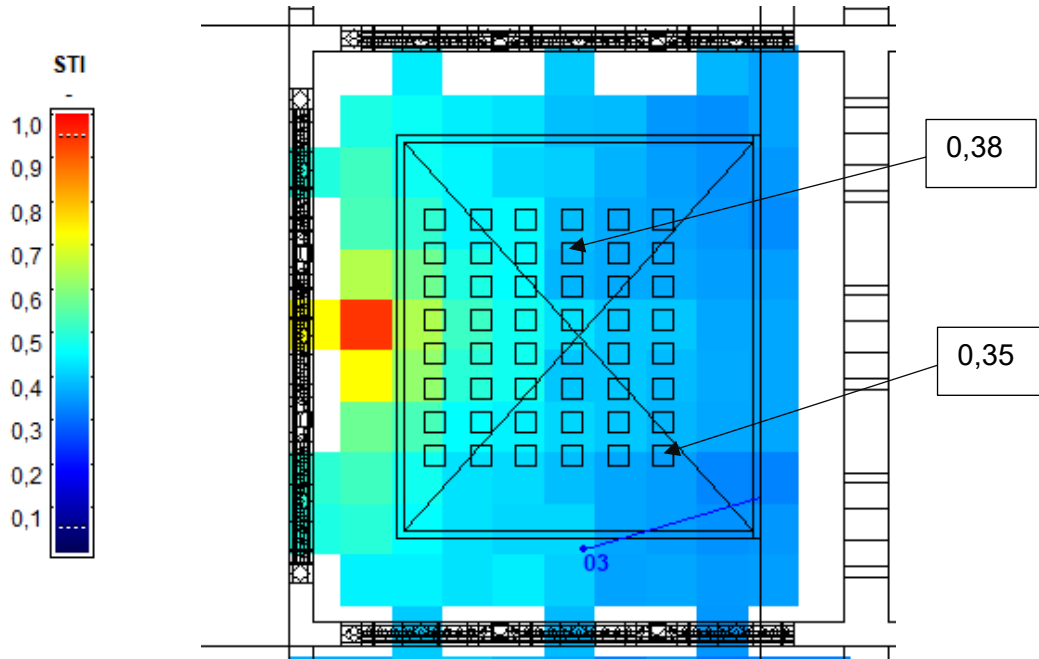


Abbildung 67: Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Ausgangssituation. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.

Variante 1

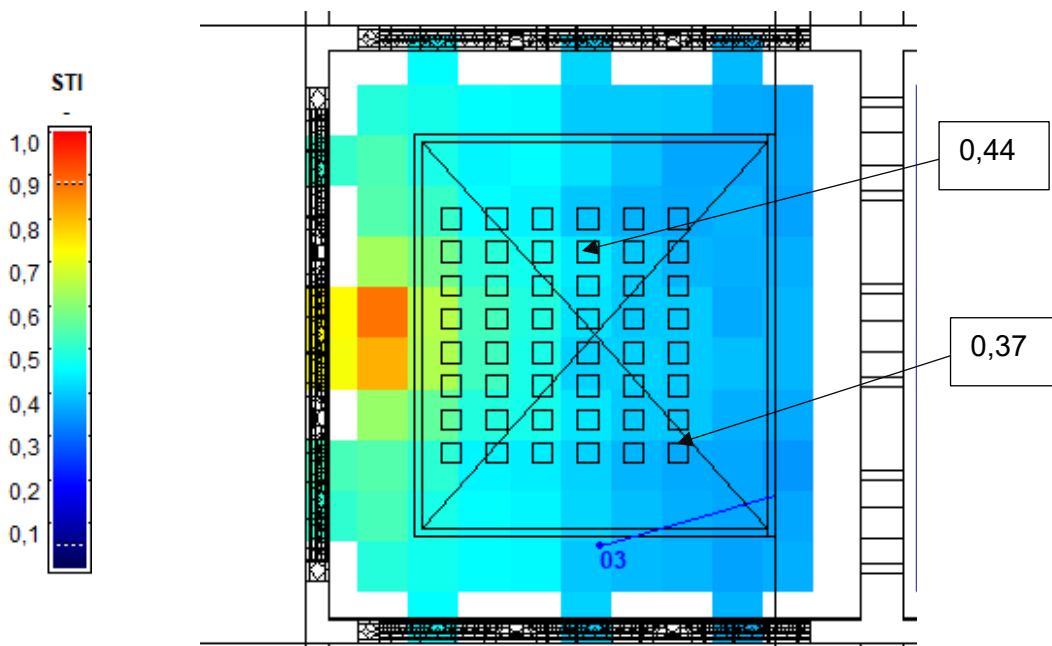


Abbildung 68 Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Simulationsvariante 1. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.

Variante 2

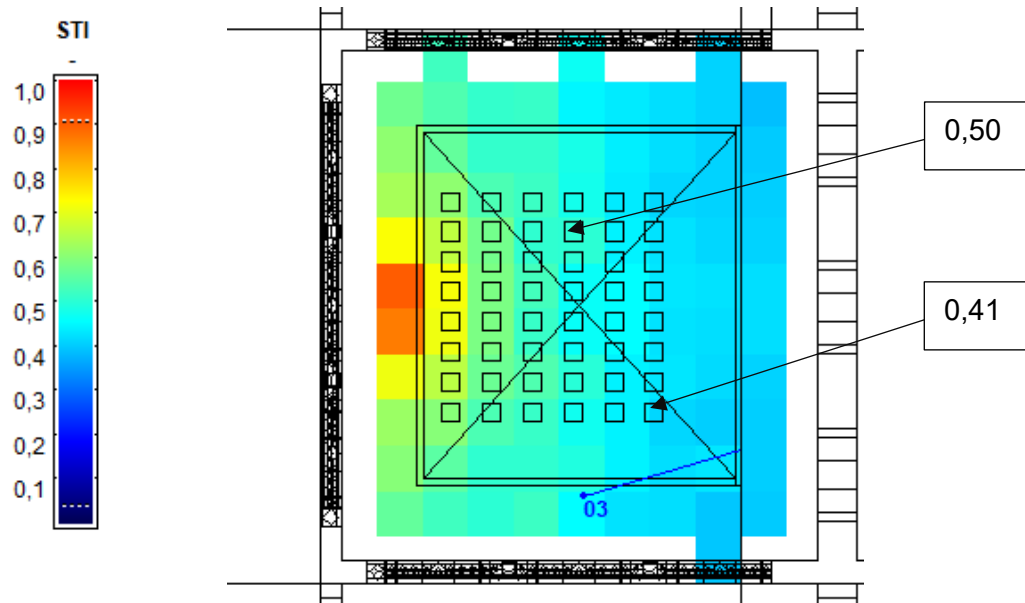


Abbildung 69: Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Simulationsvariante 2. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.

Variante 3

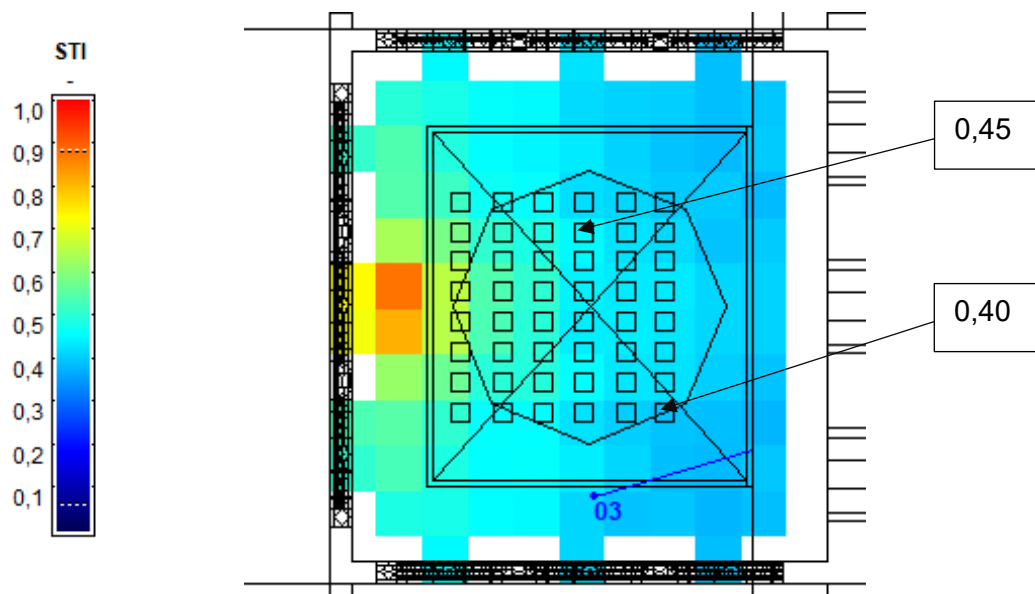


Abbildung 70: Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Simulationsvariante 3. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.

Variante 4

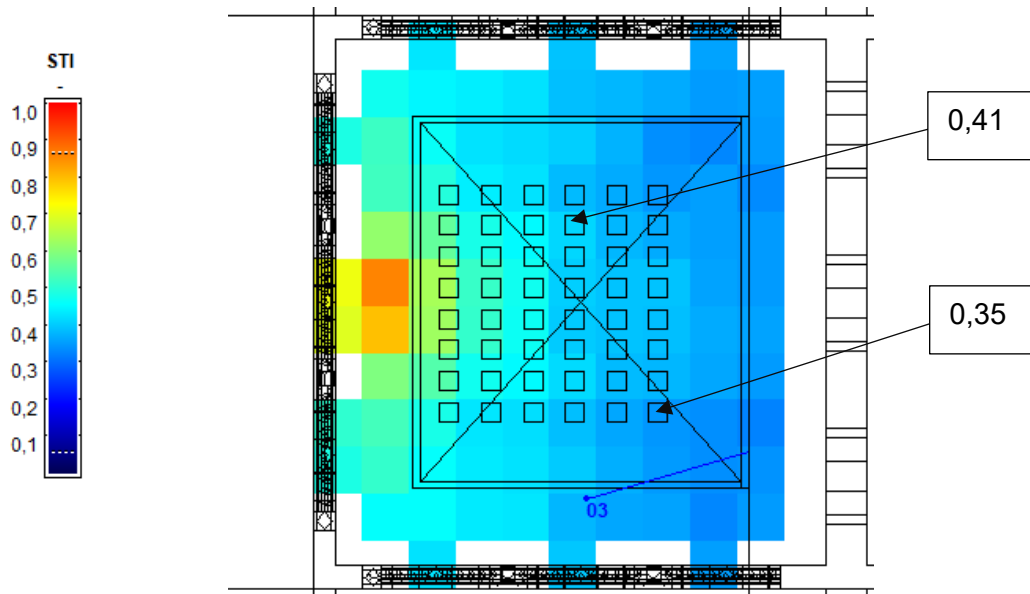


Abbildung 71: Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Simulationsvariante 4. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.

Variante 5

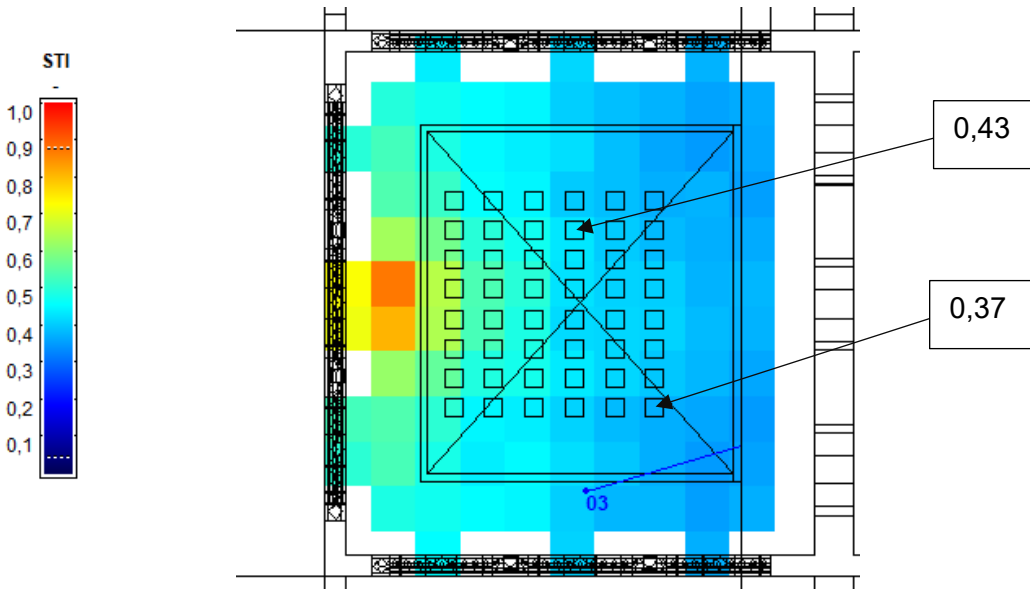


Abbildung 72: Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Simulationsvariante 5. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.

Variante 6

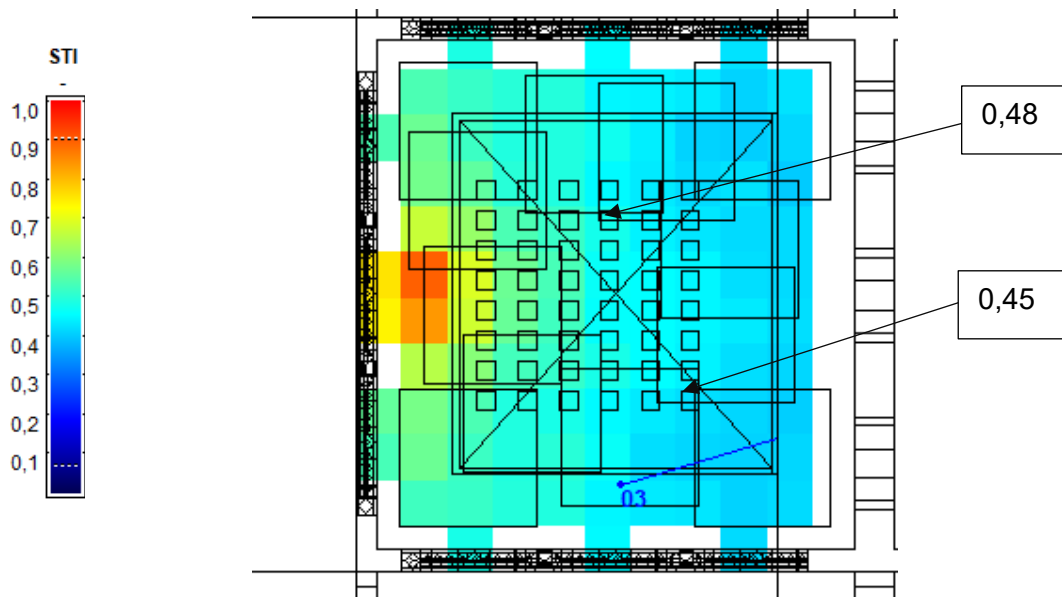


Abbildung 73: Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Simulationsvariante 6. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.

Variante 7

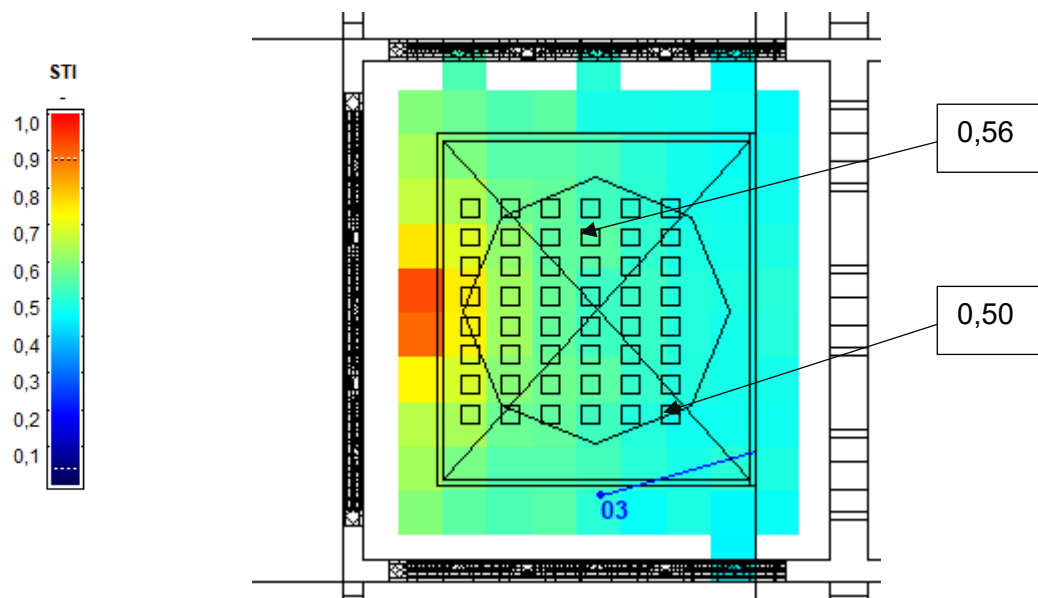


Abbildung 74: Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Simulationsvariante 7. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.

Variante 8

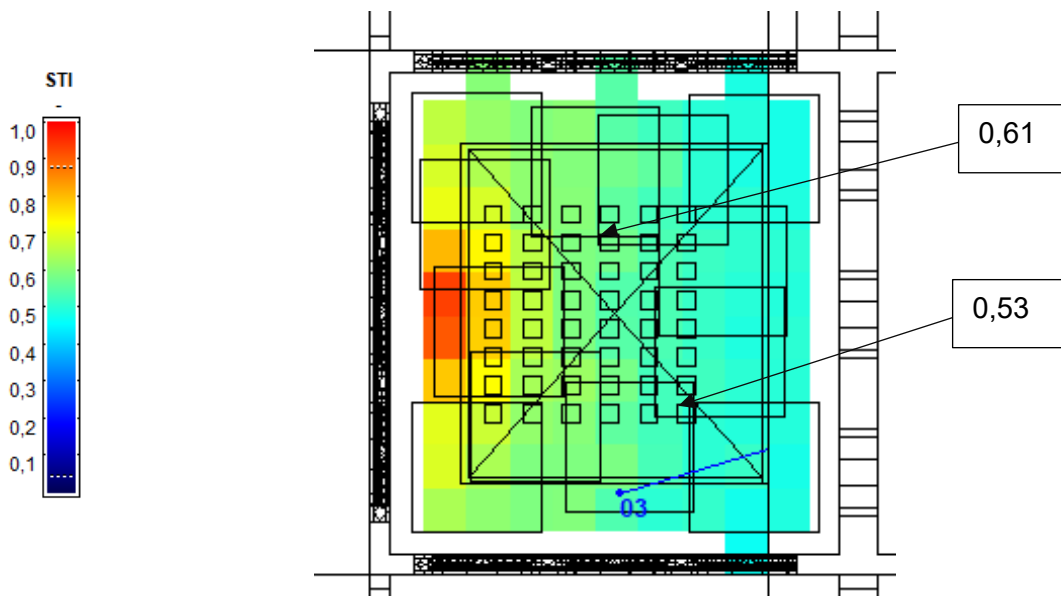


Abbildung 75: Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Simulationsvariante 8. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angeben.

Literaturverzeichnis

- [1] W. Zhao, J. Kang und H. Jin, "Effects of geometry on the sound field in atria", *Build. Simul.*, Jg. 10, Nr. 1, S. 25–39, 2017, doi: 10.1007/s12273-016-0317-0.
- [2] R. Naeemae und Z. Sü Gül, "Assessment of acoustical comfort in educational atriums of closed central and linear typologies: Reverberation perception and preference", *Building and Environment*, Jg. 252, S. 111230, 2024, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111230.
- [3] H. Rosenheinrich und O. Kornadt, "Die Raumakustik in Atrien", *Bauphysik*, Jg. 27, Nr. 3, S. 145–151, 2005, doi: 10.1002/bapi.200590048.
- [4] *HFT.Lab: HFT.Lab – Innovations-Labor an der HFT Stuttgart*. [Online]. Verfügbar unter: <https://hftlab.hft-stuttgart.de/> (Zugriff am: 19. Juni 2024).
- [5] P.-M. Dworok und S.-R. Mehra, "Behaglichkeit – Wechselwirkungen bauphysikalischer Einflüsse", *Bauphysik*, Jg. 40, Nr. 1, S. 9–18, 2018, doi: 10.1002/bapi.201810003.
- [6] P. Schmidt und S. Windhausen, *Lohmeyer Praktische Bauphysik: Eine Einführung mit Berechnungsbeispielen*, 10. Aufl. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/978-3-658-42603-3>
- [7] S. Weinzierl, Hg., *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-662-60357-4>
- [8] M. Möser, *Technische Akustik*, 10. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015.
- [9] H. V. Fuchs, *Raum-Akustik und Lärm-Minderung: Konzepte mit innovativen Schallabsorbern und -dämpfern*, 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer Vieweg, 2017.
- [10] W. M. Willems, Hg., *Lehrbuch der Bauphysik: Wärme - Feuchte - Klima - Schall - Licht - Brand*, 9. Aufl. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://swbplus.bsz-bw.de/bsz1754944728cov.htm>
- [11] G. Müller, M. Möser und H. V. Fuchs, Hg., *Schallabsorber*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 2017.
- [12] S. Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik (VDI-Buch) (German Edition)*. Dordrecht: Springer, 2007.
- [13] Bengt-Inge Dälenbäck, *What ist geometrical Acousitcs?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.catt.se/> (Zugriff am: 30. Dezember 2024).
- [14] *DIN 18041:2016-03, Hörsamkeit in Räumen_ - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung*, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Mrz. 2016.
- [15] *DIN EN ISO 3382-1:2009-10, Akustik_ - Messung von Parametern der Raumakustik_ - Teil_1: Aufführungsräume (ISO_3382-1:2009)*, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Okt. 2009.
- [16] H. W. Bobran und I. Bobran-Wittfoht, *Handbuch der Bauphysik: Schallschutz - Raumakustik - Wärmeschutz - Feuchteschutz ; mit 167 Tabellen*, 8. Aufl. Köln: R. Müller, 2010.
- [17] W. Fasold und E. Veres, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis: Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen*, 2. Aufl. Berlin: Huss-Medien, Verl. für Bauwesen, 2003.

- [18] Reinhard O. Neubauer, *Nachhallzeit in Räumen mit ungleich verteilten Schallabsorptionsflächen*. [Online]. Verfügbar unter: https://pub.dega-akustik.de/DAGA_1999-2008/data/index.html (Zugriff am: 27. November 2024).
- [19] H. Henn, G. R. Sinambari und M. Fallen, *Ingenieurakustik: Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele ; mit 36 Tabellen*, 4. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008.
- [20] DIN EN IEC 60268-16:2021-10, *Elektroakustische Geräte_- Teil_16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex (IEC_60268-16:2020); Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex*, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Okt. 2010.
- [21] F. Kaiser und F. Tonetti, *Raumakustik: Wie man Räume hörgerecht besser gestaltet*, 1. Aufl. München: Hanser, 2024.
- [22] E. Mommertz, *Akustik und Schallschutz: Grundlagen, Planung, Beispiele*, 1. Aufl. München: Inst. für Internationale Architektur-Dokumentation, 2008.
- [23] E259-03 - Forschungsbereich Bauphysik und Bauökologie, Hg., *Acoustics of Atria: Contrasting Measurement and Modeling Results: Proceedings of the 10th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition, Sep. 3-6, 2007, Tsinghua University, Beijing, China*. [College Station, TX]: International Building Performance Simulation Association: International Building Performance Simulation Association, 2007. [Online]. Verfügbar unter: <https://repositum.tu-wien.at/handle/20.500.12708/63444>
- [24] D. Urbán, J. Zrnková, P. Zaťko, C. Maywald und M. Rychtáriková, "Acoustic Comfort in Atria Covered by Novel Structural Skins", *Procedia Engineering*, Jg. 155, S. 361–368, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.039.
- [25] J. S. Bradley, "Acoustical measurements in 10 atria" (en), *Internal Report (National Research Council of Canada. Institute for Research in Construction)*, IRC-IR-765, doi: 10.4224/20386369.
- [26] H. Mei und J. Kang, "An experimental study of the sound field in a large atrium", *Building and Environment*, Jg. 58, S. 91–102, 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.06.020.
- [27] C. Rubino, S. Liuzzi und F. Martellotta, "Sustainable Sound Absorbers to Improve Acoustical Comfort in Atria: A Methodological Approach", *Acoustics*, Jg. 5, Nr. 1, S. 280–298, 2023, doi: 10.3390/acoustics5010017.
- [28] M. Rychtáriková, V. Chmelík, D. Urbán und A. Vargová, "Acoustic Conditions in the Atrium of Slovak Philharmonic", *Procedia Engineering*, Jg. 155, S. 464–471, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.049.
- [29] L. Savioja und U. P. Svensson, "Overview of geometrical room acoustic modeling techniques" (eng), *The Journal of the Acoustical Society of America*, Jg. 138, Nr. 2, S. 708–730, 2015, doi: 10.1121/1.4926438.
- [30] M. Vorländer, *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*, 2. Aufl. Cham: Springer International Publishing; Imprint Springer, 2020.
- [31] I. Rees und A. James, "COMMON PITFALLS IN COMPUTER MODELLING OF ROOM ACOUSTICS", 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.semanticscholar.org/paper/COMMON-PITFALLS-IN-COMPUTER-MODELLING-OF-ROOM-Rees-James/ef19a4d8c2ecb81eb6079a5f84243a46462e5a59>

- [32] BauNetz, "Geometrisch gerichtete Reflexionen | Akustik | Schallreflexion | BauNetz_Wissen", *BauNetz*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.baunetzwissen.de/akustik/fachwissen/schallreflexion/geometrisch-gerichtete-reflexionen-147773/gallery-1/1>. Zugriff am: 5. Januar 2025.
- [33] Copyright © CATT 1998-2024, *Catt-Acoustic*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.catt.se/> (Zugriff am: 26. November 2024).
- [34] CATT-Acoustics, "CATT-A User's Manual v9.1f:1", 2020. Zugriff am: 26. November 2024.
- [35] CATT Acoustics, "TUCT - User's Manual v2.0f:1: CATT-Acoustics v9.1f:1", 2020. Zugriff am: 26. November 2024.
- [36] Bengt-Inge Dälenbäck, *Engineering principle and techniques in room acoustic predictions*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.catt.se/> (Zugriff am: 30. Dezember 2024).
- [37] Bengt-Inge Dälenbäck, *Whitepaper regarding diffraction*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.catt.se/> (Zugriff am: 30. Dezember 2024).
- [38] Hochschule für Technik Stuttgart, *Hochschule für Technik Stuttgart - Geschichte*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hft-stuttgart.de/hft/geschichte> (Zugriff am: 19. Dezember 2024).
- [39] *DIN EN ISO 3382-2:2008-09, Akustik_ - Messung von Parametern der Raumakustik_ - Teil_2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen (ISO_3382-2:2008)*, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Sep. 2008.
- [40] NTi Audio AG, Hg., "Anleitung Minirator MR2 / MR-Pro", Juli 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nti-audio.com/de/produkte/minirator-mr-pro-mr2>. Zugriff am: 29. Dezember 2024.
- [41] NTi Audio AG, Hg., "Anleitung XL2 Tragbarer Audio- und Akustik-Analysator", Aug. 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nti-audio.com/de/produkte/schallpegelmesser/xl2-audio-akustik-analysator>. Zugriff am: 29. Dezember 2024.
- [42] Sinus Messtechnik GmbH, Hg., "Samurai - Handbuch Basisversion", Apr. 2022.
- [43] L. Aspöck, "Validation of room acoustic simulation models" [Online]. Verfügbar unter: <https://www.irb.fraunhofer.de/rswb2plus/display/displayDocuments.jsf>
- [44] A. Pilch, "Optimization-based method for the calibration of geometrical acoustic models", *Applied Acoustics*, Jg. 170, S. 107495, 2020, doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107495.
- [45] A. Southern, S. Siltanen, D. T. Murphy und L. Savioja, "Room Impulse Response Synthesis and Validation Using a Hybrid Acoustic Model", *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process.*, Jg. 21, Nr. 9, S. 1940–1952, 2013, doi: 10.1109/TASL.2013.2263139.
- [46] Z. Meng, F. Zhao und M. He, "The Just Noticeable Difference of Noise Length and Reverberation Perception" in *2006 International Symposium on Communications and Information Technologies*, Bangkok, Thailand, 2006, S. 418–421, doi: 10.1109/IS-CIT.2006.339980.
- [47] *DIN EN 12354-6:2004-04, Bauakustik_ - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften_ - Teil_6: Schallabsorption in Räumen*, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Apr. 2004.
- [48] Soundinsight BV, "SonoCat User Manual: Software version 1.1.8", Niederlanden, 2022.

- [49] P. Leistner, M. Späh, X. Zhou und T. Zhang, *Raumakustik für den Denkmalschutz: Methoden, Konzepte und konstruktive Lösungen für die Akustik in denkmalgeschützten Gebäuden*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2023/bbsr-online-13-2023.html> (Zugriff am: 18. Juni 2024).
- [50] Phillip Leistner, Horst Drotledd, Michale Leistner, Fraunhofer IBP, *Richtlinie - Akustik in Lebensräumen für Erziehung und Bildung*. [Online]. Verfügbar unter: <file:///C:/Users/duerholzlaur/Downloads/akustik-in-lebensraeumen.pdf> (Zugriff am: 31. Oktober 2024).
- [51] H. R. Wack, *Mikroperforierte Akustik-Segel in Versammlungsräumen*. IBP-Mitteilung. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/ibpmitteilungen/401-450/431.pdf> (Zugriff am: 11. November 2024).
- [52] *Ecophon - Institute of Science and Technology Austria*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ecophon.com/de/articles/inspiration/institute-of-science-and-technology-austria/> (Zugriff am: 22. Januar 2025).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einflussparameter auf die raumakustische Qualität nach [6] (Bildquelle: Eigene Darstellung)	4
Abbildung 2: Schallreflexionen an einer ebenen Fläche in Abhängigkeit der Wellenlänge λ und in Abhängigkeit der Oberflächenstruktur b (Bildquelle: [12])	4
Abbildung 3: Definition der Nachhallzeit (Bildquelle: [6])	5
Abbildung 4: Die Grafik aus der kanadischen Studie von 1989 zeigt den Verlauf der Nachhallzeit (RT) in Sekunden über die Oktavbänder an. Der gelb markierte Bereich repräsentiert die Spannweite der gemessenen Nachhallzeiten in verschiedenen Atrien, wobei die schwarze Linie die mittlere Nachhallzeit darstellt.	13
Abbildung 5: Schallreflexion nach dem Prinzip der Spiegelschallquellenmethode nach [17]; Links: Spiegelschallquelle erster Ordnung; Rechts: Spiegelschallquellen erster und zweiter Ordnung; (Bildquelle: [32])	16
Abbildung 6: Verfolgung eines Strahls von der Quelle bis zum Empfänger nach der Raytracing-Methode (Bildquelle: [30])	17
Abbildung 7: Conetracing (Bildquelle: [12])	18
Abbildung 8: Aufbau von CATT-A und TUCT nach [34] und [35] (Bildquelle: Eigene Darstellung)	19
Abbildung 9: Hochschule für Technik Stuttgart, Bau 1, Ausschnitt aus dem Grundriss Erdgeschoss Bestand; Maßstabslos; in Rot: Brandschutzabschnitt (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)	22
Abbildung 10: Hochschule für Technik, Bau 1, Ausschnitt aus dem Schnitt Bestand; Maßstabslos; in Rot: Brandschutzabschnitt; in Grün: Grenzen des Atriums (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)	22
Abbildung 11: Gezeigt werden verschiedene Perspektiven des Atriums; Oben links: Blick vom ersten Obergeschoss in den linken Lichthof; oben rechts: Blick vom zweiten Obergeschoss in den rechten Lichthof; unten links: Blick vom ersten Obergeschoss auf das Glasdach; unten rechts: Blick in die Nebenflure vom linken Lichthof (Bildquellen: Eigene Aufnahmen)	23
Abbildung 12: Darstellung der Sender- und Mikrofonpositionen im Grundrissausschnitt für die Nachhallzeitmessung des linken Lichthofes im geschlossenen Zustand. Rot: Senderpositionen; Grün: Mikrofonpositionen; Schwarze Linie: Brandschutzabschnitt mit geschlossenen Brandschutztüren (Bildquelle: Eigene Darstellung)	28
Abbildung 13: Darstellung der Sender- und Mikrofonpositionen im Schnitt für die Nachhallzeitmessung des linken Lichthofes im geschlossenen Zustand. Rot: Senderpositionen; Grün: Mikrofonpositionen (Bildquelle: Eigene Darstellung)	28
Abbildung 14: Darstellung der Sender- und Mikrofonpositionen im Grundrissausschnitt für die Nachhallzeitmessung des rechten Lichthofes im geschlossenen Zustand. Rot: Senderpositionen; Grün: Mikrofonpositionen; Schwarze Linie: Brandschutzabschnitt mit geschlossenen Brandschutztüren (Bildquelle: Eigene Darstellung)	29
Abbildung 15: Darstellung der Sender- und Mikrofonpositionen im Schnitt für die Nachhallzeitmessung des rechten Lichthofes im geschlossenen Zustand. Rot: Senderpositionen; Grün: Mikrofonpositionen (Bildquelle: Eigene Darstellung)	29
Abbildung 16: Darstellung des Messaufbaus für die Nachhallzeitmessungen anhand [40, 41], durchgeführt am 21.05.2024. Der Aufbau zeigt das NTi-Audio Messsystem, bestehend	

aus Signalgenerator Minirator, dem Signalverstärker, der Schallquelle (Dodekaeder-Lautsprecher), dem XL2-Akustikanalysator sowie das angeschlossene Mikrofon.	30
Abbildung 17: Darstellung der Sender- und Mikrofonpositionen im Grundrissausschnitt für die Nachhallzeitmessung des gesamten Atriums, Brandschutztüren geöffnet. Rot: Senderpositionen; Grün: Mikrofonpositionen; (Bildquelle: Eigene Darstellung).	32
Abbildung 18 Darstellung der Sender- und Mikrofonpositionen im Schnitt für die Nachhallzeitmessung des gesamten Atriums, Brandschutztüren geöffnet. Rot: Senderpositionen; Grün: Mikrofonpositionen; (Bildquelle: Eigene Darstellung).	32
Abbildung 19: Darstellung des Messaufbaus für die Nachhallzeitmessungen anhand [42], durchgeführt am 17.09.2024. Der Aufbau zeigt das Samurai Messsystem, bestehend aus der Schallquelle (Dodekaeder-Lautsprecher), dem Signalverstärker, sowie die angeschlossenen Mikrofone, die über den Expander mit der Samurai-Software verbunden sind.	33
Abbildung 20: Relevante Frequenzbereiche für das Hören (Bildquelle: [9]).....	35
Abbildung 21: Gemessene frequenzabhängige Nachhallzeiten T [s] in geschlossenen Zustand für Sender 1–3 im linken Lichthof: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden Jede farbige Linie repräsentiert den Nachhallzeitverlauf für eine spezifische Kombination aus Sender, Messposition und Wiederholung. Die Legende folgt dem Schema: L (linker Lichthof), S (Sendernummer: 1–3) und M (Messposition mit Wiederholung: 1–3). Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert der Nachhallzeit T für jede Frequenz.....	36
Abbildung 22: Box-Plots der gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten T [s] für Sendern 1-3 (linker Lichthof): Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden Jede Frequenz umfasst die Nachhallzeitmessungen der Sender 1 bis 3. Der Median wird durch die grüne Linie innerhalb der Box dargestellt, während der Interquartilsabstand (IQR) durch die Box begrenzt wird: der untere Rand repräsentiert das erste Quartil und der obere Rand das dritte Quartil. Die Whisker erstrecken sich bis maximal 1,5-fachen des Interquartilsabstands.	37
Abbildung 23: Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten T [s] in Abhängigkeit der Frequenz f [Hz] für Sender 1- 3 (linker Lichthof): Die Abbildung zeigt Histogramme der gemessenen Nachhallzeiten T für jede Frequenz von 63 Hz bis 8000 Hz. Die X-Achse stellt die Nachhallzeiten T in Sekunden dar, während die Y-Achse die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Werte zeigt. Der Mittelwert ist als rote gestrichelte Linie markiert, die grüne und lila gestrichelten Linien stellen das 95%-Vertrauensintervall oberhalb bzw. unterhalb des Mittelwerts dar. Die Bereiche der Standardabweichung werden farblich hervorgehoben: Gelb zeigt ± 1 , Orange ± 2 und Rot ± 3 Standardabweichungen.	38
Abbildung 24: Gemessene frequenzabhängige Nachhallzeiten T [s] in geschlossenen Zustand für Sender 1–3 im rechten Lichthof: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den Nachhallzeitverlauf für eine spezifische Kombination aus Sender, Messposition und Wiederholungsvorgang. Die Legende folgt dem Schema: L (linker Lichthof), S (Sendernummer: 1–3) und M (Messposition mit Wiederholung: 1–3). Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert der Nachhallzeit T für jede Frequenz.....	39
Abbildung 25: Box-Plots der gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten T [s] für Sendern 1-3 (rechter Lichthof): Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden Jede Frequenz umfasst die Nachhallzeitmessungen der	

Sender 1 bis 3. Der Median wird durch die grüne Linie innerhalb der Box dargestellt, während der Interquartilsabstand (IQR) durch die Box begrenzt wird: der untere Rand repräsentiert das erste Quartil und der obere Rand das dritte Quartil. Die Whisker erstrecken sich bis maximal 1,5-fachen des Interquartilsabstands.	40
Abbildung 26: Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten T [s] in Abhängigkeit der Frequenz f [Hz] für Sender 1- 3 (rechter Lichthof): Die Abbildung zeigt Histogramme der gemessenen Nachhallzeiten T für jede Frequenz von 63 Hz bis 8000 Hz. Die X-Achse stellt die Nachhallzeiten T in Sekunden dar, während die Y-Achse die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Werte zeigt. Der Mittelwert ist als rote gestrichelte Linie markiert, die grüne und lila gestrichelten Linien stellen das 95%-Vertrauensintervall oberhalb bzw. unterhalb des Mittelwerts dar. Die Bereiche der Standardabweichung werden farblich hervorgehoben: Gelb zeigt ± 1 , Orange ± 2 und Rot ± 3 Standardabweichungen. Gelb zeigt ± 1 , Orange ± 2 und Rot ± 3 Standardabweichungen.	41
Abbildung 27: Mittlere Nachhallzeiten T [s] in Abhängigkeit der Frequenz, für die Messpunkte von Sender 1 bis 3 jeweils für den linken(L) und rechten Lichthof (R): Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den gemittelten Nachhallzeitverlauf für einen Sender.	42
Abbildung 28: Gemessene frequenzabhängige Nachhallzeiten T [s] im offenen Zustand für Sender 1–6 gemittelt nach den Abklingvorgängen: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den Nachhallzeitverlauf für eine spezifische Kombination aus Sender, Aufstellungskombination und Messposition innerhalb dieser Aufstellungskombination. Die Legende folgt dem Schema: S (Sendernummer: 1–6), A (Aufstellkombination: A1-A3) und M (Messposition innerhalb dieser Aufstellungskombination: 1–8). Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert der Nachhallzeit T für jede Frequenz.	43
Abbildung 29: Box-Plots der gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten T [s] im offenen Zustand für Sendern 1-6: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden Jede Frequenz umfasst die Nachhallzeitmessungen der Sender 1 bis 6. Der Median wird durch die grüne Linie innerhalb der Box dargestellt, während der Interquartilsabstand (IQR) durch die Box begrenzt wird: der untere Rand repräsentiert das erste Quartil und der obere Rand das dritte Quartil. Die Whisker erstrecken sich bis maximal 1,5-fachen des Interquartilsabstands. Diese Darstellung visualisiert die Verteilung und Streuung der Nachhallzeiten über den gesamten Frequenzbereich.	44
Abbildung 30: Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten T [s] in Abhängigkeit der Frequenz f [Hz] im offenen Zustand für Sender 1- 6: Die Abbildung zeigt Histogramme der gemessenen Nachhallzeiten T für jede Frequenz von 63 Hz bis 8000 Hz. Die X-Achse stellt die Nachhallzeiten T in Sekunden dar, während die Y-Achse die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Werte zeigt. Der Mittelwert ist als rote gestrichelte Linie markiert, die grüne und lila gestrichelten Linien stellen das 95%-Vertrauensintervall oberhalb bzw. unterhalb des Mittelwerts dar. Die Bereiche der Standardabweichung werden farblich hervorgehoben: Gelb zeigt ± 1 , Orange ± 2 und Rot ± 3 Standardabweichungen.	45
Abbildung 31: Mittlere Nachhallzeiten T [s] in Abhängigkeit der Frequenz, für die Messpunkte von Sender 1 bis Sender 6: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den gemittelten Nachhallzeitverlauf für einen Sender.	46

- Abbildung 32: Gemessene frequenzabhängige Nachhallzeiten T [s] im offenen Zustand für Sender 1–3 gemittelt nach den Abklingvorgängen: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den Nachhallzeitverlauf für eine spezifische Kombination aus Sender, Aufstellungskombination und Messposition innerhalb dieser Aufstellungskombination. Die Legende folgt dem Schema: S (Sendernummer: 1–6), A (Aufstellkombination: A1-A3) und M (Messposition innerhalb dieser Aufstellungskombination: 1–8). Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert der Nachhallzeit T für jede Frequenz.....47
- Abbildung 33: Box-Plots der gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten T [s] im offenen Zustand für Sendern 1-3: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede Frequenz umfasst die Nachhallzeitmessungen der Sender 1 bis 6. Der Median wird durch die grüne Linie innerhalb der Box dargestellt, während der Interquartilsabstand (IQR) durch die Box begrenzt wird: der untere Rand repräsentiert das erste Quartil und der obere Rand das dritte Quartil. Die Whisker erstrecken sich bis maximal 1,5-fachen des Interquartilsabstands. Diese Darstellung visualisiert die Verteilung und Streuung der Nachhallzeiten über den gesamten Frequenzbereich.....48
- Abbildung 34: Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten T [s] in Abhängigkeit der Frequenz f [Hz] im offenen Zustand für Sender 1- 3: Die Abbildung zeigt Histogramme der gemessenen Nachhallzeiten T für jede Frequenz von 63 Hz bis 8000 Hz. Die X-Achse stellt die Nachhallzeiten T in Sekunden dar, während die Y-Achse die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Werte zeigt. Der Mittelwert ist als rote gestrichelte Linie markiert, die grüne und lila gestrichelten Linien stellen das 95%-Vertrauensintervall oberhalb bzw. unterhalb des Mittelwerts dar. Die Bereiche der Standardabweichung werden farblich hervorgehoben: Gelb zeigt ± 1 , Orange ± 2 und Rot ± 3 Standardabweichungen.49
- Abbildung 35: Gemessene frequenzabhängige Nachhallzeiten T [s] im offenen Zustand für Sender 4–6 gemittelt nach den Abklingvorgängen: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den Nachhallzeitverlauf für eine spezifische Kombination aus Sender, Aufstellungskombination und Messposition innerhalb dieser Aufstellungskombination. Die Legende folgt dem Schema: S (Sendernummer: 1–6), A (Aufstellkombination: A1-A3) und P (Messposition innerhalb dieser Aufstellungskombination: 1–8). Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert der Nachhallzeit T für jede Frequenz.....50
- Abbildung 36: Box-Plots der gemessenen frequenzabhängigen Nachhallzeiten T [s] im offenen Zustand für Sendern 4-6: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede Frequenz umfasst die Nachhallzeitmessungen der Sender 4 bis 6. Der Median wird durch die grüne Linie innerhalb der Box dargestellt, während der Interquartilsabstand (IQR) durch die Box begrenzt wird: der untere Rand repräsentiert das erste Quartil und der obere Rand das dritte Quartil. Die Whisker erstrecken sich bis maximal 1,5-fachen des Interquartilsabstands. Diese Darstellung visualisiert die Verteilung und Streuung der Nachhallzeiten über den gesamten Frequenzbereich.....51
- Abbildung 37: Verteilung der gemessenen Nachhallzeiten T [s] in Abhängigkeit der Frequenz f [Hz] im offenen Zustand für Sender 4- 6: Die Abbildung zeigt Histogramme der gemessenen Nachhallzeiten T für jede Frequenz von 63 Hz bis 8000 Hz. Die X-Achse stellt die Nachhallzeiten T in Sekunden dar, während die Y-Achse die absoluten Häufigkeiten der

jeweiligen Werte zeigt. Der Mittelwert ist als rote gestrichelte Linie markiert, die grüne und lila gestrichelten Linien stellen das 95%-Vertrauensintervall oberhalb bzw. unterhalb des Mittelwerts dar. Die Bereiche der Standardabweichung werden farblich hervorgehoben: Gelb zeigt ± 1 , Orange ± 2 und Rot ± 3 Standardabweichungen.	52
Abbildung 38: Gemessene frequenzabhängige Nachhallzeiten T [s] m offenen Zustand für Sender 1 gemittelt nach den Abklingvorgängen: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den Nachhallzeitverlauf für eine spezifische Kombination aus Sender, Aufstellungskombination und Messposition innerhalb dieser Aufstellungskombination. Die Legende folgt dem Schema: S (Sendernummer: 1), A (Aufstellkombination: A1-A3) und P (Messposition innerhalb dieser Aufstellungskombination: 1–8). Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert der Nachhallzeit T für jede Frequenz.	53
Abbildung 39: Gemessene frequenzabhängige Nachhallzeiten T [s] m offenen Zustand für Sender 5 gemittelt nach den Abklingvorgängen: Die X-Achse zeigt die Frequenzen f in Hertz, die Y-Achse die Nachhallzeiten T in Sekunden. Jede farbige Linie repräsentiert den Nachhallzeitverlauf für eine spezifische Kombination aus Sender, Aufstellungskombination und Messposition innerhalb dieser Aufstellungskombination. Die Legende folgt dem Schema: S (Sendernummer: 5), A (Aufstellkombination: A1-A3) und p (Messposition innerhalb dieser Aufstellungskombination: 1–8). Die schwarze Linie zeigt den Mittelwert der Nachhallzeit T für jede Frequenz.	54
Abbildung 40: Dargestellt wird die Entwicklung vom architektonischen Modell zum Simulationsmodell; Links: Level of Detail = hoch, architektonisches Modell; Rechts: Level of Detail = reduziert; Oben: Ansicht der Modelle von außen; Mitte: Perspektiven vom ersten Obergeschoss in den rechten Lichthof, Unten: Perspektiven vom Verbindungsgang bei der Cafeteria im Erdgeschoss (Eigene Darstellung mit SketchUP).....	58
Abbildung 41: Perspektivische Draufsicht auf das Simulationsmodell (Eigene Darstellung mit Catt-Acoustic).....	59
Abbildung 42: Perspektivische Sicht von unten auf das Simulationsmodell (Eigene Darstellung mit Catt-Acoustic).....	59
Abbildung 43: Perspektivische Sicht von links außen auf das Simulationsmodell (Eigene Darstellung mit Catt-Acoustic).....	60
Abbildung 44: Diagramm Verteilung der Flächen des Basismodells, Verteilung in %, Darstellung in Modellfarben (Eigen Darstellung).....	60
Abbildung 45: T_{30} -Verlauf (rote Linie) mit den Absorptionswerten aus Tabelle 3 und den empfohlenen Streueinstellungen nach dem CATT-Acoustic Handbuch; Grüne Linie: Nachhallzeitverlauf nach Sabine; Braune Linie: Nachhallzeitverlauf nach Eyring (Bildquelle: Eigene Darstellung mit CATT-Acoustic).....	63
Abbildung 46: T_{30} -Verlauf (rote Linie) mit den Absorptionswerten aus Tabelle 4 und den empfohlenen Streueinstellungen nach dem CATT-Acoustic Handbuch; Grüne Linie: Nachhallzeitverlauf nach Sabine; Braune Linie: Nachhallzeitverlauf nach Eyring (Bildquelle: Eigene Darstellung mit CATT-Acoustic).....	65
Abbildung 47: Messaufbau SonoCat Messung (Bildquelle: [48])	66
Abbildung 48: T_{30} -Verlauf (rote Linie) mit den Absorptionswerten aus Tabelle 5 und den empfohlenen Streueinstellungen nach dem CATT-Acoustic Handbuch; Grüne Linie: Nachhallzeitverlauf nach Sabine; Braune Linie: Nachhallzeitverlauf nach Eyring (Bildquelle: Eigene Darstellung mit CATT-Acoustic).....	69

Abbildung 49: T_{30} -Verlauf (rote Linie) mit den Absorptionswerten aus Tabelle 6 und den empfohlenen Streueinstellungen nach dem CATT-Acoustic Handbuch; Grüne Linie: Nachhallzeitverlauf nach Sabine; Braune Linie: Nachhallzeitverlauf nach Eyring (Bildquelle: Eigene Darstellung mit CATT-Acoustic)	71
Abbildung 50: Das Diagramm zeigt die gemessene mittlere Nachhallzeit im offenen Zustand (schwarze Linie) sowie die berechneten Nachhallzeiten basierend auf den beschriebenen Kalibrierungsphasen 1 bis 4 der Absorptionskoeffizienten und unter Berücksichtigung der empfohlenen Streugradeinstellungen. Der graue Bereich stellt den angestrebten Toleranzbereich von ± 5 –10 % dar. blaue Linie: Absorptionswerte nach Normwerten; orange Linie: Rückrechnung der Schallabsorptionswerte für Decke und Wand nach Sabine; grüne Linie: Integrierung der Akustikdecke; rote Linie: Justierte Schallabsorptionsgrade aus der dritten Kalibrierungsphase; (Eigene Darstellung)	72
Abbildung 51: Gezeigt werden die mittleren gemessene Nachhallzeit von Sender 1 (schwarze Linie) und die mittlere simulierte Nachhallzeit mit TUCT. Der graue Bereich stellt den angestrebten Toleranzbereich von ± 5 –10 % dar; (Eigene Darstellung)	74
Abbildung 52: Gezeigt werden die mittleren gemessene Nachhallzeit von Sender 1 (schwarze Linie) und die simulierte Nachhallzeit mit TUCT von Sender 1 und für unterschiedliche Empfängerpositionen; (Eigene Darstellung)	75
Abbildung 53: Gezeigt werden die mittleren gemessene Nachhallzeit von Sender 5 (schwarze Linie) und die mittlere simulierte Nachhallzeit mit TUCT. Der graue Bereich stellt den angestrebten Toleranzbereich von ± 5 –10 % dar; (Eigene Darstellung)	76
Abbildung 54: Gezeigt werden die mittleren gemessene Nachhallzeit von Sender 5 (schwarze Linie) und die simulierte Nachhallzeit mit TUCT von Sender 1 und für unterschiedliche Empfängerpositionen; (Eigene Darstellung)	77
Abbildung 55: Frequenzabhängige äquivalente Schallabsorptionsfläche in % für jede Oberfläche des validierten Simulationsmodell	78
Abbildung 56: Ausschnitt aus dem Grundriss des Erdgeschosses mit dem Nutzungskonzept: Unialltag im linken Lichthof und Ausstellung im rechten Lichthof (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue)	80
Abbildung 57: Ausschnitt aus dem Grundriss des Erdgeschosses mit dem Nutzungskonzept: Vortrag im linken Lichthof und Ausstellung im rechten Lichthof (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue)	80
Abbildung 58: Gezeigt wird ein Grundrissausschnitt des Atriums, in dem die Verteilung der Wandabsorber durch orange Markierungen dargestellt ist; erste Maßnahme der akustischen Optimierung (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)	82
Abbildung 59: Gezeigt wird ein Grundrissausschnitt des Atriums, in dem die Verteilung der Vorhänge durch grüne Markierungen für das Szenario „Unialltag“ dargestellt ist; zweite Maßnahme der akustischen Optimierung (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)	83
Abbildung 60: Gezeigt wird ein Grundrissausschnitt des Atriums, in dem die Verteilung der Vorhänge durch grüne Markierungen für das Szenario „Vortrag“ dargestellt ist; zweite Maßnahme der akustischen Optimierung, blauer Punkt: Redner (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)	83
Abbildung 61: Gezeigt wird ein Grundrissausschnitt des Atriums, in dem die Position der mikroperforierten Folie in den Ringlichtern durch gelbe Markierungen dargestellt ist; dritte	

Maßnahme der akustischen Optimierung (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)	84
Abbildung 62: Gezeigt wird ein Grundrissausschnitt vom ersten Obergeschoss des Atriums, in dem die Position der Abhangdecke durch eine blaue Markierung dargestellt ist; vierte Maßnahme der akustischen Optimierung (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)	85
Abbildung 63: Gezeigt wird ein Grundrissausschnitt vom Erdgeschoss des Atriums, in dem die Position der mikroperforierten Absorber vor eine Glasfläche gekennzeichnet ist (blaue gestrichelte Linie); fünfte Maßnahme der akustischen Optimierung (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)	86
Abbildung 64: Gezeigt wird ein Grundrissausschnitt vom Erdgeschoss des Atriums, in dem die Deckensegel in orange gekennzeichnet sind, sechste Maßnahme der akustischen Optimierung (Bildquelle: Projektplanung HFT.Venue, bearbeitet)	87
Abbildung 65: Anordnung Deckenabsorber im Empfangsbereich des Institute of Science and Technology in Österreich (Bildquelle: [52], Fotos von Franz Pfluegl)	87
Abbildung 66: Vergleich der simulierten Nachhallzeitverläufe für den Ausgangszustand und die Simulationsvarianten 1 – 8 in Abhängigkeit von der Frequenz.	89
Abbildung 67: Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Ausgangssituation. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.	90
Abbildung 68 Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Simulationsvariante 1. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.	90
Abbildung 69: Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Simulationsvariante 2. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.	91
Abbildung 70: Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Simulationsvariante 3. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.	91
Abbildung 71: Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Simulationsvariante 4. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.	92
Abbildung 72: Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Simulationsvariante 5. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.	92
Abbildung 73: Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Simulationsvariante 6. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.	93
Abbildung 74: Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Simulationsvariante 7. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.	93
Abbildung 75: Simulationsergebnis der Verteilung des Speech Transmission Index (STI) im linken Atrium für die Simulationsvariante 8. Es werden zudem für zwei Positionen im Raum die STI-Werte angegeben.	94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: STI-Bewertung, eigene Darstellung nach [20]	9
Tabelle 2: Oberflächen Basismodell	60
Tabelle 3: Erste Annahme der Schallabsorptionskoeffizienten für die Kalibrierung	63
Tabelle 4: Zweite Annahme der Schallabsorptionskoeffizienten für die Kalibrierung – Änderungen zur ersten Annahme hervorgehoben.....	65
Tabelle 5: Dritte Annahme der Schallabsorptionskoeffizienten für die Kalibrierung, Änderungen zu Tabelle 4 hervorgehoben	68
Tabelle 6: Vierte Annahme der Schallabsorptionskoeffizienten für die Kalibrierung, Änderungen zu Tabelle 5 hervorgehoben	70
Tabelle 7: Übersicht der Simulationsergebnisse der frequenzabhängigen Nachhallzeit für den Ausgangszustand und den Varianten 1 – 8. Variante 2 wird in Unialltag und Vortrag unterteilt, da für diese beiden Szenarien unterschiedliche Positionierungen der Vorhänge vorgesehen wurden- Ergänzend werden für jede Simulation die mittlere Nachhallzeit T_m und die Differenz ΔT zur mittleren Nachhallzeit des Ausgangszustandes angegeben.	88