Graz University of Technology

Bacherlorseminararbeit

Akustische Sanierung am Bundesrealgymnasium Kepler

Evaluierung der Klassenraumsanierung und Konzeptentwurf einer Musiksaalsanierung

durchgeführt am
Signal Processing and Speech Communications Laboratory,
Graz University of Technology, Austria

von
Rüdiger Fasching (1031369)
Korbinian Wegler (1131471)

Betreuer:
Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gerhard Graber
Dipl.-Ing. Jamilla Balint

Graz, 26. Mai 2015

Kurzfassung

Diese Bachelorseminararbeit befasst sich mit der akustischen Sanierung des zweiten Stockwerks am Bundesrealgymnasium Kepler, Keplerstraße 1 in 8020 Graz.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird die bereits durchgeführte Sanierung aller Klassenräume des zweiten Stockwerkes dokumentiert und evaluiert. Dabei werden die unterschiedlichen Sanierungsvarianten und deren Wirksamkeit verglichen. Des weiteren wird die Messung und Berechnung von Absorptionskoeffizienten in der Praxis anhand der durchgeführten Messungen genauer untersucht.

Im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit werden mögliche Sanierungsvarianten für den Musiksaal entworfen und evaluiert. Dazu wurden Messungen zur Dokumentation des Ist-Zustandes vorgenommen und verschiedene Simulationen in CATT-Acoustic angefertigt. Anhand der Simulationsergebnisse wurde ein mögliches Sanierungskonzept entworfen.

Alle Messungen und Simulationen, die Grundlage dieser Arbeit sind, wurden von den Autoren in Zusammenarbeit erstellt. Die Auswertung und schriftliche Darlegung des ersten Teiles und des dazugehörigen Anhangs wurde von Rüdiger Fasching übernommen. Die Ausführung des zweiten Teiles inklusive Anhang oblag Korbinian Wegler.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am	(Unterschrift)
Graz, am	(Unterschrift)

Inhaltsverzeichnis

I Evaluierung verschiedener Sanierungsvarianten für Klassenräume 7

1 Aufgabenstellung 9
1.1 Warum Sanieren? . . . 9
1.2 Problemstellung Brandschutzdecke . . . 10

2 Sanierungsvarianten am BRG Kepler 11
2.1 Überblick über die Sanierungsvarianten . . . 11
2.2 Verwendete Absorber . . . 12

3 Anforderungen laut [ÖNORM 8115-3, 2005] 15
3.1 Nachhallzeit . . . 15

4 Messung der Raumimpulsantworten 17
4.1 Messpositionen . . . 17
4.2 Messvorgang . . . 17
4.3 Auswertung der Messergebnisse . . . 18

5 Akustische Datenblätter der Klassenräume 19
5.1 Überblick über eine akustisches Datenblatt . . . 19
5.2 Das akustische Datenblatt im Detail . . . 19

6 Messung des Schallabsorptionsgrades im Hallraum 23
6.1 Messung laut [ÖNORM 354, 2003] . . . 23
6.2 Probleme bei der Messung von Schallabsorption in Hallräumen . . . 24

7 Berechnungen zu den Absorptionskoeffizienten 27
7.1 Herstellerangaben zu den Absorbern aus Variante 3 . . . 27
7.2 Berechnung zu den Lochplattenabsorbern . . . 28
7.3 Vergleich: Sanierungssimulation gegen Messung . . . 29
7.4 Korrektur der Absorptionskoeffizienten . . . 31

8 Ergebnisse und Fazit 35
8.1 Evaluierung der Sanierungsvarianten . . . 35
8.2 Zum Schallabsorptionsgrad . . . 38

II Akustische Sanierung des Musiksaals 39

9 Aufgabenstellung 41
9.1 Besondere Herausforderung . . . 41
9.2 Normative Anforderungen . . . 42
9.3 Raumbeschreibung . . . 43

10 Lärmbelastung für Lehrer und Schüler 45
10.1 Schalldruckpegelmessung . . . 45
10.2 Auswertung der Messung . . . 46

11 Messung der Raumimpulsantworten 49
11.1 Verteilung der Messpunkte . . . 49
11.2 Messvorgang . . . 50

11.3 Nachhallzeit 50

12 CATT-Acoustics Modell **51**
12.1 Entstehung des Modells 51
12.2 Verwendete Materialien 51
12.3 Quellen und Empfänger 52
12.4 Verifikation des Modells 53
12.5 Raumakustische Datenblätter zu den Modellvarianten 53
12.6 Nachhhallzeitauswertung 54
12.7 Pegelauswertung 55

13 Sanierungsutopie und Möglichkeitsbetrachtung **57**
13.1 Utopisches Modell 57
13.2 Möglichkeitsbetrachtung 58
13.3 Nachhallzeit 59

14 Sanierungsvarianten **61**
14.1 Modelle 61
14.2 Vergleich der Sanierungsvarianten für die Chorsituation 62
14.3 Evaluation der möglichen Klassenzimmersanierung 64

15 Ergebnisse und Fazit **65**
15.1 Ergebnisse der Chor-Simulation 65
15.2 Ergebnisse der Klassenzimmersimulation 65
15.3 Fazit 65

III Anhang **67**

A Akustische Datenblätter der Klassenräume **68**
A.1 Akustisches Datenblatt des Raumes 012 69
A.2 Akustisches Datenblatt des Raumes 202 75
A.3 Akustisches Datenblatt des Raumes 203 81
A.4 Akustisches Datenblatt des Raumes 205 87
A.5 Akustisches Datenblatt des Raumes 206 93
A.6 Akustisches Datenblatt des Raumes 207 99
A.7 Akustisches Datenblatt des Raumes 210 105
A.8 Akustisches Datenblatt des Raumes 211 111
A.9 Akustisches Datenblatt des Raumes 212 117

B Exposé **123**

C Equipmentliste **141**

D Raumakustische Datenblätter von Raum 208 **143**
D.1 Akustisches Datenblatt von Raum 208 (gemessen) 143
D.2 Akustisches Datenblatt von Raum 208 (simuliert) 147
D.3 Akustisches Datenblatt von Raum 208 bei Unterricht 151
D.4 Akustisches Datenblatt von Raum 208 im Ensemblebetrieb 155
D.5 Akustisches Datenblatt von Raum 208 im vollbesetzten Zustand 159
D.6 Akustisches Datenblatt von Raum 208 mit totalabsorbierenden Flächen 163
D.7 Akustisches Datenblatt von Raum 208 mit stark absorbierenden Flächen 167
D.8 Akustisches Datenblatt von Raum 208 mit geschlossenem Vorhang 171

D.9 Akustisches Datenblatt von Raum 208 mit einem Deckenabsorber 175
D.10 Akustisches Datenblatt von Raum 208 mit geschlossenem Klappabsorber 179
D.11 Akustisches Datenblatt von Raum 208 mit einem Deckensegel/Baldachin 183
D.12 Akustisches Datenblatt von Raum 208 bei Unterricht durch Vorhang abgetrennt . 187

Teil I

Evaluierung verschiedener Sanierungsvarianten für Klassenräume

1 Aufgabenstellung

Im ersten Teil dieser Bachelorseminararbeit sollen die verschiedenen am Bundesrealgymnasium Kepler durchgeführten Varianten der Klassenraumsanierung evaluiert werden. Dieses Kapitel befasst sich mit der Frage warum eine akustische Sanierung zunächst notwendig war und mit der bautechnischen Herausforderung im zweiten Obergeschoß, welche die verschiedenen Sanierungsvarianten veranlasste.[1]

1.1 Warum Sanieren?

Abbildung 1.1 zeigt warum bei den vorhandenen Klassenzimmern am BRG Kepler aus akustischer Sicht Handlungsbedarf bestand. Aufgetragen ist die Nachhallzeit T30 in Sekunden, die aus der im Klassenraum 206 durchgeführten Impulsantwortmessung hervorgeht.[2] Außerdem eingetragen ist die durch das Klassenraumsimulationstool IntKlaSim[2] daraus errechnete Nachhallzeit für einen Besetzungszustand mit einer üblichen Klassenstärke von 25 Schülern. Zu sehen ist auch die laut DIN 18041 geforderte Nachhallzeit für einen Klassenraum dieser Größe für erhöhte Anforderungen im besetzten Zustand. Diese stimmt mit der in Österreich geltenden [ÖNORM 8115-3, 2005] überein. Wie leicht erkennbar ist, liegt die Nachhallzeit in diesem Raum im gesamten Frequenzbereich der Messung deutlich über dem Sollwert. Anmerkung: alle anderen zu sanierenden Klassenräume weisen ähnliche Verhältnisse auf (siehe Anhang A).

Auch anhand der Volumenkennzahl k die das Raumvolumen mit der Publikumsanzahl in Beziehung setzt, in Abhängigkeit von der Nutzungsart, wird der Handlungsbedarf deutlich. Für den Raum 207 ergibt sich bei einem Raumvolumen von ca. 250 m^3 und einer durchschnittlichen Klassenstärke von 25 Schülern für die Volumenkennzahl: $k_{25} = 10$

Die optimalen Werte für die Volumenkennzahl für verschiedene Nutzungsbedingungen laut DIN 18041 sind in Tabelle 1.1 zu sehen. Daraus ist ersichtlich, dass für den gegebenen Raum die Volumenkennzahl wesentlich zu hoch liegt, der Raum grundsätzlich allein vom Verhältnis von anwesenden Personen zum Raumvolumen für die Nutzung als Klassenraum nicht gut geeignet ist. Die Raumakustik muss durch zusätzliche Maßnahmen verbessert werden.

Hauptnutzung des Raumes	**Volumenkennzahl k in m^3/Platz**
Sprache	3 bis 6
Gemischt	5 bis 8
Musik	7 bis 12

Tabelle 1.1: Optimale Volumeknkennzahlen k

[1] siehe dazu Abschnitt 1.2
[2] siehe Kapitel 4

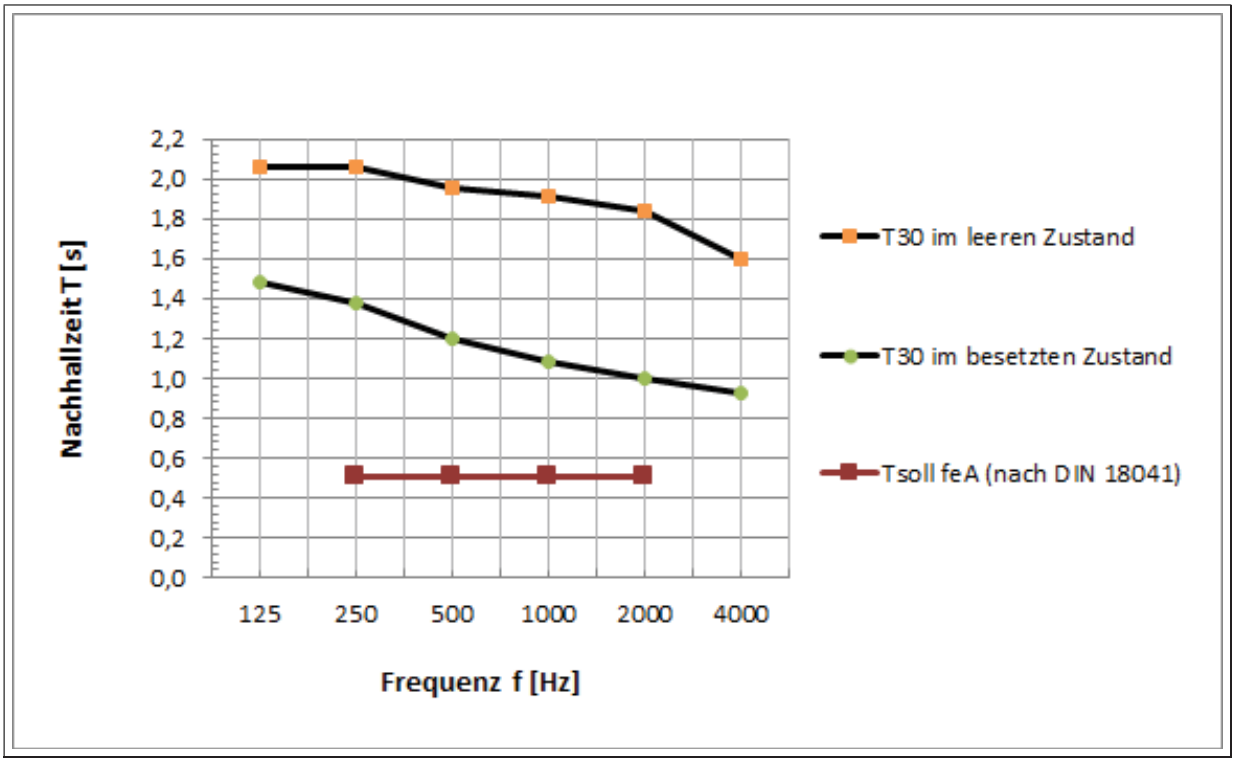


Abbildung 1.1: Nachhallzeit T30 vor der Sanierung im Raum 206

1.2 Problemstellung Brandschutzdecke

Am BRG Kepler wurden nun schon in den Klassenzimmern der unteren Stockwerke akustische Sanierungen durchgeführt. Ein grundsätzliches Problem bei den noch nicht sanierten Klassenräumen im zweiten Obergeschoß ergibt sich aus der in diesem Stockwerk vorhandenen Brandschutzdecke. Diese wurde nicht dafür ausgelegt noch zusätzlich abgehängte Decken zu tragen; genau eine solche abgehängte Akustikdecke stellte jedoch in den unteren Stockwerken ein Hauptelement der bereits durchgeführten Klassenraumsanierungen dar, wie in Kapitel 2 beschrieben. Da diese bewährte Option hier also nicht zur Verfügung stand, musste nach Alternativen gesucht werden, woraus sich die drei verschiedene Varianten der Sanierung entwickelten die nachfolgend untersucht werden.

2 Sanierungsvarianten am BRG Kepler

In diesem Kapitel werden die verschiedenen im Rahmen dieser Bachelorseminararbeit untersuchten Sanierungsvarianten für Klassenräume beleuchtet. Aufgrund der in Abschnitt 1.2 beschriebenen Problemstellung ergaben sich drei verschiedene Varianten, die in den Klassenräumen durchgeführt wurden.

2.1 Überblick über die Sanierungsvarianten

- **Variante 1:** keine Brandschutzdecke, abgehängte Akustikdecke, Gipskartonlochplatten (Raumrückwand, oberes Drittel). Beispiel: Raum 012.
- **Variante 2:** neue Brandschutzdecke, sonst wie Variante 1. Beispiel: Raum 212.
- **Variante 3:** alte Brandschutzdecke, aufgeklebte Deckenabsorber, Lochplattenabsorber aus Variante 1. (erweitert auf eine Längswand) Beispiel: Raum 211.

Das Grundmodell für die Klassenraumsanierung am BRG Kepler wurde bereits im Zuge früherer Arbeiten erstellt und auch schon in den Klassenräumen der unteren Stockwerke erfolgreich durchgeführt.[3] Dieses Grundmodell stellt die hier mit Variante 1 bezeichnete Sanierungsvariante dar, deren Hauptelement eine abgehängte Akustikdecke ist, ergänzt um einen Gipskarton-Lochplattenabsorber der am oberen Drittel der Raumrückwand angebracht wurde. Vorteil der Deckenabsorber ist, dass sie über einen breiten Frequenzbereich wirksam sind und ohne Einschränkung der Nutzfläche des Raumes auf einer großen Fläche angebracht werden können. Angemerkt sei jedoch, dass eine Anordnung über die gesamte Deckenfläche wie hier, auch für die Sprachverständlichkeit nützliche frühe Reflexionen vom mittleren Deckenbereich verhindert [ÖNORM 8115-3, 2005, S.10, Bild A.5 bzw. S.8, Abschnitt A.2.3]. In den hier sanierten Klassenräumen wurde dementsprechend auf diese nützlichen Deckenreflexionen zugunsten der Reduktion der Nachhallzeit über die große äquivalente Absorptionsfläche an der Decke verzichtet (in allen Sanierungsvarianten). Die Lochplattenabsorber an der Raumrückwand erwirken vor allem im tiefen Frequenzbereich eine Verringerung der Nachhallzeit, wie auch in Abbildung 8.1 in Kapitel 8 zu sehen ist. Außerdem verhindern sie Reflexionen die aufgrund ihrer langen Laufzeit zur Raumrückwand und retour erst spät im Bereich der Schulbänke ankommen würden und somit der Sprachverständlichkeit hinderlich wären.

Die zweite Sanierungsvariante hält am Vorgehen der ersten Variante fest, allerdings muss aufgrund der in Abschnitt 1.2 dargelegten Ausgangssituation die alte Brandschutzdecke entfernt, und durch eine neue, tragfähigere ersetzt werden. Da sonst gleich vorgegangen wird wie bei Variante 1, liegt der Unterschied zwischen den beiden Sanierungsvarianten lediglich darin, was sich über der Akustikdecke befindet. Bei Variante 1 ist dies das Mauerwerk der eigentlichen, tragenden Decke, bei Variante 2 die Gipskartonverkleidung der neuen Brandschutzdecke, über der sich Stützbalken und danach erst die eigentliche Decke befinden.

[3] Siehe dazu: [Reithner, 2013] und [Flohrschütz, 2013]

Da das Vorgehen in Variante 2 recht kostspielig ist, wurde mit Variante 3 eine Lösung entworfen, bei der die alte Brandschutzdecke erhalten bleiben kann. Indem direkt auf die alte Decke Absorber (Ecophon Focus SQ, siehe Tabelle 2.1) flächig aufgeklebt werden, wird eine punktuelle Belastung der Brandschutzdecke durch die Aufhängungen einer abgehängten Akustikdecke vermieden. Der Belastung durch die aufgeklebten Absorber kann auch die alte Brandschutzdecke standhalten. Die Gipskarton Lochplattenabsorber aus Variante 1 und 2 bleiben erhalten.[4]

Variante 1 wurde in sämtlichen Klassenräumen des Erdgeschoßes und ersten Obergeschoßes durchgeführt. In Abbildung 2.1 ist der Grundriss des 2. Obergeschoßes zu sehen, wobei die Varianten 2 und 3 farblich gekennzeichnet sind: Variante 2: rot, Variante 3: blau. In grün ist der Musiksaal (Raum Nr. 208) eingefärbt, der Thema des zweiten Teils dieser Arbeit ist.

Abbildung 2.1: Grundriss des 2.OG, ohne Maßstab

2.2 Verwendete Absorber

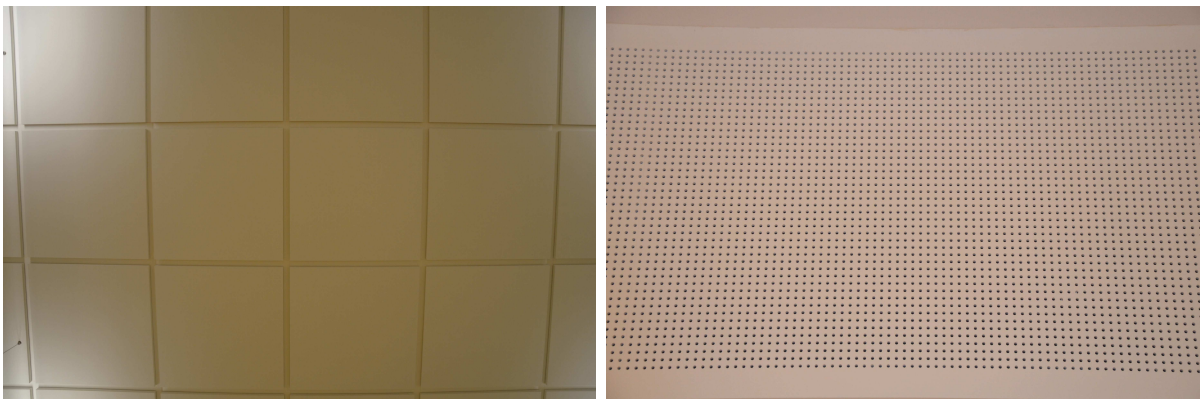
Tabelle 2.1 zeigt die bei den Sanierungsvarianten verwendeten Absorber und deren Spezifikationen wie Materialbeschaffenheit, Wand- bzw. Deckenabstand etc. Außerdem ist angeführt bei welcher der Sanierungsvarianten sie zum Einsatz kamen. In den Abbildungen 2.2 sind einerseits die Ecophon Deckenabsorber im aufgeklebten Zustand zu sehen (a), andererseits die Lochplattenabsorber an der Raumrückwand (b). Zwischen den Deckenpanelen gibt es jeweils eine Fuge von wenigen Zentimetern. Die Lochplatten weisen umlaufend entlang der Ränder einen lochfreien Bereich von 8 *cm* Breite auf. In Abbildung 2.3 (a) ist ein Klassenraum (Raum 205) nach erfolgter Sanierung nach Variante 3 zu sehen, mit den Ziffern 1 und 2 sind die Gipskartonlochplattenabsorber an Türwand und Rückwand gekennzeichnet, die jeweils in einem 1,10 *m* hohen Streifen direkt unter der Decke an den Wänden angebracht wurden. Mit Ziffer 3 sind die Ecophon Deckenpanele gekennzeichnet, die über die gesamte Deckenfläche des Raumes verbaut sind, mit Ausnahme eins Streifens am Rand (da nur ganze Platten verwendet wurden). In Abbildung 2.3 (b) ist eine abgehängte Akustikdecke zu sehen, wie sie in den Sanierungsvarianten 1 und 2 verwendet wurde.

[4] Anmerkung: Nach den Erkenntnissen aus den ersten Messungen zu Variante 3 wurden die Lochplatten auch entlang der Längswand angebracht, siehe dazu Kapitel 8.

[5] für Absorptionsgrade siehe Abschnitt 7.1

Bezeichnung	Wandabstand	Details	Bei Variante
Abgehängte Akustikdecke aus porösem Absorbermaterial	20 *cm*	Dicke: ca. 10 *mm*	1,2
Ecophon Focus SQ T24 Deckenpanele[5]	0 *cm*	600 x 600 *mm*, Dicke: 20 *mm*	3
Knauf Cleaneo Akustik Lochplatten [5]	8 *cm*	Dicke: 12,5 *mm*, Lochabstände: 23 *mm*, Lochdurchmesser: 10 *mm*, Lochanteil: 14,8 %, dahinter Mineralwolle	1,2,3

Tabelle 2.1: verwendete Absorber



(a) montierte Ecophon Deckenabsorber (b) montierte Lochplattenabsorber

Abbildung 2.2

(a) Verbaute Absorber für Sanierungsvariante 3 im Raum 205 (b) abgehängte Akustikdecke aus Raum 212

Abbildung 2.3

3 Anforderungen laut [ÖNORM 8115-3, 2005]

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Anforderungen, die in der ÖNORM B8115 Teil 3: Schallschutz und Raumakustik im Hochbau, an die Akustik von Klassenräumen gestellt werden.

3.1 Nachhallzeit

In Teil 3 der ÖNORM wird für Räume mit verschiedenen Nutzungsarten eine ideale Nachhallzeit für den besetzten Zustand definiert und ein entsprechendes Toleranzband angegeben. Die optimale Nachhallzeiten für die Nutzungsarten 'Kommunikation' und 'Sprache' sind nach den Gleichungen (3.1) und (3.2) gegeben [ÖNORM 8115-3, 2005, S.5]:

$$T = 0,32 \cdot \lg(V) - 0,17 \text{ , für Kommunikation} \tag{3.1}$$

$$T = 0,37 \cdot \lg(V) - 0,14 \text{ , für Sprache} \tag{3.2}$$

Dabei ist für Klassenräume und Medienräume in Schulen laut Norm die Nachhallzeit für die Nutzungsart 'Kommunikation' zu verwenden. In Räumen für hörbehinderte Personen oder Kommunikation in Fremdsprachen wird zudem eine Nachhallzeit gefordert, die um 20 % unter jenen der oben angegebenen Formeln liegt. In solchen Räumen ist laut Norm außerdem auf einen sehr geringen Grundgeräuschpegel und wenig Störgeräusche zu achten [ÖNORM 8115-3, 2005, S.6, Abschnitt 4.2.3]. In den Klassenräumen des BRG Kepler ist grundsätzlich immer von den erhöhten Anforderungen auszugehen, da in jedem Raum auch Fremdsprachenunterricht stattfindet bzw. auch Schüler mit nicht-deutscher Muttersprache unterrichtet werden. Damit ergibt sich mit einem durchschnittlichen Raumvolumen der vermessenen Klassenzimmer von ca. 260 m^3 für die optimale Nachhallzeit:

$$T = (0,32 \cdot \lg(260) - 0,17) - 20\% = 0,603s - 20\% = 0,603 - 0,1206 = 0,4824s \tag{3.3}$$

In den zu sanierenden Klassenzimmern ist dementsprechend eine Nachhallzeit im Bereich von ca. 0,5 s anzustreben, wobei die genauen Sollwerte für die einzelnen Räume den Diagrammen in den akustischen Datenblättern der Klassenräume zu entnehmen sind (siehe Kapitel 5 bzw. Anhang, Kapitel A). Anmerkung: Die in den Diagrammen eingetragenen Sollnachhallzeiten für erhöhte Anforderungen laut DIN 18041 ist mit der [ÖNORM 8115-3, 2005] konform.

4 Messung der Raumimpulsantworten

Um eine Aussage über den Erfolg der vorgenommenen Sanierung treffen zu können, wurde in den Klassenräumen des zweiten Obergeschoßes jeweils vor und nach der akustischen Sanierung eine Messung der Raumimpulsantwort vorgenommen. Daraus konnten anschließend mit Hilfe der Messsoftware ARTA, raumakustische Parameter und Kennwerte wie Nachhallzeit, STI, oder Al_{cons} gewonnen werden.

4.1 Messpositionen

Die Raumimpulsantwortmessungen sind nach [ÖNORM 3382-2, 2009] durchgeführt worden. Dazu mussten zunächst für jeden Raum sinnvolle Quell- und Mikrofonpositionen festgelegt werden, die auch die in der Norm angegebenen Mindestabstände zueinander und zu Raumbegrenzungsflächen einhalten. Der Mindestabstand zwischen den Mikrofonpositionen sollte mindestens der halben Wellenlänge entsprechen, im interessierenden Frequenzbereich ca. 2 m; Der Abstand zur nächsten reflektierenden Oberfläche sollte mindestens ein Viertel der Wellenlänge betragen, im üblichen Frequenzbereich ca. 1 m [ÖNORM 3382-2, 2009, S.8]. Die Anzahl der Messpositionen entspricht mit 2 Quellpositionen, 6 Mikrofonpositionen und 3 Mittelungen pro Kombination für Quell- Mikrofonposition den Anforderungen einer Präzisionsmessung laut Norm [ÖNORM 3382-2, 2009, S.8, Tabelle 1]. Für die Schallquellen der Messung sollten für die Nutzung des Raumes typische Positionen verwendet werden. In den vorliegenden Klassenräumen waren daher Quellpositionen im vorderen Bereich des Raumes nahe der Tafel und dem Lehrerpult naheliegend. Die Mikrofonpositionen wurden verstärkt, jedoch nicht ausschließlich in den Schulbankreihen verteilt, da der gesamte Raum erfasst werden sollte. Außerdem sorgt eine unsymmetrische bzw. unregelmäßige Verteilung dafür, dass das Erfassen einzelner Raummoden durch mehrere Mikrofonpositionen vermieden wird. Diese Überlegungen führten zu den Messpositionen für jeden Raum, die in den Klassenraumsteckbriefen in Kapitel A im Anhang zu finden sind. Um die Vergleichbarkeit der Messungen vor und nach der akustischen Sanierung zu gewährleisten wurden die Messpositionen der ersten Messung jeweils beibehalten - mit unvermeidlichen geringfügigen Abweichungen. Die Mikrofonhöhe von 1,20 m entspricht der typischen Ohrhöhe sitzender Personen, als Höhe der Schallquelle (Dodekaederlautsprecher) wurde ein üblicher Wert von 1,50 m gewählt.

4.2 Messvorgang

Das für die Messung verwendete Equipment ist im Anhang in Tabelle C.1 zu finden. Nach dem Festlegen der Quell- und Mikrofonpositionen und dem Aufbau der Messkette erfolgt die Kalibration (94 dB SPL @ 1 kHz). Ein logarithmischer Sinussweep von 20 Hz bis 20 kHz mit 256 Kilosamples bei 48 kHz Samplingrate (ergibt eine Sweepdauer von 5,46 s) wird über den Dodekaederlautsprecher, der als Schallquelle mit kugelförmiger Abstrahlcharakteristik dient, abgestrahlt und regt den Raum an. Die Raumimpulsantwort wird über die Mikrofone und das Audiointerface von der Messsoftware ARTA aufgezeichnet. Dieser Vorgang wird für jede Kombination aus Mikrofon- und Quellposition drei mal durchgeführt und der Mittelwert daraus gebildet

um Messfehler einzelner Messdurchgänge durch die Mittelung zu kompensieren. In ARTA kann aus der Raumimpulsantwort die Nachhallzeit in den Oktavbändern mit Mittenfrequenzen von 63 Hz bis 8 kHz nach ISO 3382 ausgewertet und zur weiteren Verarbeitung als .csv-Textdatei abgespeichert werden.

4.3 Auswertung der Messergebnisse

Zur weiteren Auswertung der Ergebnisse aus den Raumimpulsantwortmessungen stellte sich das Excel-Tool IntKlaSim als geeignet und vorteilhaft heraus. Dieses 'Interdisziplinäre Klassenraumakustik Simulationstool' wurde im Rahmen diverser Arbeiten und Projekte am Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation (SPSC) der TU-Graz entwickelt.[6] Es ist dafür konzipiert raumakustische Planungen für Klassenräume durchzuführen, indem man nach einer Messung der Nachhallzeit und Angabe der Raumparameter direkt in IntKlaSim eine Sanierung durch Einbringen verschiedener Absorber simulieren kann. Außerdem ist es möglich aus Messungen eines unbesetzten Klassenraumes eine besetzte Messung zu simulieren, indem die Schallabsorption durch eine anzugebende Anzahl an Schülern eingerechnet wird.

Für diese Bachelorseminararbeit wurde IntKlaSim zwar nicht wie gedacht zu Planung einer Klassenraumsanierung herangezogen, die Auswertung der Messergebnisse ließ sich jedoch trotzdem hervorragend mit dem Simulationstool durchführen. Dazu mussten die von IntKlaSim benötigten Raumparameter Baujahr, Raumhöhe, -länge und -breite, sowie die maximale Anzahl von Schülern eingegeben werden. Danach konnten die mit ARTA erzeugten .csv-Texdateien der durch die Messungen ermittelten Nachhallzeitwerte mittels eines Makro-Befehls in das Excel-Tool eingelesen werden.

Dementsprechend ließ sich IntKlaSim nach einigen kleineren Anpassungen in der Funktionsweise zur räumlichen Mittelwertbildung über alle Messpositionen, sowie der graphischen Darstellung der Messergebnisse verwenden. Erstellt wurden:

- Diagramm und Tabelle für die Nachhallzeit in Oktavbändern mit folgenden Graphen:
  - T_{30} im leeren Zustand
  - T_{30} im besetzten Zustand (simuliert durch IntKlaSim)
  - T_{30} im leeren Zustand nach der Sanierung
  - T_{30} im besetzten Zustand nach der Sanierung (simuliert durch IntKlaSim)
  - Sollwerte für die Nachhallzeit des Klassenraumes für erhöhte Anforderungen nach DIN 18041 inklusive Toleranzband.

  Jeweils für den leeren Raum und den simulierten besetzten Zustand:
- Diagramm für den STI
- Diagramm für den Al_{cons}
- Diagramm für den Grundgeräuschpegel im Klassenraum
- Diagramm zum Stimmaufwand des Lehrers

Genauere Informationen dazu finden sich in Kapitel 5 im Abschnitt 5.2.

[6] Informationen zu IntKlaSim und die aktuelle Version aus dem Toningenieursprojekt von Raphael Ludwig sind hier zu finden: [IntKlaSim, 2015]

5 Akustische Datenblätter der Klassenräume

Um die Ergebnisse der Messungen übersichtlich und einheitlich darzustellen, wurde ein akustisches Datenblatt als Formular entworfen und für jeden der untersuchten Räume angelegt. Diese Datenblätter sind in Anhang A zu finden wobei die auf jedem davon dargelegten Informationen in diesem Kapitel erklärt werden.

5.1 Überblick über eine akustisches Datenblatt

Das akustische Datenblatt eines Klassenraumes besteht aus folgenden Abschnitten:

- Beschreibung und Raumdaten
  - enthält Raumabmessungen, Volumen, maximale Schüleranzahl, Photo
- Messungen
  - Informationen zu den Messungen (Norm, Anzahl und Höhe der Messpositionen, etc.)
  - Raumskizze und geneaue Lage der Messpositionen
- Nachhallzeit
  - Graph und Tabelle für die Nachhallzeitauswertung des Raumes
- Raumakustische Kennwerte, enthält Graphiken für:
  - Grundgeräuschpegel
  - Stimmaufwand des Lehrers
  - STI
  - Al_{cons}

5.2 Das akustische Datenblatt im Detail

Im Folgenden werden die einzelnen Abschnitte des akustischen Datenblattes erläutert, die nach dem Schema A.x.1, A.x.2 etc. nummeriert sind (für den ersten Raum z.B. A.1.1 etc.). Das A steht hierbei für Anhang A, die erste Ziffer ist die Nummer des Datenblattes und die zweite Ziffer der Abschnitt in einem Datenblatt.

A.x.1 Beschreibung und Raumdaten

Nach einer knappen Beschreibung der Lage und des Verwendungszwecks des vorliegenden Raumes folgt eine Tabelle mit den wichtigsten Daten zur Raumgeometrie und maximaler Anzahl an Schülern. Angeführt werden Raumhöhe, Länge und Breite in m sowie das Raumvolumen in

m^3 wobei größere fixe Einrichtungsgegenstände die das Raumvolumen verkleinern wie z.B. große Schränke abgezogen werden. Außerdem wird die maximale Anzahl an Schülern die während einer Unterrichtseinheit vorhanden sind (ermittelt anhand der vorhandenen Sitzplätze) angegeben.

Um einen optischen Eindruck vom Raum zu bekommen ist außerdem eine Photographie des Raumes angefügt. Danach folgen etwaige Anmerkungen zu Besonderheiten des Raumes oder der Messungen, wie z.B. Hinweise auf Vorhänge die nur bei einer der beiden Messungen vorhanden waren.

A.x.2 Messungen

Zunächst folgt eine Tabelle mit Angaben zu den durchgeführten Messungen. Angeführt sind: Verwendete Messnorm, Anzahl der Mikrofonpositionen, Anzahl der Quellpositionen, Mikrofon- und Quellhöhe in m, Angaben zum verwendeten Messsignal sowie die gemessene Raumtemperatur in $°C$ und relative Luftfeuchte in % und das Datum der Messungen. Diese Angaben gelten mit Ausnahme der Temperatur und Luftfeuchte und des Datums sowohl für die Messung vor- als auch nach der Sanierung. Temperatur, Luftfeuchte und Datum sind sowohl für die Vor- als auch Nachhermessung angegeben.

Den nächsten Punkt bildet eine Skizze des Raumes in der die verwendeten Messpositionen für Quellen und Mikrofone zu sehen sind. Die Positionen stimmen dabei genau für die Messung vor der Sanierung, bei der Nachhermessung wurden nach Möglichkeit die selben Positionen Verwendet, kleine Abweichungen sind jedoch unausweichlich. Die genauen Messpositionen sind in zwei Tabellen abzulesen.

A.x.3 Nachhallzeit

Die gemessenen Nachhallzeiten beider Messungen (vor und nach der akustischen Sanierung) sind sowohl als Diagramm als auch als Tabellen in Oktavbändern von 125 Hz bis 4 kHz zu sehen. Dabei gibt es auch mit Hilfe von IntKlaSim simulierte Werte für einen besetzten Zustand (mit einer konstanten typischen Schüleranzahl von 25 Schülern unabhängig von der für die einzelnen Räume maximal möglichen).

A.x.4 Raumakustische Kennwerte

In diesem letzten Teil des akustischen Datenblattes werden in vier Diagrammen die (neben der Nachhallzeit) einer akustischen Charakterisierung des Raumes besonders förderlichen Kennwerte dargestellt: Grundgeräuschpegel, STI, Alcons und Stimmaufwand des Lehrers. Die Diagramme sind erneut IntKlaSim entnommen.

Grundgeräuschpegel:

Der Grundgeräuschpegel in einer typischen Unterrichtssituation im Klassenzimmer wird in IntKlaSim aus der anzugebenden typischen Schülerzahl (hier unabhängig vom Raum zur besseren Vergleichbarkeit immer mit 25 Schülern angenommen) und dem Grundgeräuschpegel für den leeren Raum errechnet. Dabei wird für jeden Schüler 1 dB zum Grundgeräuschpegel addiert.[7] Der im Diagramm vorhandenen Dezibelskala ist zusätzlich eine Tabelle mit Vergleichswerten wie z.B. 'normale Sprache' oder 'stärkerer Straßenverkehr' beigefügt.

[7] siehe: [IntKlaSim, 2015]

Speech Transmission Index (STI):

Der Sprachübertragungsindex STI geht als raumakustisches Gütemaß speziell auf die Eigenheiten der Sprachübertragung ein. Es wird sowohl die Grundstruktur eines Sprachsignals berücksichtigt, als auch die typischen Effekte die in einer Sprachübertragungsstrecke auftreten, d.h. die Veränderung des ursprünglichen Signals durch Hintergrundgeräusche und den Nachhall. Außerdem wird aufgrund der wesentlich unterschiedlichen Spektren der Sprachsignale zwischen männlicher und weiblicher Stimme unterschieden. Für beide gelten jedoch die in Tabelle 5.1 Bewertungen des STI [Graber und Weselak, 2009, S.107].

Die bei den Messungen für diese Bachelorseminararbeit verwendete Software ARTA kann den STI aus einer gemessenen Raumimpulsantwort errechnen. Dabei muss jedoch laut Softwarehandbuch [Mateljan, 2014] ein spezielles Anregungssignal verwendet, sowie eine genaue Pegelkalibration vorgenommen werden. Darauf wurde im Rahmen dieser Bachelorseminararbeit verzichtet, der STI wurde in einem vereinfachten Verfahren direkt aus der Raumimpulsantwortmessung mittels Sinussweep, wie in Kapitel 4 beschrieben, ausgewertet. Das bedeutet, dass die dadurch erhaltenen Absolutwerte für den STI möglicherweise verfälscht wurden, die Verbesserung der STI-Werte durch die Sanierung, sprich die Relation, zwischen zwei mit dem vereinfachten Verfahren gemessenen STI-Werten, ist jedoch in jedem Fall korrekt.

STI	**subjektive Bewertung**
0,0 < STI < 0,3	Bad
0,3 < STI < 0,45	Poor
0,45 < STI < 0,6	Fair
0,6 < STI < 0,75	Good
0,75 < STI < 1	Excellent

Tabelle 5.1: STI Bewertung

Articulation loss of consonants (Al_{cons}) :

Diese Größe geht auf PEUTZ und KLEIN zurück, die einen Zusammenhang zwischen dem Artikulationsverlust gesprochener Konsonanten und der Sprachverständlichkeit in Räumen herstellten. Bei einem ausreichend großen Signal-Stör-Abstand von $S/N = 35\,\mathrm{dB}$ gilt für den Al_{cons} [Graber und Weselak, 2009, S.105]:

$$Al_{cons} \approx 0,652 \cdot \left(\frac{r_{LH}}{r_R} \cdot T \right) \tag{5.1}$$

Wobei gilt:

T ..... Nachhallzeit
r_{LH} ..... Abstand zwischen Schallquelle und Hörer
$r_R \approx \sqrt{\gamma} \cdot r_H$ ..... Richtentfernung
$r_H = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{V}{T}} \cdot \left[\sqrt{\frac{s}{m}}\right]$ ... Hallradius
γ ..... Bündelungsgrad der Schallquelle

Außerdem kann man den Al_{cons} auch aus einem vorhandenen STI-Wert errechnen [Mateljan, 2014, Kapitel 8.3]:

$$Al_{cons} = 170,5405 \cdot \left(e^{-5,419 \cdot STI}\right) \tag{5.2}$$

Eine Bewertung des Al_{cons} ist in Tabelle 5.2 zu sehen Die Werte für den Al_{cons} verschlechtern sich außerdem noch dramatisch sobald der Signal-Stör-Abstand unter die geforderten $S/N = 35\,\text{dB}$ sinkt.

Al_{cons}	**Verständlichkeit (subjektiv)**
$20\ \% < Al_{cons}$	unbrauchbar
$7\ \% < Al_{cons} < 20\ \%$	befriedigend
$2\ \% < Al_{cons} < 7\ \%$	gut
$Al_{cons} < 2\ \%$	ideal

Tabelle 5.2: Al_{cons} Bewertung

Die Al_{cons} Werte im Diagramm aus IntKlaSim die im akustischen Datenblatt zu sehen sind entstanden durch die aus der Messoftware ARTA exportierten Al_{cons} Daten für die einzelnen Messpositionen welche in IntKlaSim über alle Messpositionen gemittelt wurden.

Stimmaufwand des Lehrers:

In IntKlaSim wird aus dem Grundgeräuschpegel für den besetzten Zustand des Raumes ein Dezibelwert für den Sprachaufwand des Lehrers errechnet, der auf einer Skala von 'entspannt' bis 'sehr laut' dargestellt wird, wie in Tabelle 5.3 zu sehen.

Stimmaufwand in dB	**subjektive Bewertung**
> 78	Sehr laut
72 bis 77	Laut
66 bis 71	Erhoben
60 bis 65	Normal
54 bis 59	Entspannt

Tabelle 5.3: Stimmaufwand des Lehrers

6 Messung des Schallabsorptionsgrades im Hallraum

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Verfahren der Messung des Absorptionsgrades eines Materials oder Gegenstandes im Hallraum. Bei dieser gängigen Messmethode stellte man in der Praxis diverse Abweichungen und Diskrepanzen fest, die auch erwähnt werden.

6.1 Messung laut [ÖNORM 354, 2003]

Die Messung der Schallabsorptionsgrades in Hallräumen ist in der Internationalen Norm [ÖNORM 354, 2003]: Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen beschrieben.

Zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades eines Materials im Hallraum müssen zwei Nachhallzeitmessungen durchgeführt werden. Zunächst wird die Nachhallzeit des leeren Hallraums gemessen. Danach wird die Probe in den Raum eingebracht und die dadurch veränderte Nachhallzeit gemessen. Aus der Änderung der Nachhallzeit des Raumes durch die Probe können über die Änderung der äquivalenten Absorptionsfläche die Schallabsorptionskoeffizienten α berechnet werden. Laut Norm wird die Berechnung nach Sabine durchgeführt [ÖNORM 354, 2003, S.13f]:

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3 \cdot \left(\frac{V}{c_2 \cdot T_2} - \frac{V}{c_1 \cdot T_1} \right) - 4 \cdot V \cdot (m_2 - m_1) \tag{6.1}$$

$$\alpha_S = \frac{A_T}{S} \tag{6.2}$$

wobei:

A ..... äquivalente Absorptionsfläche:
A_T ... der Probe,
A_1 ... des leeren Hallraumes,
A_2 ... des Hallraumes mit Probe

V ..... Volumen des leeren Hallraumes, in Kubikmetern

c ..... Schallgeschwindigkeit in Luft, in Metern je Sekunde
Abhängig von der Temperatur, für 15 $°C$ bis 30 $°C$ berechenbar nach:
$c = (331 + 0,6 \cdot \frac{t}{°C})$
c_1 ... erste Messung, leer,
c_2 ... zweite Messung, mit Probe

T_1, T_2 ..... Nachhallzeit in Sekunden
T_1 ... des leeren Raumes,

T_2 ... mit Probe

m_1, m_2 ..... Luftabsorptionskoeffizienten bei den beiden Messungen (abhängig von den atmosphärischen Bedingungen)

α_S ..... Schallabsorptionsgrad der Probe

S ..... vom Prüfobjekt überdeckte Fläche in Quadratmetern (ggf. um Kantenflächenflächen korrigiert)

Der Index S beim Absorptionsgrad sagt aus, dass hier das Verhältnis von äquivalenter Schallabsorptionsfläche zu Fläche eines Prüfobjektes gemeint ist, im Gegensatz zum 'geometrischen' Schallabsorptionsgrad, der aus dem Verhältnis von reflektierter zu auftreffender Schallenergie errechnet wird, im Fall des auftreffens einer ebenen Schallwelle auf eine ebene Wand in einem bestimmten Winkel [ÖNORM 354, 2003, S.5].

Zweck der Messung im Hallraum ist es, die Richtungsabhängigkeit der Schallabsorption zu eliminieren um vergleichbare Schallabsorptionsgrade zu erhalten. Dafür wird vorausgesetzt, dass es sich bei dem sich im Hallraum einstellenden Schallfeld um ein diffuses Schallfeld handelt. Eine ausreichende Diffusität laut Norm muss dementsprechend für den Hallraum sichergestellt werden. Dazu werden üblicherweise Diffusoren in unregelmäßiger Anordnung im Hallraum aufgehängt, gemeint sind gedämpfte Platten die eine geringe Schallabsorption aufweisen. Angaben zur Prüfung der Diffusität sind im Anhang A der Norm enthalten.

6.2 Probleme bei der Messung von Schallabsorption in Hallräumen

Unter Anderem folgende Probleme und Phänomene wurden bei der Messung von Schallabsorptionsgraden im Hallraum in verschiedenen Untersuchungen beobachtet:[8]

6.2.1 Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit

Ein Punkt ist, dass bei oben beschriebener Messung nach Norm in unterschiedlichen Hallräumen keine exakte Übereinstimmung der resultierenden Absorptionsgrade erreicht wird, wie in diversen Versuchsreihen belegt wurde. Auch in der [ÖNORM 354, 2003] wird darauf hingewiesen: 'Die Reproduzierbarkeit der Messungen des Absorptionsgrades wird noch untersucht' [ÖNORM 354, 2003, S.15].

Auch in ein und dem selben Hallraum, gibt es viele Details die das Messergebnis beeinflussen. So wurde zum Beispiel in [Cops u. a., 1995] festgestellt, dass die erhaltenen Absorptionsgrade von den Quellpositionen, der Ausstattung an Diffusoren und der Position der Probe im Hallraum abhängt. Außerdem ist die laut Norm geforderte Genauigkeit an konstanter Temperatur und Luftfeuchte im Raum bei den beiden Nachhallzeitmessungen oft nur schwer einzuhalten.

6.2.2 Überschätzung der Schallabsorptionsgrade

Schon in [ÖNORM 354, 2003] wird angemerkt, dass der errechnete Absorptionsgrad α_S aufgrund von 'Streueffekten' Werte größer als eins erreichen kann. Der 'geometrische Schallabsorptionsgrad'

[8] genaueres dazu siehe auch: [Balint, 2014]

(siehe Abschnitt 6.1) kann dagegen maximal den Wert 1 erreichen, wie man das auch erwarten würde, da ein Material, das mehr Schall absorbiert als auf seine Oberfläche auftrifft, physikalisch nicht möglich ist. Generell wurde in der Praxis bei raumakustischen Sanierungen häufig ein um ca. 20 % niedrigerer Absorptionsgrad beobachtet, als im Hallraum gemessen.

6.2.3 Diffusität

Ein weiteres Problem stellt die geforderte Diffusität des Hallraums dar, die auch bei den Berechnungen vorausgesetzt wird. Allein das Einbringen einer hochabsorbierenden Probe stört das Schallfeld im Sinne seiner Diffusität, womit die bei der Messung geforderten Bedingungen, um eine Richtungsabhängigkeit der Schallabsorption der Probe zu vermeiden, nicht mehr gegeben sind.

6.2.4 Vom Absorber verdeckte Fläche

Bei der Berechnung laut Norm nach (6.1) und (6.2) wird die Schallabsorption der vom Absorber verdeckten Fläche nicht explizit berücksichtigt. Der eingebrachte Absorber überdeckt einen Anteil der vorher wirksamen äquivalenten Absorptionsfläche des Raumes. Diese Änderung der äquivalenten Absorptionsfläche des Hallraumes wird laut Norm vernachlässigt. Im Hallraum fällt dies bei einer kaum absorbierenden Raumoberfläche jedoch wenig ins Gewicht. Bei den Berechnungen nach (7.2) und (7.3) im nächsten Kapitel wurde die Flächenänderung berücksichtigt, da es sich hier um Messungen in den Klassenzimmern handelt und deren Raumoberfläche sehr wohl Schallanteile absorbiert.

7 Berechnungen zu den Absorptionskoeffizienten

Nachfolgend soll untersucht werden, was anhand der durchgeführten Messungen am BRG Kepler bezüglich der Absorptionsgrade der verwendeten Absorber beobachtet werden kann. Die Herstellerangaben bezüglich des Absorptionsgrades der Absorber - sofern im Hallraum nach [ÖNORM 354, 2003] gemessen, siehe Kapitel 6 - sollen mit der tatsächlichen Wirkung der Absorber in den Klassenräumen abgeglichen werden. Dabei liegt die Konzentration auf Sanierungsvariante 3, zu der die meisten Messdaten zur Verfügung stehen.

7.1 Herstellerangaben zu den Absorbern aus Variante 3

Für die Deckenpanele Ecophon Focus SQ, die in Variante 3 verwendet wurden, gibt es ein Datenblatt vom Hersteller,[9] indem auch die Absorptionsgrade angegeben sind. Diese wurden laut ISO 354 [ÖNORM 354, 2003] im Hallraum in Terzbändern gemessen und nach DIN EN ISO 11654 in den praktischen Absorptionsgrad α_P in Oktavbändern umgerechnet. (7.1) zeigt ein Berechnungsbeispiel dazu für 500 Hz. Dieser Absorptionsgrad α_P ist in Tabelle 7.1 zu sehen. Verbaut wurden die Absorber grundsätzlich wie im Datenblatt angegeben, die vorgeschlagene Fugenbreite zwischen den Panelen von 8 mm wurde zwar nicht eingehalten, was den Absorptionsgrad jedoch nicht maßgeblich beeinflussen sollte.

$$\alpha_{P,500} = \frac{\alpha_{S,400} + \alpha_{S,500} + \alpha_{S,630}}{3} \tag{7.1}$$

wobei:

$\alpha_{P,500}$ ..... praktischer Schallabsorptionsgrad für das 500 Hz Oktavband
α_S ..... Nach ÖNORM 354 gemessener Schallabsorpeionsgrad:
$\alpha_{S,400}$ ... für das 400 Hz Terzband
$\alpha_{S,500}$ ... für das 500 Hz Terzband
$\alpha_{S,630}$ ... für das 630 Hz Terzband

	125 Hz	**250 Hz**	**500 Hz**	**1 kHz**	**2 kHz**	**4 kHz**
α_P	0,05	0,35	0,70	0,95	1	1

Tabelle 7.1: Absorptionskoeffizienten der Ecophon-Deckenabsorber

[9] Zu finden unter [Ecophon, 2015]

Bezüglich der Cleaneo Akustik Gipskartonlochplatten gibt es von Knauf ein gesammeltes Datenblatt zur dieser Lochplattenserie. Die am BRG Kepler verwendeten Platten entsprechen dem Modell 10/23 R mit gerader Rundlochung und 14,8 % Lochanteil in [Knauf, 2015, S.12] rechts. Angegeben ist wiederum der praktische Absorptionsgrad α_P der ebenfalls aus dem laut [ÖNORM 354, 2003] gemessenen Absorptionsgrad α_S errechnet wurde. Hier sind jedoch verschiedene Werte für unterschiedliche Konstruktionstiefen mit und ohne Mineralwolle dahinter angegeben, und zwar für 65 mm, 200 mm und 400 mm Konstruktionstiefe. Am BRG Kepler wurde an den Wänden allerdings eine Konstruktionstiefe von 93 mm erreicht. Dementsprechend sollte der Absorptionsgrad zwischen den Werten für 65 mm und 200 mm Konstruktionstiefe liegen die in Tabelle 7.2 zu sehen sind.

	125 Hz	**250 Hz**	**500 Hz**	**1 kHz**	**2 kHz**	**4 kHz**
$\alpha_{P,65mm}$	0,35	0,55	0,7	0,7	0,6	0,65
$\alpha_{P,200mm}$	0,45	0,60	0,65	0,60	0,55	0,60

Tabelle 7.2: Absorptionskoeffizienten der Knauf Cleaneo Akustik Absorber

7.2 Berechnung zu den Lochplattenabsorbern

Herstellerangaben zum Absorptionsgrad der Gipskartonlochplatten sind nicht für die erreichte Konstruktionstiefe verfügbar, allerdings kann dieser auf andere Art ermittelt werden: Im Raum 211 wurde sowohl nach der ersten, als auch nach der zweiten Sanierung die Nachhallzeit gemessen. Bei der zweiten Sanierung wurden allerdings lediglich an der Längswand weitere Lochplatten hinzugefügt. Aus der Änderung der Nachhallzeit – die nur von diesem hinzugefügten Absorber verursacht ist – kann somit mit Hilfe der Sabin'schen Formel für die Nachhallzeit der Schallabsorptionsgrad der mit Mineralwolle hinterlegten Lochplatten errechnet werden:

$$\alpha_{Abs} = 0,161 \cdot \frac{V_{n2}}{T_{n2} \cdot S_{Abs}} - \frac{(S_{Raum} - S_{Abs}) \cdot \alpha_m}{S_{Abs}} \tag{7.2}$$

$$\alpha_m = 0,161 \cdot \frac{V_{n1}}{T_{n1} \cdot S_{Raum}} \tag{7.3}$$

wobei:

α_{Abs} ..... Schallabsorptionsgrad des Absorbers
V_{n1} ..... Raumvolumen nach erster Sanierung
V_{n2} ..... Raumvolumen nach zweiter Sanierung
T_{n1} ..... Nachhallzeit nach erster Sanierung
T_{n1} ..... Nachhallzeit nach zweiter Sanierung
S_{Abs} ..... Vom Absorber verdeckte Fläche
S_{Raum} ..... Raumoberfläche
α_m ..... mittlerer Schallabsorptionsgrad des Raumes nach erster Sanierung

Dies führt zu den Werten in Tabelle 7.3 die im folgenden für die Lochplattenabsorber verwendet werden. Vergleicht man die errechneten Werte aus Tabelle 7.3 mit den Herstellerangaben in

Tabelle 7.2 erkennt man, dass die berechneten Absorptionsgrade nicht wie erwartet zwischen den Werten für 65 mm und 200 mm Konstruktionstiefe liegen. Da diese Werte jedoch aus den Messungen in einem Klassenraum ähnlich den übrigen errechnet wurden wird davon ausgegangen, dass sie die Wirkung der Absorber für diese Anwendung beschreiben.

	125 Hz	**250 Hz**	**500 Hz**	**1 kHz**	**2 kHz**	**4 kHz**
α_P	0,46	0,81	0,6	0,34	0,32	0,45

Tabelle 7.3: berechnete Absorptionskoeffizienten der Knauf Cleaneo Akustik Absorber

7.3 Vergleich: Sanierungssimulation gegen Messung

Mittels IntKlaSim kann nun für jeden mit Variante 3 sanierten Raum die durchgeführte Sanierung simuliert werden wie in Abschnitt 4.3 beschrieben. Sind die Absorptionskoeffizienten der Absorber akkurat, so sollte ein Vergleich mit der tatsächlich nach der Sanierung gemessenen Nachhallzeit idealerweise keine Abweichung zeigen, allenfalls eine sehr geringe (wenn man Toleranzen für die Raumimpulsantwortmessungen sowie die Messungen zu Bestimmung der Absorptionsgrade und der Simulation einrechnet).

Die Fläche der eingebrachten Deckenabsorber wurde aus der Anzahl (N) und den Abmessungen derselben (siehe Abschnitt 2.2) berechnet: $S_1 = N \cdot 0,6^2$; die Fläche der Lochplattenabsorber ergibt sich aus der Absorberhöhe (h_a) und den Raummaßen (b_r,l_r) unter Berücksichtigung der Stoßkante in der Raumecke (Abzug der Absorbertiefe t_a von der Raumlänge):
$S_2 = b_r \cdot h_a + (l_r - t_a) \cdot h_a$.

Die Absorptionskoeffizienten für die Wandabsorber wurden laut Tabelle 7.3 (wie berechnet) und die der Deckenabsorber nach Tabelle 7.1 (laut Herstellerangabe) verwendet. Unter der Annahme, dass die Koeffizienten der Wandabsorber akkurat berechnet wurden, wird die dargestellte Abweichung zwischen Messung und Simulation allein von den Ecophon Deckenabsorbern verursacht, was bedeutet, dass man somit die Abweichung der Wirkung der Absorber von den vom Hersteller nach Norm im Hallraum gemessenen Absorptionsgraden erkennt.

Abbildung 7.1 zeigt jeweils die Abweichungen der durch IntKlaSim simulierten Nachhallzeiten von den tatsächlich gemessenen Nachhallzeiten nach der Sanierung in den Oktavbändern von 125 Hz bis 4 kHz für jeden der nach Variante 3 sanierten Klassenräume. Zusätzlich ist noch der Mittelwert über alle Räume eingetragen. Die Abweichung ist dabei in % der Nachhallzeit nach der Sanierung angegeben, positive Werte sagen aus, dass die Simulation hier eine geringere Nachhallzeit ergibt als die Messung (die Simulation 'besser' ist als die Messung), negative Werte das Gegenteil (die Messung liefert geringere Nachhallzeiten als die Simulation und ist somit 'besser'). Idealisiert würde man über den gesamten Frequenzbereich eine Abweichung der Simulation von der Messung von annähernd 0 % erwarten.

Betrachtet man die Graphik erkennt man zwei wesentliche Dinge:

1. Die Streuung der Abweichungen der einzelnen Räume ist groß.
2. Bei allen Räumen treten nicht zu vernachlässigende Abweichungen zwischen 10 und 20 % auf.

Die große Streuung sagt im Kern aus, dass die selben Absorber in unterschiedlichen Räumen - mit den in dieser Arbeit vorgestellten Messungen, Berechnungen, und Simulationen ausgewertet - keine einheitliche Veränderung der Nachhallzeit bewirken, sondern in jedem Raum leicht unterschiedliche Ergebnisse liefern. Mehr dazu in Kapitel 8. Mit dem Wissen über diese Abweichung

ist auch ersichtlich, dass in Abbildung 7.1 der Verlauf der Abweichung für den Raum 211 am ehesten die tatsächliche Abweichung der Ecophon Absorber darstellt. Für die anderen Räume ergibt sich ein systematischer Fehler aufgrund der aus den Messungen in Raum 211 berechneten Werte für die Lochplattenabsorber.

Für die weiteren Berechnungen bedeutet das, dass zwar für einen Raum korrigierte Absorptionsgrade errechnet werden können, die der tatsächlichen Schallabsorption der Absorber bei dieser Sanierung entsprechen, welche dann jedoch auch nur für diesen einen Raum tatsächlich exakt sind.

Bei näherer Betrachtung erkennt man, dass für Raum 211 die Abweichung der Simulation von der Nachhermessung für Frequenzen ab 500 Hz konstant bei etwa 20 % liegt. Dies stimmt gut mit Berichten aus der Praxis überein. Unter 500 Hz nähert sich die Simulation der Messung zunehmend an. Bei den übrigen Räumen ist ein ähnlicher Kurvenverlauf zu erkennen. Bei 125 Hz sind die Abweichungen für alle Räume negativ, hier hat die Sanierung besser funktioniert als erwartet, besonders auffällig sind dabei die Räume 202 und 206, die beiden größten der betrachteten Klassenräume. Die Räume 202 und 207 weichen im übrigen Frequenzbereich auffällig von den anderen Räumen ab. Im Fall des Raumes 207 ist dies nicht verwunderlich, da er sich bereits bei der Messung vor der Sanierung von den übrigen Räumen unterschied.

	125	250	500	1k	2k	4k
Raum 202	-35,13%	-3,72%	3,85%	0,03%	13,93%	24,34%
Raum 203	-21,35%	5,81%	13,05%	7,19%	17,48%	21,03%
Raum 205	-35,19%	7,35%	14,78%	10,59%	17,57%	22,56%
Raum 206	-36,38%	9,49%	18,46%	16,29%	21,88%	25,33%
Raum 207	-33,71%	-0,66%	1,76%	-7,76%	-3,90%	-3,92%
Raum 210	-11,55%	8,42%	15,36%	9,40%	15,78%	20,33%
Raum 211	-1,43%	13,33%	20,18%	17,65%	21,30%	22,48%
Mittelwert	-24,96%	5,72%	12,49%	7,63%	14,86%	18,88%

Abbildung 7.1: Abweichung der simulierten von der gemessenen Nachhallzeit nach der Sanierung

7.4 Korrektur der Absorptionskoeffizienten

Berechnungen zur Korrektur der Absorptionskoeffizienten funktionieren aus oben genannten Gründen demnach nur für einzelne Räume genau. Die entworfenen Konzepte dazu seien dennoch vorgestellt:

7.4.1 Berechnungskonzept 1

Ein erster Ansatz kann ähnlich aussehen wie die Berechnungen zu den Gipskartonlochplatten. Hinzu kommt lediglich ein Term zur Berücksichtigung der Wandabsorber:

$$\alpha_D = 0,161 \cdot \frac{V_n}{T_n \cdot S_{Abs}} - \frac{(S_{Raum} - S_D) \cdot \alpha_m}{S_D} - \frac{S_W \cdot \alpha_W}{S_D} \tag{7.4}$$

$$\alpha_m = 0,161 \cdot \frac{V_v}{T_v \cdot S_{Raum}} \tag{7.5}$$

wobei:

α_D ..... Schallabsorptionsgrad des Deckenabsorbers
α_W ..... Schallabsorptionsgrad des Wandabsorbers
V_v ..... Raumvolumen vor der Sanierung
V_n ..... Raumvolumen nach der Sanierung
T_v ..... Nachhallzeit vor der Sanierung
T_n ..... Nachhallzeit nach der Sanierung
S_D ..... Vom Deckenabsorber verdeckte Fläche
S_W ..... Vom Wandabsorber verdeckte Fläche
S_{Raum} ..... Raumoberfläche
α_m ..... mittlerer Schallabsorptionsgrad des Raumes vor der Sanierung

7.4.2 Berechnungskonzept 2

Eine Ungenauigkeit dieser obigen Berechnung liegt jedoch darin, dass mit dem mittleren Schallabsorptionsgrad des Raumes gerechnet wird, um unter anderem auch die vom Absorber verdeckte Raumoberfläche berücksichtigen zu können. Das heißt, die im Raum vor der Sanierung vorhandene Schallabsorption wird gleichmäßig auf alle Flächen verteilt, und die Fläche die mit diesem Schallabsorptionsgrad belegt wird, wird um die vom Absorber verdeckte Fläche verringert. Dies berücksichtigt die tatsächlich verdeckte Fläche jedoch nur ungenau. Um dieses Problem zu umgehen dient das im Folgenden vorgestellte Excel-Dokument.

Indem man die verschiedenen Materialien die man in einem Klassenraum vorfindet (Wände, Decke, Tafel, Fenster, etc.) erfasst und deren Fläche sowie Absorptionskoeffizienten (aus der diverser Literatur dazu) in einer Tabelle auflistet, erhält man äquivalente Absorptionsflächen für die einzelnen Materialien. Werden die so erhaltenen äquivalenten Absorptionsflächen der einzelnen Teilflächen aufsummiert, kann man daraus über die Sabine'sche Nachhallzeitformel einen Wert für die Nachhallzeit des Raumes berechnen.

Idealerweise müssen die so berechneten Werte für die Nachhallzeit nun mit den gemessenen Werten übereinstimmen. Passt man die Absorptionskoeffizienten der Teilflächen für die Nachhallzeitberechnung vor der Sanierung so lange an, bis die Nachhallzeiten tatsächlich übereinstimmen,

wird das Berechnungsmodell kalibriert. Fügt man nun die Sollwerte für die Absorptionskoeffizienten der bei der Sanierung verwendeten Absorber, sowie deren verbaute Fläche in eine gleich aufgebaute Berechnung der Nachhallzeit nach der Sanierung ein, kann man über die Abweichung der berechneten Nachhallzeit nach der Sanierung gegenüber der gemessenen Nachhallzeit eine Abweichung der Absorptionskoeffizienten der verwendeten Absorber gegenüber den Sollwerten feststellen. Daraus erhält man außerdem korrigierte Absorptionskoeffizienten die der tatsächlichen Wirkung der Absorber auf die Raumakustik im konkreten Fall entsprechen.

7.4.3 Übersicht über das Excel-Dokument zur Berechnung über Teilflächen

Es folgt ein Überblick über das angelegte Excel-Dokument mit dem sich die im vorigen Abschnitt beschriebenen Berechnungen durchführen lassen. Abbildung 7.2 sowie Abbildung 7.3 und Abbildung 7.4 zeigen Ausschnitte aus dem Dokument.

Das Excell-Dokument ist in vier Arbeitsmappen unterteilt:

- Teilflächen vor der Sanierung, mit den Tabellen für:
  - Raumvolumen (Abbildung 7.2 [1])
  - gemessene sowie berechnete Nachhallzeit und Differenz (Abbildung 7.2 [2])
  - Teilflächen mit Absorptionskoeffizienten und äquivalenter Absorptionsfläche (Abbildung 7.2 [3],[4])
  - durchschnittlichen Absorptionskoeffizienten (Abbildung 7.2 [5])
- Teilflächen nach der Sanierung, mit den Tabellen siehe vor der Sanierung (mit der Ausnahme der durchschnittlichen Absorptionskoeffizienten)
- Teilflächen Ergebnis, mit den Tabellen für:
  - Vergleich der Nachhallzeiten aus den vorigen Arbeitsblättern (Abbildung 7.3 [1])
  - Vergleich von Soll- und Ist-Werten der Deckenabsorber (Abbildung 7.2 [2])
  - Faktor(en) von Sollwerten zu Istwerten der Deckenabsorber, falls vorhanden (Abbildung 7.2 [3])
  - Äquivalente Absorptionsfläche vor und nach der Sanierung (Abbildung 7.2 [4])
- Differenz A (Messung vs. Teilflächen)
  dient dem Vergleich der Änderung der äquivalenten Absorptionsfläche,
  einerseits aus den Messungen, andererseits aus den Teilflächenberechnungen gewonnen (Abbildung 7.4).

Absorptionsflächen und Nachhallzeit vor der Sanierung

Raumvolumen in m³:	240,47

[1]

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
$T_{berechnet}$	1,48 s	1,40 s	1,44 s	1,22 s	1,45 s	1,33 s
$T_{gemessen}$	1,52 s	1,40 s	1,37 s	1,30 s	1,28 s	1,14 s
Differenz	-0,03 s	0,00 s	0,06 s	-0,08 s	0,18 s	0,18 s

[2]

[3]

[4]

		α							A					
Bezeichnung	Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Fläche	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
3 Personen	6m²/Person	0,15	0,25	0,55	0,8	0,9	0,9	3 m²	0 m²	1 m²	2 m²	2 m²	3 m²	3 m²
Beamertafel	Kunststoff	0,23	0,11	0,09	0,01	0,01	0,03	2 m²	1 m²	0 m²	0 m²	0 m²	0 m²	0 m²
Boden	Parkett	0,2	0,15	0,1	0,1	0,06	0,1	63 m²	13 m²	9 m²	6 m²	6 m²	4 m²	6 m²
Decke	Gipskarton	0,05	0,02	0,06	0,04	0,1	0,11	56 m²	1 m²	1 m²	2 m²	2 m²	6 m²	6 m²
Fenster 3	Kastenfenster	0,28	0,2	0,1	0,06	0,03	0,02	12 m²	3 m²	2 m²	1 m²	1 m²	0 m²	0 m²
Heizkörper	Metall gestrichen	0,15	0,13	0,06	0,05	0,04	0,04	2 m²	0 m²	0 m²	0 m²	0 m²	0 m²	0 m²
Kasten	Kasten	0,31	0,34	0,26	0,26	0,22	0,21	8 m²	2 m²	3 m²	2 m²	2 m²	2 m²	2 m²
Pinwand	Pressspan gestrichen	0,1	0,1	0,1	0,12	0,1	0,1	3 m²	0 m²	0 m²	0 m²	0 m²	0 m²	0 m²
Schulbank	Holz	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07	11 m²	2 m²	1 m²	1 m²	1 m²	1 m²	1 m²
Sessel	Holzstuhl pro Platz	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	32 m²	0 m²	0 m²	1 m²	1 m²	1 m²	1 m²
Tafel	Kunststoff	0,23	0,11	0,09	0,01	0,01	0,03	3 m²	1 m²	0 m²	0 m²	0 m²	0 m²	0 m²
ums Waschbecken	Fließen	0	0	0	0,02	0,03	0,03	3 m²	0 m²	0 m²	0 m²	0 m²	0 m²	0 m²
Vorhänge 2	Akustikvorhang	0,08	0,43	0,87	0,95	0,95	0,95	8 m²	1 m²	4 m²	7 m²	8 m²	8 m²	8 m²
Wände	Mauerwerk	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,02	91 m²	2 m²	3 m²	4 m²	5 m²	2 m²	2 m²
Ergebnis								296 m²	26 m²	28 m²	27 m²	32 m²	27 m²	29 m²

$\alpha_{durchschnittl.}$					
125 HZ	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2kHz	4 kHz
0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,12

[5]

Legende

A ..... äquivalente Absorptionsfläche

α ..... Absorptionsgrade

$T_{berechnet}$ ..... Aus der äquivalenten Absorptionsfläche (mit Hilfe der Sabine'schen Formel) berechnete Nachhallzeit

$T_{gemessen}$ ..... Nachhallzeit aus den Impulsantwortmessungen mit Arta

Differenz ..... $T_{berechnet}$ - $T_{gemessen}$

Abbildung 7.2: Arbeitsblatt: Teilflächen vor der Sanierung

Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Teilflächenberechnungen

[1]

	Vor Sanierung				Nach Sanierung			
Frequenz	$T_{berechnet}$	$T_{gemessen}$	Differenz	A	$T_{berechnet}$	$T_{gemessen}$	Differenz	A
125 Hz	1,48 s	1,52 s	-0,03 s	26 m²	1,35 s	1,35 s	0,00 s	30 m²
250 Hz	1,40 s	1,40 s	0,00 s	28 m²	1,09 s	1,08 s	0,01 s	37 m²
500 Hz	1,44 s	1,37 s	0,06 s	27 m²	0,86 s	0,88 s	-0,01 s	47 m²
1 kHz	1,22 s	1,30 s	-0,08 s	32 m²	0,67 s	0,67 s	0,00 s	60 m²
2 kHz	1,45 s	1,28 s	0,18 s	27 m²	0,69 s	0,69 s	0,01 s	58 m²
4 kHz	1,33 s	1,14 s	0,18 s	29 m²	0,70 s	0,71 s	0,00 s	57 m²

$\alpha_{D,vS}$					
125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
0,05	0,02	0,06	0,04	0,1	0,11

[2]

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
$\alpha_{D.abs,soll}$	0,100	0,300	0,800	1,000	1,000	0,900
$\alpha_{D.abs,neu}$	0,02	0,175	0,420	0,76	0,750	0,700
Differenz	0,08	0,125	0,38	0,24	0,25	0,2

Faktor soll zu ist	Faktoren s.u.	Faktor soll zu ist	0,40	0,50	0,60	0,80	0,75	0,70
Einzelfaktor			Verschiedene Faktoren für die Frequenzbänder falls vorhanden					

[3]

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Δ A vor/nach	4 m²	9 m²	20 m²	29 m²	32 m²	28 m²

[4]

Legende

A ..... äquivalente Absorptionsfläche

$\alpha_{D,vS}$ ..... Absorptionsgrade der Decke vor der Sanierung

$\alpha_{D.abs,soll}$ ..... Absorptionsgrade der Deckenabsorber laut Hersteller

$\alpha_{D.abs,neu}$ ..... Absorptionsgrade der Deckenabsorber aus den Berechnungen

$T_{berechnet}$ ..... Aus der äquivalenten Absorptionsfläche (mit Hilfe der Sabine'schen Formel) berechnete Nachhallzeit

$T_{gemessen}$ ..... Nachhallzeit aus den Impulsantwortmessungen mit Arta

Δ A vor/nach ..... Unterschied in der Äquivalenten Absortpionsfläche vor und nach der Sanierung (laut Berechnungen)

Abbildung 7.3: Arbeitsblatt: Teilflächen Ergebnis

Differenz der Äquivalenten Absorptionsfläche von Vorhermessung zu Nachhermessung

Raumvolumen	240,47

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
T_{vorher}	1,52 s	1,40 s	1,37 s	1,30 s	1,28 s	1,14 s	
$T_{nachher}$	1,35 s	1,08 s	0,88 s	0,67 s	0,69 s	0,71 s	Aus Messungen

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
A_{vorher}	26 m²	28 m²	29 m²	30 m²	31 m²	34 m²
$A_{nachher}$	29 m²	36 m²	45 m²	59 m²	57 m²	56 m²

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Δ A aus Messungen	3 m²	8 m²	16 m²	29 m²	26 m²	21 m²
Δ A aus Teilflächen	4 m²	9 m²	20 m²	29 m²	32 m²	28 m²
Differenz	-0,54 m²	-1,08 m²	-3,46 m²	-0,05 m²	-5,10 m²	-6,72 m²

Legende

A ..... äquivalente Absorptionsfläche

T_{vorher} ..... Nachhallzeit vor der Sanierungaus den Impulsantwortmessungen mit Arta

$T_{nachher}$ ..... Nachhallzeit nach der Sanierung aus den Impulsantwortmessungen mit Arta

Δ A ..... Unterschied in der Äquivalenten Absortpionsfläche vor und nach der Sanierung (laut Berechnungen)

Abbildung 7.4: Differenz A (Messung vs. Teilflächen)

8 Ergebnisse und Fazit

Zusammenfassend werden die Messergebnisse zu den verschiedenen Sanierungsvarianten, sowie der Berechnungen zu den Absorptionskoeffizienten kommentiert und interpretiert.

8.1 Evaluierung der Sanierungsvarianten

Der dringendste Teil der Aufgabenstellung dieser Bachelorseminararbeit war es, die Sanierungsvariante 3 (aufgeklebte Deckenabsorber)[10] zu beurteilen, die, wegen der hohen Kosten für Variante 2 (abgehängte Akustikdecke unter neuer Brandschutzdecke), von Seite der Schule die bevorzugte Lösung für das zweite Obergeschß darstellte. Die erste Aufgabe war es demnach möglichst rasch die Raumimpulsantwortmessungen im ersten Raum der nach Variante 3 saniert wurde (Nummer 211) durchzuführen und auszuwerten. Diese ersten Ergebnisse wurden der Schule in Form eines Exposés[11] vorgelegt, in dem die Sanierungsvarianten 2 und 3 anhand der Räume 012 und 211 gegenübergestellt sind und wurden in einer Besprechung am 25.11.2014 mit Herrn Professor Graber, Frau DI Balint und dem Direktor des BRG Kepler, Herrn Mag. Franz Riegler diskutiert. Diese ersten Messungen zeigten, dass verglichen mit der Sanierungsvariante 2 durch die aufgeklebten Deckenabsorber in Variante 3 nur unbefriedigende Ergebnisse erzielt werden konnten. Deshalb wurde in der Besprechung beschlossen, die Gipskartonlochplattenabsorber nicht nur auf den oberen Bereich der Raumrückwand, sonder auch auf den oberen Teil der Türwand auszudehnen. Dies versprach aufgrund der großen zusätzlichen Absorptionsfläche eine weitere Verbesserung der Situation. Anhand zweier Messungen in Raum 211 kann dies überprüft werden, da hier in einem ersten Schritt zunächst nur an der Raumrückwand die Lochplattenabsorber angebracht wurden (erste Nachhermessung) und danach auch an der Längswand (zweite Nachhermessung). Abbildung 8.1 zeigt die Nachhallzeiten die aus diesen beiden Raumimpulsantwortmessungen hervorgehen. Über 1 kHz ist die Verbesserung durch die zusätzlichen Absorber unwesentlich, darunter jedoch konnte die Nachhallzeit noch deutlich gesenkt werden, bei 250 Hz beispielsweise um knapp 0,2 s.

[10] siehe Kapitel 2
[11] Zu finden in Anhang B

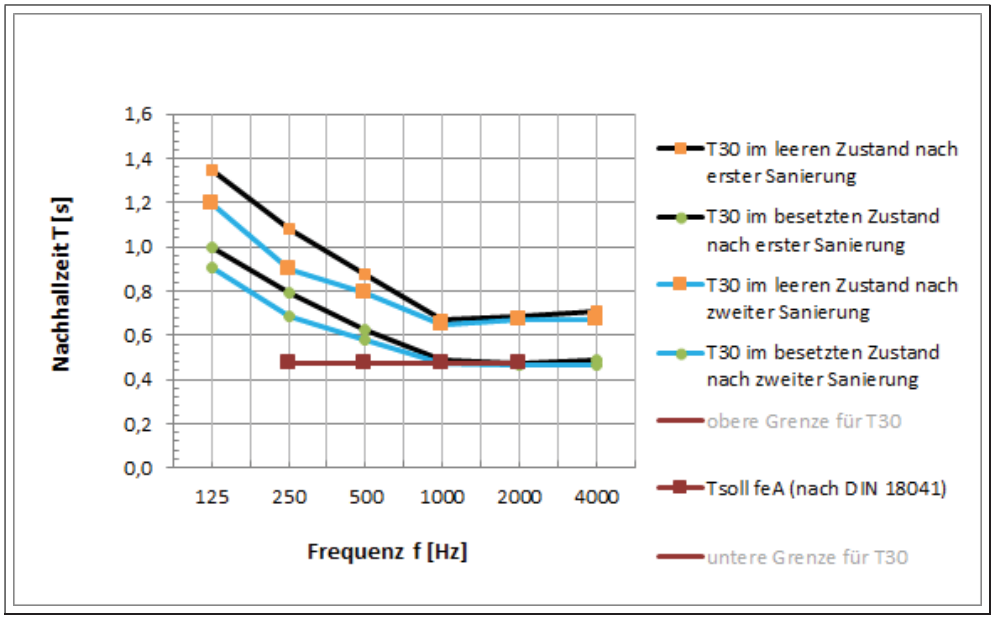
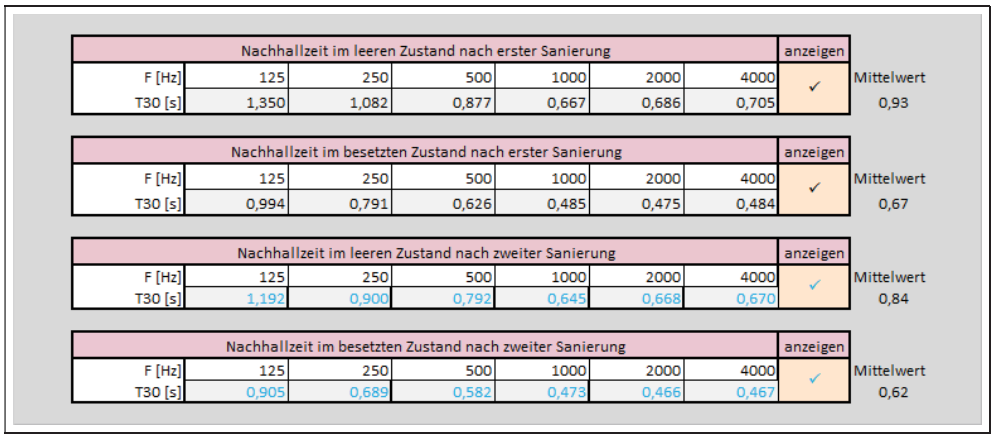


Abbildung 8.1: Nachhallzeit nach den beiden Sanierungsschritten in Raum 211



Nachhallzeit im leeren Zustand nach erster Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,350	1,082	0,877	0,667	0,686	0,705		0,93

Nachhallzeit im besetzten Zustand nach erster Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	0,994	0,791	0,626	0,485	0,475	0,484		0,67

Nachhallzeit im leeren Zustand nach zweiter Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,192	0,900	0,792	0,645	0,668	0,670		0,84

Nachhallzeit im besetzten Zustand nach zweiter Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	0,905	0,689	0,582	0,473	0,466	0,467		0,62

Abbildung 8.2: Tabelle zu Abbildung 8.1

8.1.1 Vergleich der Sanierungsvarianten

Eine Betrachtung der durchgeführten Sanierungsvarianten kann anhand der Klassenraumsteckbriefe im Anhang Kapitel A erfolgen. Erste und wichtigste Vergleichsgröße muss hierbei immer die Nachhallzeit sein. Erreicht werden sollten idealerweise in allen Klassenräumen, unabhängig davon wie sie saniert wurden, die Anforderungen für Fremdsprachenunterricht nach [ÖNORM 8115-3, 2005] die in den Nachhallzeitdiagrammen der Steckbriefe eingetragen ist (als $Tsoll\,feA$). Da die Raumvolumina nicht ident sind, ist ein Vergleich von Absolutwerten der Nachhallzeit auch nicht sinnvoll, Aussagen über den Sanierungserfolg können am besten immer in Hinsicht auf die Sollnachhallzeit getätigt werden. Nachfolgend seien die auffälligsten Punkte beim Vergleich der drei Sanierungsvarianten aufgezeigt, wobei Aussagen über Variante 3 (aufgeklebte Deckenabsorber) immer insgesamt, über alle mit dieser Variante sanierten Räume gesehen, zu verstehen sind. Es ist sinnvoll hier die Nachhallzeit mit simuliertem Besetzungszustand zu betrachten, da dieser den in der Unterrichtspraxis an der Schule anzutreffenden Zustand am besten annähert.

a) Die drei Sanierungsvarianten sind bezüglich der Nachhallzeit nach der Sanierung, mit simulierter Besetzung durch 25 Schüler, durchaus vergleichbar.

b) Ab 1 kHz werden bei allen drei Varianten die Sollwerte für erhöhte Anforderungen erreicht. In diesem Frequenzbereich ist kaum ein Unterschied zwischen den Sanierungsvarianten festzustellen.

c) Unter 1 kHz unterscheidet sich das Erscheinungsbild der Nachhallzeitkurven etwas: Bei Variante 3 ist ein Knick in der Kurve bei 1 kHz zu erkennen: bei höheren Frequenzen bleibt die Nachhallzeit annähernd konstant auf einem Wert um 0,5 s, zu tieferen Frequenzen steigt sie an, bis bei 125 Hz je nach Raum Werte um 0,9 s erreicht werden. Bei den Varianten 1 und 2 findet dieser Knick bei dem die Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen hin ansteigt erst bei 500 Hz statt. Daraus resultierend, sind die Werte bei 500 Hz für die Varianten 1 und 2 etwas näher an den Sollwerten als bei Variante 3. Erklärt werden kann dies dadurch, dass die abgehängte Akustikdecke aus den ersten beiden Varianten offensichtlich noch bis zum 500 Hz Oktavband hinunter gleich wirksam absorbiert wie darüber, was bei den angeklebten Deckenabsorbern in Variante 3 nicht der Fall ist, und auch durch die größere Fläche an Wandabsorbern nicht vollständig kompensiert werden kann.

d) Die Varianten 1 und 2 sind sehr ähnlich. Auch wenn man hier bei Variante zwei eine bessere Absorption tiefer Frequenzen erwarten könnte, da über der Akustikdecke insgesamt mehr Abstand zur eigentlichen Decke aus Mauerwerk besteht (den Raum über der neuen Brandschutz-Zwischendecke mit einbezogen), konnte dies durch die Messungen nicht bestätigt werden.

Anmerkungen zu Variante 3: Obwohl hier in den verschiedenen Räumen durchaus unterschiedliche Ausgangssituationen bezüglich der Nachhallzeit bestanden, sind die Nachhallzeiten für die Räume nach der Sanierung im besetzten Zustand, qualitativ wie quantitativ, sehr ähnlich. Das ist dadurch erklärbar, dass die Nachhallzeit vor allem von der im Raum vorherrschenden äquivalenten Absorptionsfläche abhängig ist. Die ist jedoch, besonders relativ zum Raumvolumen gesehen, für alle Räume nahezu gleich, da alle nach dem selben Konzept saniert wurden und die eingebrachten Absorber den Hauptanteil der im Raum vorhandenen äquivalenten Absorptionsfläche ausmachen.
Kleine Unterschiede zwischen den einzelnen Räumen bestehen dennoch: Bei den Räumen 202, 203 und 210 hat die Sanierung besonders gut funktioniert, hier sind die Nachhallzeitwerte über 1 kHz sogar etwas unter den Sollwerten. Im Raum 206 hat die Sanierung am schlechtesten funktioniert hier wurden auch in diesem Frequenzbereich die Sollwerte knapp nicht erreicht. Da es sich hierbei um den Raum mit dem größten Volumen handelt, ist dies auch plausibel und der Sanierungserfolg dennoch beachtlich.

8.1.2 Conclusio

In allen betrachteten Klassenräumen bestand akustisch akuter Handlungsbedarf. Wie anhand des Datenblattes von Raum 012 (Abschnitt A.1) zu sehen ist, wurde hierbei mit Sanierungsvariante 1 ein gut funktionierendes Konzept gefunden. Dieses stand im zweiten Obergeschoß allerdings nicht zu Verfügung (siehe Abschnitt 1.2), hier musste zwischen den Varianten 2 und 3 gewählt werden. Die Sanierungsvariante 2 hat, wie an Nachhallzeit und Gütemaßen (STI, Alcons) zu sehen, leichte Vorteile akustischer Natur (siehe Abschnitt A.9). Dies macht Variante 3 jedoch durch geringere Kosten und baulichen Aufwand wett und erzielt trotzdem ein ähnliches Ergebnis, womit sie eine gute Wahl als Sanierungskonzept für den Großteil des zweiten Obergeschoßes darstellt. In allen Klassenräumen konnte die Situation hinsichtlich Sprachverständlichkeit und Lärmbelastung wesentlich verbessert werden, was auch schon beim subjektiven Eindruck der Raumakustik bei den Messungen deutlich wurde.

Anmerkung: bei den Messungen in den Klassenräumen fiel auf, dass diese recht karg eingerichtet waren. Gute Vorhänge, einige Pflanzen oder ein Sofa im rückwärtigen Bereich des Raumes, könnten hier zusätzlich positiv zu einer guten Klassenraumakustik beitragen.

8.2 Zum Schallabsorptionsgrad

In der Praxis wurden bei raumakustischen Sanierungen des öfteren Diskrepanzen zu den nach Norm im Hallraum gemessenen Absorptionsgraden von Absorbermaterial festgestellt. Im Rahmen dieser Bachelorseminararbeit sollte untersucht werden ob Ähnliches auch bei den am BRG Kepler durchgeführten Messungen zu beobachten ist. Dazu wurde eine Sanierungssimulation über die laut [ÖNORM 354, 2003] gemessenen Absorptionsgrade mit den Messungen nach der Sanierung bezüglich der Nachhallzeit verglichen. Wie in Abbildung 7.1 zu sehen ist, konnten dabei im Fall der Ecophon Deckenabsorber in allen Räumen Abweichungen festgestellt werden. Die Abweichungen sind jedoch nicht in jedem Raum ident. Dadurch können die Absorptionsgrade nicht auf allgemein gültige Werte korrigiert werden. Die tatsächliche Wirkung der Absorber bei den durchgeführten Klassenraumsanierungen kann nicht allgemein gültig akkurat beschrieben werden. Zieht man in Betracht, dass auch bei Messungen in verschiedenen Hallräumen für eine Materialprobe unterschiedliche Absorptionsgrade gemessen werden, ist dies plausibel. Ein weiterer Punkt der die offensichtlich unterschiedliche Wirkung der Absorber in verschiedenen Räumen erklären könnte, ist, dass in diesen Räumen, nicht wie bei der Messung nach [ÖNORM 354, 2003], ein kontrolliertes Diffuses Schallfeld erzeugt wurde. Wenn das auf die Absorber einwirkende Schallfeld also richtungsabhängig ist, und von der Raumeinrichtung und dem Mobiliar beeinflusst wird, ist dieses natürlich nicht mehr in allen Räumen gleich, obwohl immer das selbe Anregungssignal für die Messungen verwendet wurde. Damit sind keine identen Grundvoraussetzungen in den Räumen gegeben um die Wirkung der Absorber zu vergleichen.

Anmerkung zu der Berechnungsvariante 2 für die Schallabsorptionsgrade über Teilflächen: Die Genauigkeit dieser Berechnungen ist fraglich, da zwar wie in Abschnitt 7.4.2 beschrieben die Berechnungen mit der Nachhallzeitmessung vor der Sanierung kalibriert werden, die Anpassung der Absorptionsgrade der einzelnen Teilflächen, bei der Kalibration jedoch willkürlich erfolgt, im Hinblick darauf bei welcher Teilfläche man korrigiert. Dass die Intention dieser Berechnungen, die Schallabsorption der vom Absorber verdeckte Fläche genau zu berücksichtigen erfüllt wird, kann nicht vollständig gewährleistet werden.

Teil II

Akustische Sanierung des Musiksaals

9 Aufgabenstellung

Dieser Teil der Bachelorseminararbeit soll sich mit der Sanierung des Musiklehrsaales, Raum 208 am Bundesrealgymnasium Kepler befassen. Dieser soll in naher Zukunft normgerecht[1] sowie praxisgerecht saniert werden.

Das Ergebnis dieser Arbeit soll sein, den Ist-Zustand durch eine detaillierte Messung genau zu dokumentieren, die Ergebnisse zu evaluieren und durch Simulation, mögliche Szenarien für eine Sanierung zu entwerfen.

Der Musiklehrsaal erfährt eine sehr vielseitige Nutzung; so ist dieser nicht nur Klassenzimmer für den üblichen Musikunterricht, sondern wird auch als Probenraum für die Keplerspatzen, den Chor der Schule verwendet. Der übliche Musikunterricht deckt dabei etwa 24 Wochenstunden ab, die Chorprobenzeit beläuft sich auf etwa zwölf Stunden pro Woche. Hinzu kommen die ausserordentlichen Proben vor Konzerten und Aufführungen.

9.1 Besondere Herausforderung

Aus dem Schulchor bilden sich verschiedene Gruppierungen unterschiedlichster Größe. Da anwesende Personen die Absorption stark beeinflussen, ergeben sich dadurch auch sehr unterschiedliche Anforderungen an den Raum.

Besonders die volle Ensemblegröße des Chores mit über 100 Schülerinnen und Schülern bedeutet eine aussergewöhnliche Herausforderung für alle Beteiligten und führt nach Aussage des leitenden Musiklehrers auch zu einer starken Belastung durch die große Lautstärke.

Bei einer ersten Begehung während einer Unterrichtsstunde fiel bereits auf, dass auch für einen Lehrbetrieb keine idealen Bedingungen vorhanden sind. Der Lautstärkepegel war bereits bei kleiner Klassenstärke beträchtlich. Da im Raum zu wenig absorbierende Fläche vorhanden ist, ergeben sich lange Nachhallzeiten und die Schallenergie bleibt länger im Raum erhalten. Die dadurch entstehenden hohen Schalldruckpegel führen durch den Lombard-Effekt zu einem weiteren Anschwellen der Geräuschkulisse. Der Lombard-Effekt beschreibt dabei das unwillkürliche Erheben der Sprechstimme bei vorhandenen Umgebungsgeräuschen. Dieser Zusammenhang macht sich besonders in der Unterrichtssituation störend bemerkbar.

[1] [ÖNORM 8115-3, 2005]

9.2 Normative Anforderungen

Für Klassenzimmer und Musikübungssäle schreibt die [ÖNORM 8115-3, 2005] genaue Rahmenbedingungen für die zu erreichende Nachhallzeit vor. Aus dem Raumvolumen und den gewünschten Verwendungszwecken ergeben sich folgende ideale Nachhallzeiten, die jeweils mit einem Toleranzschlauch umgeben sind:

Nachhallzeit für Musikproberäume: $T_{soll} = 0,47 \cdot \lg(V) - 0,37$ (9.1)

Nachhallzeit für Kommunikation: $T_{soll} = 0,32 \cdot \lg(V) - 0,17$ (9.2)

T_{soll} ..... Soll-Nachhallzeit
V ..... Raumvolumen

Volumen	Verwendungszweck	Nachhallzeit
458 m^3	Musikproberaum	0,88 s
	Klassenraum	0,68 s

Tabelle 9.1: Ideale Nachhallzeit nach [ÖNORM 8115-3, 2005]

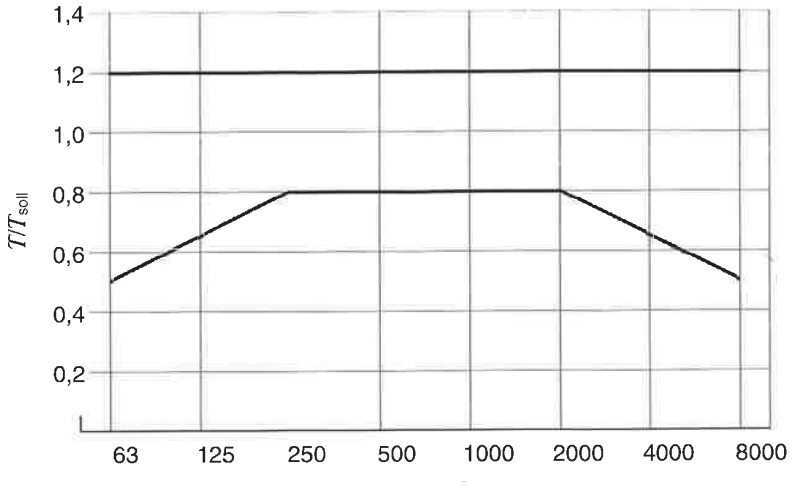


Abbildung 9.1: Toleranzbereich der optimalen Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Frequenz, für Sprache, Kommunikation und Musikproberäume, nach [ÖNORM 8115-3, 2005, Seite 6]

9.3 Raumbeschreibung

Der Lehrsaal 208 ist ein Altbau mit einer Deckenhöhe von 4, 08 m. Mit einer Längen 15, 93 m und einer Breite von 7, 11 m ergibt sich ein Raumvolumen von 456 m^3, das im Vergleich mit anderen Klassenzimmern sehr groß.

Der Raum 208 ist mit einem Parkettboden, fünf Kastenfenstern, drei Schränken und einem fünfstufigen Sängerpodest ausgestattet. Die Rückwand ist als Schrank ausgeführt, alle anderen Wände bestehen aus verputztem Mauerwerk. Im Raum befinden sich 15 Schulbänke, ein Lehrerpult, zwei Stellwände und ausserdem zwei Klaviere und einige Pflanzen.

(a) aus Tafelrichtung

(b) aus Podestrichtung

(c) aus Podestrichtung

(d) aus Tafelrichtung

10 Lärmbelastung für Lehrer und Schüler

Schon bei einer ersten Bestandsaufnahme wurde die starke Belastung durch die hohe Lautstärke durch die betreuende Lehrkraft der Keplerspatzen zur Sprache gebracht. Um diese Lautstärkebelastung tatsächlich abbilden zu können wurde eine Schalldruckpegelmessung durchgeführt und im folgenden Kapitel ausgewertet.

10.1 Schalldruckpegelmessung

Um die tatsächliche Lautstärkebelastung während eine Chorprobe abbilden zu können, wurde eine In-situ-Messung im Chorbetrieb mit 75 Personen vorgenommen. Diese Ensemblegröße stellt einen Mittelwert der anzunehmenden Probensituationen dar.

Für die Schalldruckpegelmessung fand ein Schalldruckpegelmesser NTI XL2 [12] Verwendung. Mit diesem wurden der A-bewertete energieäquivalente Schalldruckpegel $L_{A,eq}$ und, falls möglich, die Maximalwerte des A-bewerteten Schalldruckpegels $L_{A,max}$ erfasst. Mittels dieser Werte konnte abgeschätzt werden, ob die gemessenen $L_{A,eq}$-Werte, durch große Dynamiksprünge verfälscht sein könnten. Es wurden acht Messungen bei leisen Passagen und 13 Messungen bei lauten bis sehr lauten Passagen vorgenommen. Die Messungen wurden dazu, über den gesamten Chorbereich, das Podest und die Raummitte verteilt auf Ohrhöhe der Beteiligten vorgenommen.

10.1.1 Der energieäquivalente Dauerschallpegel $\mathbf{L_{A,eq}}$

Der $L_{A,eq}$ ist der A-bewertete, energieäquivalente Dauerschallpegel, der zur Abschätzung der Belastung durch Lärm verwendet wird. Er ist der Mittelwert des über einen längeren Zeitraum aufgezeichneten Schalldruckpegels [Weselak, 2013, S.11]. Aus diesem Wert wird durch eine Extrapolation auf die Einwirkungszeit, eine Lärmdosis berechnet. In diesem Fall soll die Verwendung des $L_{A,eq}$ vorrangig dazu dienen, eine Kurzzeitmittelung und eine Auswertung an verschiedenen Punkten zu ermöglichen. Das Messfenster wurde dazu auf fünf Sekunden festgelegt. Dieser Zeitraum schien geeignet, um musikalische Einheiten abzuschätzen und eine hinreichend stabile Anzeige zu ermöglichen.

[12] Details siehe Tabelle C.1

10.1.2 Gemessene Schalldruckpegel

Messung	Forte - Fortissimo		Piano - Pianissimo	
	$L_{A,eq}$ in dB	$L_{A,max}$ in dB	$L_{A,eq}$ in dB	$L_{A,max}$ in dB
1	88,0	93,5	84,0	88,4
2	91,4	95,7	86,6	91,6
3	81,0	-	79,0	82,8
4	91,6	96,4	82,0	87,1
5	91,3	99,1	80,8	87,8
6	100,1	105,2	84,9	90,2
7	87,2	92,1	71,1	74,3
8	92,3	95,9	71,1	74,7
9	95,5	100,5	Letzte 2 Werte: gesummt	
10	96,7	104,2		
11	100,2	105,8		
12	104,2	107,8		
13	105,9	106,1		
Letzte 3 Werte: in Vortragslautstärke				

Tabelle 10.1: Gemessene Schalldruckpegel in dB bei verschiedenen Vortragslautstärken

10.2 Auswertung der Messung

Um die Bedeutung der gemessenen Pegel aus Tabelle 10.1 zu erfassen, werden diese zuerst gemittelt. Eine Pegelmittelung muss in absoluten Werten geschehen und kann nicht in Dezibel erfolgen. Sie entspricht dem Zusammenhang [vgl. Kohlrausch, 1996]:

$$L_{SPL} = 10 \cdot \lg\left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{1}^{n} 10^{\frac{L_n}{10}}\right) \tag{10.1}$$

Eine Mittelung über alle gemessenen Werte ergibt dabei keinen Sinn, da diese eine Wertung mit einschließen würde (13 Anteile Forte/Fortissimo und 8 Anteile Piano/Pianissimo). Diese ist nicht plausibel , daher soll eine getrennte Mittelung erfolgen und die Lärmdosis daraus abgeschätzt werden.

Mittelung der Forte-Messungen: $L_{SPL,f} = 98,9dB$
Mittelung der Piano-Messungen: $L_{SPL,p} = 82,4dB$
Mittelung der beiden Phasen: $L_{SPL,p} = 92,4dB$

Die Mittelung dieser beiden Phasen stellt mit Sicherheit eine starke Vereinfachung dar, soll aber exemplarisch für eine Lärmdosisbestimmung verwendet werden.

Laut [Dickreiter, 1997, Band 1, S.140] ergibt ein Durchschnittspegel von $85\,dB_A$ die Höchstlärmdosis $L_{EX,8h}$ bei acht Stunden. Diese Dosis hat ihren Ursprung in der Lärmbegutachtung und ist daher für Maschinenlärm und als absolute Höchstgrenze zu verstehen. Für Arbeitsumgebungen in denen konzentrierte geistige Arbeit erforderlich ist, sind weit geringere Höchstdosen üblich. Eine weitere Erhöhung des Pegels um 3 dB verkleinert die maximale Einwirkzeit um einen Faktor zwei. Führt man diesen Gedanken mit den eben berechneten 92, 4 dB weiter, ergibt sich analog zur Pegelberechnung:

Zeit bis 100% Lärmdosis erreicht: $t_{max} = 8h \cdot 10^{\frac{-\Delta_L}{10}}$, (10.2)

$$t_{max} = 8h \cdot 10^{\frac{-7,4}{10}} = 1,456h \mathrel{\widehat{=}} 1h, 27min \tag{10.3}$$

Dieses Ergebnis zeigt, dass die Beteiligten bereits nach einer Stunde und 27 Minuten die höchstzulässige tägliche Lärmdosis erreichen. Die tatsächliche Lärmdosis für eine angenommene Probendauer t_p von drei Stunden berechnet sich wie folgt:

$$L_{EX,8h} = \frac{t_p}{8} \cdot 10^{\frac{\Delta_L}{10}} \cdot 100\% \tag{10.4}$$

$$L_{EX,8h} = \frac{3}{8} \cdot 10^{\frac{7,5}{10}} \cdot 100\% = 211\% \tag{10.5}$$

$L_{EX,8h}$ ..... Lärmdosis
Δ_L ..... Überschreitung des Grenzwertes von 85 dB

Eine Lärmdosis von über 211 % der täglichen Höchstdosis ist als stark verbesserungswürdig einzustufen und eine Veränderung der Probensituation damit unabdingbar.

11 Messung der Raumimpulsantworten

Um den gesamten Raum charakterisieren zu können, waren detaillierte Raumimpulsantwortmessungen durchzuführen. Diese sollen präzisen Aufschluss über die Nachhallzeit und andere raumakustische Gütemaße bringen. Nach [ÖNORM 3382-2, 2009, S.8] sind für eine Präzisionsmessung mehr als zwölf Mikrofon-Sender-Kombinationen, mindestens zwei Quellen- und drei Mikrofon-Positionen nötig. Bei einer Art von Messung ist von einer Nenngenauigkeit, besser als 2,5% in Oktavbändern auszugehen. Für die Messung im besetzten Zustand mit anwesendem Chor wird, um die Messzeit gering zu halten, auf eine weniger genaue Standardmessung zurückgegriffen. Dafür sind sechs Mikrofonpositionen und zwei Quellpositionen ausreichend. Eine Standardmessung erreicht in Oktavbändern immer noch eine Nenngenauigkeit besser als 5%.

11.1 Verteilung der Messpunkte

Die 24 Punkte, die im Raum 208 verwendet werden, entstehen nach folgendem Muster: Jeweils zwölf Punkte befinden sich im Klassenzimmerbereich und im Chorbereich des Raumes. Davon wiederum sechs Stück ergeben ein Messsystem, dessen Mikrofone nach [ÖNORM 3382-1, 2009] nicht näher als einen Meter an einer Wand und nicht näher als zwei Meter voneinander entfernt stehen sollen. Daraus ergeben sich die Messpunkte in Abbildung 11.1. Die genauen Orte und Abmessungen dieser befinden sich in Tabelle D.3 im Anhang.

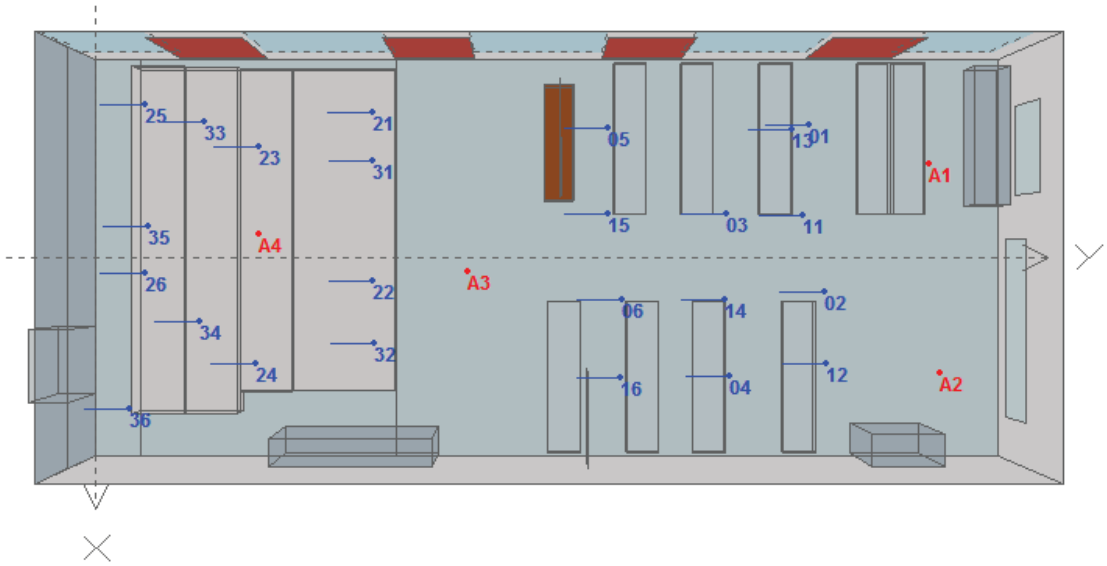


Abbildung 11.1: Skizze der Messpunkte, ohne Maßstab

11.2 Messvorgang

Nach einer Pegelkalibration der gesamten Aufnahmekette (94 dB SPL @ 1 kHz), wird das Mikrofon auf einem Stativ in 1,2 Metern beziehungsweise 1,5 Metern Höhe angebracht und an den entsprechenden Messpunkten aufgestellt. Bei der Messung im besetzten Zustand, wird auf die größere Mikrofonhöhe zurückgegriffen, um dem stehenden Chor gerecht zu werden. Über den Dodekaederlautsprecher, auf einer Höhe von 1,5 Metern an den entsprechenden Quellpositionen, kann dann mittels eines Gleitsinussignals von 20 Hz bis 20 kHz die Raumimpulsantwort ermittelt werden. Das Signal hat dabei eine Länge von 256 Kilosamples, das entspricht bei einer Samplingrate von 48 kHz, einer Dauer von 5, 46 Sekunden. Die Mittelung über drei Sweep-Durchgänge wird vom verwendeten Messprogramm ARTA[13] automatisch durchgeführt. Darauffolgend kann die Nachhallzeit nach [ÖNORM 3382-1, 2009; ÖNORM 3382-2, 2009] durch ARTA[13] ausgewertet werden.

11.3 Nachhallzeit

Durch Mittelung über alle Mikrofon-/Quellpositionen der Nachhallzeitenmessungen aus 11.2 durch das Klassenraumakustiksimulations- und Auswertungs-Tool [IntKlaSim, 2015] [14] ergibt sich nachfolgende Abbildung 11.2.

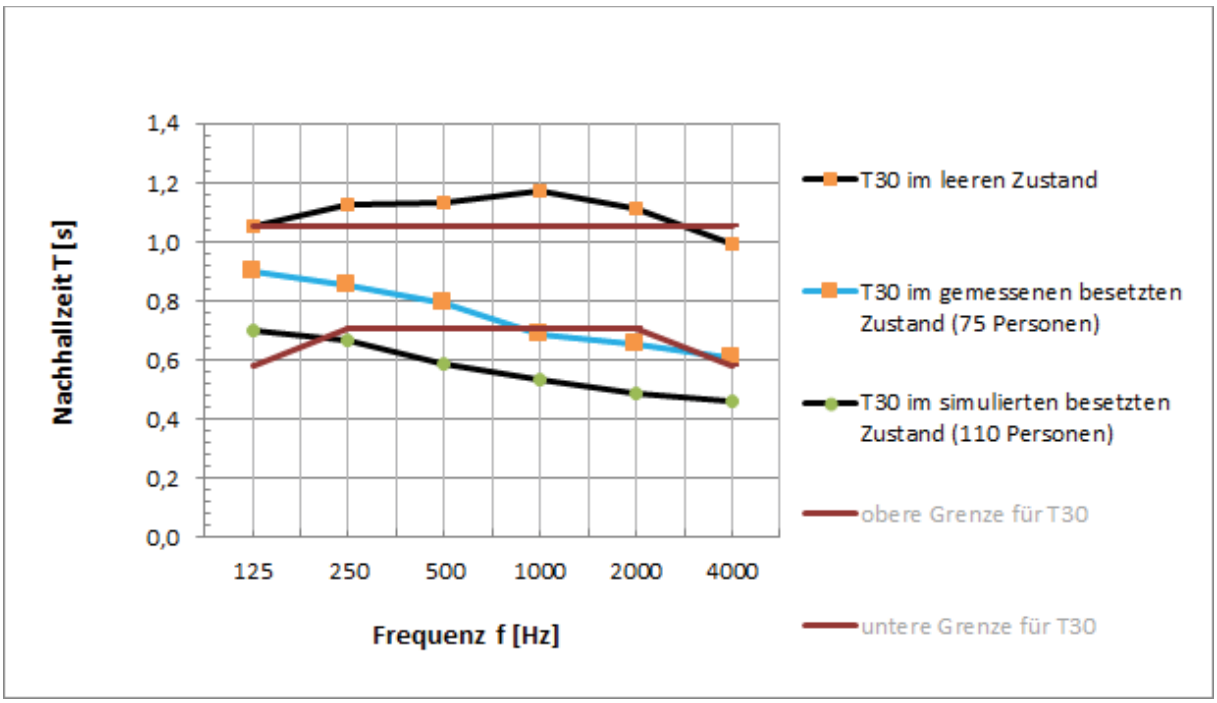


Abbildung 11.2: Nachhallzeit T30 in besetztem und unbesetztem Zustand und eine Simulation von 110 Personen

In Abbildung 11.2 ist zusätzlich eine IntKlaSim [2015]-Simulation der Auswirkung von 110 Personen im Raum zu sehen. Das Toleranzband besteht aus der normgerechten Ober- und Untergrenze der Nachhallzeiten für Musikübungssäle. Auffallend ist, dass bereits bei 75 anwesenden Personen im Raum die Nachhallzeit in den oberen Frequenzbändern zu klein für eine musikalische Probe ist. Bei 110 anwesenden Personen ist das breitbandig der Fall.

[13] URL siehe [Mateljan, 2014]
[14] näher beschrieben in Abschnitt 4.3

12 CATT-Acoustics Modell

Um die erreichbare Verbesserung und die Möglichkeiten einer Sanierung abzuschätzen, wurde ein CATT-Acoustics Modell angefertigt und mittels der Messungen kalibriert.

12.1 Entstehung des Modells

Zuerst wurde ein Grundmodell des Raumes entworfen und mit den entsprechenden Flächen ausgestattet. Danach konnte das Modell mit detaillierter Einrichtung verbessert werden. Durch iteratives Anpassen der verwendeten Materialien und der entsprechenden Absorptionskoeffizienten ergab sich ein an möglichst vielen Quell-/Mikrofonkombinationen passendes Modell. Die Abweichungen in der Nachhallzeit konnten mit Ausnahme des tiefsten Oktavbandes bei $\leq 0,1\,\mathrm{s}$ gehalten werden. Durch den Einsatz von Variablen ist eine einfache Anpassbarkeit des Modells gewährleistet.

12.2 Verwendete Materialien

Die Absorptionskoeffizienten für die Simulation wurden aus [Nocke, 2014], der Absorberdatenbank [PTB, 2003] und einer Sammlung von Absorbtionskoeffizienten aus dem Raumakustiklabor [Graf, 2014] entnommen. Diese entstammen mehrheitlich [Bobran, 1967, S. 91ff.]. Eine Übersicht über die verwendeten Materialien und ihre Absorptionsgrade befindet sich in der folgenden Tabelle 12.1. Die jeweilige Herkunft ist durch Fußnoten erklärt.

Der Absorptionskoeffizient für Sänger (Tabelle 12.1, Zeile 13) ergab sich aus den tatsächlichen Messungen im Raum in guter Übereinstimmung mit [Nocke, 2014] (Tabelle 12.1, Zeile 12). Aus den Nachhallzeiten im besetzten und unbesetzten Zustand wurde jeweils die äquivalente Schallabsorptionsfläche mittels Sabine'scher Nachhhallzeitformel (12.1) berechnet. Aus der Differenz und der Anzahl der Personen konnte auf die äquivalente Absorptionsfläche einer Person zurückgerechnet werden (Vorgehen: vgl. Abschnitt 7.4).

$$\alpha = 0,161 \cdot \frac{V}{T_\Delta \cdot S_{dazu}} \tag{12.1}$$

wobei:

α ..... Schallabsorptionsgrad
S_{dazu} ..... Oberfläche die durch Personen hinzukommt
T_Δ ..... Änderung der Nachhallzeit
V ..... Raumvolumen, konstant angenommen

	Material	125	250	500	1k	2k	4k	Herkunft / Details
1	Mauerwerk	2	2	3	4	5	2	Mauerwerk aus [2], S.1
2	Parkett	20	15	10	10	6	10	Holz auf Blindfußboden aus [1], S.218
3	Rigips	5	2	6	4	10	11	Decke aus [1], S.238, 662mm abgeh.
4	Kasten	31	34	26	26	22	21	Kasten aus [1], S.81
5	Fenster	28	20	10	6	3	2	Kastenfenster geschlossen [1] S.248 T8.6
6	Podest1	4	4	5	6	6	6	aus [2] Spanplatte furniert
7	Vorhang	8	43	87	95	95	95	Akustikvorhang [1], S.250
8	Tuer	10	8	6	5	5	5	Tür aus Buch [1], S.218
9	Whiteboard	15	13	6	5	4	4	Stahlblechkassetten unperforiert aus [2], S.8
10	Pflanzen	5	15	30	55	50	50	geschätzt aus [6]
11	Blumenkasten	5	5	5	10	10	10	geschätzt aus [6]
12	Saengerbuch	15	25	40	50	60	60	aus [1] S.256, 0,5m2 pro Person
13	Saenger	16	28	37	60	62	63	1m2 pro Pers., siehe unten
14	Holzplatte1	18	12	10	9	8	7	aus [2] S. 16mm, 10 kg/m^2, 5cm WA[4]
15	Schulbankbes	15	20	35	40	40	40	2,5m2 pro Person [1], S.256
16	Lochplatte37	75	96	68	79	72	62	Gipskarton[1], S.239, 15%LA[4], 37cmWA[5]
17	Holzwolle50105	45	88	99	99	94	86	WA[5] 105mm , aus [1]S.233
18	Gipskartabs450	85	81	74	76	59	53	aus [2], S.4 WA[5] 450mm, 12,6%LA[4]

Tabelle 12.1: Verwendete Materialien mit ihren Absorptionskoeffizienten

12.3 Quellen und Empfänger

Die Quellen und Empfänger werden in CATT-Acoustic in eigenständigen Source-Files (SRC) und Reciever-Files (REC) definiert.

12.3.1 Quellen

Als Quellen wurden vier kugelförmig abstrahlende Quellen mit weißem Rauschen und einem Schalldruckpegel von 94 dB bei 1000 Hz in einem Meter Abstand verwendet. Das entspricht Quellen, die pro Oktavband (so wie später auch mehrheitlich ausgewertet wird) 94 dB SPL erzeugen. Daraus ergeben sich, da in CATT-Acoustic die sechs Oktavbänder pegelmäßig aufaddiert werden, für das gesamte Spektrum ein Pegelzuwachs und ein Gesamtpegel von:

$$Pegelzuwachs: \quad L_\Delta = 20 \cdot \lg(6) = 15,56dB \tag{12.2}$$

$$Gesamtpegel: \quad L_{sum} = 94dB + L_\Delta = 94dB + 15,56dB = 109,56dB \tag{12.3}$$

Diese circa 110 dB in 1m sind auch in der graphischen Pegelauswertung (vgl. Abbildung 13.2) zu erkennen. Um möglichst kongruent mit den Messungen vorzugehen, finden die vier Quellpositionen aus diesen Verwendung. Für eine bestmögliche Vergleichbarkeit der Schalldruckpegel, werden in jedem Modell jeweils zwei Quellen aktiviert.

[1] [Nocke, 2014]
[2] [Graf, 2014]
[3] [PTB, 2003]
[4] Lochflächenanteil
[5] Wandabstand
[6] [Lauber, 1953]

12.3.2 Empfänger

Die Empfängerpositionen werden ebenfalls aus den Messungen übernommen. 24 Mikrofonpositionen aufgeteilt in vier Sextette werden über den gesamten Raum verteilt (vgl. Abschnitt 11.1). Deren Verteilung entsteht dadurch, dass in Richtung der Tafel blickend jeweils drei Positionen links der Mitte (ungerade Endziffern) und drei Positionen rechts der Mitte (gerade Endziffern) angeordnet werden. Zwei dieser Sextette befinden sich im Klassenzimmerbereich und zwei weitere im Bereich des Podestes. Zur besseren Unterscheidbarkeit beginnt jedes Sextett in einer neuen Dekade. Daraus folgt, dass die Nummerierungen eins bis sechs und elf bis 16 im Unterrichtsbereich Platz finden und die Mikrofonpositionen 21 bis 26 sowie 31 bis 36 auf dem Podest.

12.4 Verifikation des Modells

Um das Modell zu verifizieren, soll ein Vergleich der Nachhallzeiten herangezogen werden (siehe Abbildung 12.1). Es ist ersichtlich, dass in fünf von sechs Oktavbändern eine Übereinstimmung besser als $0,1\,\mathrm{s}$ erreicht werden konnte. Da die Kalibration des Modells anhand von einzelnen Messpunkten und deren Simulation vorgenommen wurde, konnte die Gesamtabweichung nicht abgeschätzt werden. In Abbildung 12.1 ist ersichtlich, dass eine Sanierung tendenziell gleiche oder niedrigere Nachhallzeitwerte liefert als die Simulation voraussagt. Vor allem im 125 Hz-Band wird die gemessene Nachhallzeit $0,1\,\mathrm{s}$ bis $0,2\,\mathrm{s}$ geringer sein, als die der Simulation.

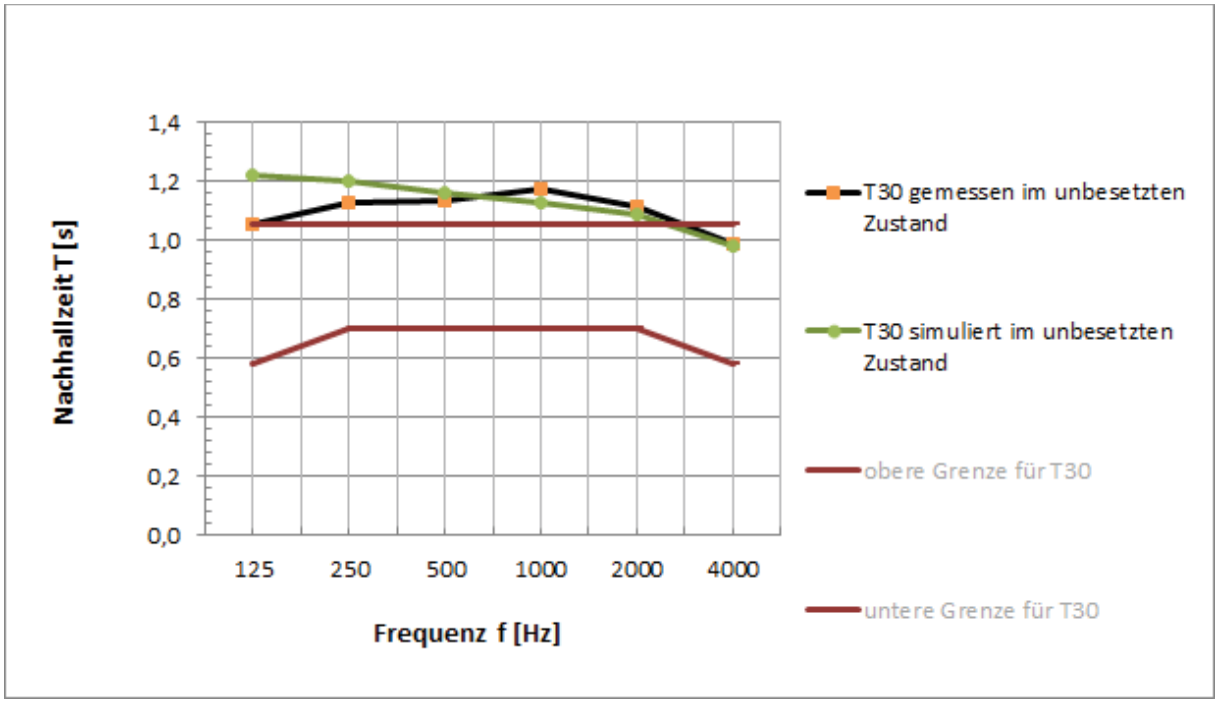


Abbildung 12.1: Vergleich der Simulation und der Messung, zur Kalibration

12.5 Raumakustische Datenblätter zu den Modellvarianten

Um die Simulationen untereinander vergleichbar zu halten, befinden sich im Anhang D raumakustische Kurzdatenblätter mit den wesentlichen Eckdaten, Skizzen, Nachhallzeiten, sowie dem Schalldruckpegel in Oktavbändern. Skizzen der Messgrößenverteilungen im Raum sind ebenfalls

dort zu finden. Nachfolgend sollen die unterschiedlichen Verwendungszwecke des Raumes und die zugehörigen Modellvarianten näher erklärt werden.

12.5.1 Leerer Raum

Im Betriebszustand *Leerer Raum* ist der Klassenraum im Grundzustand nachgebildet. Es befinden sich Schulbänke im vorderen Raumteil und deren verwendete Absorptionskoeffizienten entsprechen einer glatten Holzplatte. Es befinden sich keine Personen im Raum (siehe Anhang D, Abschnitt D.2).

12.5.2 Unterricht

Für die Simulation des Unterrichtsgeschehens konnte auf Absorptionswerte für besetzte Schulbänke zurückgegriffen werden. Diese wurden anstatt der einfachen Holzplatten verwendet, ansonsten sind diese Modelle gleich aufgebaut. Die Menge an eingebrachter Absorptionsfläche entspricht 25 Schülerinnen und Schülern. Bei dieser Simulation wurde zusätzlich der Sprachübertragungsindex STI ausgewertet. Das dazugehörige Datenblatt befindet sich in Anhang D, Abschnitt D.3.

12.5.3 Ensemblebetrieb

Statt Schülern an Schulbänken ist in diesem Modell eine Besetzung des Musiklehrsaales mit einem Gesangsensemble von circa 60 Personen umgesetzt. Diese finden auf dem hinten im Raum befindlichen Podest Platz und werden durch stehendes Auditorium verkörpert. Ein Quader auf jeder Stufe des Podestes modelliert den Chor. Die Oberfläche dieser Quader ist mit den Absorptionskoeffizienten *Saenger* (Tabelle 12.1, Zeile 14) belegt und die absorbierende Fläche beträgt etwa $68\,m^2$. Zu finden ist das Datenblatt für Ensemblebetrieb in Anhang D, Abschnitt D.4.

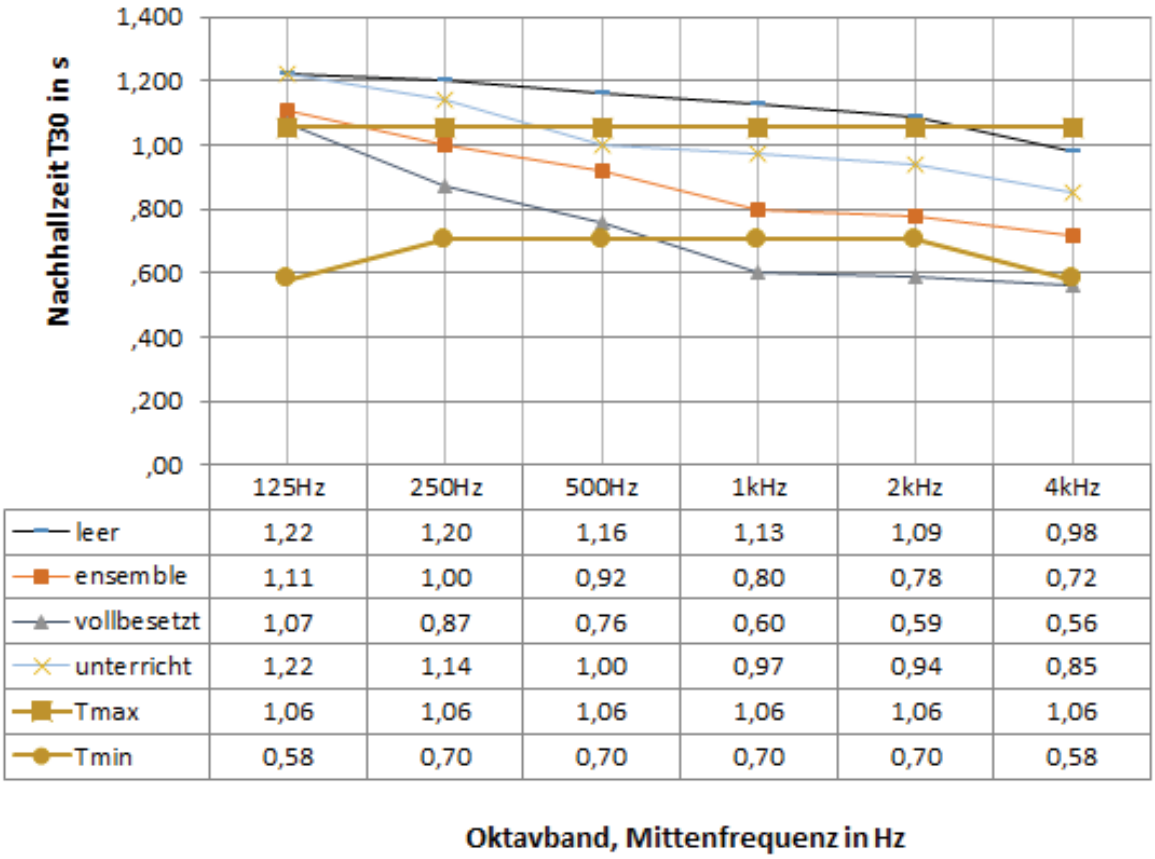
12.5.4 Vollbesetzter Raum

Der vollbesetzte Raum ist für alle Chorsimulationen der Grundzustand, da für diesen der größte Handlungsbedarf besteht (vgl. Kapitel 10). Dieser ist durch zusammengeschobene Schulbänke und einen zweiten Sängerblock in der Mitte des Raumes umgesetzt. Die Pflanzen und eine sonst in der Raummitte stehende Pinnwand werden wie im realen Probenbetrieb an die Aussenwände verschoben. Das entsprechende Datenblatt befindet sich in Anhang D, Abschnitt D.5.

12.6 Nachhhallzeitauswertung

Eine erste Untersuchung der Nachhallzeiten ergibt die Werte aus Abbildung 12.2. Diese wurden wie folgt ermittelt. CATT-Acoustic bietet die Möglichkeit raumakustische Gütemaße in Oktavbändern auszuwerten. Die räumliche Verteilung dieser kann separat ausgewertet werden. Aus der statistischen Auswertung dieser räumlichen Betrachtung sind die Werte der Nachhallzeiten entnommen. Es handelt sich um räumliche Mittelwerte in Oktavbändern.

Die Abbildung 12.2 zeigt die Nachhallzeiten, der unterschiedlichen Besetzungszustände und das Toleranzband um die Sollnachhallzeit für Musikprobensäle ($0,88\,s$). Bereits ohne Absorptionsmaterial zeigt sich im vollbesetzten Zustand eine zu niedrige Nachhallzeit zu höheren Frequenzen hin.



	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
leer	1,22	1,20	1,16	1,13	1,09	0,98
ensemble	1,11	1,00	0,92	0,80	0,78	0,72
vollbesetzt	1,07	0,87	0,76	0,60	0,59	0,56
unterricht	1,22	1,14	1,00	0,97	0,94	0,85
Tmax	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Tmin	0,58	0,70	0,70	0,70	0,70	0,58

Abbildung 12.2: Nachhallzeiten T_{30} bei unterschiedlicher Verwendung

12.7 Pegelauswertung

Die Pegelauswertung ist nur bedingt auf den Praxisfall übertragbar, da die Art der Quellen sehr unterschiedlich ist. Die Modellquellen sind Kugelquellen – die reale Quelle, der Chor, steht jedoch über den gesamten Raum verteilt.

Dennoch behält die Simulation ihre grundsätzliche Aussagekraft, denn die Schalldruckpegel werden, wie die Nachhallzeit, im räumlichen Mittel ausgewertet. Dadurch werden höhere Pegel, nah an den Quellen und niedrigere Pegel, weit weg von diesen gleichermaßen berücksichtigt. Des Weiteren kann eine Auswertung auch relativ zu den anderen Modellen geschehen und somit eine Schalldruckpegelminderung exakt ermittelt werden (vgl. Abschnitt 13.1.1).

13 Sanierungsutopie und Möglichkeitsbetrachtung

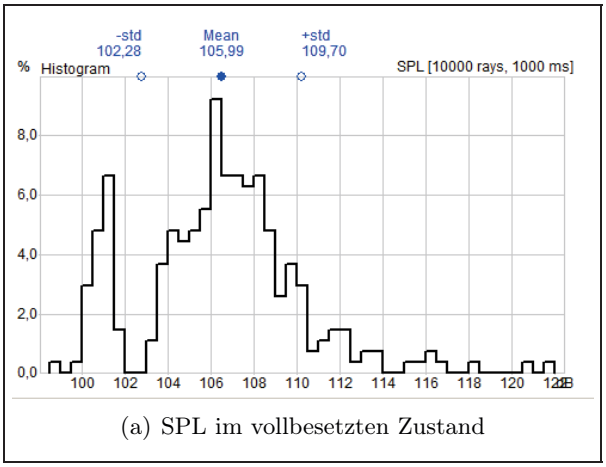
Um abschätzen zu können, welche Möglichkeiten eine Sanierung bietet, soll im Folgenden eine Sanierungsutopie entworfen werden – eine Sanierungsvariante, die nicht umsetzbar ist, die aber einem Optimum entspricht. Darauffolgend soll die Machbarkeit einer Annäherung an diese Utopie betrachtet werden. Die Ergebnisse dieser Simulationen befinden sich, als raumakustische Datenblätter, ebenfalls im Anhang D.

13.1 Utopisches Modell

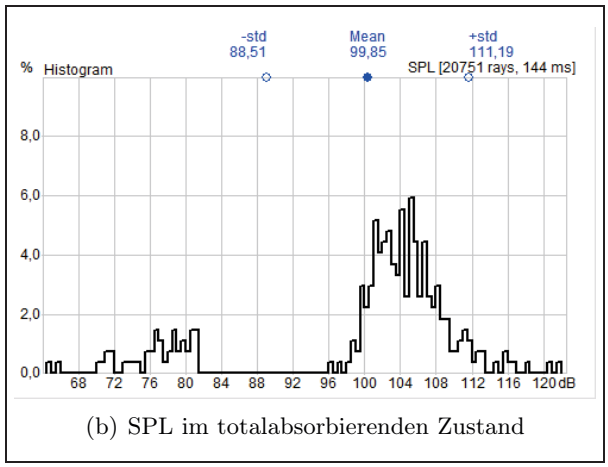
Um eine größtmögliche Schalldruckpegelreduktion zu erreichen, werden Decke und Wände totalabsorbierend ($\alpha = 1$) ausgeführt. Decke und Wände decken einen großen Teil der Raumoberfläche ab und sind zudem ohne Verlust der Nutzbarkeit des Raumes einfach veränderbar. Die übrigen Flächen und die Einrichtungsgegenstände verbleiben unverändert.

13.1.1 Schalldruckpegelreduktion

Das Ergebnis der Simulation (in Abbildung 13.1) zeigt die maximal mögliche Reduktion des Schalldruckpegels (SPL). Die Differenz der Mittelwerte (Mean in Abbildung 13.1) beträgt 6, 14 dB. Betrachtet man die Verteilung der Pegel genauer, zeigt sich eine starke Verschiebung des linken Peaks (bei 101 dB) um etwa 20 dB zu 80 dB. Die Ausbildung dieser zweiten Häufigkeitsspitze bedarf einer näheren Untersuchung.



(a) SPL im vollbesetzten Zustand

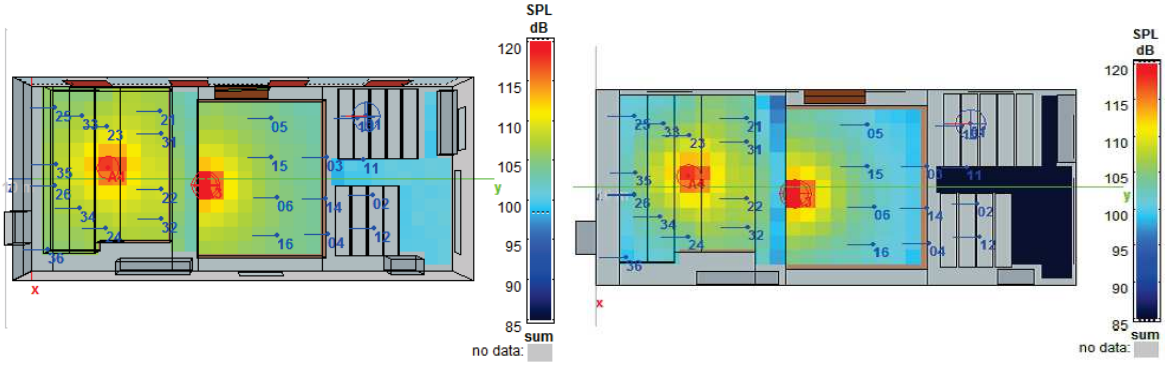


(b) SPL im totalabsorbierenden Zustand

Abbildung 13.1: Vergleich der Schalldruckpegel SPL in dB

13.1.2 Schalldruckpegelverteilung

Ein Plot der Schalldruckpegelverteilung (Abbildung 13.2) zeigt, woher die besonders niedrigen Schalldruckpegelwerte kommen. Im Türbereich (unten/rechts) und zwischen den Schulbänken(mitte/rechts), vergleichsweise weit weg von den Quellen, zeigt die starke Absorption ihre beste Wirkung. Für eine Probensituation ist eine Auswertung weit weg vom Chor jedoch nicht sinnvoll. Es folgt der Schluss, dass die durchschnittliche Pegelminderung der sinnvoll auswertbare Parameter ist.



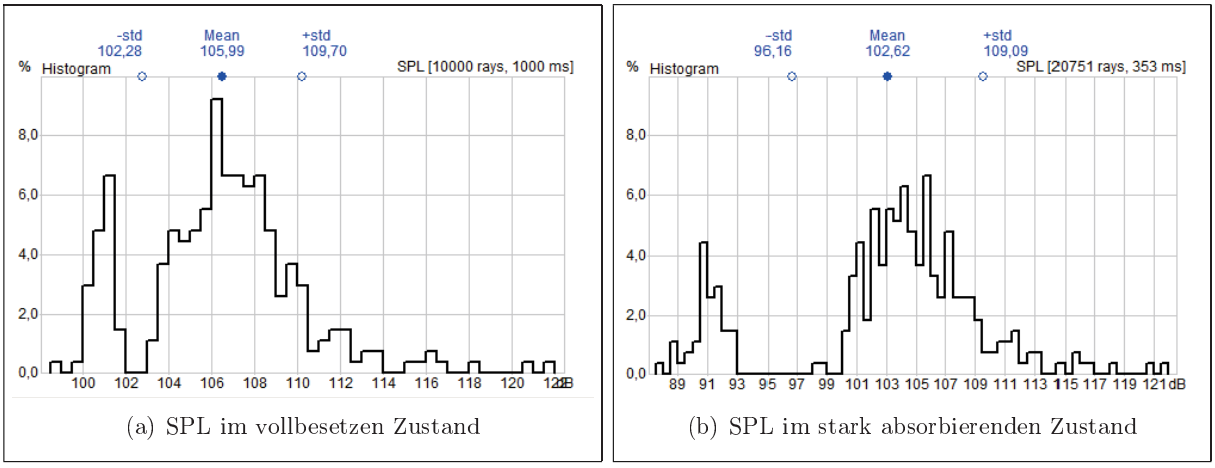
(a) SPL im vollbesetzen Zustand (b) SPL im vollabsorbierenden Zustand

Abbildung 13.2: Vergleich der räumlichen Schalldruckpegelverteilung

13.2 Möglichkeitsbetrachtung

Da in der Realität ein Absorptionsgrad (α) von 100% natürlich nur ein Wunsch bleiben kann, ist ein Entwurf eines umsetzbaren, stark absorbierenden Modells gefragt. Für dieses wird an den Wänden ein Holzwolleabsorber angebracht. Dieser ergibt besonders im mittleren Frequenzbereich nahezu Vollabsorption (vgl. Tabelle 12.1, Zeile 17).

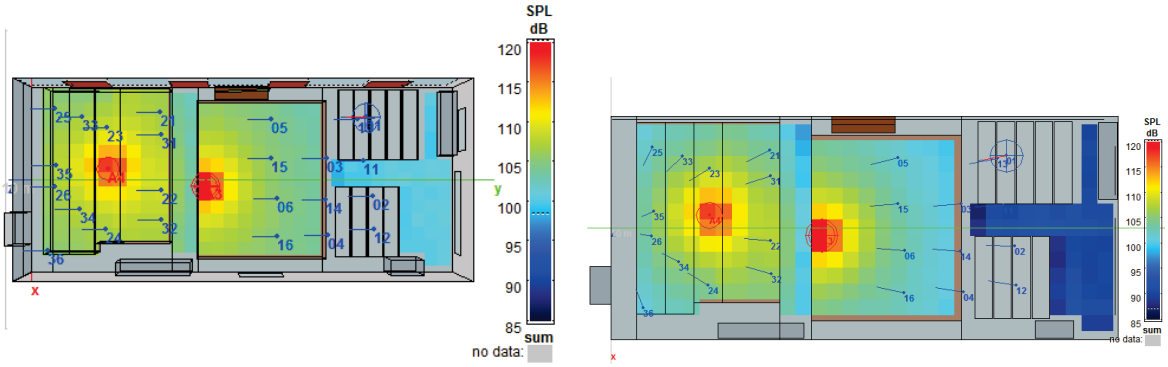
Für die Decke werden Gipskarton-Lochplatten, mit einem Lochanteil von 20% mit Mineralfaser hinterlegt und 37cm Wandabstand angenommen (vgl. Tabelle 12.1, Zeile 16). Dieser Absorber wirkt bereits im 250 Hz-Oktavband sehr stark und kann so zu einer gleichmäßigeren Absorption zu tiefen Frequenzen hin beitragen. In Anhang D, Abschnitt D.7 befindet sich der Steckbrief zum entsprechenden Ergebnis.



(a) SPL im vollbesetzen Zustand (b) SPL im stark absorbierenden Zustand

Abbildung 13.3: Vergleich der Schalldruckpegel SPL in dB

Der Vergleich der Mittelwerte legt nahe, dass zumindest eine Reduktion des Schalldruckpegels um $3,5\,\mathrm{dB}$ möglich ist. In großen Teilen des Raumes, erreicht der Schalldruckpegel jedoch weiterhin über $100\,\mathrm{dB}$. Bei näherer Betrachtung der Minima ist wiederum ersichtlich, dass an manchen Stellen im Raum eine Schalldruckpegelreduktion um $10\,\mathrm{dB}$ möglich ist. Betrachtet man jedoch die örtliche Auswertung des Schalldruckpegels, zeigt sich abermals, dass diese Reduktion wiederum nur im Türbereich möglich ist und nicht in der Nähe des Chores. Ob dadurch eine musikalische Probe bei geringerer Belastung möglich ist, soll im Weiteren untersucht werden.



(a) SPL im vollbesetzen Zustand

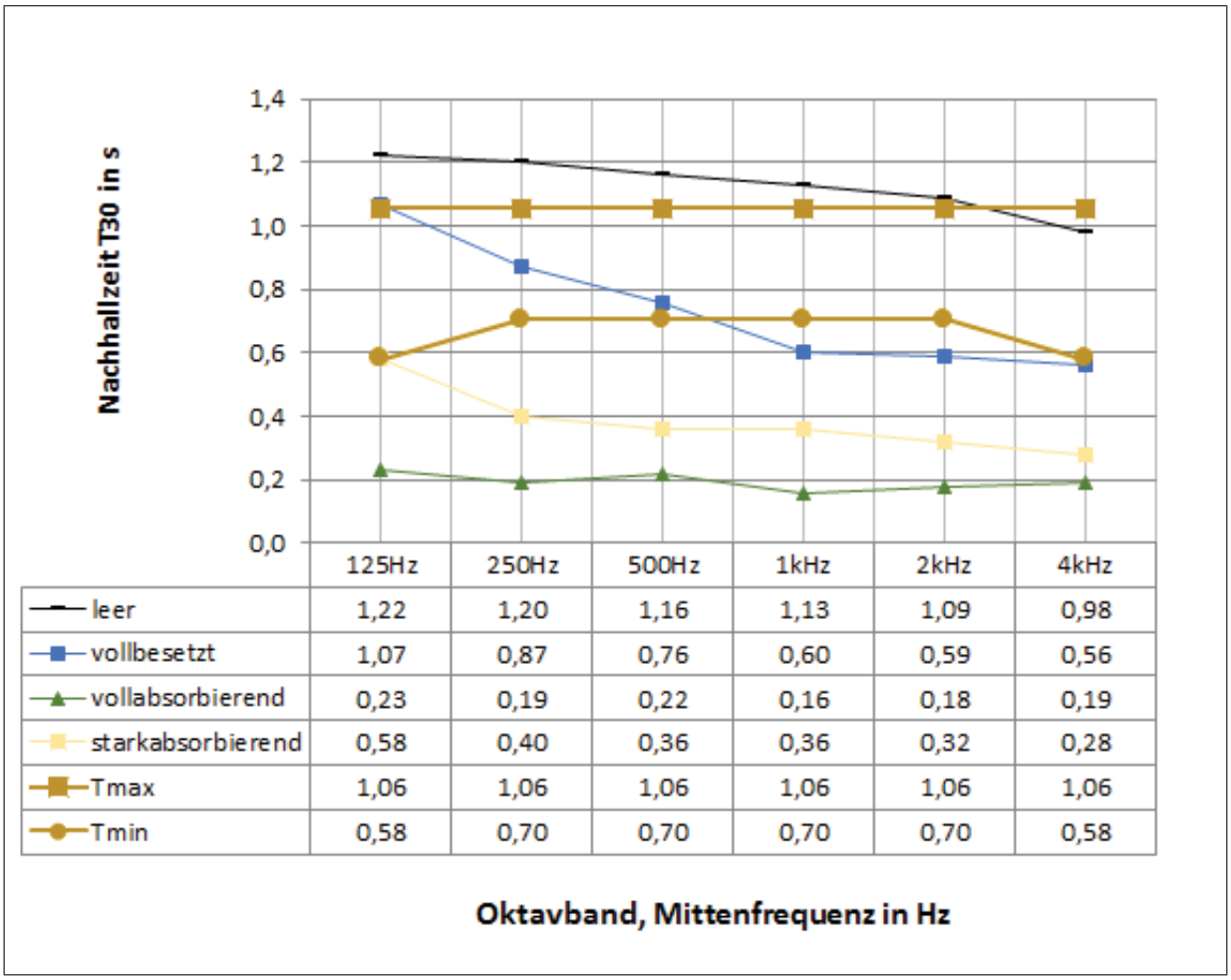
(b) SPL im stark absorbierenden Zustand

Abbildung 13.4: Vergleich der räumlichen Schalldruckpegelverteilung

13.3 Nachhallzeit

Eine Untersuchung der Nachhallzeit gibt Aufschluss über die Eignung für eine Gesangsprobe.

Die Simulation bestätigt, dass die Nachhallzeiten für eine Chorprobe zu niedrig sind (siehe Abbildung 13.5). Die Werte der Nachhallzeit T_{30} liegen zwischen $0,2\,\mathrm{s}$ und $0,4\,\mathrm{s}$ und sind damit etwa halb so hoch, wie deren Minimalwert laut [ÖNORM 8115-3, 2005]. Das Resultat ist eine sehr stimmaufwändige Probe und ein übermäßig trockener Klang.



	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
leer	1,22	1,20	1,16	1,13	1,09	0,98
vollbesetzt	1,07	0,87	0,76	0,60	0,59	0,56
vollabsorbierend	0,23	0,19	0,22	0,16	0,18	0,19
starkabsorbierend	0,58	0,40	0,36	0,36	0,32	0,28
Tmax	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Tmin	0,58	0,70	0,70	0,70	0,70	0,58

Abbildung 13.5: Betrachtung der T30, einschließlich Toleranzband

14 Sanierungsvarianten

14.1 Modelle

Im folgenden Abschnitt werden einige tatsächlich mögliche Sanierungskonzepte untersucht. Diese beziehen sich auf den vollbesetzten Zustand und im Abschnitt 14.1.5 auf den Klassenzimmerzustand. Es handelt sich dabei jeweils um den besetzten Zustand für den jeweiligen Verwendungszweck.

14.1.1 Vorhang

Um mit geringen Investitionen raumakustische Veränderungen zu erreichen, eignen sich Vorhänge. Diese stellen ausserdem ein sehr variables Konzept dar. Die bereits montierten Vorhänge, sind ähnlich den aus [Nocke, 2014, Seite 149] entnommenen (schwerer Velours/Leinen-Baumwolle-Gemisch, glatt). Eine genauere Untersuchung des verwendeten Stoffs oder die Verwendung eines geeigneten Akustikvorhanges könnten eine schnelle Veränderung bewirken. Eine Simulation zur Auswirkung geschlossener Vorhänge befindet sich in Anhang D, Abschnitt D.8.

14.1.2 Deckenabsorber

Die Decke ist ein geeigneter Platz für die wirkungsvolle Absorption von Schall. Sie bietet den Vorteil, überall im Raum gleichmäßig zu wirken. Zugleich verkleinert eine abgehängte Decke die Nutzfläche des Raumes nicht. Bei Räumen, in denen eine besonders gute Sprachverständlichkeit benötigt wird (z.B. Klassenzimmer), ist jedoch darauf zu achten, dass frühe Deckenreflexionen erheblich zur besseren Verständlichkeit beitragen können. In diesem Fall wären wichtige Reflexionsflächen von Absorbern freizuhalten [vgl. ÖNORM 8115-3, 2005, Seite 10]. Um den Schalldruckpegel möglichst stark zu reduzieren, verwendet diese Variante einen Lochplattenabsorber mit 45 cm Wandabstand. Diese Absorberkonfiguration funktioniert bereits in sehr tiefen Frequenzbändern. (siehe Anhang D, Abschnitt D.9)

14.1.3 Klappabsorber

Um den Gedanken guter Variabilität aufrecht zu erhalten, bietet sich ein Konzept mit klappbaren Absorbern an. Verwendet wird hierzu ein Melaninharzschaumstoffabsorber. Dieser könnte auf einem Klappmechanismus zwischen den Fenstern angebracht sein und einen zweiten gleichgroßen Absorber im zugeklappten Zustand darunter verdecken. Die aufgeklappten Absorber würden dann die gesamte Wandfläche bedecken. Da die Fläche und Absorptionsgrade im Wesentlichen nicht so verschieden zu einem durchgehenden Akustikvorhang sind, entstehen auch ähnliche Resultate (vgl. Anhang D, Abschnitt D.10 und Abschnitt 14.1.1).

14.1.4 Deckensegel

Vorteilhaft an einem Deckensegel oder Baldachin ist, dass die Variabilität eines Vorhangkonzeptes erhalten und die große Deckenfläche genutzt werden kann. Interessant wäre dabei die Umsetzung eines Vorhangs, der die komplette Decke überspannen kann, aber genauso leicht in einer Kassette an einem Raumende Platz findet. So kann auch für Situationen bei denen mehr Nachhall notwendig ist oder falls Reflexionen für die Sprachverständlichkeit notwendig sind, die richtige Raumsituation gefunden werden. Zusätzlich zu diesem Deckenvorhang, könnte ein Vorhang zwischen Podest und Wandschrank angebracht werden. Dadurch wären zwei große Flächen rund um den Chor absorbierend ausgeführt und könnten den Schalldruckpegel verringern (s. Akustisches Datenblatt in Anhang D, Abschnitt D.11).

14.1.5 Klassenzimmer mit Vorhang abgetrennt

Die Unterrichtssituation ist, wie in Anhang D, Abschnitt D.3 ersichtlich, nicht ideal und bedarf der Verbesserung. Der Ansatz dieses Konzeptes ist eine Aufteilung des Raumes in zwei Teile mittels eines Vorhanges. Dadurch wird nicht nur das wirkende Volumen im Raum unterteilt, sondern auch ein Absorber in einem Bereich hoher Schallschnelle eingebracht. Das führt zu einer guten Wirksamkeit des Absorbers bis in tiefe Frequenzbereiche. Das Raumdatenblatt zu dieser Sanierung befindet sich in Anhang D, Abschnitt D.12. Als schwierig erweist sich bei der Simulation dieses Konzeptes die Absorption des Vorhanges. Absorptionskoeffizienten von Vorhängen werden häufig an einer Wand oder in einem bestimmten Wandabstand gemessen. Im Falle eines raumtrennenden Vorhanges mit sehr großen Wandabständen, können die dafür gängigen Absorptionskoeffizienten nicht genau stimmen. Vor allem in niedrigeren Oktavbändern, wird sich eine zu geringe Absorption zeigen, da der Vorhang bei Messung an einer Wand, eher im Bereich eines Druckmaximums hängt. Ein poröser Absorber wirkt aber am besten in Bereichen hoher Schallschnelle [Graber und Weselak, 2009, S.131].

Auch Transmission ist für diesen Fall essentiell. Es wurde in diesem Modell angenommen, dass der nicht absorbierte Schall fast vollständig transmittiert wird. Eine starke Reflexion scheint im Falle eines dicken Vorhangstoffes nicht plausibel.

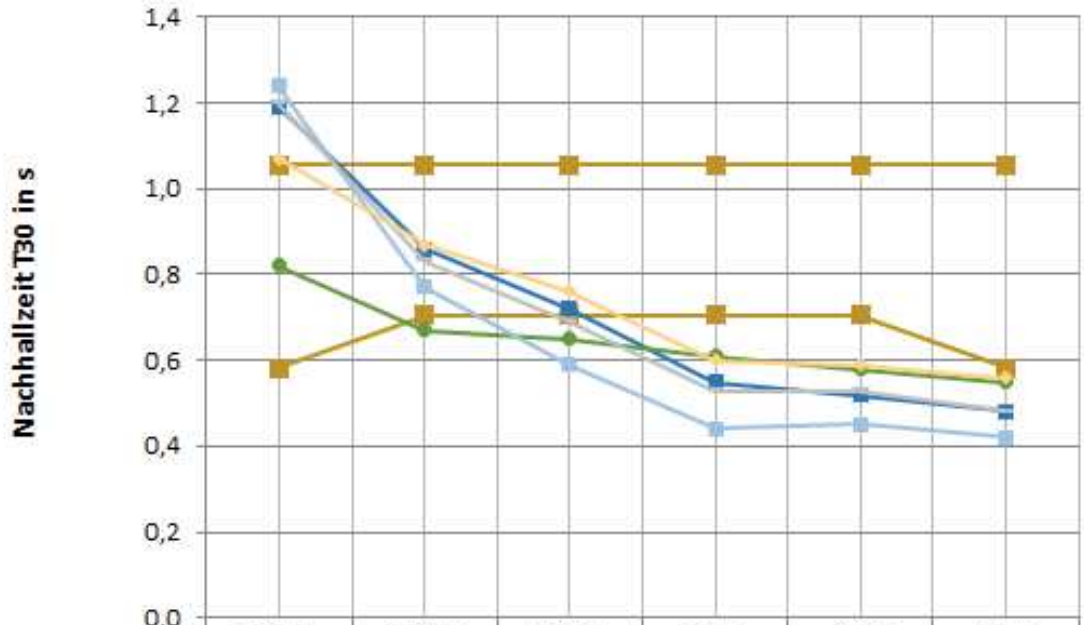
14.2 Vergleich der Sanierungsvarianten für die Chorsituation

Vergleicht man die unterschiedlichen Sanierungsvarianten, zeigt sich Folgendes:

14.2.1 Nachhallzeit

Der folgende Plot in Abbildung 14.1 enthält die simulierten Nachhallzeiten, aller Sanierungsvarianten und das dazugehörige Toleranzband, nach [ÖNORM 8115-3, 2005].

Der Deckenabsorber (Abschnitt 14.1.2) funktioniert besonders breitbandig und hat die ausgeglichenste Wirkung. Der Baldachin aus Akustikvorhang wirkt bei mittleren und hohen Frequenzen besonders stark. Daher könnte dieser für die gehörbelastende Chorsituation sehr gute Entspannung bieten.



	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Tmax	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Tmin	0,58	0,70	0,70	0,70	0,70	0,58
Vorhang zu	1,19	0,86	0,72	0,55	0,52	0,48
Deckenabsorber	0,82	0,67	0,65	0,61	0,58	0,55
Baldachin	1,24	0,77	0,59	0,44	0,45	0,42
Klappabsorber	1,20	0,83	0,69	0,53	0,53	0,48
vollbesetzt	1,07	0,87	0,76	0,60	0,59	0,56

Abbildung 14.1: Vergleich der T30 aller Sanierungsvarianten

14.2.2 Schalldruckpegelminderung

Bei den unterschiedlichen Sanierungsvarianten wäre eine Schalldruckpegelreduktion bis zu 3 dB im interessierenden Raumbereich in der Nähe des Chores möglich (vgl. Anhang D, Abschnitt D.11).

14.2.3 Fehlerbetrachtung

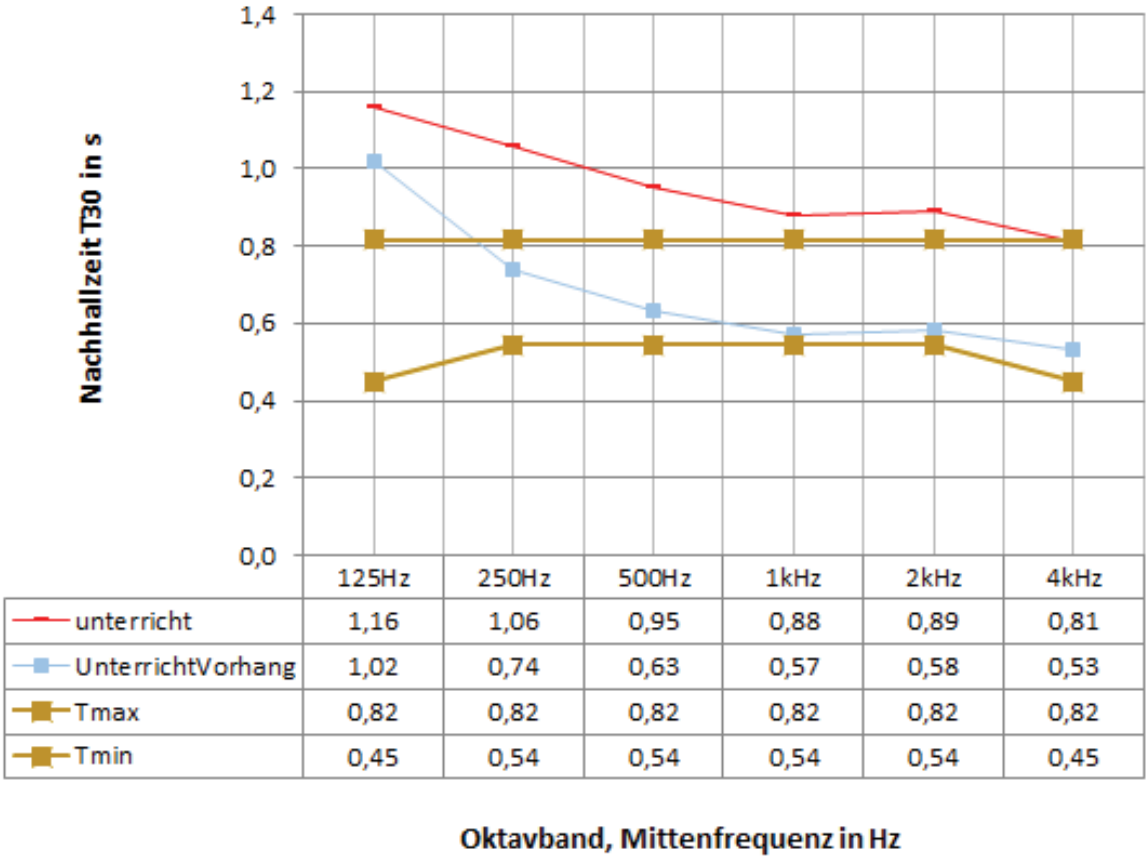
Auffällig in Abbildung 14.1 ist, dass bei den Sanierungen mit Vorhang ein Anstieg der Nachhallzeiten zu tiefen Frequenzen hin zu erkennen ist. Es entspricht nicht den Erwartungen, dass beim Einbringen zusätzlicher Absorptionsfläche in den Raum die Nachhallzeit länger wird. Zurückzuführen ist dieser Effekt wohl auf die fehlende Verwendung von Transmission in den Chormodellen. Dadurch wird tieffrequenter Schall nicht durch die vom Vorhang verdeckte Wand oder Decke absorbiert, sondern reflektiert und kann weiter zum Nachhall beitragen. In Realität würde der transmittierte Schall dennoch von der dahinterliegenden Fläche absorbiert. Dieser Fehler führt in der Simulation zu höheren Nachhallzeiten bei tiefen Frequenzen, da stärker absorbierende Flächen überdeckt und unwirksam werden.

14.3 Evaluation der möglichen Klassenzimmersanierung

Die Simulation eines Vorhangs im Klassenzimmerbetrieb zeigt folgende Ergebnisse:

14.3.1 Nachhallzeit

Der Plot in Abbildung 14.2 zeigt die simulierten Nachhallzeiten der Sanierung und des besetzten Ausgangszustandes (25 SchülerInnen) und das dazugehörige Toleranzband für Unterricht, laut [ÖNORM 8115-3, 2005].



	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
unterricht	1,16	1,06	0,95	0,88	0,89	0,81
UnterrichtVorhang	1,02	0,74	0,63	0,57	0,58	0,53
Tmax	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
Tmin	0,45	0,54	0,54	0,54	0,54	0,45

Abbildung 14.2: Vergleich der T30 der Sanierung und des Grund zustandes, Toleranzband für Unterricht

In der simulierten Sanierung zeigt sich ein Verlauf der T_{30}, der in fünf von sechs Oktavbändern im Toleranzband liegt. Einzig das tieffrequente 125 Hz-Band behält eine um $0,2$ s zu hohe Nachhallzeit.

14.3.2 Fehlerbetrachtung

Durch die adaptierten Absorptionskoeffizienten kann die erzielte Genauigkeit schwer abgeschätzt werden. Vor allem im Tieftonbereich könnte die Nachhallzeit noch deutlich niedriger ausfallen, als es die Simulation erwarten lässt. Das würde die raumakustische Situation tendenziell jedoch positiver gestalten, als die Simulation bereits erhoffen lässt.

15 Ergebnisse und Fazit

15.1 Ergebnisse der Chor-Simulation

Wie aus Kapitel 10 hervorgeht, muss der Schalldruckpegel während der Chorproben reduziert werden. Aus Abschnitt 14.2 ist bekannt, dass durch das Anbringen eines Deckensegels (Anhang D, Abschnitt D.11), eine Verringerung des Schalldruckpegels um 3 dB zu erwarten ist. Nach Gleichung 10.4 ergibt sich:

$$L_{EX,8h} = \frac{3}{8} \cdot 10^{\frac{-\Delta_L}{10}} \cdot 100\% \tag{15.1}$$

$$\text{mit } \Delta_L = 7,4\text{dB} - 3\text{dB} = 4,4\text{dB} \tag{15.2}$$

$$L_{EX,8h} = \frac{3}{8} \cdot 10^{\frac{-4,4}{10}} \cdot 100\% = 103\% \tag{15.3}$$

Eine Reduktion der Lärmdosis für die Beteiligten auf 103% scheint erreichbar. Dass diese mit einem trockenen Raumklang und wenig angenehmer Akustik einhergeht, ist jedoch nicht zu verhindern. Eine Lärmdosisreduktion um 100% ist sehr erstrebenswert und die Gehörbelastung für alle Beteiligten sollte gering gehalten werden.

Ob eine musikalische Probenatmosphäre oder eine geringe Lärmbelastung das schützenswertere Gut darstellt, ist in der Praxis von den Betroffenen zu beurteilen. Um die Praktikabilität einer Lösung mit Deckensegel und deren weitere Auswirkungen auf das Probengeschehen abzuschätzen, könnte testweise ein provisorischer Baldachin angebracht werden. Das wäre vergleichsweise unaufwändig mittels eines Gerüstes und darübergelegter Stoffbahnen möglich.

15.2 Ergebnisse der Klassenzimmersimulation

Für die Unterrichtssituation erweist sich der angedachte, raumtrennende Vorhang als sehr geeignet. In weiten Bereichen befindet sich die Nachhallzeit im Toleranzband nach [ÖNORM 8115-3, 2005] (siehe Abschnitt 14.3). Dabei sinkt diese dennoch nicht so weit ab, dass Gesang im Unterricht oder die Hörsamkeit von Musikbeispielen beeinträchtigt wären. Der Sprachübertragungsindex STI verbessert sich durch den Vorhang von durchschnittlich $0,64$ auf $0,71$ und ist damit als gut zu bezeichnen (vgl. Abschnitt 5.2).

Um die hohe Variabilität einer Lösung mit Vorhang voll ausschöpfen zu können und die Akustik für die Proben der kleineren Ensembles nicht zu verschlechtern, sollte eine Holzkassette zur Unterbringung des zusammengeschobenen Vorhanges montiert werden.

15.3 Fazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Sanierung des Raumes 208 angebracht ist. Die genaue Ausführung dieser bringt jedoch Zielkonflikte mit sich.

Die Nachhallzeiten und der Raumklang zum jetzigen Zeitpunkt sind für einige Nutzungsarten durchaus geeignet. Für andere Verwendungen sollten, um eine angenehme Arbeitsatmosphäre zu schaffen, durchaus drastische Absorptionsmaßnahmen ergriffen werden. Um dabei die Nutzbarkeit des Raumes nicht zu verlieren, muss eine variable Anbringung von Veränderungen unbedingt im Auge behalten werden.

Für eine Probe mit dem gesamten Chor könnte auch ein Ausweichen auf einen anderen, größeren Raum eine geeignete Lösung bleiben.

Teil III

Anhang

A

Akustische Datenblätter der Klassenräume

A.1 Akustisches Datenblatt des Raumes 012

A.1.1 Beschreibung und Raumdaten

Es handelt sich um einen Klassenraum im 2. Obergeschoss des Bundesrealgymnasiums Kepler, in der Keplerstraße 1 8020 Graz, mit folgenden Eckdaten:

Raumhöhe:	3,90 m
Raumlänge:	10,21 m
Raumbreite:	6,56 m
Volumen:	261,26 m^3
max. Schüleranzahl:	27
saniert nach:	Variante 1

Tabelle A.1: Raumdaten

Keine Photographie verfügbar.

A.1.2 Messungen

Angaben zu den Messungen

Da der Raum zu Beginn der Messungen für diese Bachelorseminararbeit bereits saniert war, muss hier auf die Messergebnisse von Frau Dipl. Ing. Claudia Reithner zurückgegriffen werden, die im Rahmen ihrer Diplomarbeit entstanden sind. Für Informationen zu dieser Messung sei daher auch auf [Reithner, 2013] verwiesen.

Messnorm:	Önorm EN ISO 3382
Anzahl der Mikrofonpositionen:	6
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Messsignal:	log. Sinussweep 256k Samples @ 48 kHz
Temperatur und Luftfeuchte:	nach: 19,6 $°C$, 46,8 %
Datum:	nach: 21.11.2014

Tabelle A.2: Zu der Messungen

Raumskizze/Messpositionen

Bezeichnung	**Abstand zur Tafelwand**	**Abstand zur Türwand (rechts)**
Quellposition 1:	1,30 m	3,00 m
Quellposition 2:	1,11 m	1,70 m
Mikrofonposition 1:	6,80 m	1,60 m
Mikrofonposition 2:	5,04 m	5,22 m
Mikrofonposition 3:	2,30 m	2,28 m
Mikrofonposition 4:	3,99 m	2,84 m
Mikrofonposition 5:	6,70 m	4,84 m
Mikrofonposition 6:	6,80 m	1,60 m

Tabelle A.3: Messpositionen (Messung nach der Sanierung)

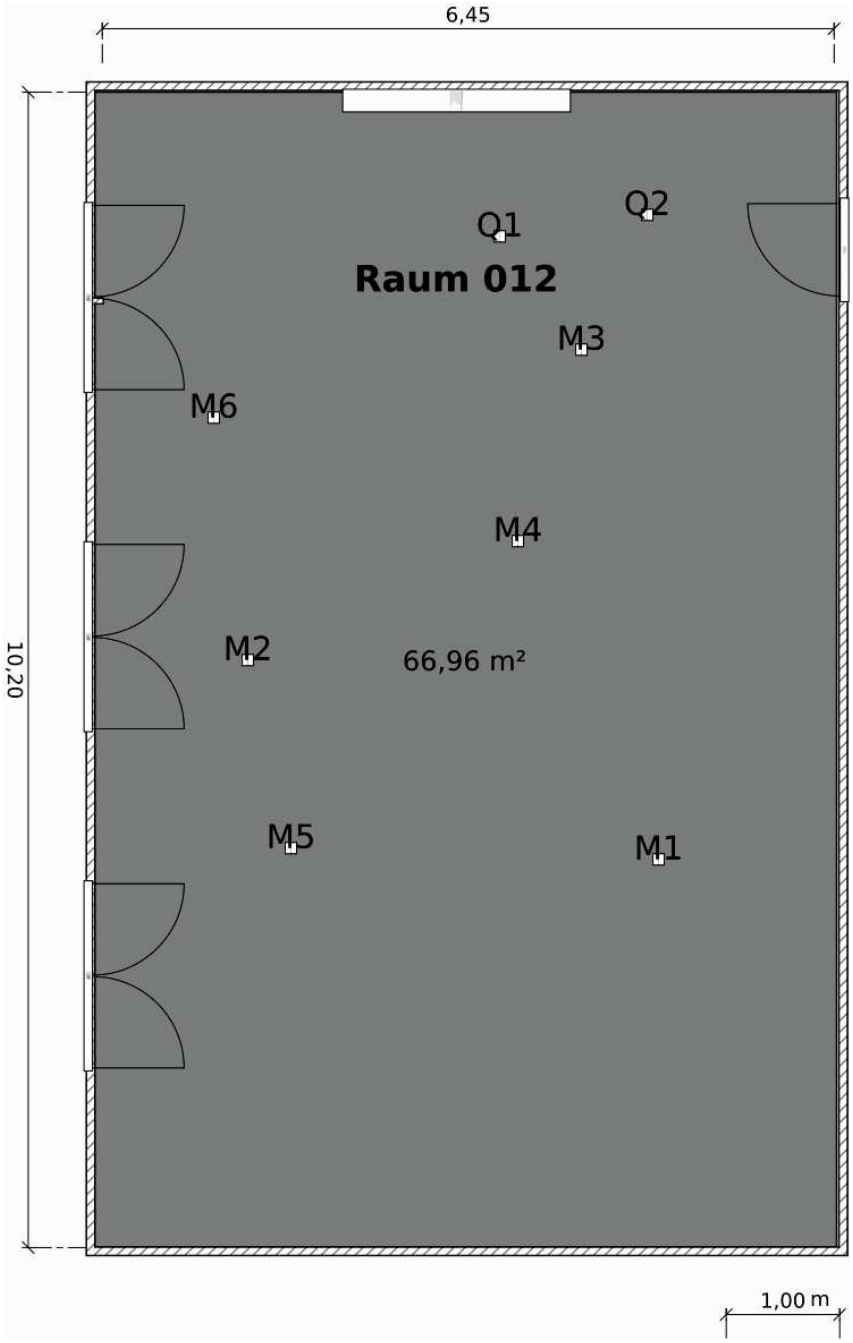


Abbildung A.1: Raumskizze mit Messpositionen

A.1.3 Nachhallzeit

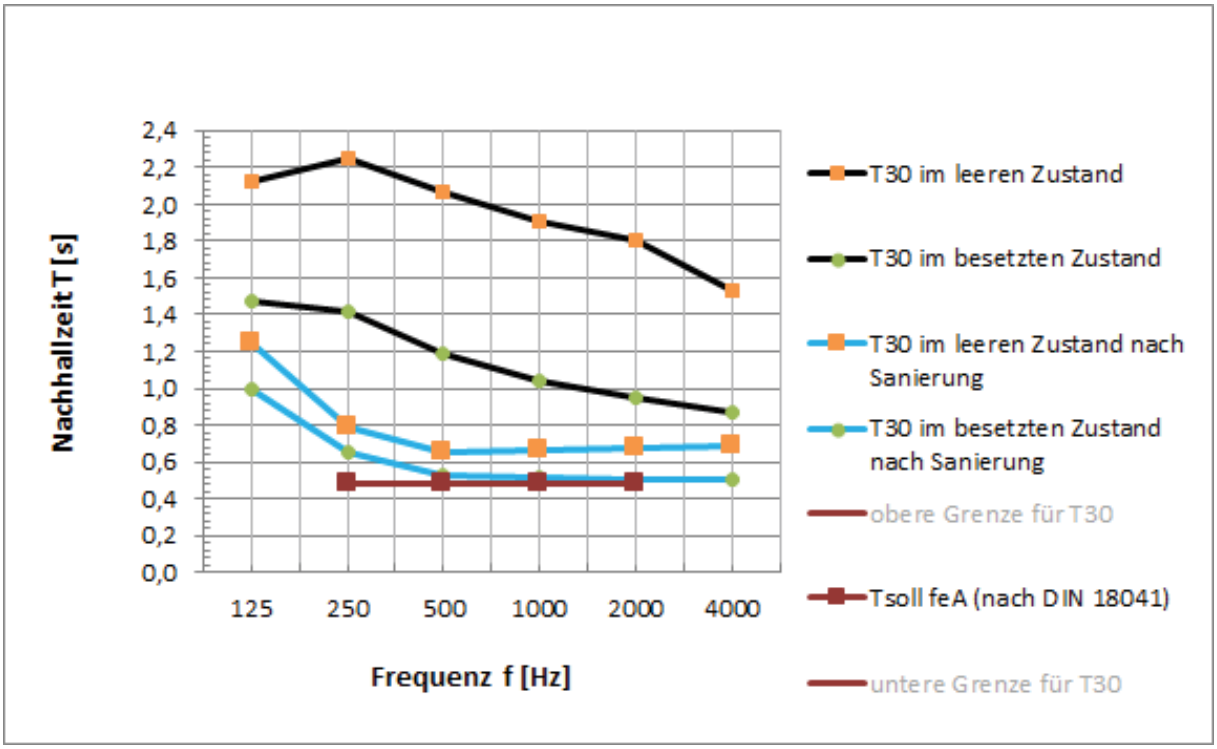


Abbildung A.2: Nachhallzeit T30 vor und nach der Sanierung inkl. simulierter Besetzung

Nachhallzeit im leeren Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	2,122	2,249	2,062	1,907	1,808	1,532		2,03

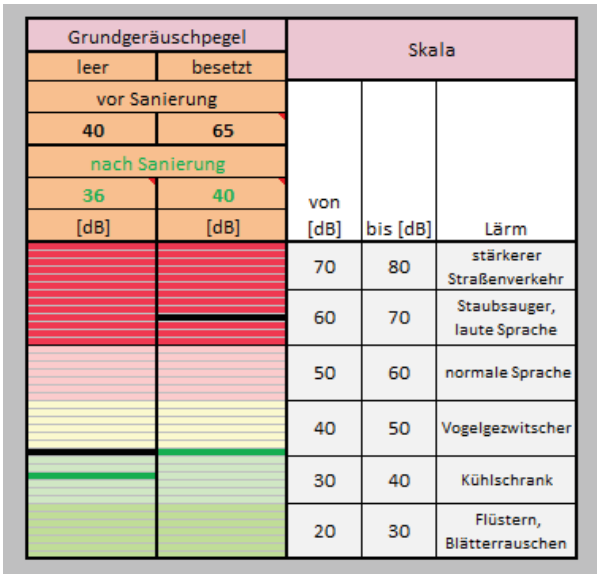
Nachhallzeit im besetzten Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,478	1,413	1,193	1,041	0,949	0,867		1,21

Nachhallzeit im leeren Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,241	0,790	0,650	0,664	0,674	0,683		0,80

Nachhallzeit im besetzten Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	0,989	0,654	0,529	0,515	0,504	0,509		0,64

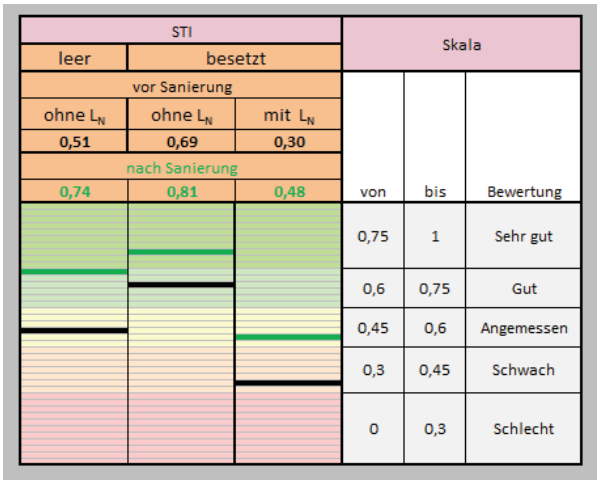
Abbildung A.3: Tabelle der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung Abbildung A.2

A.1.4 Raumakustische Kennwerte



Grundgeräuschpegel		Skala		
leer	besetzt			
vor Sanierung				
40	65			
nach Sanierung				
36	40	von [dB]	bis [dB]	Lärm
[dB]	[dB]			
		70	80	stärkerer Straßenverkehr
		60	70	Staubsauger, laute Sprache
		50	60	normale Sprache
		40	50	Vogelgezwitscher
		30	40	Kühlschrank
		20	30	Flüstern, Blätterrauschen

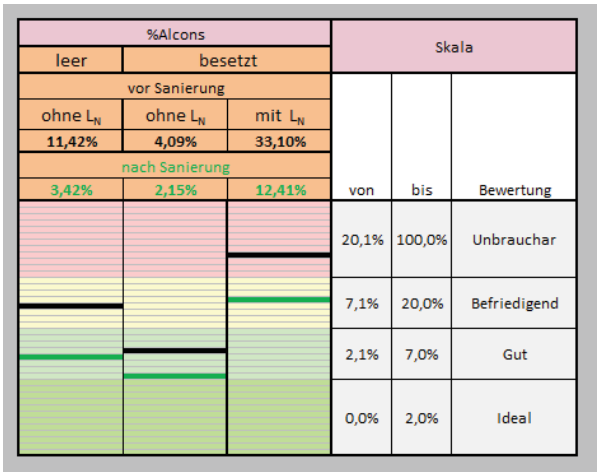
(a) Grundgeräuschpegel, leer und besetzt, vor und nach der Sanierung



STI			Skala		
leer	besetzt				
vor Sanierung					
ohne L_N	ohne L_N	mit L_N			
0,51	0,69	0,30			
nach Sanierung					
0,74	0,81	0,48	von	bis	Bewertung
			0,75	1	Sehr gut
			0,6	0,75	Gut
			0,45	0,6	Angemessen
			0,3	0,45	Schwach
			0	0,3	Schlecht

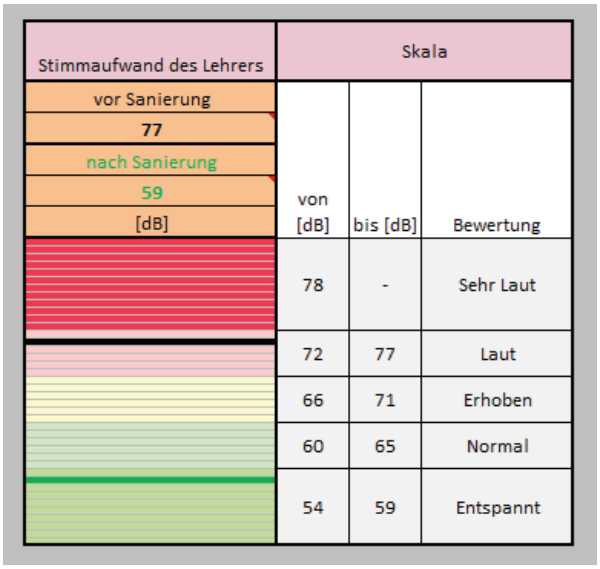
(b) STI Auswertung des Raumes 012

Abbildung A.4: Grundgeräuschpegel und STI



%Alcons			Skala		
leer	besetzt				
vor Sanierung					
ohne L_N	ohne L_N	mit L_N			
11,42%	4,09%	33,10%			
nach Sanierung					
3,42%	2,15%	12,41%	von	bis	Bewertung
			20,1%	100,0%	Unbrauchar
			7,1%	20,0%	Befriedigend
			2,1%	7,0%	Gut
			0,0%	2,0%	Ideal

(a) Al_{cons}-Auswertung des Raumes 012



Stimmaufwand des Lehrers	Skala		
vor Sanierung			
77			
nach Sanierung			
59	von [dB]	bis [dB]	Bewertung
[dB]			
	78	-	Sehr Laut
	72	77	Laut
	66	71	Erhoben
	60	65	Normal
	54	59	Entspannt

(b) Stimmaufwand des Lehrers für besetzten Zustand

Abbildung A.5: Al_{cons} und Stimmaufwand

A.2 Akustisches Datenblatt des Raumes 202

A.2.1 Beschreibung und Raumdaten

Es handelt sich um einen Informatikraum im 2. Obergeschoss des Bundesrealgymnasiums Kepler, in der Keplerstraße 1 8020 Graz, mit folgenden Eckdaten:

Raumhöhe:	3,83 m
Raumlänge:	12,82 m
Raumbreite:	6,23 m
Volumen:	303,36 m^3
max. Schüleranzahl:	42
saniert nach:	Variante 3

Tabelle A.4: Raumdaten

Abbildung A.6: Raum 202

Die Ausstattung des Informatikraumes weicht naturgemäß von der üblichen Klassenraumeinrichtung ab. Es sind 14 Computerarbeitsplätze vorhanden, die an den Wänden entlang aufgestellt sind. Zusätzlich gibt es in der Raummitte noch Plätze ohne Computer. Die Infrastruktur für den Lehrenden beinhaltet außerdem abgesehen von der üblichen Tafel einen Beamer nebst Leinwand.

A.2.2 Messungen

Angaben zu den Messungen

Messnorm:	Önorm EN ISO 3382
Anzahl der Mikrofonpositionen:	6
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Messsignal:	log. Sinussweep 256k Samples @ 48 kHz
Temperatur und Luftfeuchte:	vor: 19 $°C$, 48 % nach: 22,5 $°C$, 35,6 %
Datum:	vor: 18.11.2014 nach: 27.02.2015

Tabelle A.5: Zu den Messungen

Raumskizze/Messpositionen

Bezeichnung	**Abstand zur Tafelwand**	**Abstand zur Türwand (rechts)**
Quellposition 1:	1,86 m	1,93 m
Quellposition 2:	1,22 m	5,38 m
Mikrofonposition 1:	3,61 m	2,68 m (zum Kasten)
Mikrofonposition 2:	5,05 m	1,34 m
Mikrofonposition 3:	6,47 m	9,86 m
Mikrofonposition 4:	8,13 m	1,24 m
Mikrofonposition 5:	9,28 m	4,84 m
Mikrofonposition 6:	11,17 m	3,17 m

Tabelle A.6: Messpositionen (Messung vor der Sanierung)

Bezeichnung	**Abstand zur Tafelwand**	**Abstand zur Türwand (rechts)**
Quellposition 1:	1,86 m	1,93 m
Quellposition 2:	1,22 m	5,24 m
Mikrofonposition 1:	3,61 m	2,68 m
Mikrofonposition 2:	5,05 m	1,34 m
Mikrofonposition 3:	6,47 m	4,86 m
Mikrofonposition 4:	8,14 m	1,24 m
Mikrofonposition 5:	9,27 m	4,84 m
Mikrofonposition 6:	11,17 m	3,17 m

Tabelle A.7: Messpositionen (Messung nach der Sanierung)

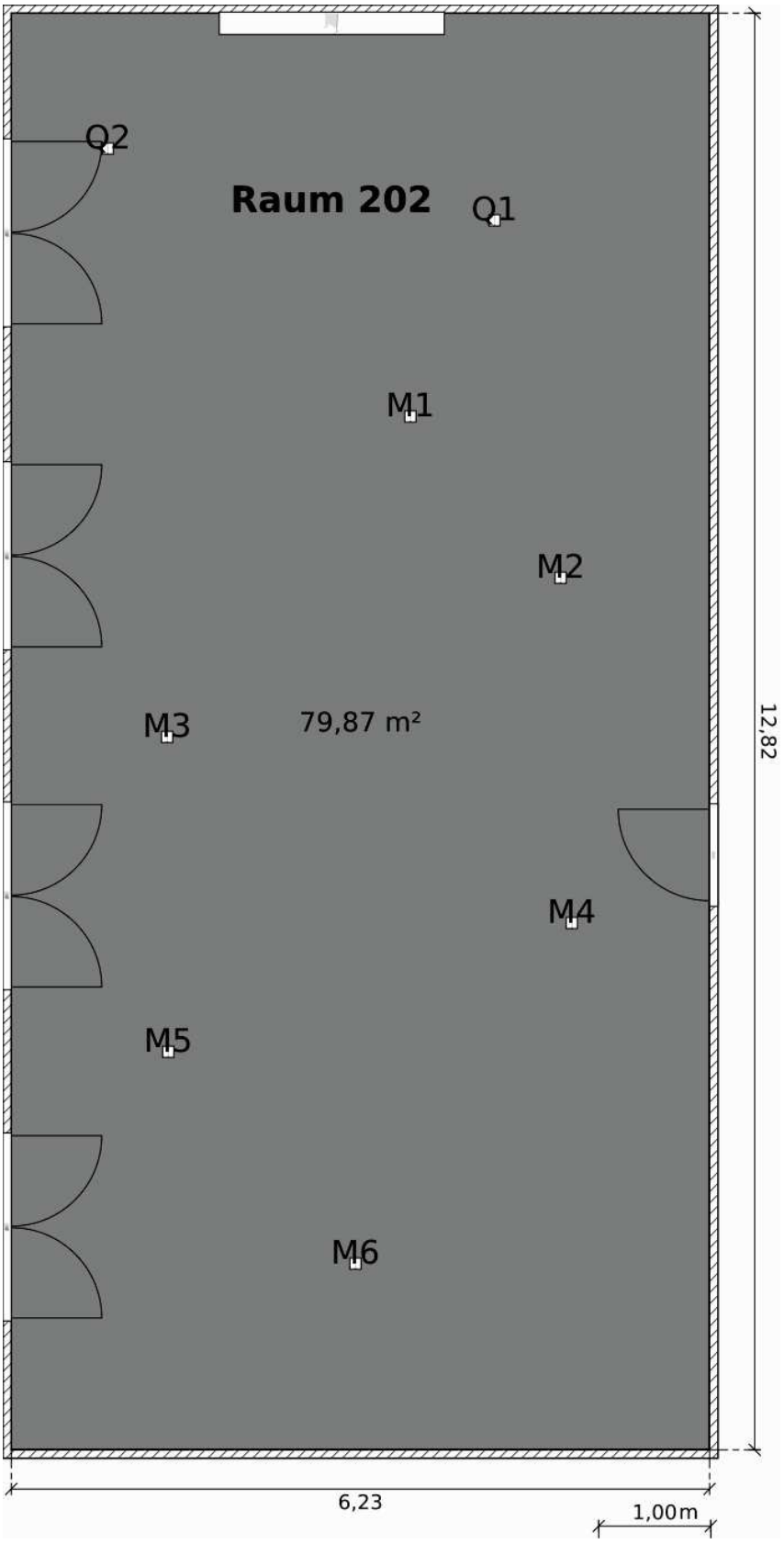


Abbildung A.7: Raumskizze mit Messpositionen

A.2.3 Nachhallzeit

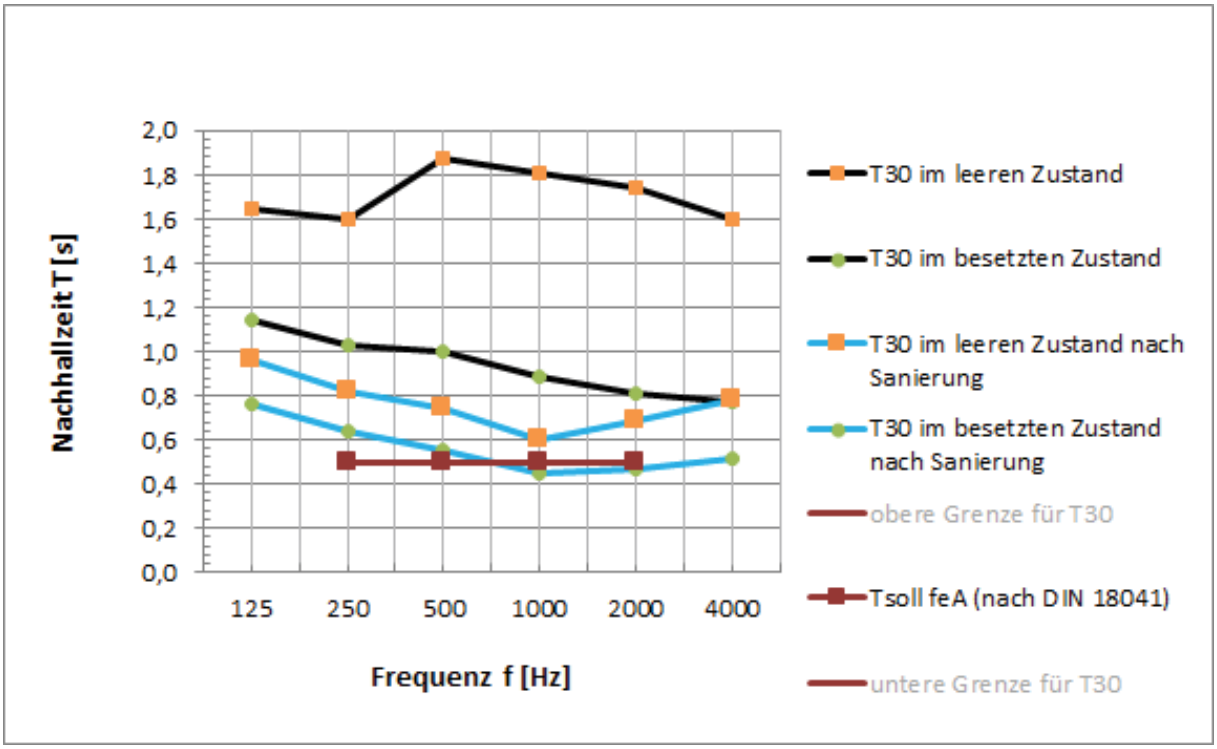


Abbildung A.8: Nachhallzeit T30 vor und nach der Sanierung inkl. simulierter Besetzung

Nachhallzeit im leeren Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,650	1,603	1,878	1,804	1,745	1,603		1,74

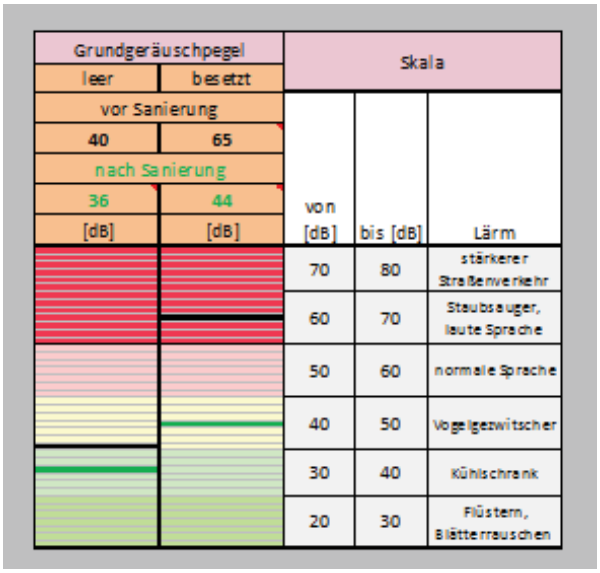
Nachhallzeit im besetzten Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,138	1,027	0,998	0,882	0,808	0,776		0,97

Nachhallzeit im leeren Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	0,962	0,817	0,747	0,599	0,686	0,782		0,76

Nachhallzeit im besetzten Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	0,762	0,635	0,553	0,445	0,471	0,514		0,57

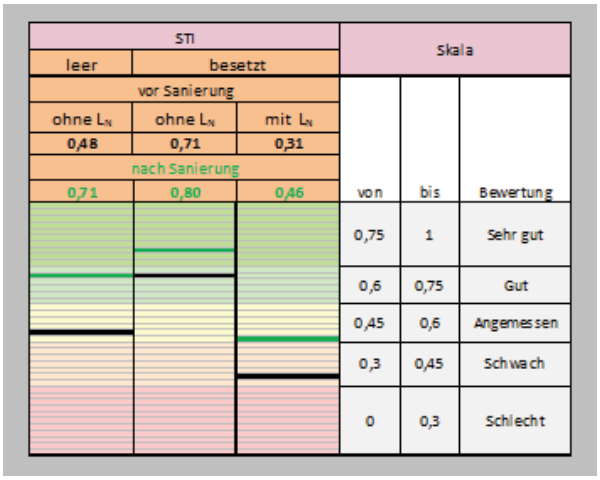
Abbildung A.9: Tabelle der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung Abbildung A.8

A.2.4 Raumakustische Kennwerte



Grundgeräuschpegel		Skala		
leer	besetzt			
vor Sanierung				
40	65			
nach Sanierung				
36	44	von [dB]	bis [dB]	Lärm
[dB]	[dB]	70	80	stärkerer Straßenverkehr
		60	70	Staubsauger, laute Sprache
		50	60	normale Sprache
		40	50	Vogelgezwitscher
		30	40	Kühlschrank
		20	30	Flüstern, Blätterrauschen

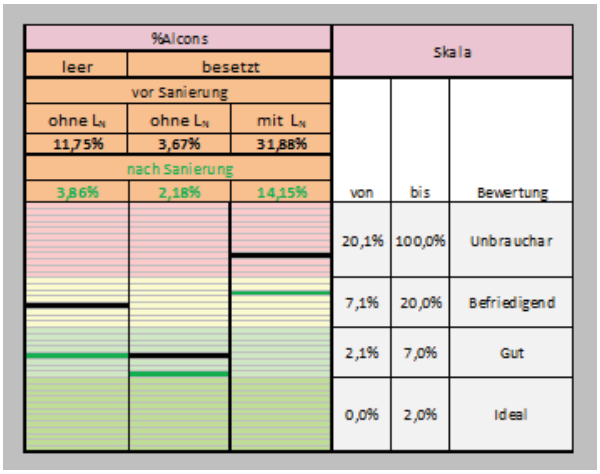
(a) Grundgeräuschpegel, leer und besetzt, vor und nach der Sanierung



STI			Skala		
leer	besetzt				
vor Sanierung					
ohne L_N	ohne L_N	mit L_N			
0,48	0,71	0,31			
nach Sanierung					
0,71	0,80	0,46	von	bis	Bewertung
			0,75	1	Sehr gut
			0,6	0,75	Gut
			0,45	0,6	Angemessen
			0,3	0,45	Schwach
			0	0,3	Schlecht

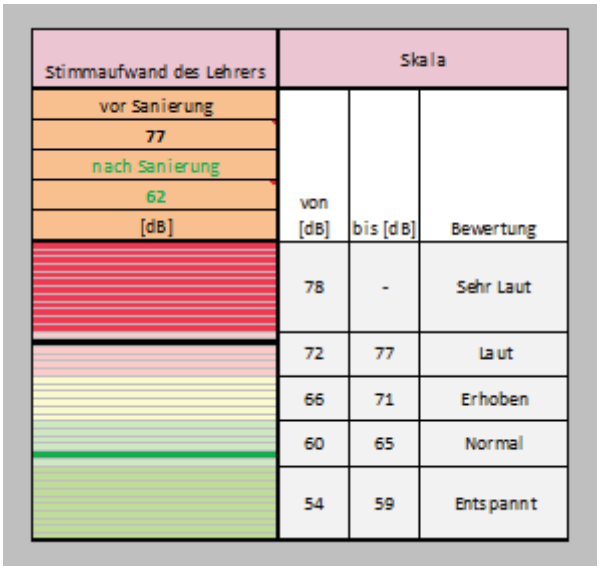
(b) STI Auswertung des Raumes 202

Abbildung A.10: Grundgeräuschpegel und STI



%Alcons			Skala		
leer	besetzt				
vor Sanierung					
ohne L_N	ohne L_N	mit L_N			
11,75%	3,67%	31,88%			
nach Sanierung					
3,86%	2,18%	14,15%	von	bis	Bewertung
			20,1%	100,0%	Unbrauchar
			7,1%	20,0%	Befriedigend
			2,1%	7,0%	Gut
			0,0%	2,0%	Ideal

(a) Al_{cons}-Auswertung des Raumes 202



Stimmaufwand des Lehrers	Skala		
vor Sanierung			
77			
nach Sanierung			
62	von [dB]	bis [dB]	Bewertung
[dB]	78	-	Sehr Laut
	72	77	Laut
	66	71	Erhoben
	60	65	Normal
	54	59	Entspannt

(b) Stimmaufwand des Lehrers für besetzten Zustand

Abbildung A.11: Al_{cons} und Stimmaufwand

A.3 Akustisches Datenblatt des Raumes 203

A.3.1 Beschreibung und Raumdaten

Es handelt sich um einen Klassenraum im 2. Obergeschoss des Bundesrealgymnasiums Kepler, in der Keplerstraße 1 8020 Graz, mit folgenden Eckdaten:

Raumhöhe:	3,81 m
Raumlänge:	10,80 m
Raumbreite:	6,19 m
Volumen:	254,706 m^3
max. Schüleranzahl:	33
saniert nach:	Variante 3

Tabelle A.8: Raumdaten

Abbildung A.12: Raum 203

Anmerkung: die bei der ersten Messung vorhandenen Vorhänge (bei der Messung offen) fehlten bei der zweiten Messung nach der Sanierung (wie in Abbildung A.12 zu sehen).

A.3.2 Messungen

Angaben zu den Messungen

Messnorm:	Önorm EN ISO 3382
Anzahl der Mikrofonpositionen:	vor: 8 nach: 6
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Messsignal:	log. Sinussweep 256k Samples @ 48 kHz
Temperatur und Luftfeuchte:	vor: 19,2 °C, 48 % nach: 21,2 °C, 40,2 %
Datum:	vor: 17.11.2014 nach:27.02.2015

Tabelle A.9: Zu den Messungen

Raumskizze/Messpositionen

Bezeichnung	**Abstand zur Tafelwand**	**Abstand zur Türwand (rechts)**
Quellposition 1:	1,53 m	2,10 m
Quellposition 2:	1,23 m	4,67 m
Mikrofonposition 1:	2,07 m	4,96 m (Jacke)
Mikrofonposition 2:	2,01 m	1,26 m (Jacke)
Mikrofonposition 3:	3,84 m	4,89 m
Mikrofonposition 4:	3,47 m	1,32 m
Mikrofonposition 5:	5,03 m	4,84 m
Mikrofonposition 6:	5,04 m	1,30 m
Mikrofonposition 7:	6,80 m	4,93 m
Mikrofonposition 8:	6,79 m	1,33 m

Tabelle A.10: Messpositionen (Messung vor der Sanierung)

Bezeichnung	Abstand zur Tafelwand	Abstand zur Türwand (rechts)
Quellposition 1:	1,50 m	2,13 m
Quellposition 2:	1,23 m	4,66 m
Mikrofonposition 1:	3,84 m	4,89 m
Mikrofonposition 2:	3,47 m	1,33 m
Mikrofonposition 3:	5,10 m	4,84 m
Mikrofonposition 4:	5,04 m	1,30 m
Mikrofonposition 5:	6,80 m	4,93 m
Mikrofonposition 6:	6,79 m	1,33 m

Tabelle A.11: Messpositionen (Messung nach der Sanierung)

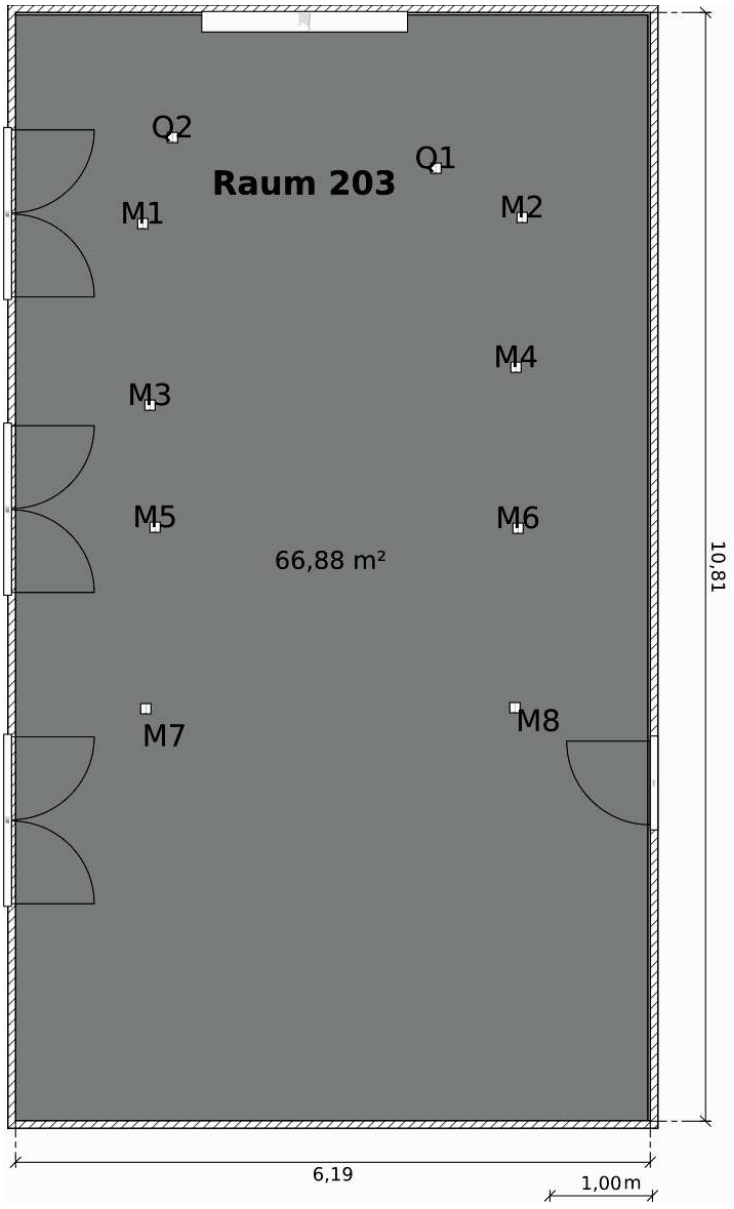


Abbildung A.13: Raumskizze mit Messpositionen

A.3.3 Nachhallzeit

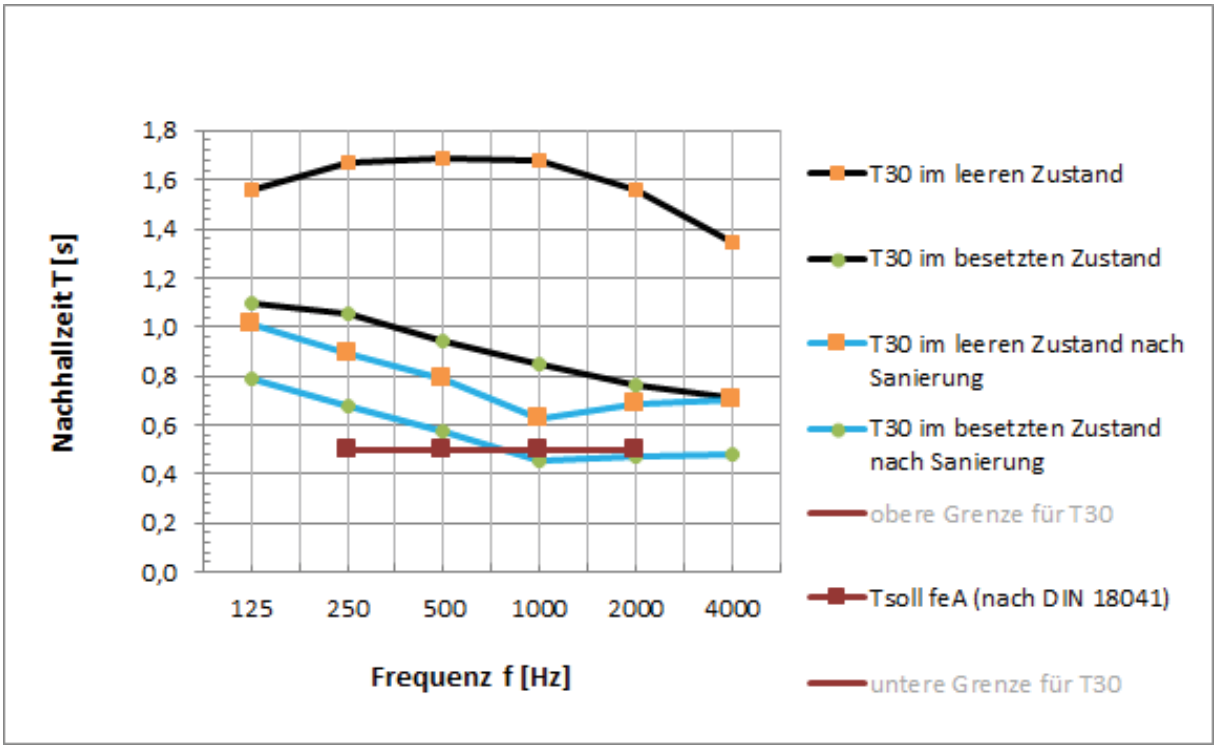


Abbildung A.14: Nachhallzeit T30 vor und nach der Sanierung inkl. simulierter Besetzung

Nachhallzeit im leeren Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,561	1,667	1,690	1,679	1,559	1,349		1,63

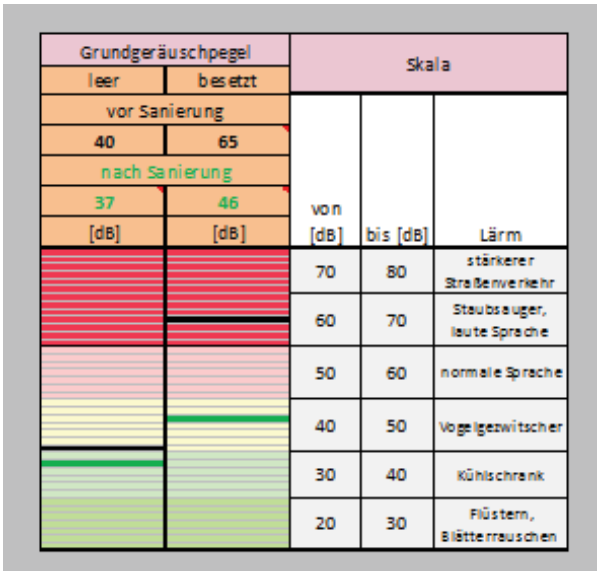
Nachhallzeit im besetzten Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,094	1,053	0,943	0,851	0,765	0,711		0,94

Nachhallzeit im leeren Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,011	0,892	0,787	0,623	0,684	0,703		0,80

Nachhallzeit im besetzten Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	0,792	0,680	0,575	0,458	0,470	0,479		0,59

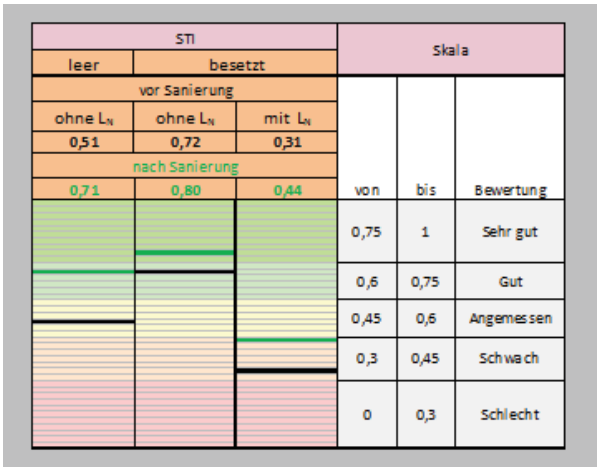
Abbildung A.15: Tabelle der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung Abbildung A.14

A.3.4 Raumakustische Kennwerte



Grundgeräuschpegel		Skala		
leer	besetzt			
vor Sanierung				
40	65			
nach Sanierung				
37	46	von [dB]	bis [dB]	Lärm
[dB]	[dB]			
		70	80	stärkerer Straßenverkehr
		60	70	Staubsauger, laute Sprache
		50	60	normale Sprache
		40	50	Vogelgezwitscher
		30	40	Kühlschrank
		20	30	Flüstern, Blätterrauschen

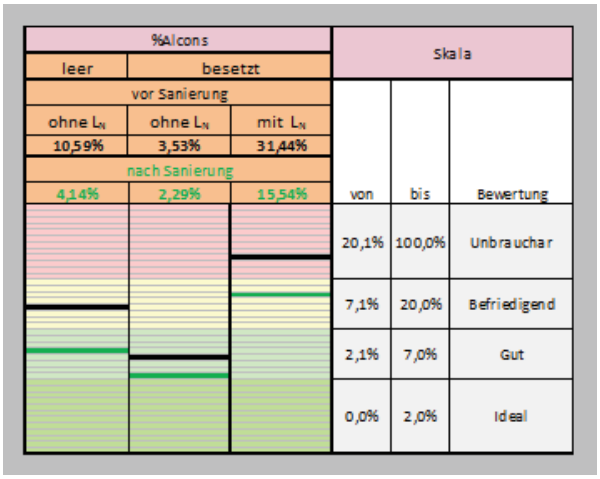
(a) Grundgeräuschpegel, leer und besetzt, vor und nach der Sanierung



STI			Skala		
leer	besetzt				
vor Sanierung					
ohne L_N	ohne L_N	mit L_N			
0,51	0,72	0,31			
nach Sanierung					
0,71	0,80	0,44	von	bis	Bewertung
			0,75	1	Sehr gut
			0,6	0,75	Gut
			0,45	0,6	Angemessen
			0,3	0,45	Schwach
			0	0,3	Schlecht

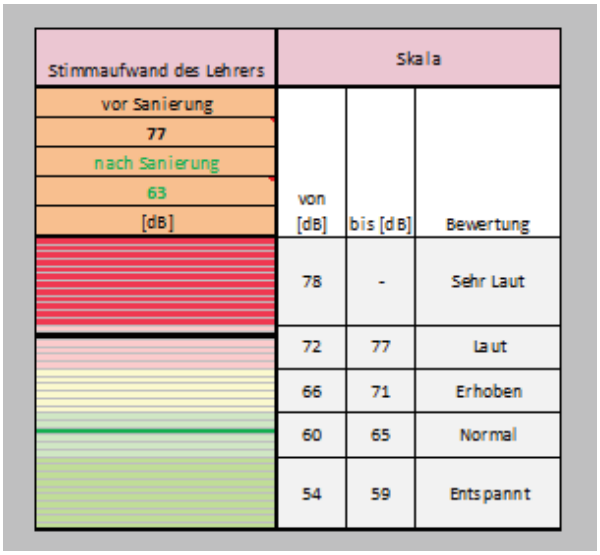
(b) STI Auswertung des Raumes 203

Abbildung A.16: Grundgeräuschpegel und STI



%Alcons			Skala		
leer	besetzt				
vor Sanierung					
ohne L_N	ohne L_N	mit L_N			
10,59%	3,53%	31,44%			
nach Sanierung					
4,14%	2,29%	15,54%	von	bis	Bewertung
			20,1%	100,0%	Unbrauchar
			7,1%	20,0%	Befriedigend
			2,1%	7,0%	Gut
			0,0%	2,0%	Ideal

(a) Al_{cons}-Auswertung des Raumes 203



Stimmaufwand des Lehrers	Skala		
vor Sanierung			
77			
nach Sanierung			
63			
[dB]	von [dB]	bis [dB]	Bewertung
	78	-	Sehr Laut
	72	77	Laut
	66	71	Erhoben
	60	65	Normal
	54	59	Entspannt

(b) Stimmaufwand des Lehrers für besetzten Zustand

Abbildung A.17: Al_{cons} und Stimmaufwand

A.4 Akustisches Datenblatt des Raumes 205

A.4.1 Beschreibung und Raumdaten

Es handelt sich um einen Klassenraum im 2. Obergeschoss des Bundesrealgymnasiums Kepler, in der Keplerstraße 1 8020 Graz, mit folgenden Eckdaten:

Raumhöhe:	3,81 m
Raumlänge:	10,197 m
Raumbreite:	6,59 m
Volumen:	256,4 m^3
max. Schüleranzahl:	26
saniert nach:	Variante 3

Tabelle A.12: Raumdaten

Abbildung A.18: Raum 205

Anmerkung: Bei der Messung nach der Sanierung war im Gegensatz zur ersten Messung nur ein Vorhang vorhanden (bei der Messung offen). Außerdem wurde eine Wandnische neben der Türe mit den Abmessungen 0,36 m x 0,62 m x 3,055 m im Grundriss in Abbildung A.19 vernachlässigt.

A.4.2 Messungen

Angaben zu den Messungen

Messnorm:	Önorm EN ISO 3382
Anzahl der Mikrofonpositionen:	6
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Messsignal:	log. Sinussweep 256k Samples @ 48 kHz
Temperatur und Luftfeuchte:	vor: 19 $°C$, 48 % nach: 21,3 $°C$, 40,0 %
Datum:	vor: 18.11.2014 nach: 27.02.2015

Tabelle A.13: Zu den Messungen

Raumskizze/Messpositionen

Bezeichnung	**Abstand zur Tafelwand**	**Abstand zur Türwand (rechts)**
Quellposition 1:	1,41 m	2,34 m
Quellposition 2:	1,29 m	5,24 m
Mikrofonposition 1:	3,34 m	5,08 m
Mikrofonposition 2:	3,14 m	3,16 m
Mikrofonposition 3:	4,87 m	4,64 m
Mikrofonposition 4:	4,54 m	1,64 m
Mikrofonposition 5:	7,02 m	5,17 m
Mikrofonposition 6:	8,28 m	1,65 m

Tabelle A.14: Messpositionen (Messung vor der Sanierung)

Bezeichnung	**Abstand zur Tafelwand**	**Abstand zur Türwand (rechts)**
Quellposition 1:	1,41 m	2,34 m
Quellposition 2:	1,29 m	5,26 m
Mikrofonposition 1:	3,34 m	5,08 m
Mikrofonposition 2:	3,14 m	3,16 m
Mikrofonposition 3:	4,87 m	4,46 m
Mikrofonposition 4:	4,54 m	1,64 m
Mikrofonposition 5:	7,02 m	5,17 m
Mikrofonposition 6:	8,28 m	1,65 m

Tabelle A.15: Messpositionen (Messung nach der Sanierung)

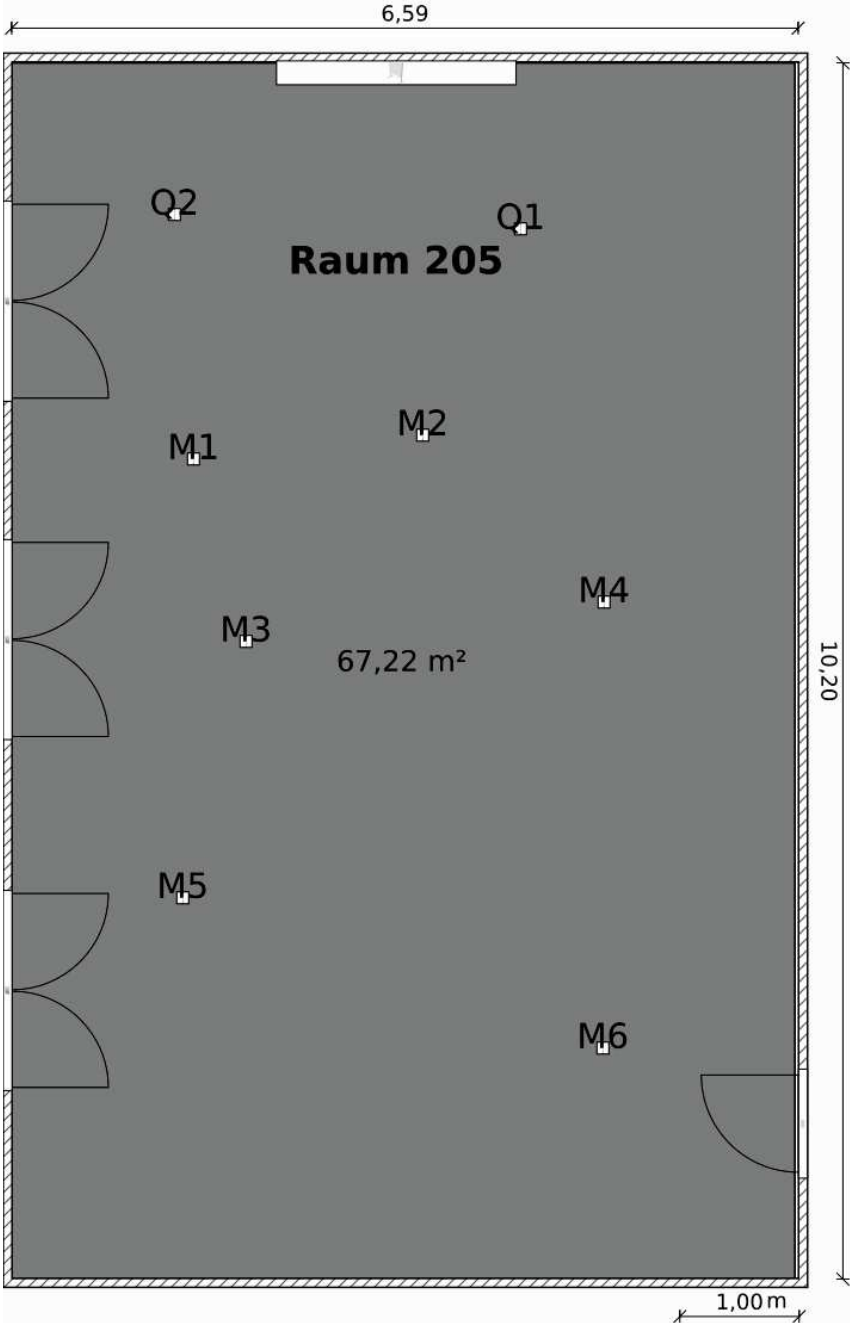


Abbildung A.19: Raumskizze mit Messpositionen

A.4.3 Nachhallzeit

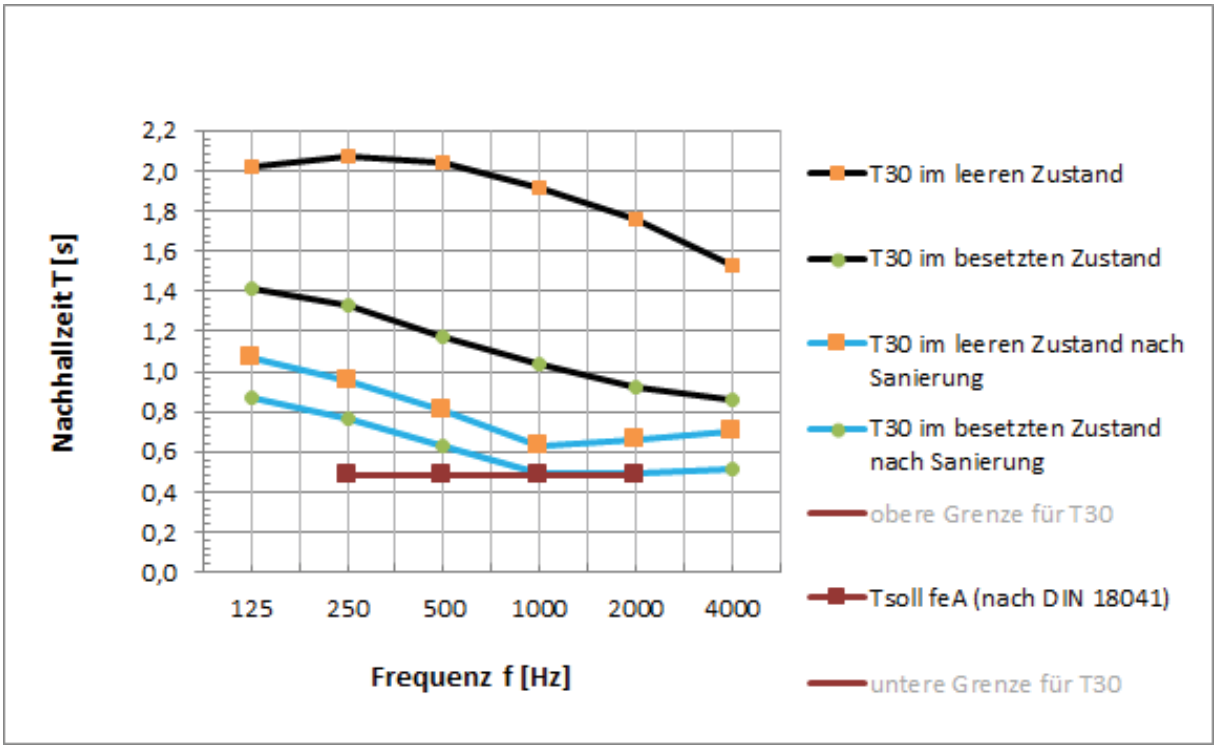


Abbildung A.20: Nachhallzeit T30 vor und nach der Sanierung inkl. simulierter Besetzung

Nachhallzeit im leeren Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	2,017	2,068	2,038	1,912	1,756	1,528		1,96

Nachhallzeit im besetzten Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,418	1,330	1,175	1,033	0,926	0,858		1,18

Nachhallzeit im leeren Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,063	0,956	0,805	0,629	0,664	0,700		0,82

Nachhallzeit im besetzten Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	0,870	0,761	0,624	0,492	0,496	0,516		0,65

Abbildung A.21: Tabelle der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung Abbildung A.20

A.4.4 Raumakustische Kennwerte

Grundgeräuschpegel		Skala		
leer	besetzt			
vor Sanierung				
40	65			
nach Sanierung				
36	41	von [dB]	bis [dB]	Lärm
[dB]	[dB]			
		70	80	stärkerer Straßenverkehr
		60	70	Staubsauger, laute Sprache
		50	60	normale Sprache
		40	50	Vogelgezwitscher
		30	40	Kühlschrank
		20	30	Flüstern, Blätterrauschen

(a) Grundgeräuschpegel, leer und besetzt, vor und nach der Sanierung

STI			Skala		
leer	besetzt				
vor Sanierung					
ohne L_N	ohne L_N	mit L_N			
0,48	0,66	0,29			
nach Sanierung					
0,72	0,79	0,46	von	bis	Bewertung
			0,75	1	Sehr gut
			0,6	0,75	Gut
			0,45	0,6	Angemessen
			0,3	0,45	Schwach
			0	0,3	Schlecht

(b) STI Auswertung des Raumes 205

Abbildung A.22: Grundgeräuschpegel und STI

%Alcons			Skala		
leer	besetzt				
vor Sanierung					
ohne L_N	ohne L_N	mit L_N			
13,17%	4,75%	34,86%			
nach Sanierung					
3,90%	2,42%	13,79%	von	bis	Bewertung
			20,1%	100,0%	Unbrauchar
			7,1%	20,0%	Befriedigend
			2,1%	7,0%	Gut
			0,0%	2,0%	Ideal

(a) Al_{cons}-Auswertung des Raumes 205

Stimmaufwand des Lehrers	Skala		
vor Sanierung			
77			
nach Sanierung			
60	von [dB]	bis [dB]	Bewertung
[dB]			
	78	-	Sehr Laut
	72	77	Laut
	66	71	Erhoben
	60	65	Normal
	54	59	Entspannt

(b) Stimmaufwand des Lehrers für besetzten Zustand

Abbildung A.23: Al_{cons} und Stimmaufwand

A.5 Akustisches Datenblatt des Raumes 206

A.5.1 Beschreibung und Raumdaten

Es handelt sich um einen Klassenraum im 2. Obergeschoss des Bundesrealgymnasiums Kepler, in der Keplerstraße 1 8020 Graz, mit folgenden Eckdaten:

Raumhöhe:	3,82 m
Raumlänge:	12,19 m
Raumbreite:	6,84 m
Volumen:	321,43 m^3
max. Schüleranzahl:	30
saniert nach:	Variante 3

Tabelle A.16: Raumdaten

Abbildung A.24: Raum 206

Anmerkung: die bei der ersten Messung vorhandenen Vorhänge (bei der Messung offen) fehlten bei der zweiten Messung nach der Sanierung (wie in Abbildung A.24 zu sehen). Außerdem fehlte bei der zweiten Messung das davor vorhandene Klavier (Pianino).

A.5.2 Messungen

Angaben zu den Messungen

Messnorm:	Önorm EN ISO 3382
Anzahl der Mikrofonpositionen:	6
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Messsignal:	log. Sinussweep 256k Samples @ 48 kHz
Temperatur und Luftfeuchte:	vor: 19 $°C$, 48 % nach: 20,8 $°C$, 42,9 %
Datum:	vor: 18.11.2014 nach: 26.02.2015

Tabelle A.17: Zu den Messungen

Raumskizze/Messpositionen

Bezeichnung	**Abstand zur Tafelwand**	**Abstand zur Türwand (rechts)**
Quellposition 1:	1,13 m	4,11 m
Quellposition 2:	1,55 m	1,97 m
Mikrofonposition 1:	2,68 m	5,42 m
Mikrofonposition 2:	2,93 m	3,19 m
Mikrofonposition 3:	5,29 m	5,86 m
Mikrofonposition 4:	5,44 m	1,91 m
Mikrofonposition 5:	9,171 m	5,32 m
Mikrofonposition 6:	10,12 m	1,632 m

Tabelle A.18: Messpositionen (Messung vor der Sanierung)

Bezeichnung	**Abstand zur Tafelwand**	**Abstand zur Türwand (rechts)**
Quellposition 1:	1,13 m	4,13 m
Quellposition 2:	1,55 m	1,97 m
Mikrofonposition 1:	2,68 m	5,45 m
Mikrofonposition 2:	2,93 m	3,19 m
Mikrofonposition 3:	5,30 m	5,86 m
Mikrofonposition 4:	5,44 m	1,91 m
Mikrofonposition 5:	9,17 m	5,33 m
Mikrofonposition 6:	10,20 m	1,63 m

Tabelle A.19: Messpositionen (Messung nach der Sanierung)

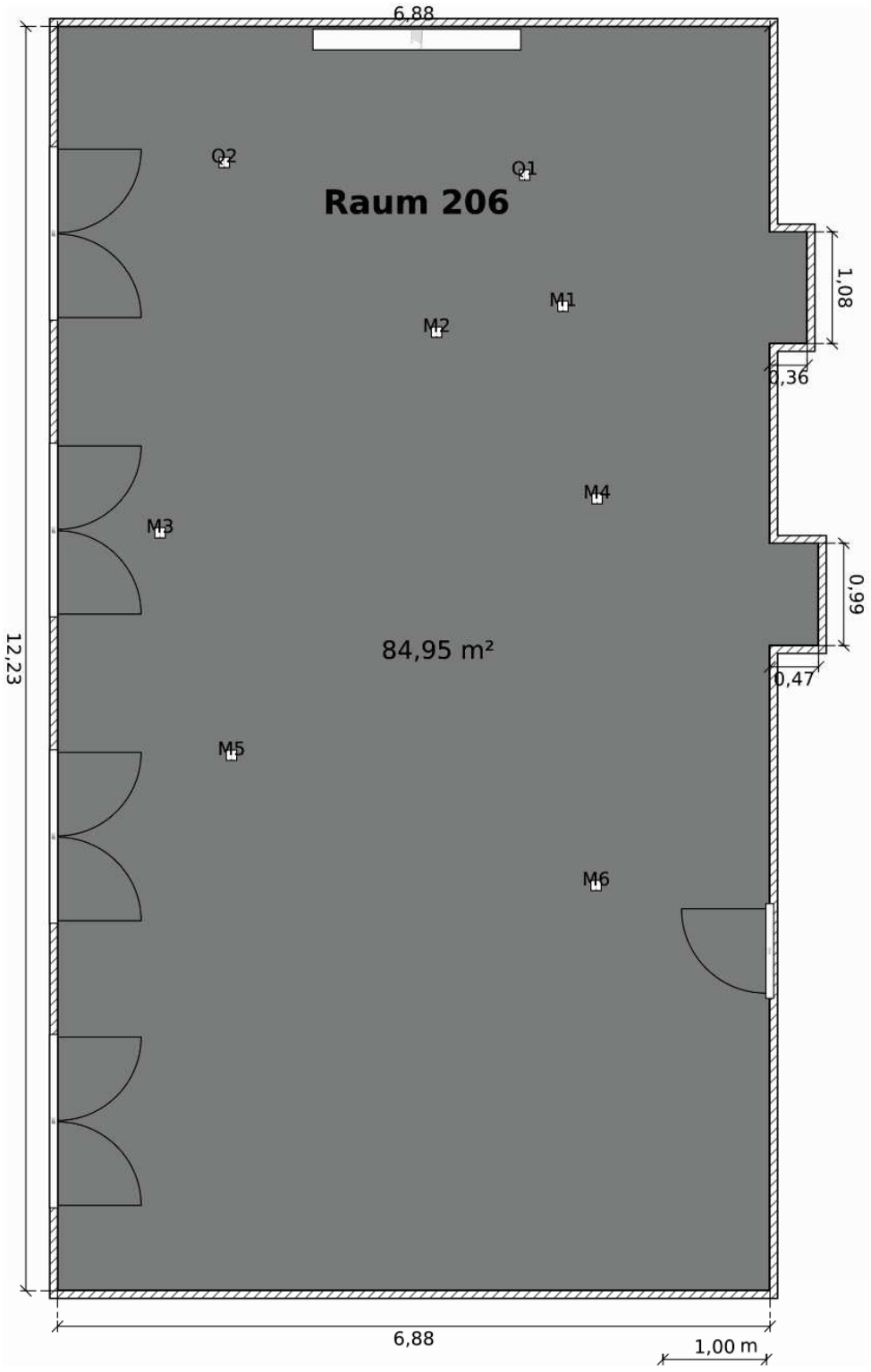


Abbildung A.25: Raumskizze mit Messpositionen

A.5.3 Nachhallzeit

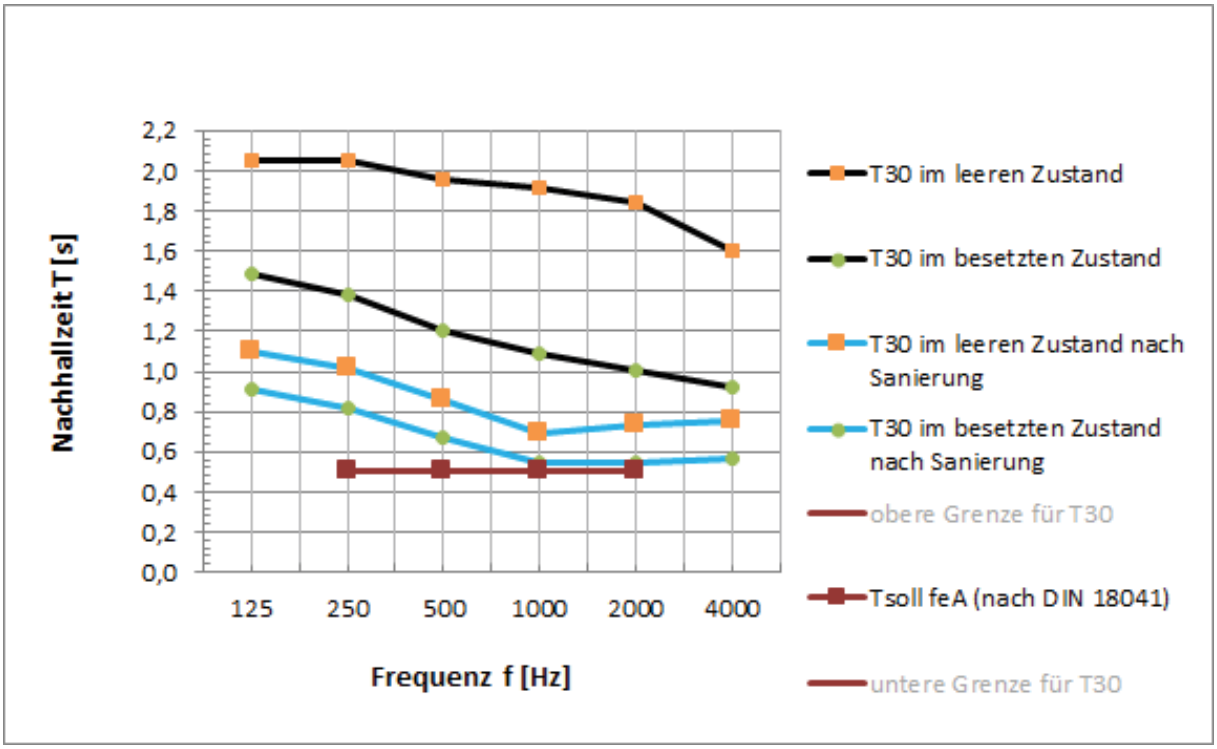


Abbildung A.26: Nachhallzeit T30 vor und nach der Sanierung inkl. simulierter Besetzung

Nachhallzeit im leeren Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	2,056	2,056	1,958	1,914	1,843	1,601		1,97

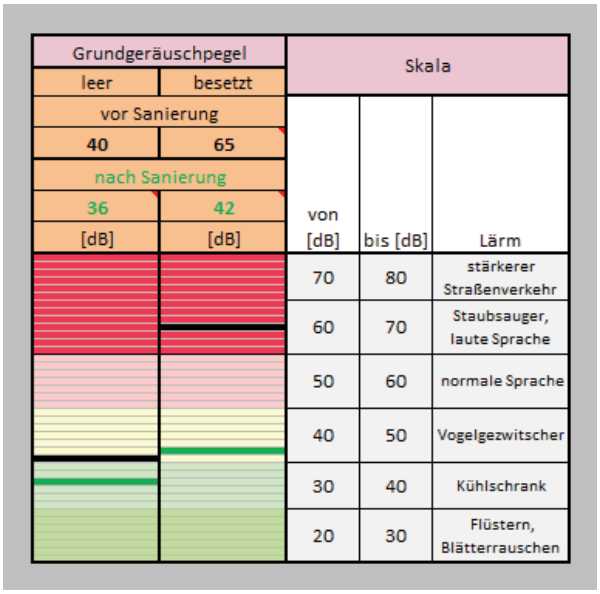
Nachhallzeit im besetzten Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,485	1,377	1,201	1,087	1,001	0,925		1,23

Nachhallzeit im leeren Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,105	1,017	0,863	0,697	0,733	0,758		0,88

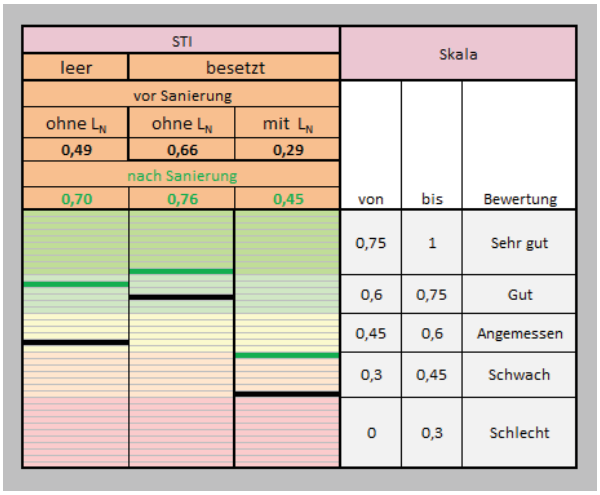
Nachhallzeit im besetzten Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	0,916	0,818	0,675	0,546	0,550	0,563		0,70

Abbildung A.27: Tabelle der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung Abbildung A.26

A.5.4 Raumakustische Kennwerte

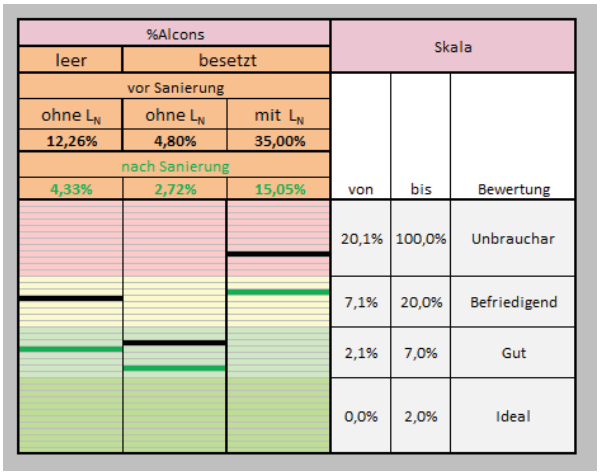


(a) Grundgeräuschpegel, leer und besetzt, vor und nach der Sanierung

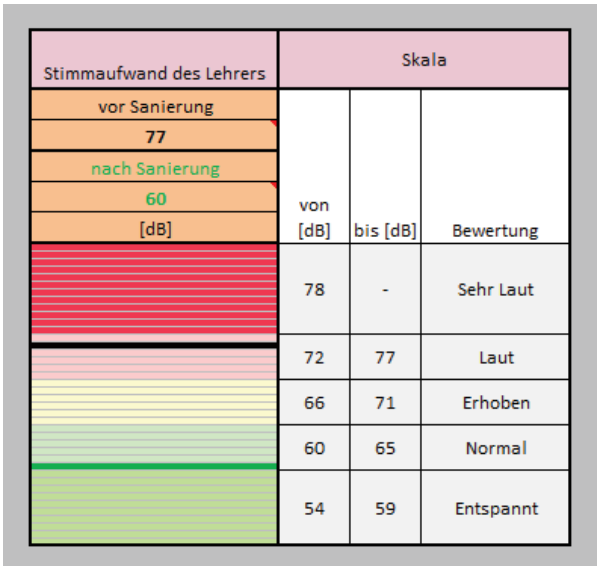


(b) STI Auswertung des Raumes 206

Abbildung A.28: Grundgeräuschpegel und STI



(a) Al_{cons}-Auswertung des Raumes 206



(b) Stimmaufwand des Lehrers für besetzten Zustand

Abbildung A.29: Al_{cons} und Stimmaufwand

A.6 Akustisches Datenblatt des Raumes 207

A.6.1 Beschreibung und Raumdaten

Es handelt sich um einen Klassenraum im 2. Obergeschoss des Bundesrealgymnasiums Kepler, in der Keplerstraße 1 8020 Graz, mit folgenden Eckdaten:

Raumhöhe:	3,83 m
Raumlänge:	9,15 m
Raumbreite:	7,32 m
Volumen:	247,64 m^3
max. Schüleranzahl:	27
saniert nach:	Variante 3

Tabelle A.20: Raumdaten

Abbildung A.30: Raum 207

Anmerkung: der Raum weicht in seiner Geometrie durch die Wandnische mit Säulen an der Türwand von den restlichen Klassenräumen ab (siehe Abbildung A.31). die Wand in der Nische besteht außerdem nicht aus Mauerwerk wie die restlichen Wände, sondern aus Gipskartonplatten (die den Raum akustisch nur unzureichend vom Gang dahinter trennen).

A.6.2 Messungen

Angaben zu den Messungen

Messnorm:	Önorm EN ISO 3382
Anzahl der Mikrofonpositionen:	6
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Messsignal:	log. Sinussweep 256k Samples @ 48 kHz
Temperatur und Luftfeuchte:	vor: 19 $°C$, 48 % nach: 20,6 $°C$, 41,8 %
Datum:	vor: 18.11.2014 nach: 26.02.2015

Tabelle A.21: Zu den Messungen

Raumskizze/Messpositionen

Bezeichnung	**Abstand zur Tafelwand**	**Abstand zur Türwand (rechts)**
Quellposition 1:	1,13 m	5,74 m
Quellposition 2:	1,37 m	3,05 m
Mikrofonposition 1:	2,56 m	4,56 m
Mikrofonposition 2:	2,66 m	1,13 m
Mikrofonposition 3:	3,64 m	5,89 m
Mikrofonposition 4:	4,27 m	2,23 m
Mikrofonposition 5:	6,26 m	5,23 m
Mikrofonposition 6:	7,46 m	1,57 m

Tabelle A.22: Messpositionen (Messung vor der Sanierung)

Bezeichnung	**Abstand zur Tafelwand**	**Abstand zur Türwand (rechts)**
Quellposition 1:	1,13 m	5,74 m
Quellposition 2:	1,37 m	3,05 m
Mikrofonposition 1:	2,56 m	4,56 m
Mikrofonposition 2:	2,66 m	1,13 m
Mikrofonposition 3:	3,66 m	5,90 m
Mikrofonposition 4:	4,27 m	2,23 m
Mikrofonposition 5:	6,26 m	5,23 m
Mikrofonposition 6:	7,46 m	1,57 m

Tabelle A.23: Messpositionen (Messung nach der Sanierung)

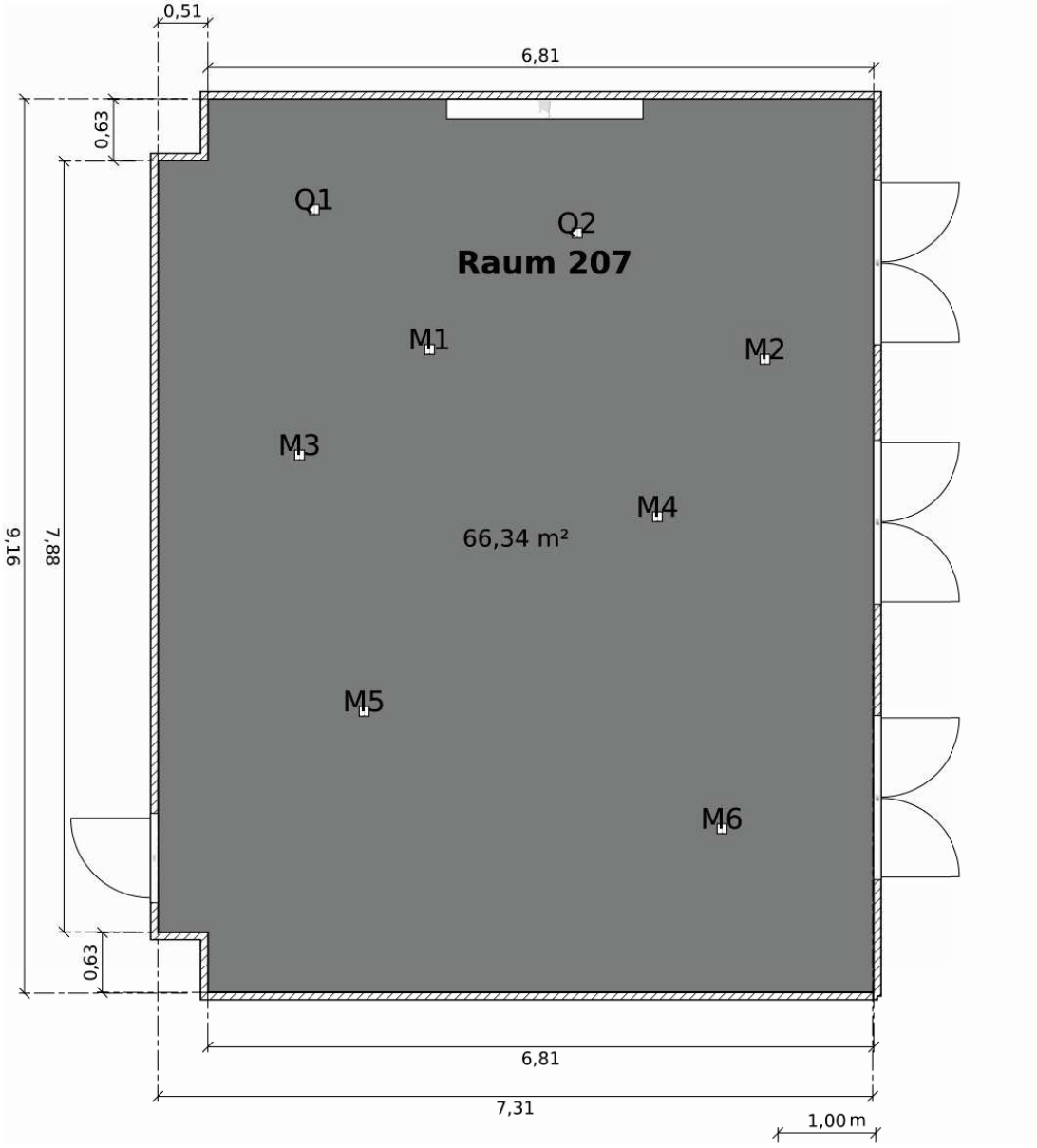


Abbildung A.31: Raumskizze mit Messpositionen

A.6.3 Nachhallzeit

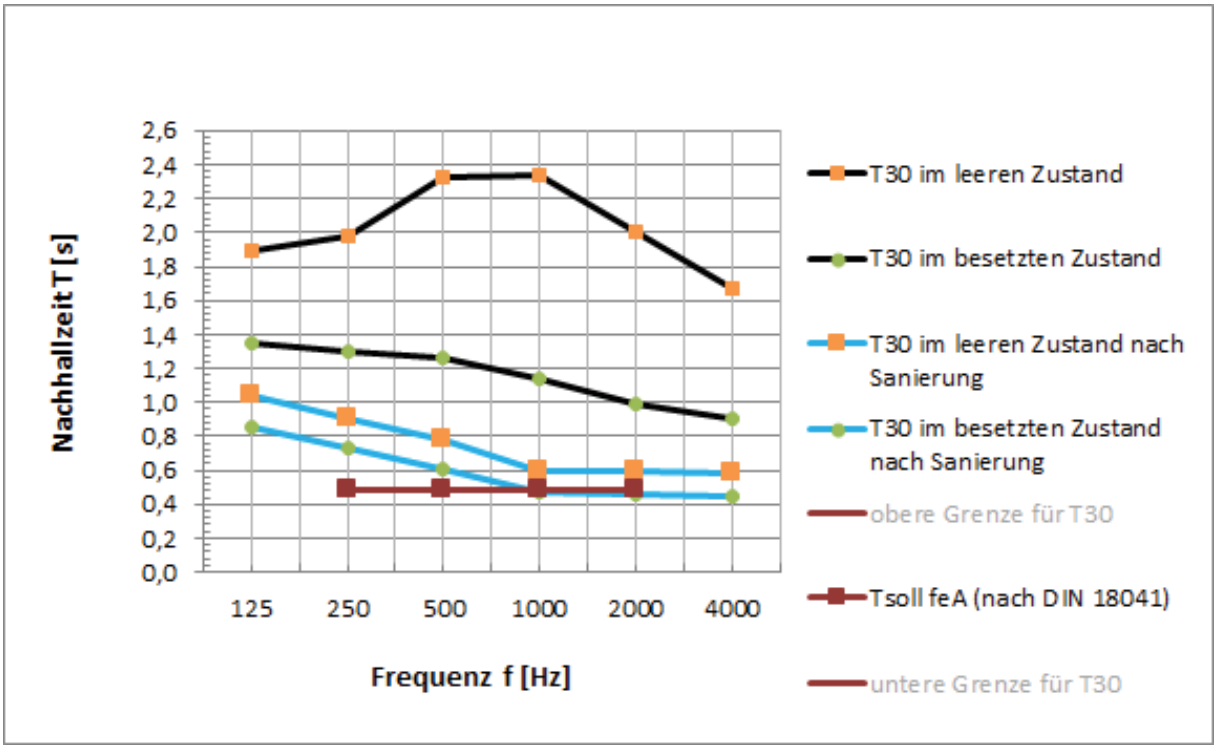


Abbildung A.32: Nachhallzeit T30 vor und nach der Sanierung inkl. simulierter Besetzung

Nachhallzeit im leeren Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,887	1,985	2,323	2,334	2,002	1,666		2,11

Nachhallzeit im besetzten Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,353	1,295	1,266	1,145	0,990	0,900		1,21

Nachhallzeit im leeren Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,039	0,909	0,779	0,595	0,593	0,581		0,78

Nachhallzeit im besetzten Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	0,853	0,731	0,609	0,470	0,455	0,448		0,62

Abbildung A.33: Tabelle der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung Abbildung A.32

A.6.4 Raumakustische Kennwerte

Grundgeräuschpegel		Skala		
leer	besetzt			
vor Sanierung				
40	65			
nach Sanierung				
36	38	von [dB]	bis [dB]	Lärm
[dB]	[dB]			
		70	80	stärkerer Straßenverkehr
		60	70	Staubsauger, laute Sprache
		50	60	normale Sprache
		40	50	Vogelgezwitscher
		30	40	Kühlschrank
		20	30	Flüstern, Blätterrauschen

(a) Grundgeräuschpegel, leer und besetzt, vor und nach der Sanierung

STI			Skala		
leer	besetzt				
vor Sanierung					
ohne L_N	ohne L_N	mit L_N			
0,47	0,67	0,30			
nach Sanierung					
0,73	0,79	0,48	von	bis	Bewertung
			0,75	1	Sehr gut
			0,6	0,75	Gut
			0,45	0,6	Angemessen
			0,3	0,45	Schwach
			0	0,3	Schlecht

(b) STI Auswertung des Raumes 207

Abbildung A.34: Grundgeräuschpegel und STI

%Alcons			Skala		
leer	besetzt				
vor Sanierung					
ohne L_N	ohne L_N	mit L_N			
13,33%	4,40%	33,94%			
nach Sanierung					
3,81%	2,41%	12,58%	von	bis	Bewertung
			20,1%	100,0%	Unbrauchar
			7,1%	20,0%	Befriedigend
			2,1%	7,0%	Gut
			0,0%	2,0%	Ideal

(a) Al_{cons}-Auswertung des Raumes 207

Stimmaufwand des Lehrers	Skala		
vor Sanierung			
77			
nach Sanierung			
58			
[dB]	von [dB]	bis [dB]	Bewertung
	78	-	Sehr Laut
	72	77	Laut
	66	71	Erhoben
	60	65	Normal
	54	59	Entspannt

(b) Stimmaufwand des Lehrers für besetzten Zustand

Abbildung A.35: Al_{cons} und Stimmaufwand

A.7 Akustisches Datenblatt des Raumes 210

A.7.1 Beschreibung und Raumdaten

Es handelt sich um einen Klassenraum im 2. Obergeschoss des Bundesrealgymnasiums Kepler, in der Keplerstraße 1 8020 Graz, mit folgenden Eckdaten:

Raumhöhe:	3,83 m
Raumlänge:	8,61 m
Raumbreite:	6,82 m
Volumen:	225,04 m^3
max. Schüleranzahl:	30
saniert nach:	Variante 3

Tabelle A.24: Raumdaten

Abbildung A.36: Raum 210

Anmerkung: Neben der üblichen Ausstattung ist auch ein Klavier (Flügel) vorhanden.

A.7.2 Messungen

Angaben zu den Messungen

Messnorm:	Önorm EN ISO 3382
Anzahl der Mikrofonpositionen:	6
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Messsignal:	log. Sinussweep 256k Samples @ 48 kHz
Temperatur und Luftfeuchte:	vor: 19 $°C$, 48 % nach: 21,1 $°C$, 45,6 %
Datum:	vor: 18.11.2014 nach: 7.12.2014

Tabelle A.25: Zu den Messungen

Raumskizze/Messpositionen

Bezeichnung	**Abstand zur Tafelwand**	**Abstand zur Türwand (rechts)**
Quellposition 1:	1,41 m	2,10 m
Quellposition 2:	1,14 m	5,02 m
Mikrofonposition 1:	3,50 m	5,27 m
Mikrofonposition 2:	3,52 m	2,95 m
Mikrofonposition 3:	5,22 m	5,29 m
Mikrofonposition 4:	5,06 m	2,83 m
Mikrofonposition 5:	6,92 m	4,48 m
Mikrofonposition 6:	6,46 m	1,07 m

Tabelle A.26: Messpositionen (Messung vor der Sanierung)

Bezeichnung	**Abstand zur Tafelwand**	**Abstand zur Türwand (rechts)**
Quellposition 1:	1,41 m	2,10 m
Quellposition 2:	1,14 m	5,05 m
Mikrofonposition 1:	3,50 m	5,27 m
Mikrofonposition 2:	3,52 m	3,95 m
Mikrofonposition 3:	5,22 m	5,29 m
Mikrofonposition 4:	5,10 m	2,03 m
Mikrofonposition 5:	6,92 m	4,84 m
Mikrofonposition 6:	6,40 m	1,10 m

Tabelle A.27: Messpositionen (Messung nach der Sanierung)

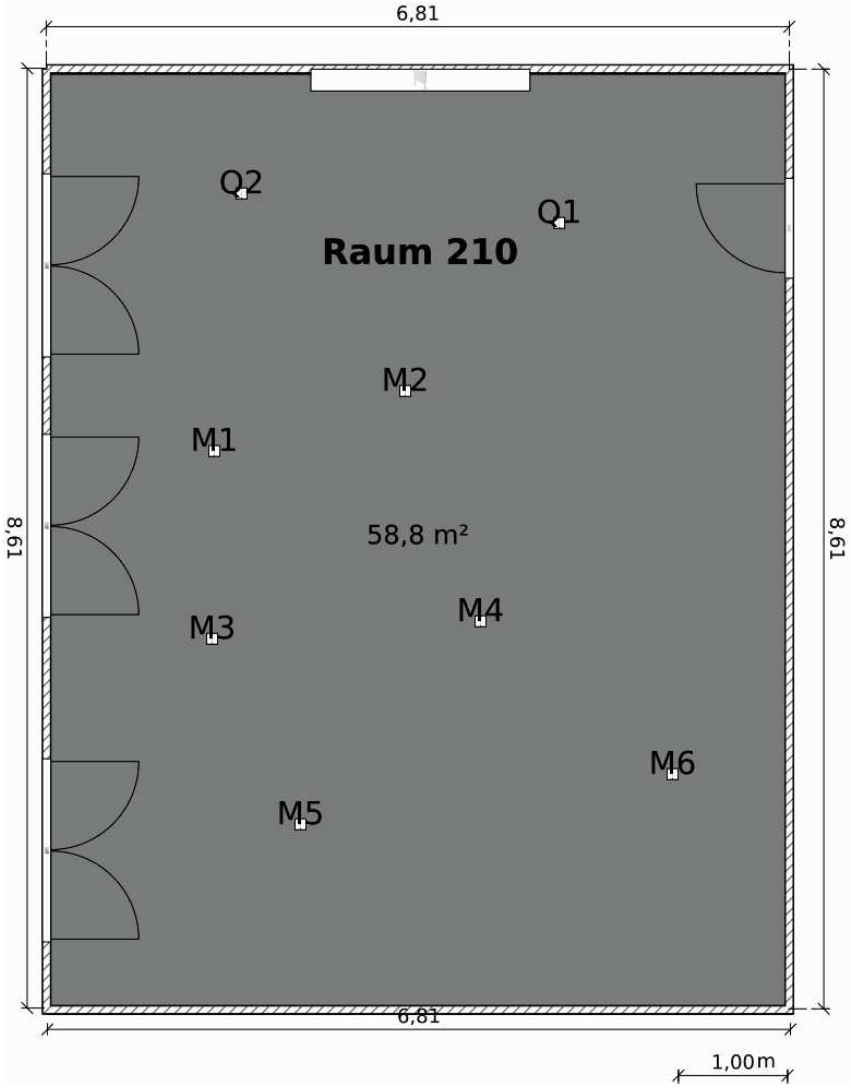


Abbildung A.37: Raumskizze mit Messpositionen

A.7.3 Nachhallzeit

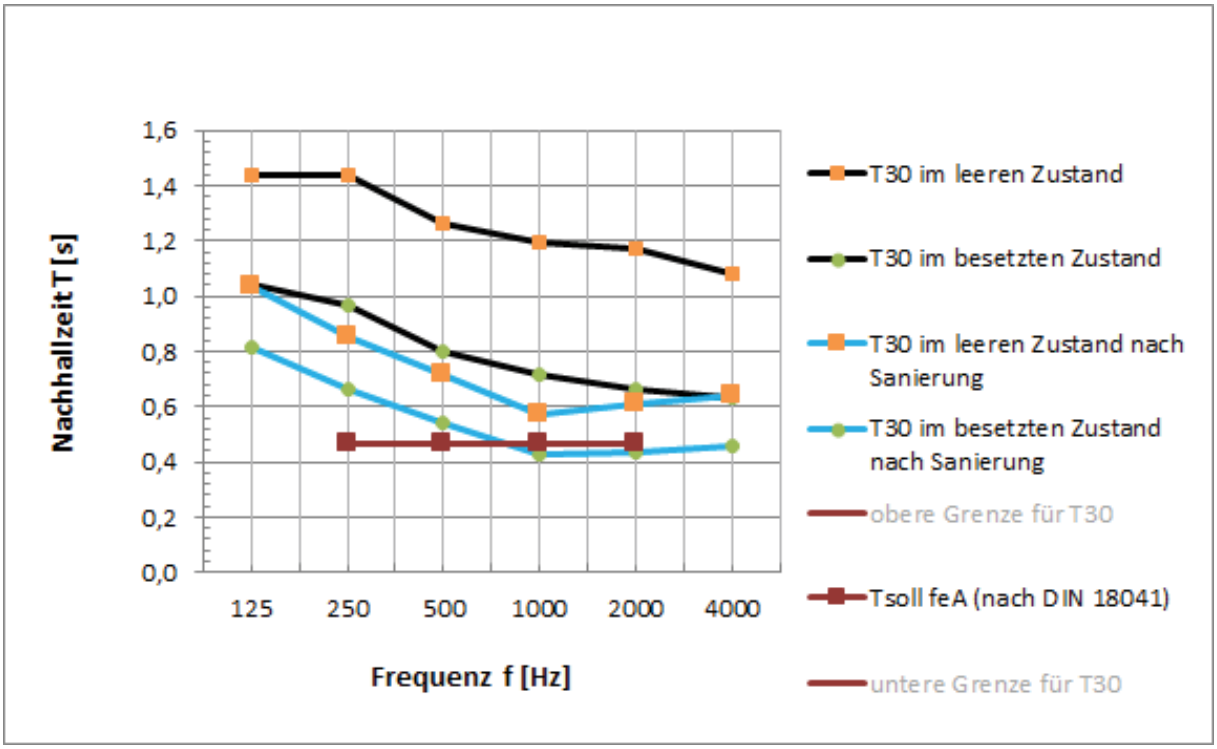


Abbildung A.38: Nachhallzeit T30 vor und nach der Sanierung inkl. simulierter Besetzung

Nachhallzeit im leeren Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,436	1,441	1,265	1,193	1,170	1,080		1,30

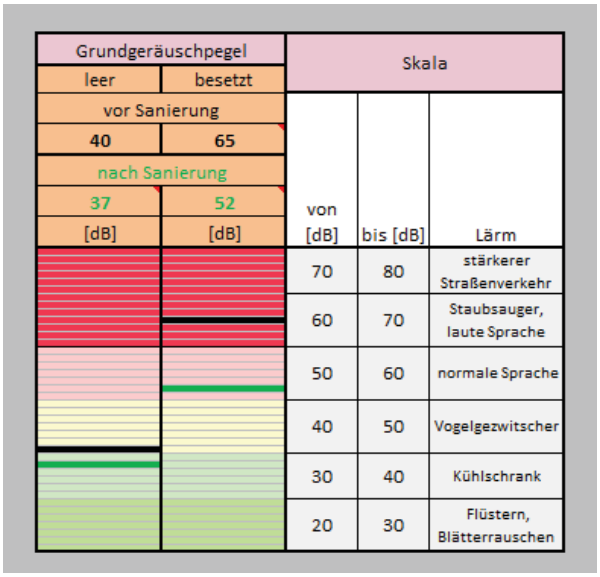
Nachhallzeit im besetzten Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,040	0,968	0,803	0,713	0,666	0,636		0,84

Nachhallzeit im leeren Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,034	0,853	0,720	0,568	0,607	0,642		0,76

Nachhallzeit im besetzten Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	0,812	0,662	0,542	0,430	0,436	0,454		0,58

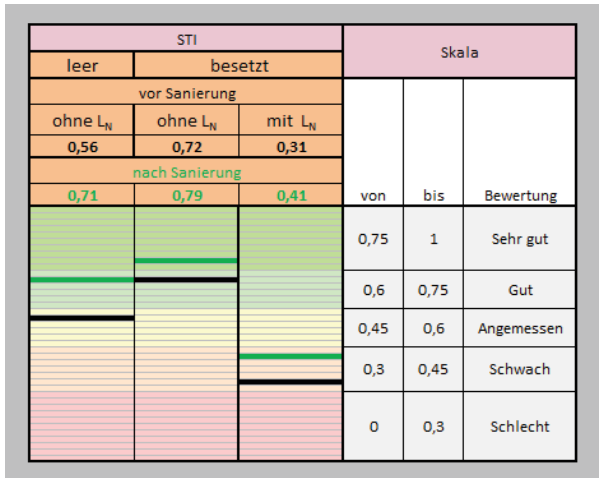
Abbildung A.39: Tabelle der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung Abbildung A.38

A.7.4 Raumakustische Kennwerte



Grundgeräuschpegel		Skala		
leer	besetzt			
vor Sanierung				
40	65			
nach Sanierung				
37	52	von [dB]	bis [dB]	Lärm
[dB]	[dB]			
		70	80	stärkerer Straßenverkehr
		60	70	Staubsauger, laute Sprache
		50	60	normale Sprache
		40	50	Vogelgezwitscher
		30	40	Kühlschrank
		20	30	Flüstern, Blätterrauschen

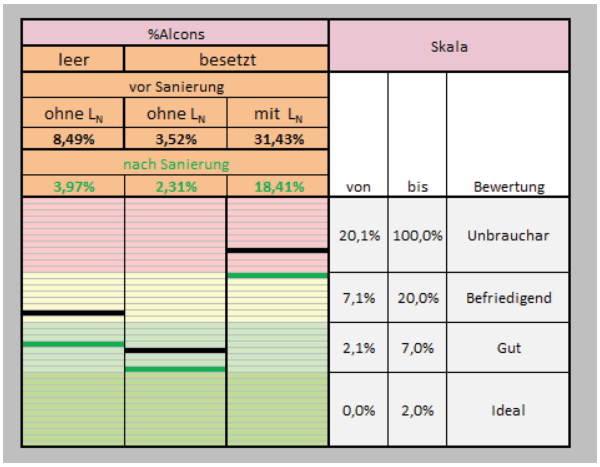
(a) Grundgeräuschpegel, leer und besetzt, vor und nach der Sanierung



STI			Skala		
leer	besetzt				
vor Sanierung					
ohne L_N	ohne L_N	mit L_N			
0,56	0,72	0,31			
nach Sanierung					
0,71	0,79	0,41	von	bis	Bewertung
			0,75	1	Sehr gut
			0,6	0,75	Gut
			0,45	0,6	Angemessen
			0,3	0,45	Schwach
			0	0,3	Schlecht

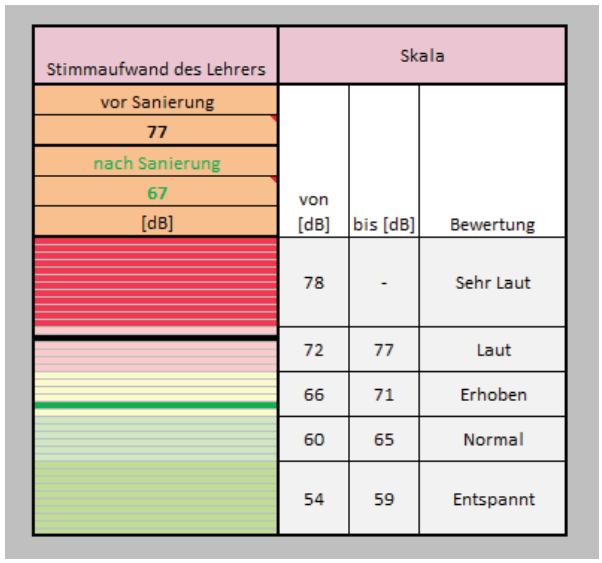
(b) STI Auswertung des Raumes 210

Abbildung A.40: Grundgeräuschpegel und STI



%Alcons			Skala		
leer	besetzt				
vor Sanierung					
ohne L_N	ohne L_N	mit L_N			
8,49%	3,52%	31,43%			
nach Sanierung					
3,97%	2,31%	18,41%	von	bis	Bewertung
			20,1%	100,0%	Unbrauchar
			7,1%	20,0%	Befriedigend
			2,1%	7,0%	Gut
			0,0%	2,0%	Ideal

(a) Al_{cons}-Auswertung des Raumes 210



Stimmaufwand des Lehrers	Skala		
vor Sanierung			
77			
nach Sanierung			
67	von [dB]	bis [dB]	Bewertung
[dB]			
	78	-	Sehr Laut
	72	77	Laut
	66	71	Erhoben
	60	65	Normal
	54	59	Entspannt

(b) Stimmaufwand des Lehrers für besetzten Zustand

Abbildung A.41: Al_{cons} und Stimmaufwand

A.8 Akustisches Datenblatt des Raumes 211

A.8.1 Beschreibung und Raumdaten

Es handelt sich um einen Klassenraum im 2. Obergeschoss des Bundesrealgymnasiums Kepler, in der Keplerstraße 1 8020 Graz, mit folgenden Eckdaten:

Raumhöhe:	3,82 m
Raumlänge:	9,38 m
Raumbreite:	6,83 m
Volumen:	242,76 m^3
max. Schüleranzahl:	32
saniert nach:	Variante 3

Tabelle A.28: Raumdaten

Abbildung A.42: Raum 211

Anmerkung: In diesem Raum wurden drei Raumimpulsantwort Messungen durchgeführt, da der Raum in zwei Schritten saniert wurde (die Lochplattenabsorber an der Türwand wurden nachträglich hinzugefügt). Detaillierte Messpositionen sind allerdings nur für die Vorhermessung und jene nach der Vollständigen Sanierung angeführt.

A.8.2 Messungen

Angaben zu den Messungen

Messnorm:	Önorm EN ISO 3382
Anzahl der Mikrofonpositionen:	6
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Messsignal:	log. Sinussweep 256k Samples @ 48 kHz
Temperatur und Luftfeuchte:	vor: 19 °C, 48 % nach: 19,7 °C, 49,1 %
Datum:	vor: 17.11.2014 zwischen: 21.11.2014 nach: 6.12.2014

Tabelle A.29: Zu den Messungen

Raumskizze/Messpositionen

Bezeichnung	**Abstand zur Tafelwand/Rückwand**	**Abstand zur Türwand (rechts)**
Quellposition 1:	7,93 m (Rückwand)	2,12 m
Quellposition 2:	1,23 m (Tafelwand)	5,22 m
Mikrofonposition 1:	6,18 m (Rückwand)	2,64 m
Mikrofonposition 2:	5,87 m (Kasten)	5,20 m
Mikrofonposition 3:	4,72 m	2,39 m
Mikrofonposition 4:	3,97 m (Kasten)	5,53 m
Mikrofonposition 5:	2,54 m (Kasten)	5,48 m
Mikrofonposition 6:	2,09 m (Rückwand)	1,56 m

Tabelle A.30: Messpositionen (Messung vor der Sanierung)

Bezeichnung	**Abstand zur Tafelwand/Rückwand**	**Abstand zur Türwand (rechts)**
Quellposition 1:	7,93 m	2,12 m
Quellposition 2:	1,20 m (Tafelwand)	5,30 m
Mikrofonposition 1:	6,20 m	2,60 m
Mikrofonposition 2:	5,90 m (zum Kasten)	5,20 m
Mikrofonposition 3:	4,70 m	2,39 m
Mikrofonposition 4:	4,00 m	5,50 m
Mikrofonposition 5:	2,50 m (zum Kasten)	5,50 m
Mikrofonposition 6:	2,00 m	1,90 m

Tabelle A.31: Messpositionen (Messung nach der Sanierung)

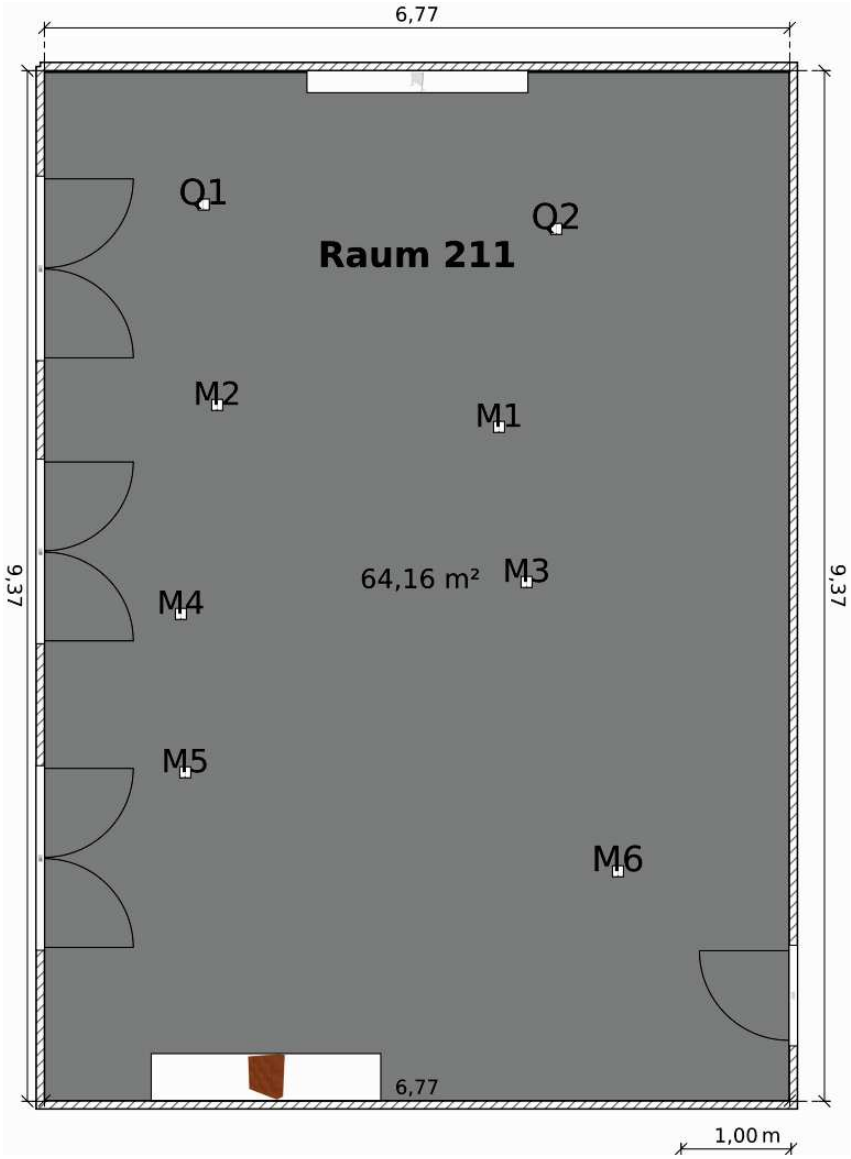


Abbildung A.43: Raumskizze mit Messpositionen

A.8.3 Nachhallzeit

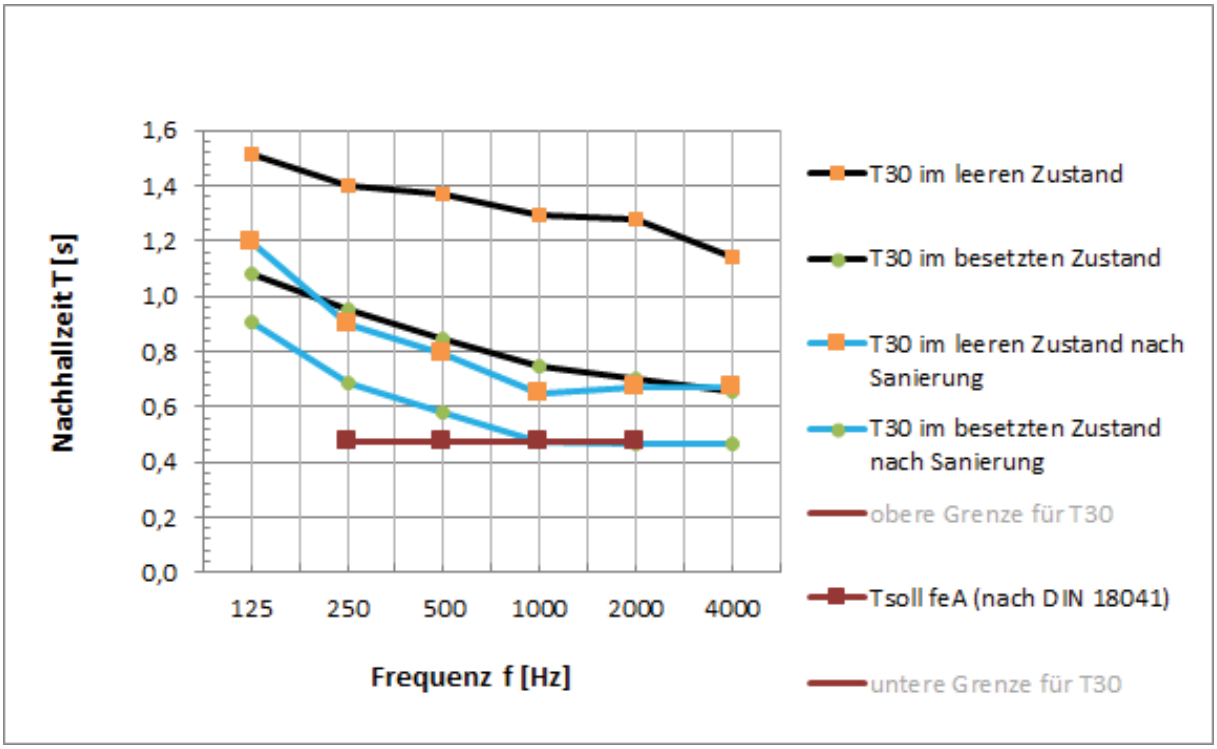


Abbildung A.44: Nachhallzeit T30 vor und nach der Sanierung inkl. simulierter Besetzung

Nachhallzeit im leeren Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,516	1,403	1,373	1,297	1,276	1,145		1,37

Nachhallzeit im besetzten Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,081	0,950	0,844	0,749	0,699	0,658		0,86

Nachhallzeit im leeren Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,192	0,900	0,792	0,645	0,668	0,670		0,84

Nachhallzeit im besetzten Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	0,905	0,689	0,582	0,473	0,466	0,467		0,62

Abbildung A.45: Tabelle der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung Abbildung A.44

A.8.4 Raumakustische Kennwerte

Grundgeräuschpegel		Skala		
leer	besetzt			
vor Sanierung				
40	65			
nach Sanierung				
38	52	von [dB]	bis [dB]	Lärm
[dB]	[dB]	70	80	stärkerer Straßenverkehr
		60	70	Staubsauger, laute Sprache
		50	60	normale Sprache
		40	50	Vogelgezwitscher
		30	40	Kühlschrank
		20	30	Flüstern, Blätterrauschen

(a) Grundgeräuschpegel, leer und besetzt, vor und nach der Sanierung

STI			Skala		
leer	besetzt				
vor Sanierung					
ohne L_N	ohne L_N	mit L_N			
0,55	0,72	0,31			
nach Sanierung					
0,71	0,80	0,42	von	bis	Bewertung
			0,75	1	Sehr gut
			0,6	0,75	Gut
			0,45	0,6	Angemessen
			0,3	0,45	Schwach
			0	0,3	Schlecht

(b) STI Auswertung des Raumes 211

Abbildung A.46: Grundgeräuschpegel und STI

%Alcons			Skala		
leer	besetzt				
vor Sanierung					
ohne L_N	ohne L_N	mit L_N			
8,85%	3,51%	31,39%			
nach Sanierung					
4,03%	2,22%	17,85%	von	bis	Bewertung
			20,1%	100,0%	Unbrauchar
			7,1%	20,0%	Befriedigend
			2,1%	7,0%	Gut
			0,0%	2,0%	Ideal

(a) Al_{cons}-Auswertung des Raumes 211

Stimmaufwand des Lehrers	Skala		
vor Sanierung			
77			
nach Sanierung			
67	von [dB]	bis [dB]	Bewertung
[dB]	78	-	Sehr Laut
	72	77	Laut
	66	71	Erhoben
	60	65	Normal
	54	59	Entspannt

(b) Stimmaufwand des Lehrers für besetzten Zustand

Abbildung A.47: Al_{cons} und Stimmaufwand

A.9 Akustisches Datenblatt des Raumes 212

A.9.1 Beschreibung und Raumdaten

Es handelt sich um einen Klassenraum im 2. Obergeschoss des Bundesrealgymnasiums Kepler, in der Keplerstraße 1 8020 Graz, mit folgenden Eckdaten:

Raumhöhe:	3,84 m
Raumlänge:	10,2 m
Raumbreite:	6,59 m
Volumen:	247,73 m^3
max. Schüleranzahl:	25
saniert nach:	Variante 2

Tabelle A.32: Raumdaten

Abbildung A.48: Raum 212

A.9.2 Messungen

Da dieser Raum vor Beginn der Messungen für diese Bachelorseminararbeit schon saniert war, gibt es hier keine Messung vor der Sanierung. Aufgrund der sehr ähnlichen Raumabmessungen können jedoch sehr ähnliche Werte wie in Raum 205 angenommen werden. Um eine Auswertung der Kennwerte durch IntKlaSim zu ermöglichen wurde auf die Messung vor der Sanierung aus Raum 205 zurückgegriffen. Die Nachhallzeitkurven aus Raum 205 sind in Abbildung A.50 grau eingezeichnet.

Angaben zu den Messungen

Messnorm:	Önorm EN ISO 3382
Anzahl der Mikrofonpositionen:	6
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Messsignal:	log. Sinussweep 256k Samples @ 48 kHz
Temperatur und Luftfeuchte:	nach: 19,8 $°C$, 50,9 %
Datum:	nach: 27.11.2014

Tabelle A.33: Zu den Messungen

Raumskizze/Messpositionen

Bezeichnung	**Abstand zur Tafelwand**	**Abstand zur Türwand (rechts)**
Quellposition 1:	1,25 m	4,42 m
Quellposition 2:	1,80 m	2,09 m
Mikrofonposition 1:	3,63 m	5,05 m
Mikrofonposition 2:	3,38 m	1,41 m
Mikrofonposition 3:	5,23 m	4,27 m
Mikrofonposition 4:	5,05 m	1,07 m
Mikrofonposition 5:	8,70 m	5,05 m
Mikrofonposition 6:	7,94 m	1,71 m

Tabelle A.34: Messpositionen (Messung nach der Sanierung)

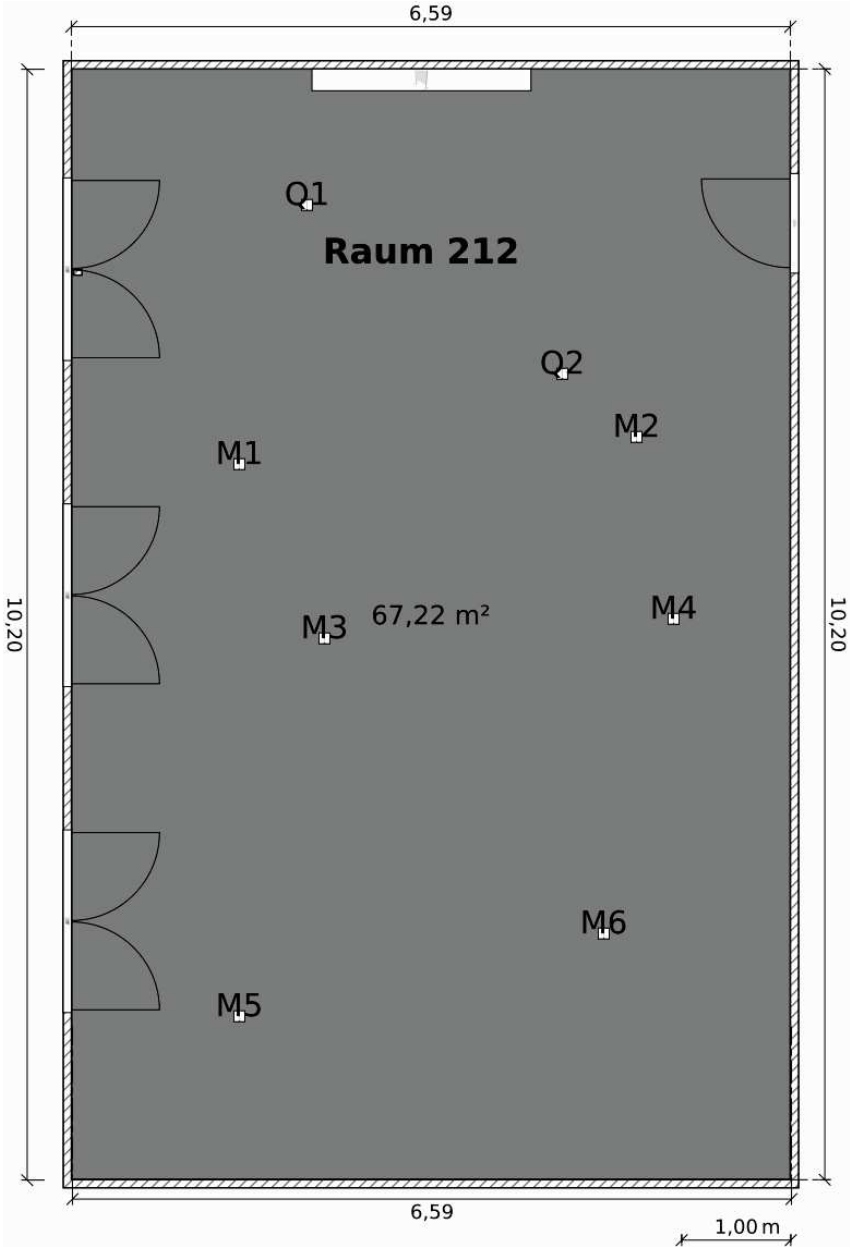


Abbildung A.49: Raumskizze mit Messpositionen

A.9.3 Nachhallzeit

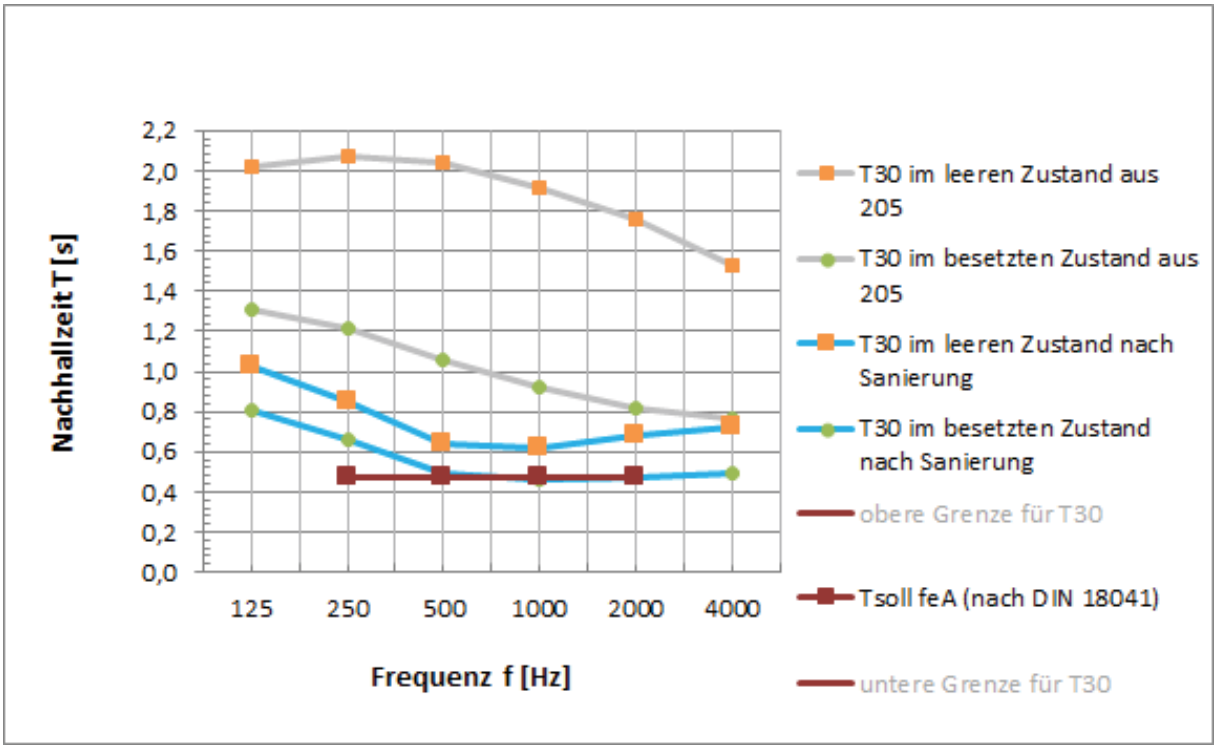


Abbildung A.50: Nachhallzeit T30 vor und nach der Sanierung inkl. simulierter Besetzung

Nachhallzeit im leeren Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	2,017	2,068	2,038	1,912	1,756	1,528		1,96

Nachhallzeit im besetzten Zustand vor Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,314	1,214	1,056	0,920	0,822	0,768		1,07

Nachhallzeit im leeren Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,026	0,848	0,642	0,617	0,679	0,722		0,76

Nachhallzeit im besetzten Zustand nach Sanierung							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	0,806	0,658	0,496	0,457	0,472	0,492		0,58

Abbildung A.51: Tabelle der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung Abbildung A.50

A.9.4 Raumakustische Kennwerte

Grundgeräuschpegel		Skala		
leer	besetzt			
vor Sanierung				
40	65			
nach Sanierung				
36	40	von [dB]	bis [dB]	Lärm
[dB]	[dB]	70	80	stärkerer Straßenverkehr
		60	70	Staubsauger, laute Sprache
		50	60	normale Sprache
		40	50	Vogelgezwitscher
		30	40	Kühlschrank
		20	30	Flüstern, Blätterrauschen

(a) Grundgeräuschpegel, leer und besetzt, vor und nach der Sanierung

STI			Skala		
leer	besetzt				
vor Sanierung					
ohne L_N	ohne L_N	mit L_N			
0,00	0,00	#ZAHL!			
nach Sanierung					
0,73	0,82	0,49	von	bis	Bewertung
			0,75	1	Sehr gut
			0,6	0,75	Gut
			0,45	0,6	Angemessen
			0,3	0,45	Schwach
			0	0,3	Schlecht

(b) STI Auswertung des Raumes 212

Abbildung A.52: Grundgeräuschpegel und STI

%Alcons			Skala		
leer	besetzt				
vor Sanierung					
ohne L_N	ohne L_N	mit L_N			
0,00%	0,00%	#ZAHL!			
nach Sanierung					
3,50%	2,01%	12,04%	von	bis	Bewertung
			20,1%	100,0%	Unbrauchar
			7,1%	20,0%	Befriedigend
			2,1%	7,0%	Gut
			0,0%	2,0%	Ideal

(a) Al_{cons}-Auswertung des Raumes 212

Stimmaufwand des Lehrers	Skala		
vor Sanierung			
77			
nach Sanierung			
59	von [dB]	bis [dB]	Bewertung
[dB]	78	-	Sehr Laut
	72	77	Laut
	66	71	Erhoben
	60	65	Normal
	54	59	Entspannt

(b) Stimmaufwand des Lehrers für besetzten Zustand

Abbildung A.53: Al_{cons} und Stimmaufwand

B
Exposé

Es folgt das 15-seitige Exposé zu den ersten Messergebnissen nach der Sanierung im Raum 211, wie es dem BRG Kepler am 25. November 2014 vorgelegt wurde.

Bestandsaufnahme der akustischen Sanierung der Räume 012 und 211 am BRG Kepler

Verfasst von:

Rüdiger Fasching,
Korbinian Wegler

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation

Elektro- und Raumakustik-Seminar

Betreuer: Dipl.-Ing. Balint, Ao.Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr. Graber

Graz, 25. November 2014

1 Raum 211

Im Zuge der raumakustischen Sanierung am BRG Kepler wurden, im Rahmen einer Bachelorseminararbeit, im Raum 211, vor und nach der Sanierung, raumakustische Messungen durchgeführt. Daraus ergaben sich nachfolgende Messwerte. Die Messungen wurden im Excel-Auswertungstool IntKlaSim (Interdisziplinäres Klassenraumakustik Simulationstool) aufbereitet, welches am SPSC entwickelt wurde.

1.1 Raumdaten

Aus den Raumdaten (Größe und Art des Raumes) ergibt sich eine zu erwartende und eine ideale Raumnachhallzeit. Diese sind im ersten Graphen in Abbildung 1 zu sehen.

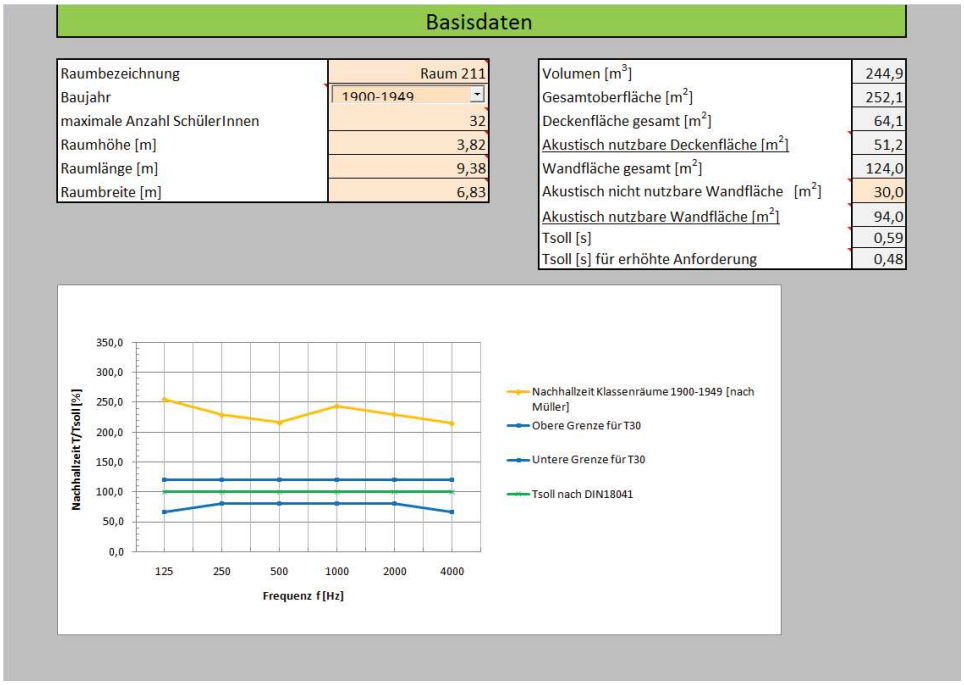


Abbildung 1: Basisdaten des Raumes 211 aus IntKlaSim

1.2 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit ist ein zentrales Raumgütemaß und sollte sich für einen Klassenraum dieser Größe im Bereich von $0,59s$, bei Nutzung unter erhöhter Anforderung (Fremdsprachenunterricht) $0,48s$ befinden. Hier ist immer von erhöhten Anforderungen auszugehen, die Nachhallzeit soll also unter der eingezeichneten Gerade liegen.

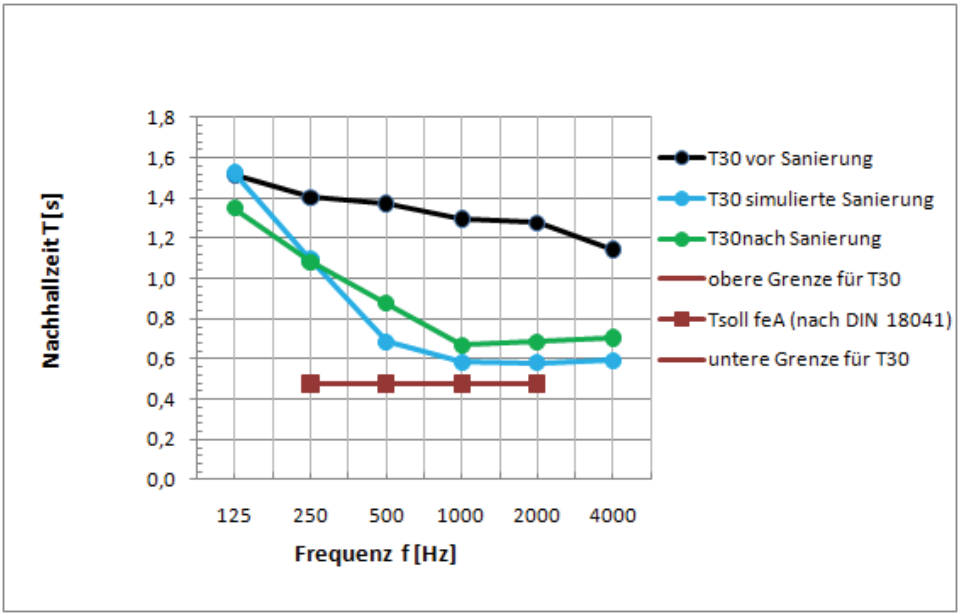


Abbildung 2: Nachhallzeit des Raumes 211 im *unbesetzten* Zustand

In Abbildung 2 leicht ersichtlich, ist vor der Sanierung, die Nachhallzeit im gesamten Frequenzbereich zu hoch. Die gezeigte hellblaue Kurve ist mit Hilfe der Angaben des Herstellers für die verwendeten Deckenabsorber simuliert. Bei der grünen Kurve handelt es sich um die tatsächlichen Messergebnisse (inklusive der Lochplattenabsorber an der Rückwand). Nach der Sanierung, zeigt sich, dass die verbauten Absorber nicht ganz die geforderte Nachhallzeit möglich machen. Für niedrigere Frequenzen scheint noch größerer Handlungsbedarf zu bestehen. Da die Messungen im unbesetzten Zustand durchgeführt wurden, kann die reale Wirkung der Absorber im besetzten Zustand zumindest simuliert werden (siehe Abbildung 3).

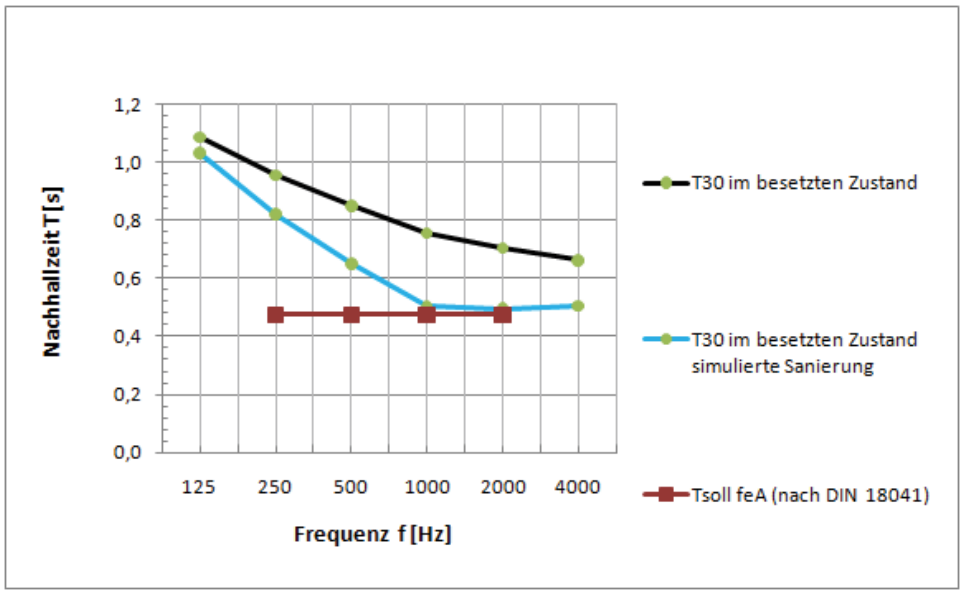


Abbildung 3: Nachhallzeit des Raumes 211 im *besetzten* Zustand

Die blaue Kurve zeigt die Simulation des besetzten Zustandes aus den tatsächlichen (im unbesetzten Zustand) gemessenen Daten. Die schwarze Kurve beinhaltet die Simulation des besetzten Zustandes vor der Sanierung. Es zeigt sich, dass auch im besetzten Zustand die Nachhallzeit im gesamten Frequenzbereich noch über dem Sollwert liegt und sich auch nur bei sehr hohen Frequenzen diesem annähert.

1.3 Grundgeräuschpegel

Der Grundgeräuschpegel gibt einen Anhaltspunkt für die Lärmbelastung in einem Klassenraum. Die angegebenen Werte gehen von sich ruhig verhaltenden SchülerInnen aus.

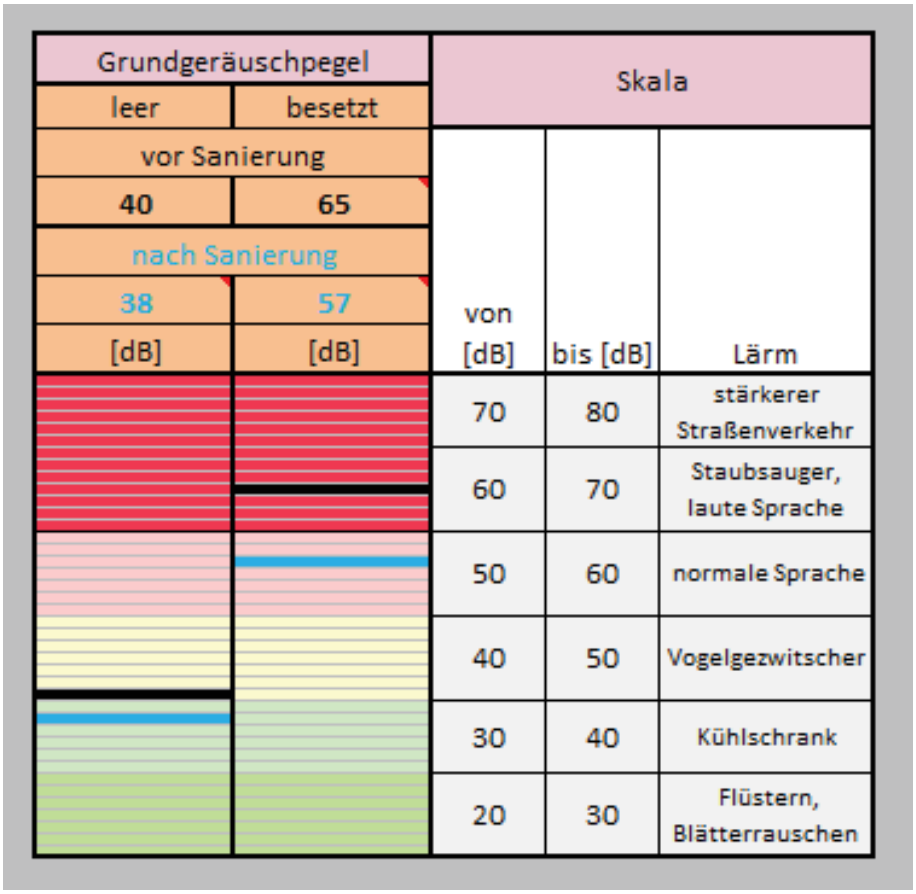


Abbildung 4: Grundgeräuschpegel, leer und besetzt, vor und nach der Sanierung

Hier ist am besetzten Zustand bereits zu erkennen, dass sich die Geräuschkulisse im Klassenraum auch nach der Sanierung mindestens im Bereich von normaler Sprache befinden wird. Der/die Lehrende muss sich also immer gegen ein Geräusch, das so laut wie normale Sprache ist, durchsetzen.

1.4 Sprachübertragungsindex (STI)

Der Sprachübertragungsindex klassifiziert die Sprachverständlichkeit. Bei einem STI von 1 ist jedes Wort perfekt verständlich. Ein Wert über 0,75 wäre für einen Unterrichtsraum wünschenswert. Die angegebenen Werte sind einmal inklusive der Dämpfungswerte durch den besetzten Zustand, aber ohne die Geräuschkulisse durch Bewegung (mittlere Spalte) und einmal mit berücksichtigter Geräuschkulisse (rechte Spalte).

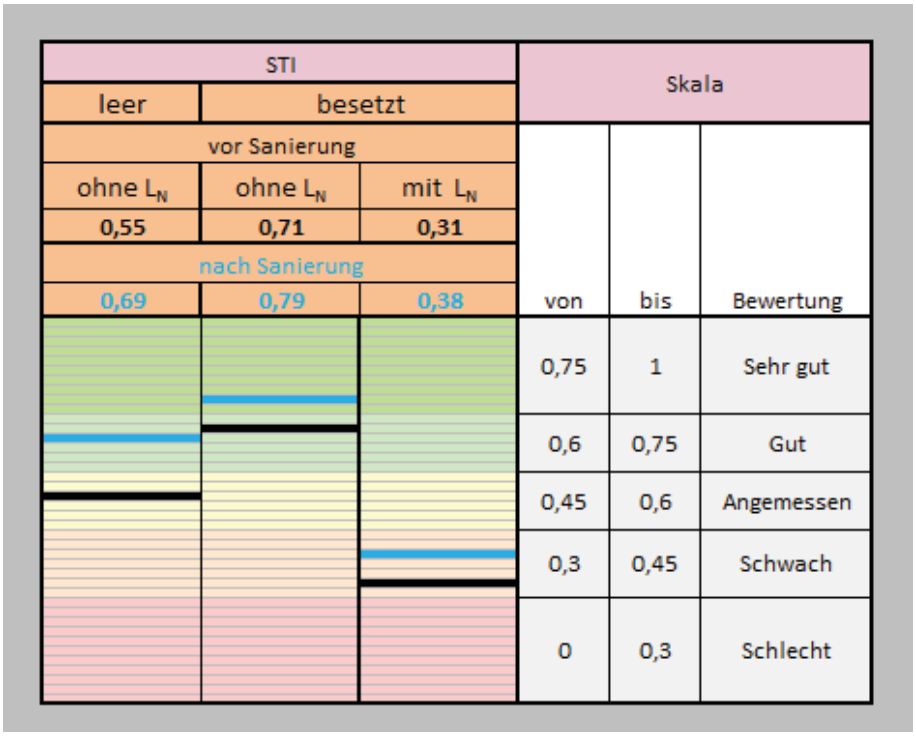


Abbildung 5: STI-Auswertung des Raumes 211

Die erreichten Konditionen für den realen Zustand (rechte Spalte) zeigen einen schwachen Sprachübertragungsindex.

1.5 Artikulationsverlust (Al_{cons})

Der Al_{cons} beschreibt den Artikulationsverlust der Konsonanten. Diese sind besonders wichtig für die Verständlichkeit der Sprache. Der Al_{cons} sollte für ideale Verständlichkeit kleiner als 2% sein. Die angegebenen Werte sind einmal inklusive der Dämpfungswerte durch den besetzten Zustand, aber ohne die Geräuschkulisse durch Bewegung (mittlere Spalte) und einmal mit berücksichtigter Geräuschkulisse (rechte Spalte).

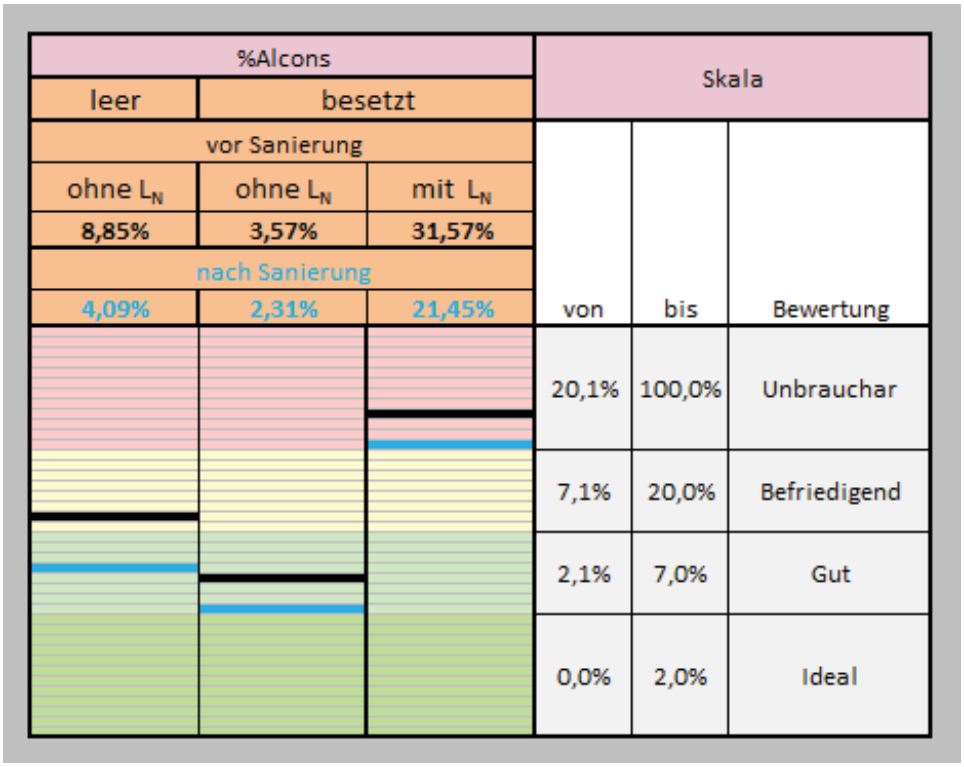


Abbildung 6: Al_{cons}-Auswertung des Raumes 211

In Abbildung 6 ist erkennbar, dass sich der Al_{cons} für den besetzten Zustand im unbrauchbaren Bereich befindet.

1.6 Stimmaufwand des Lehrers

Der Stimmaufwand des Lehrers gibt Rückschlüsse auf die notwendige Anstrengung um sich im Klassenraum verständlich zu machen.

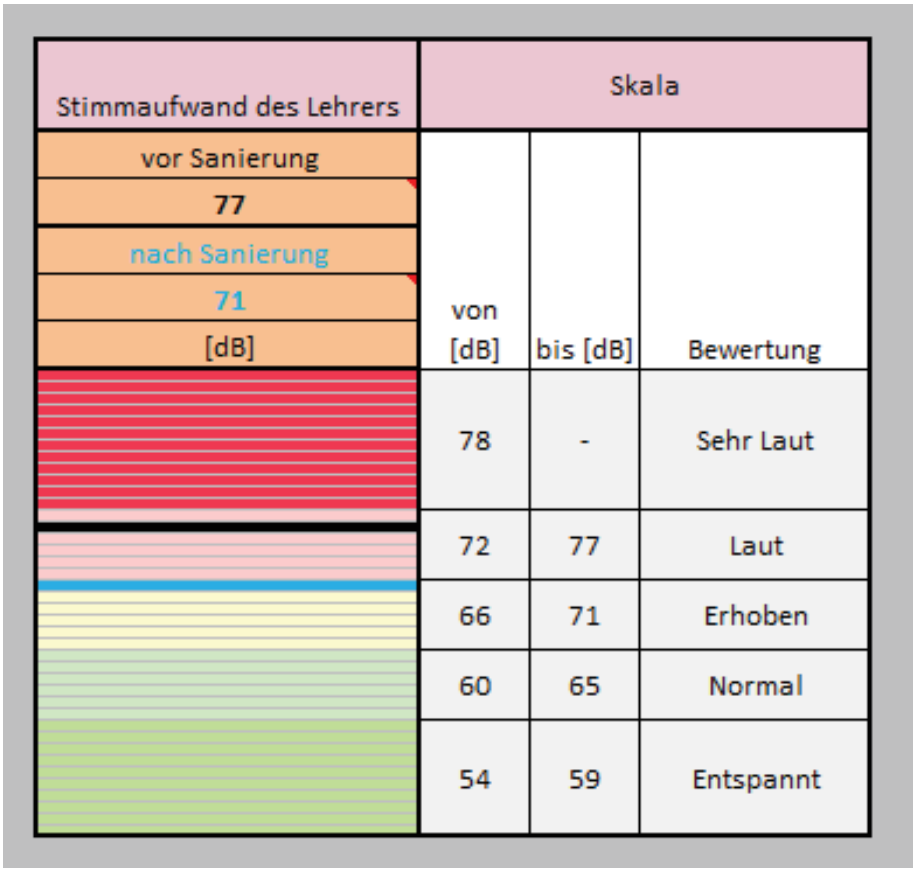


Abbildung 7: Stimmaufwand des Lehrers für besetzten Zustand

Die Stimme muss zumindest erhoben, wenn nicht sogar laut sein, um für klare Verständlichkeit zu sorgen.

2 Raum 012

Im Zuge der raumakustischen Sanierung am BRG Kepler wurden, im Rahmen einer Bachelorseminararbeit, im Raum 012 vor und nach der Sanierung raumakustische Messungen durchgeführt. Daraus ergaben sich nachfolgende Messwerte. Die Messungen wurden im Excel-Auswertungstool IntKlaSim (Interdisziplinäres Klassenraumakustik Simulationstool) aufbereitet, welches am SPSC entwickelt wurde.

2.1 Raumdaten

Aus den Raumdaten (Größe und Art des Raumes) ergibt sich eine zu erwartende und eine ideale Raumnachhallzeit. Diese sind im ersten Graphen in Abbildung 8 zu sehen.

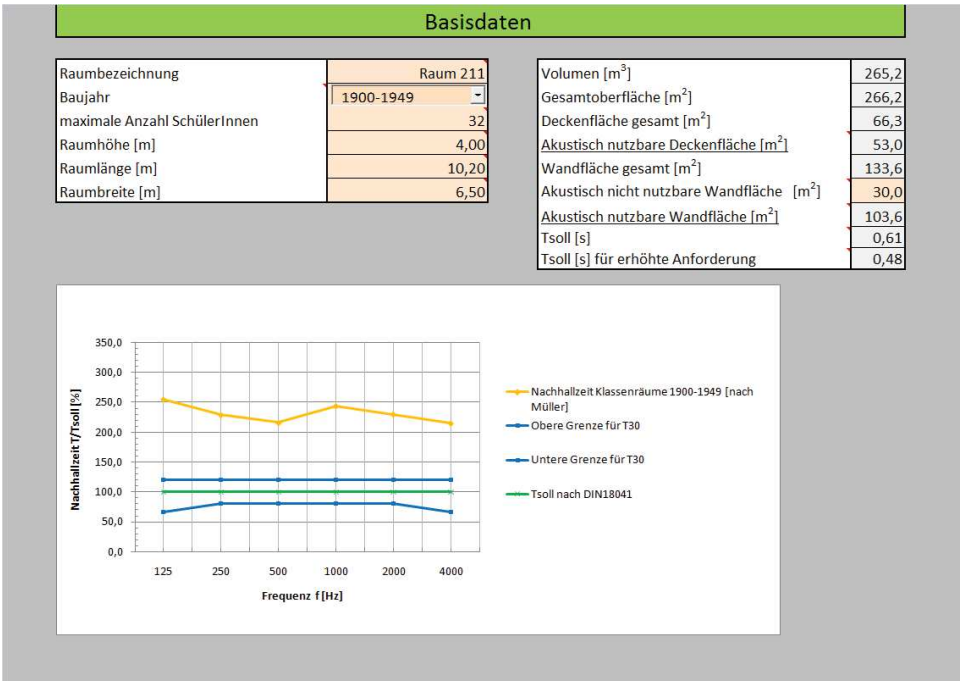


Abbildung 8: Basisdaten des Raumes 012 aus IntKlaSim

2.2 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit ist ein zentrales Raumgütemaß und sollte sich für einen Klassenraum dieser Größe im Bereich von $0,60s$, bei Nutzung unter erhöhter Anforderung (Fremdsprachenunterricht) unter $0,48s$ befinden. Hier ist immer von erhöhten Anforderungen auszugehen, die Nachhallzeit soll also unter der eingezeichneten Gerade liegen.

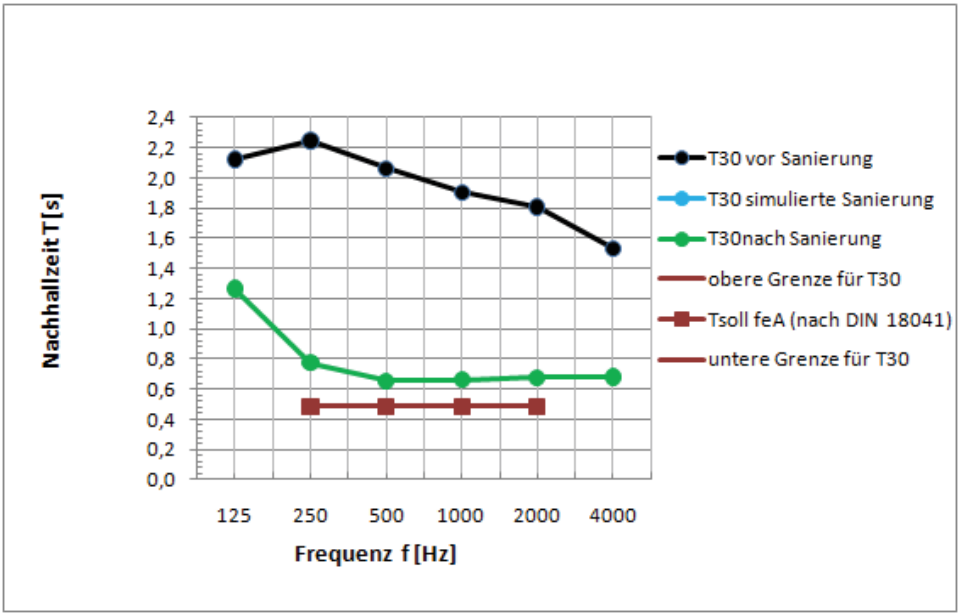


Abbildung 9: Nachhallzeit des Raumes 012 im *unbesetzten* Zustand

In Abbildung 9 leicht ersichtlich, ist vor der Sanierung, die Nachhallzeit im gesamten Frequenzbereich zu hoch. Bei der grünen Kurve handelt es sich um die Messergebnisse (inklusive der Lochplattenabsorber an der Rückwand). Nach der Sanierung, zeigt sich, dass die verbauten Absorber ab einer Frequenz von $250Hz$ die Nachhallzeit zumindest in die Nähe des Sollwertes absenken. Um auch unter $250Hz$ im Toleranzband zu landen, müssten noch zusätzliche Lochplattenabsorber eingebracht werden. Da die Messungen im unbesetzten Zustand durchgeführt wurden, kann die reale Wirkung der Absorber im besetzten Zustand zumindest simuliert werden (siehe Abbildung 10). Die blaue Kurve zeigt die Simulation des besetzten Zustandes aus den

tatsächlichen (im unbesetzten Zustand) gemessenen Daten. Die schwarze Kurve beinhaltet die Simulation des besetzten Zustandes vor der Sanierung.

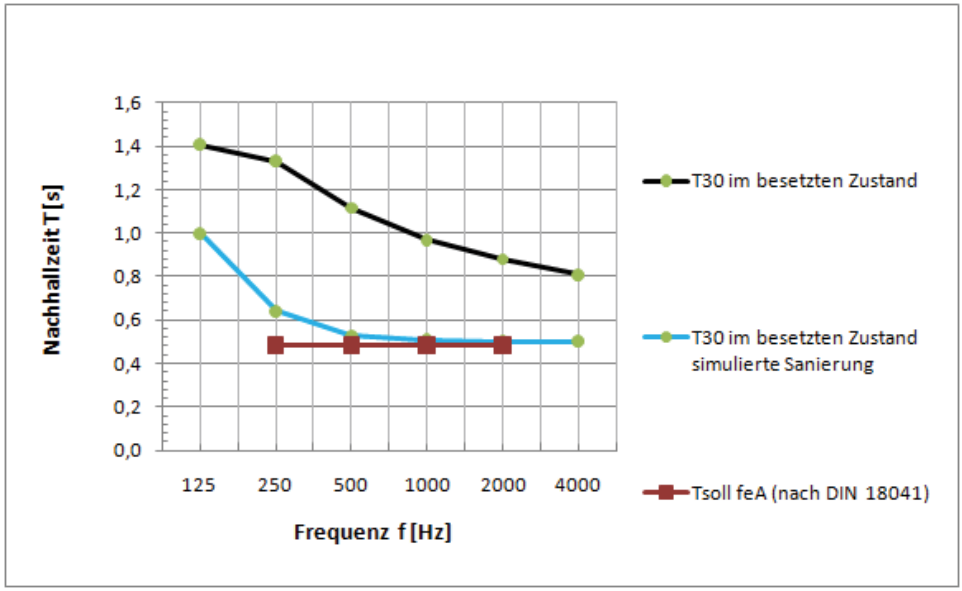


Abbildung 10: Nachhallzeit des Raumes 012 im *besetzten* Zustand

Der Sollbereich wird ab $1000Hz$ erreicht und darunter nur knapp verfehlt.

2.3 Grundgeräuschpegel

Der Grundgeräuschpegel gibt einen Anhaltspunkt für die Lärmbelastung in einem Klassenraum. Die angegebenen Werte gehen von sich ruhig verhaltenden SchülerInnen aus.

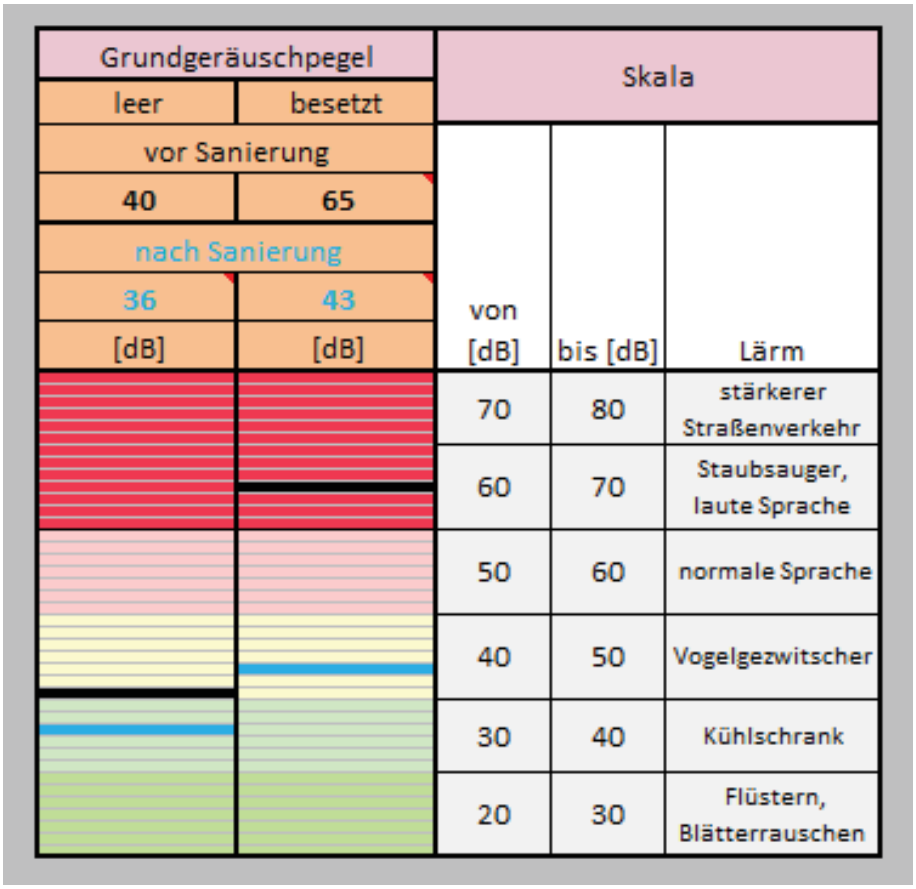


Abbildung 11: Grundgeräuschpegel, leer und besetzt, vor und nach der Sanierung

Hier zeigt sich durch die Sanierung eine klare Verbesserung. Auch im besetzten Zustand steigt der Geräuschpegel nur auf weniger als normales Sprachniveau an.

2.4 Sprachübertragungsindex (STI)

Der Sprachübertragungsindex klassifiziert die Sprachverständlichkeit. Bei einem STI von 1 ist jedes Wort perfekt verständlich. Ein Wert über 0,75 wäre für einen Unterrichtsraum wünschenswert. Die angegebenen Werte sind einmal inklusive der Dämpfungswerte durch den besetzten Zustand, aber ohne die Geräuschkulisse durch Bewegung und Ähnliches (mittlere Spalte) und einmal mit berücksichtigter Geräuschkulisse (rechte Spalte).

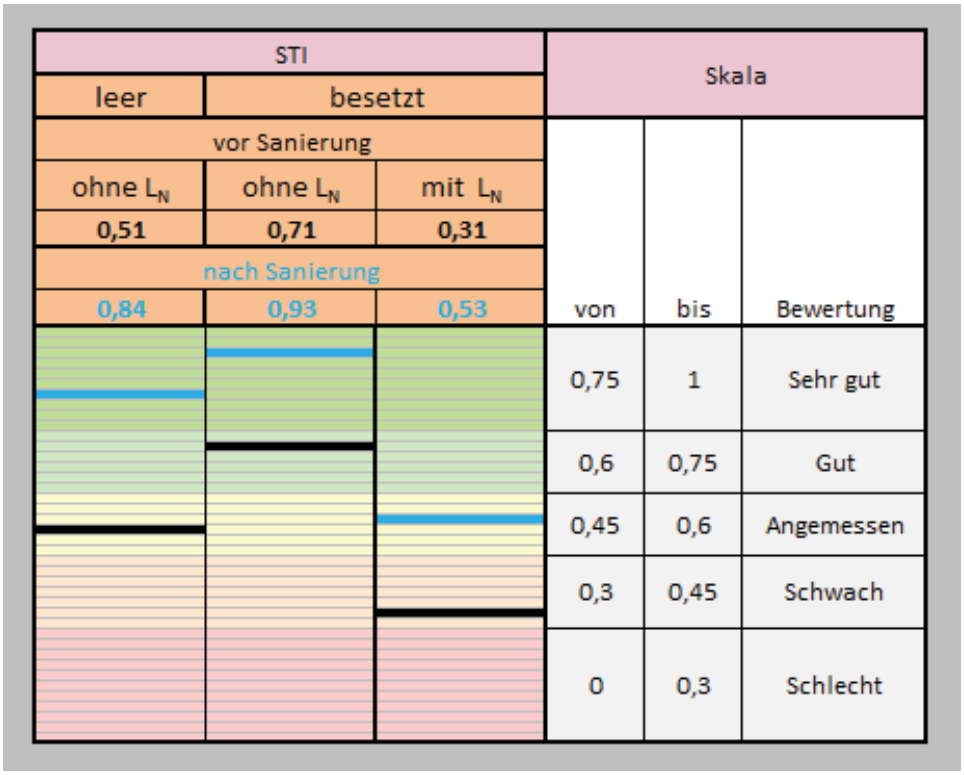


Abbildung 12: STI-Auswertung des Raumes 012

Die Steigerung durch die Sanierung ist ersichtlich (Verbesserung um 0,33). Die erreichten Konditionen sind auch im besetzten Zustand zumindest noch angemessen.

2.5 Artikulationsverlust (Al_{cons})

Der Al_{cons} beschreibt den Artikulationsverlust der Konsonanten. Diese sind besonders wichtig für die Verständlichkeit der Sprache. Der Al_{cons} sollte für ideale Verständlichkeit kleiner als 2% sein. Die angegebenen Werte sind einmal inklusive der Dämpfungswerte durch den besetzten Zustand, aber ohne die Geräuschkulisse durch Bewegung (mittlere Spalte) und einmal mit berücksichtigter Geräuschkulisse (rechte Spalte).

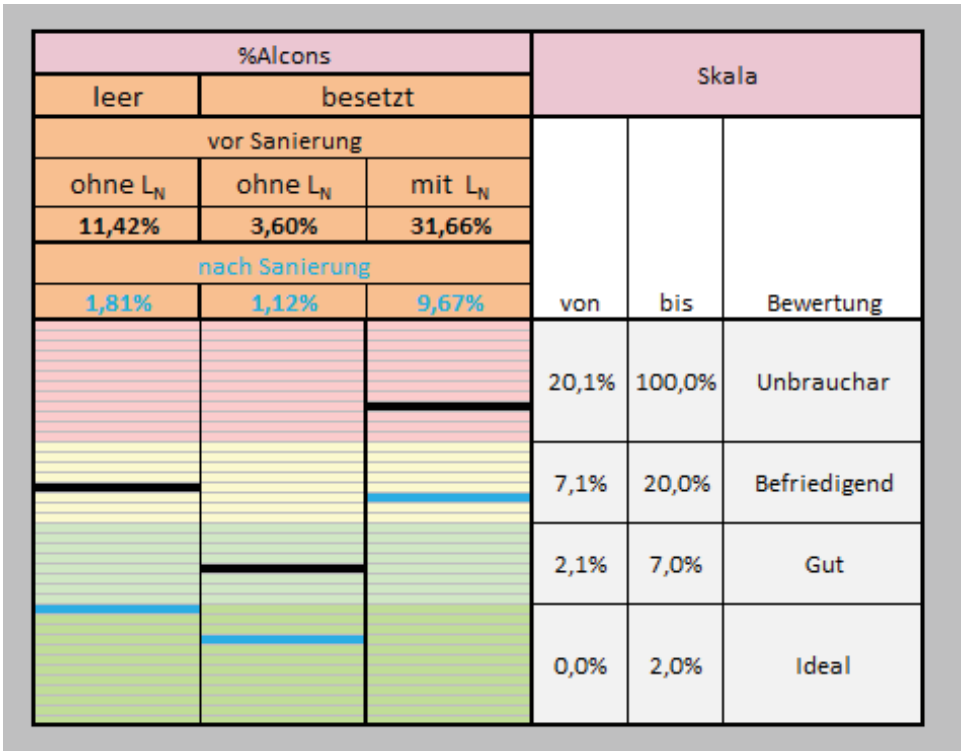


Abbildung 13: Al_{cons}-Auswertung des Raumes 012

Der Al_{cons} für ein besetztes Klassenzimmer befindet sich im Bereich von befriedigend.

2.6 Stimmaufwand des Lehrers

Der Stimmaufwand des Lehrers gibt Rückschlüsse auf die notwendige Anstrengung um sich im Klassenraum verständlich zu machen.

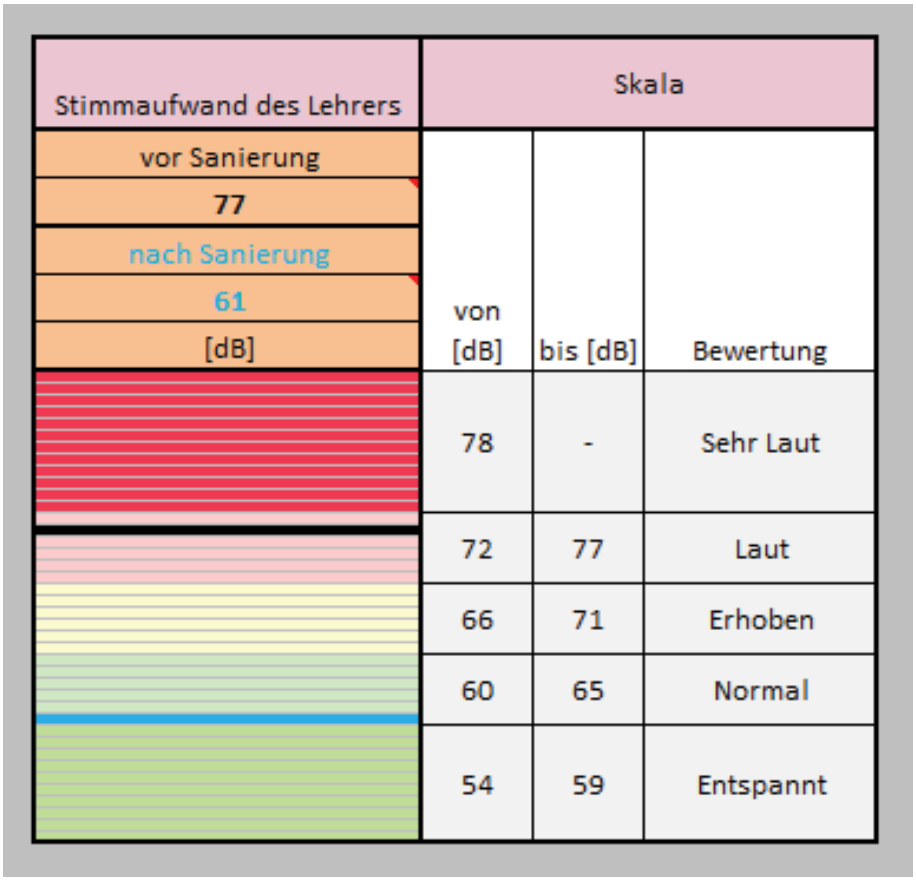


Abbildung 14: Stimmaufwand des Lehrers im besetzten Zustand

Nach der Sanierung zeigt sich eine deutliche Verbesserung des Stimmaufwandes. Dieser befindet sich im Bereich normal bis entspannt.

C Equipmentliste

Nr.	Equipment	Typenbezeichnung	Inventarnummer / Seriennummer
1	Dodekaederlautsprecher	Norsonic NOR 276	0138945 / 2765678
2	Nf-Leistungsverstärker	Norsonic NOR 280	0138943
3	Audiointerface	RME Fireface 800	0116952
4	Messmikrofone	NTI MA220	3025
			2959
			2962
5	Pegelkalibrator	Brüel&Kjaer 4231	0106865 /0116952
6	Messsoftware	ARTA 1.8.3	
7	Laptop	Thinkpad T500	0116956
8	Laptop	HP Elitebook	0119648
9	Schallpegelmessgerät	NTI XL2	0104784

Tabelle C.1: Verwendetes Equipment

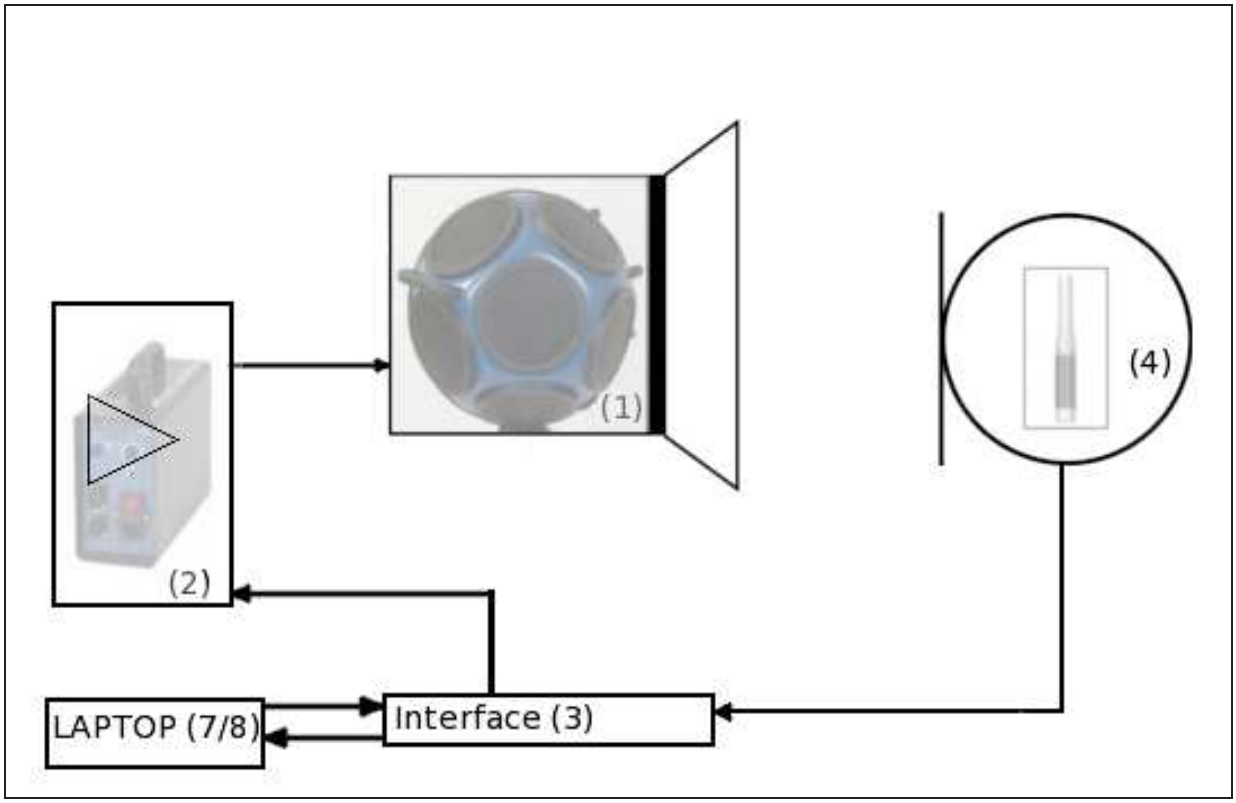


Abbildung C.1: Blockschaltbild zur Raumimpulsantwortmessung

D

Raumakustische Datenblätter von Raum 208

D.1 Akustisches Datenblatt von Raum 208 (gemessen)

D.1.1 Beschreibung und Raumdaten

Raumhöhe:	4,08 m
Raumlänge:	15,93 m
Raumbreite:	7,11 m
Volumen:	456 m^3
typ. Schüleranzahl:	20 - 110

Tabelle D.1: Raumdaten

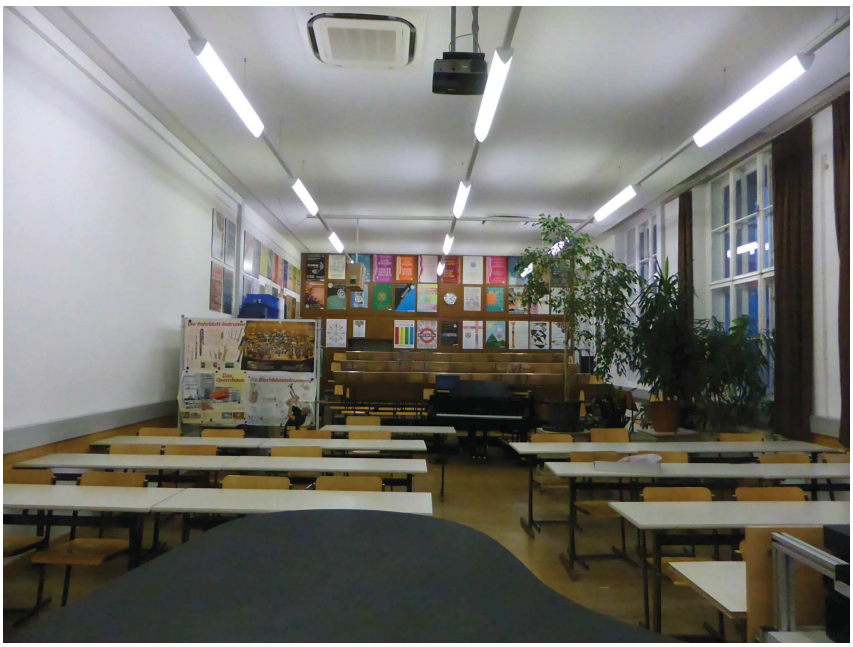


Abbildung D.1: Raum 208

D.1.2 Messungen

Angaben zu den Messungen

Detail	im unbesetzten Zustand	im besetzten Zustand
Messnorm:	Önorm EN ISO 3382	Önorm EN ISO 3382
Anzahl der Mikrofonpositionen:	24	6
Anzahl der Quellpositionen:	4	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m	1,5 m
Quellhöhe:	1,50 m	1,5 m
Messsignal:	log. Sinussweep 256k Samples @ 48 kHz	log. Sinussweep 256k Samples @ 48 kHz
Anzahl der Wiederholungen:	3	3
Temperatur und Luftfeuchte:	21,3 °C, 46,4 %	20,9 °C, 46,8 %
Anzahl der anwesenden Personen:	2	75

Tabelle D.2: Angaben zur Messung

Raumskizze

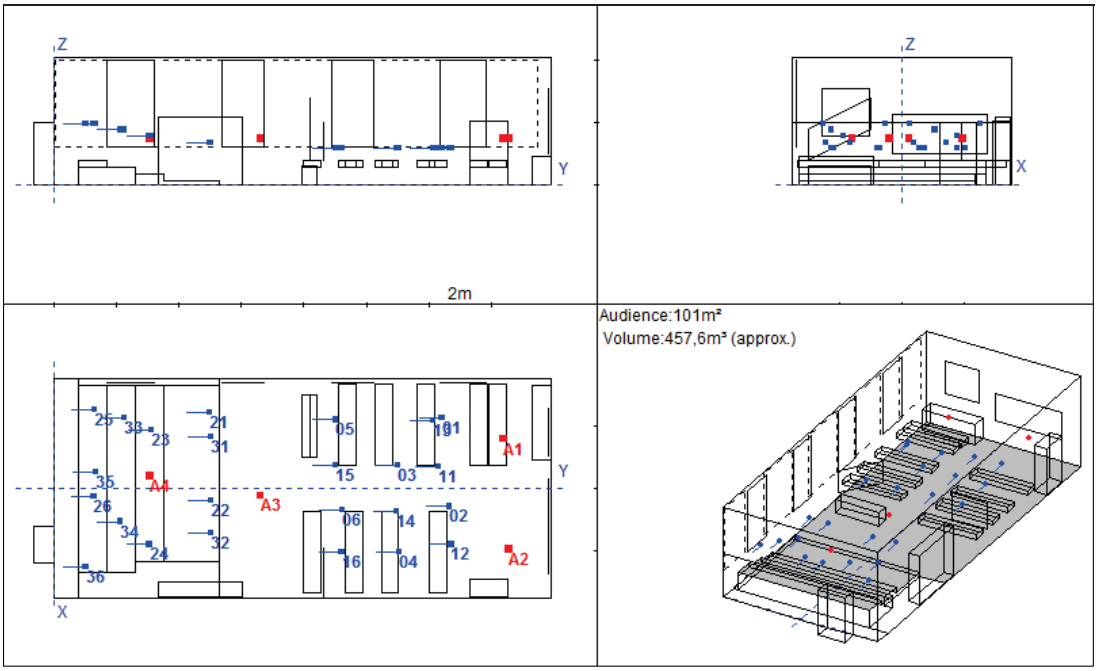


Abbildung D.2: Raum 208 - aus verschiedenen Perspektiven

Messpositionen

Bezeichnung	Abstand zur Tafelwand	Abstand zur Türwand (rechts)
Quellposition 1:	1,52 m	5,09 m
Quellposition 2:	1,35 m	1,56 m
Mikrofonposition 1:	3,50 m	5,77 m
Mikrofonposition 2:	3,25 m	2,93 m
Mikrofonposition 3:	4,92 m	4,26 m
Mikrofonposition 4:	4,86 m	1,48 m
Mikrofonposition 5:	6,92 m	5,70 m
Mikrofonposition 6:	6,70 m	2,80 m
Mikrofonposition 11:	3,60 m	4,21 m
Mikrofonposition 12:	3,20 m	1,71 m
Mikrofonposition 13:	3,79 m	5,68 m
Mikrofonposition 14:	4,94 m	2,78 m
Mikrofonposition 15:	6,92 m	4,26 m
Mikrofonposition 16:	6,71 m	1,46 m
Bezeichnung	**Abstand zur Rückwand**	**Abstand zur Türwand (rechts)**
Quellposition 3:	6,62 m	3,21 m
Quellposition 4:	3,09 m	3,90 m
Mikrofonposition 21:	5,00 m	5,95 m
Mikrofonposition 22:	5,02 m	3,11 m
Mikrofonposition 23:	3,11 m	5,37 m
Mikrofonposition 24:	3,06 m	1,71 m
Mikrofonposition 25:	1,29 m	6,03 m
Mikrofonposition 26:	1,28 m	3,24 m
Mikrofonposition 31:	5,02 m	5,14 m
Mikrofonposition 32:	5,04 m	2,06 m
Mikrofonposition 33:	2,24 m	5,76 m
Mikrofonposition 34:	2,14 m	2,44 m
Mikrofonposition 35:	1,34 m	4,02 m
Mikrofonposition 36:	1,02 m	1,00 m

Tabelle D.3: Messpositionen (Messung im unbesetzten Zustand)

Bezeichnung	Abstand zur Rückwand	Abstand zur Türwand (rechts)
Quellposition 1 $\widehat{=}$ 3:	6,69 m	3,28 m
Quellposition 2 $\widehat{=}$ 4:	3,10 m	3,90 m
Mikrofonposition 1 $\widehat{=}$ 3:	11,01 m	4,25 m
Mikrofonposition 2 $\widehat{=}$ 16:	9,23 m	1,46 m
Mikrofonposition 3 $\widehat{=}$ 22:	5,02 m	3,11 m
Mikrofonposition 4 $\widehat{=}$ 21:	5,20 m	6,95 m
Mikrofonposition 5 $\widehat{=}$ 34:	2,30 m	2,44 m
Mikrofonposition 6 $\widehat{=}$ 25:	1,30 m	6,04 m

Tabelle D.4: Messpositionen (Messung im besetzten Zustand)

Nachhallzeit

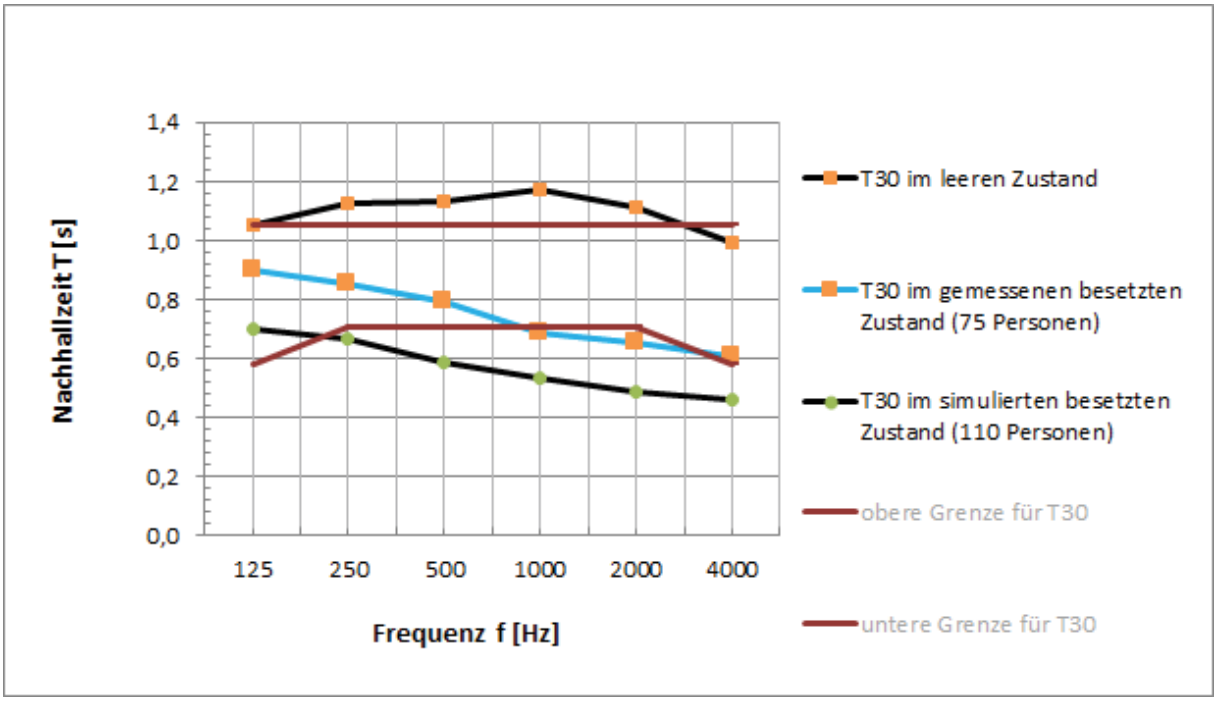


Abbildung D.3: Nachhallzeit T30 in besetztem und unbesetztem Zustand und eine Simulation von 110 Personen

Nachhallzeit im leeren Zustand							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1	1,0		1,12

Nachhallzeit im gemessenen besetzten Zustand (75 Personen)							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6		0,78

Nachhallzeit im simulierten besetzten Zustand (110 Personen)							anzeigen	
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	✓	Mittelwert
T30 [s]	0,7	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5		0,59

Abbildung D.4: Tabelle der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung D.3

D.2 Akustisches Datenblatt von Raum 208 (simuliert)

D.2.1 Beschreibung und Raumskizze

Raumhöhe:	4,08 m
Raumlänge:	15,93 m
Raumbreite:	7,11 m
Volumen:	456 m^3
Schüleranzahl:	keine
Vorhänge:	offen

Tabelle D.5: Raumdaten

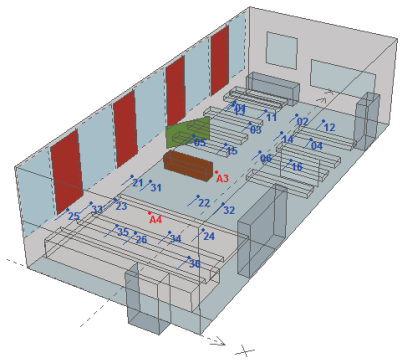


Abbildung D.5: Raum 208

D.2.2 Skizze aus unterschiedlichen Perspektiven

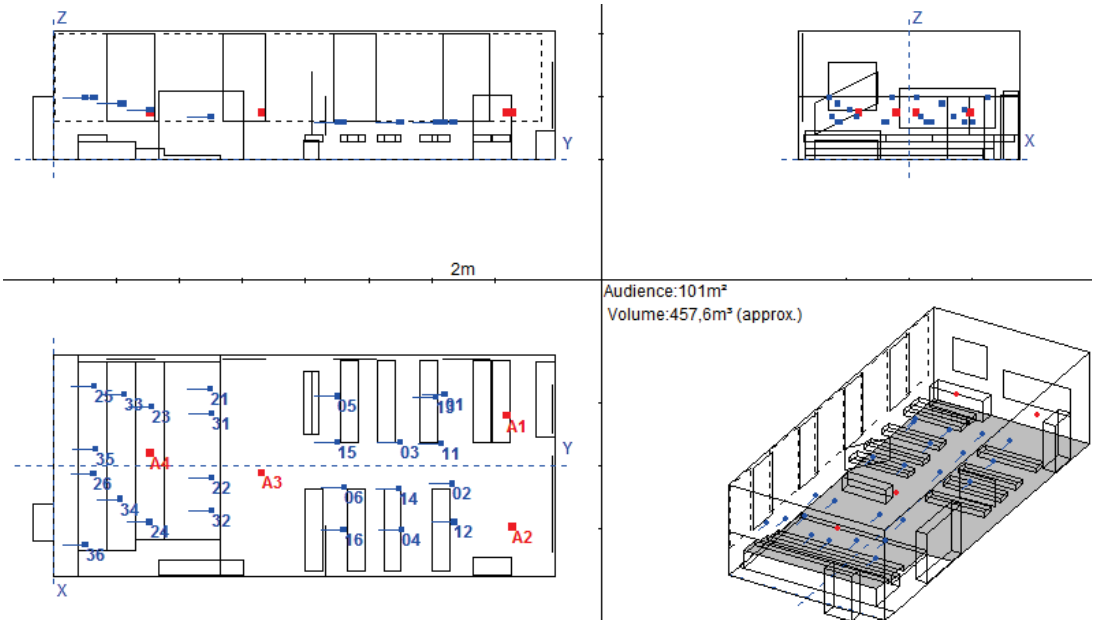


Abbildung D.6: Raum 208 Simulation - Perspektiven

D.2.3 Simulation

Angaben zur Simulation

Detail	leerer Raum
Simulationsauflösung:	$0{,}5m$
Anzahl der Mikrofonpositionen:	24
Anzahl der Quellpositionen:	4
Mikrofonhöhe:	$1{,}20\ m$
Quellhöhe:	$1{,}50\ m$
Temperatur und Luftfeuchte:	$21{,}3\ °C$, 46,4 %

Tabelle D.6: Angaben zur Simulation

Nachhhallzeit T_{30} in Oktavbändern

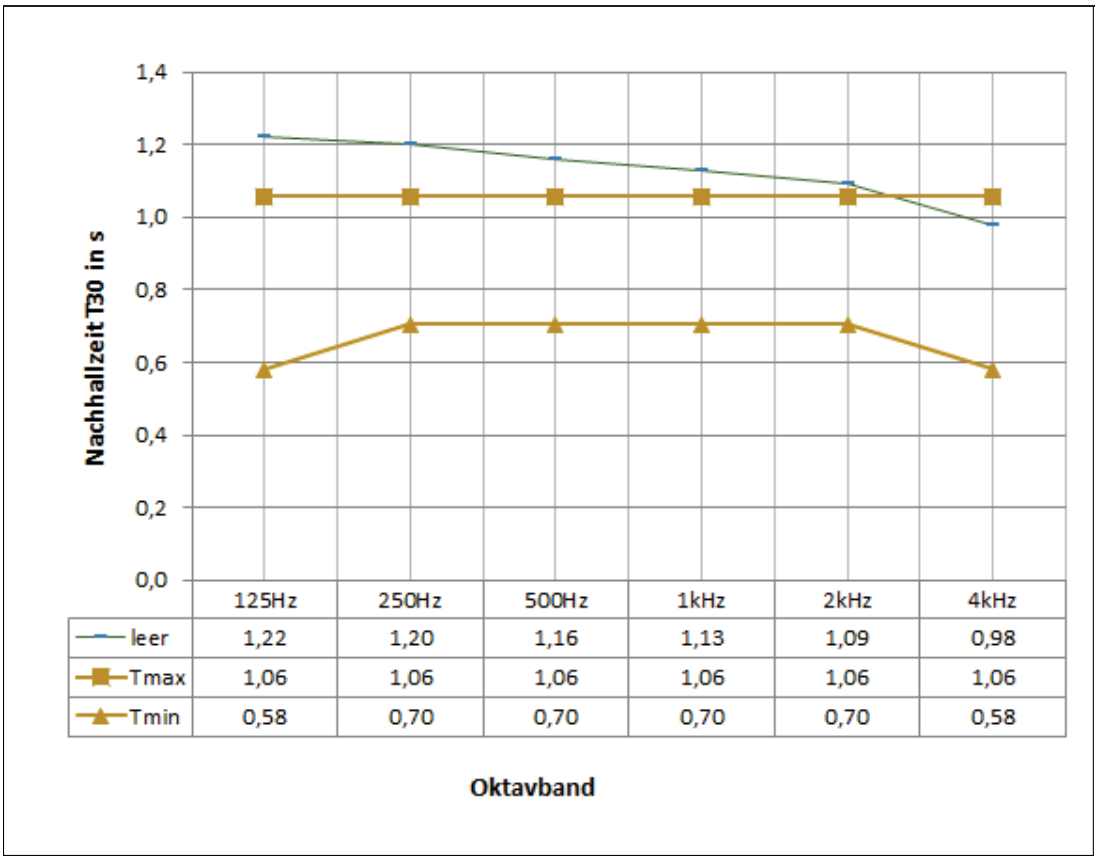


Abbildung D.7: Simulierte Nachhallzeit und Toleranzband

Nachhallzeit

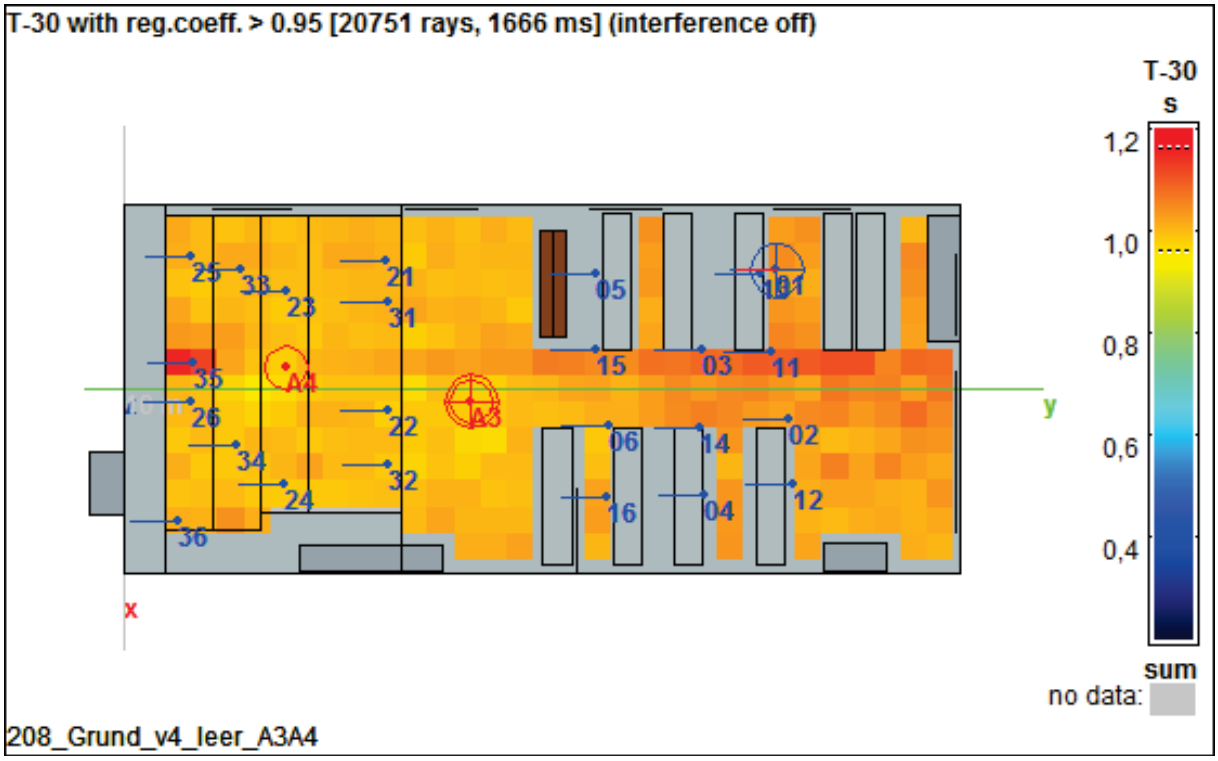


Abbildung D.8: Nachhallzeit T30 in s

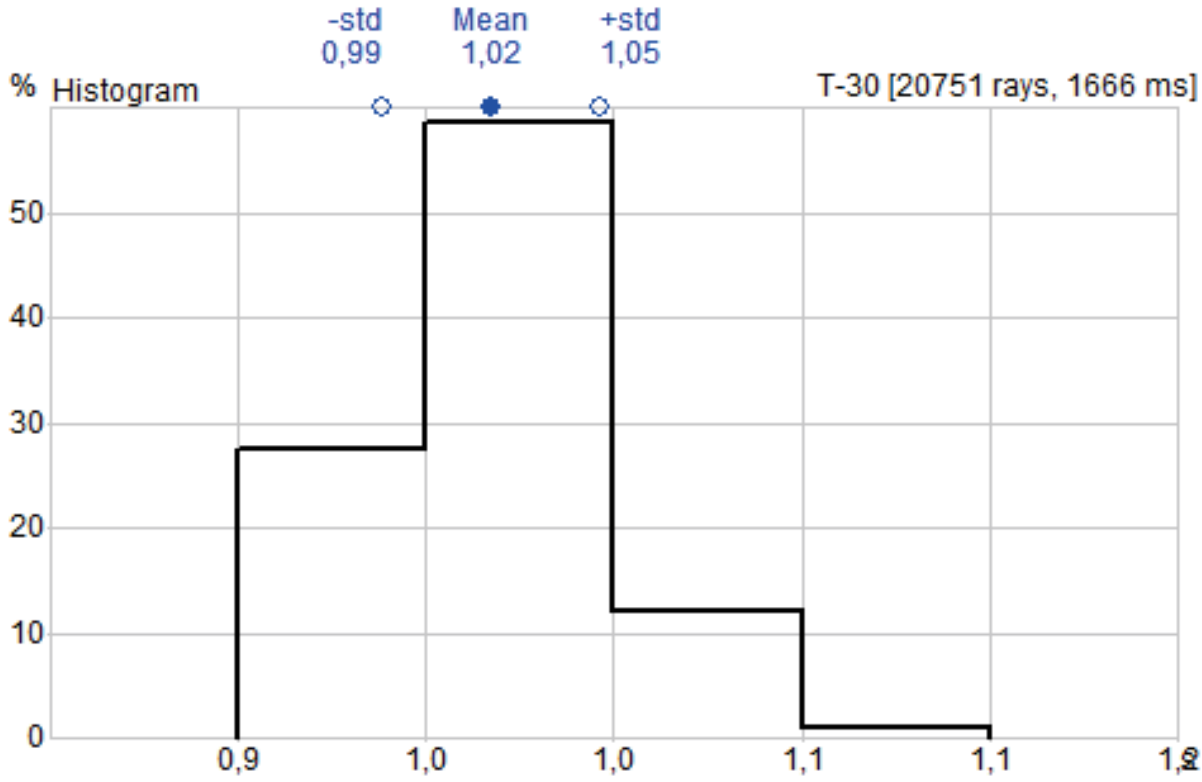


Abbildung D.9: Häufigkeitsverteilung der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung D.8

Schalldruckpegel

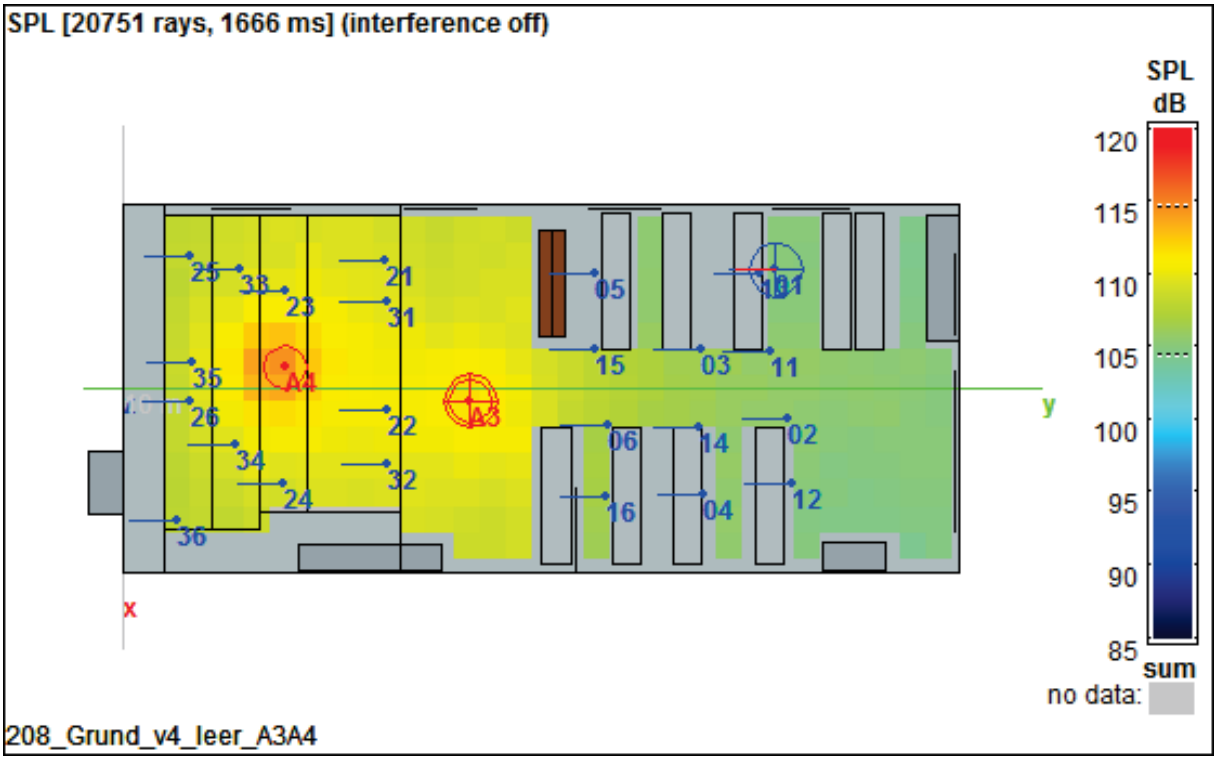


Abbildung D.10: Schalldruckpegel in dB

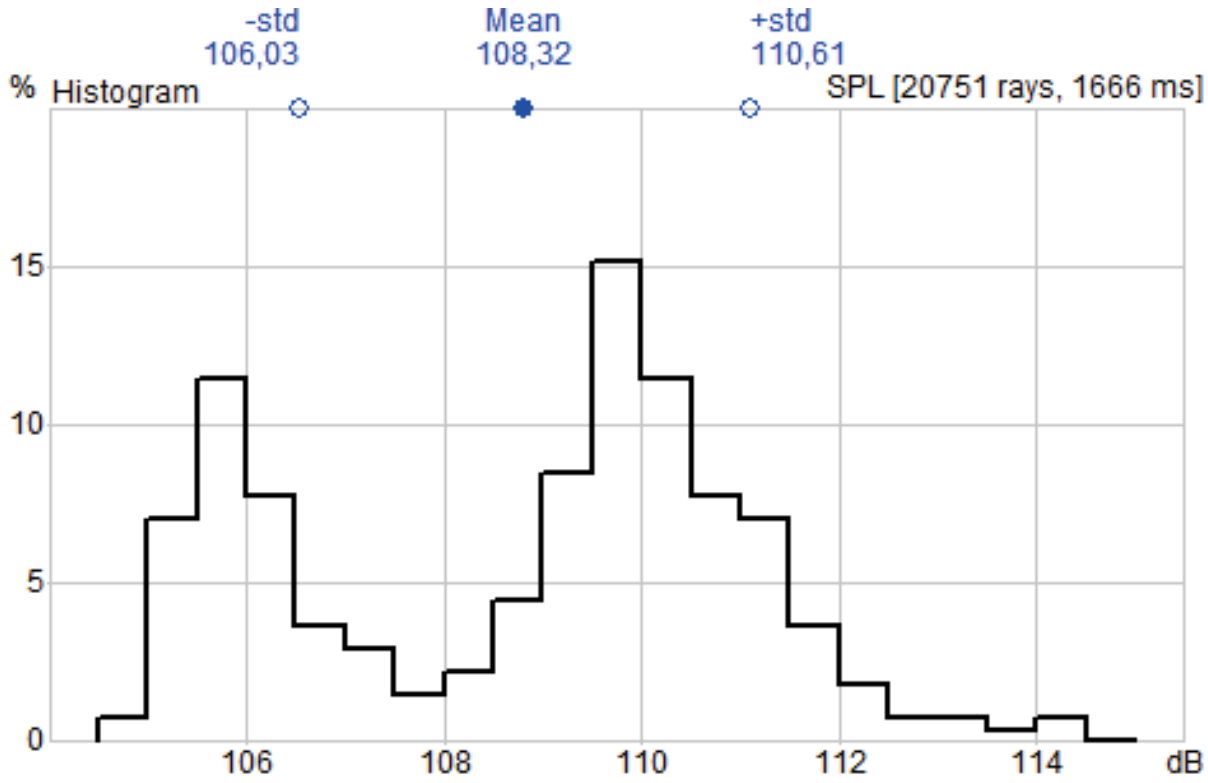


Abbildung D.11: Häufigkeitsverteilung des Schalldruckpegels SPL zu Abbildung D.10

D.3 Akustisches Datenblatt von Raum 208 bei Unterricht

D.3.1 Beschreibung und Raumskizze

Raumhöhe:	4,08 m
Raumlänge:	15,93 m
Raumbreite:	7,11 m
Volumen:	456 m^3
Schüleranzahl:	25
Vorhänge:	offen

Tabelle D.7: Raumdaten

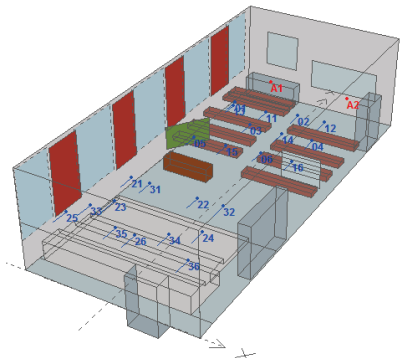


Abbildung D.12: Raum 208 bei Unterricht

D.3.2 Skizze aus unterschiedlichen Perspektiven

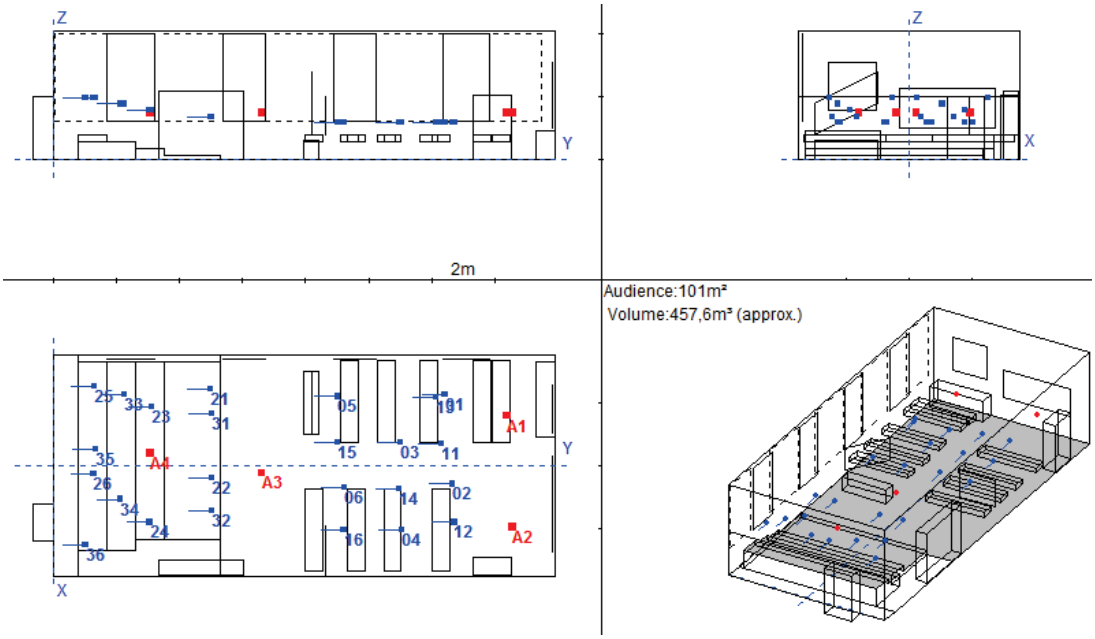


Abbildung D.13: Raum 208 bei Unterricht - Perspektiven

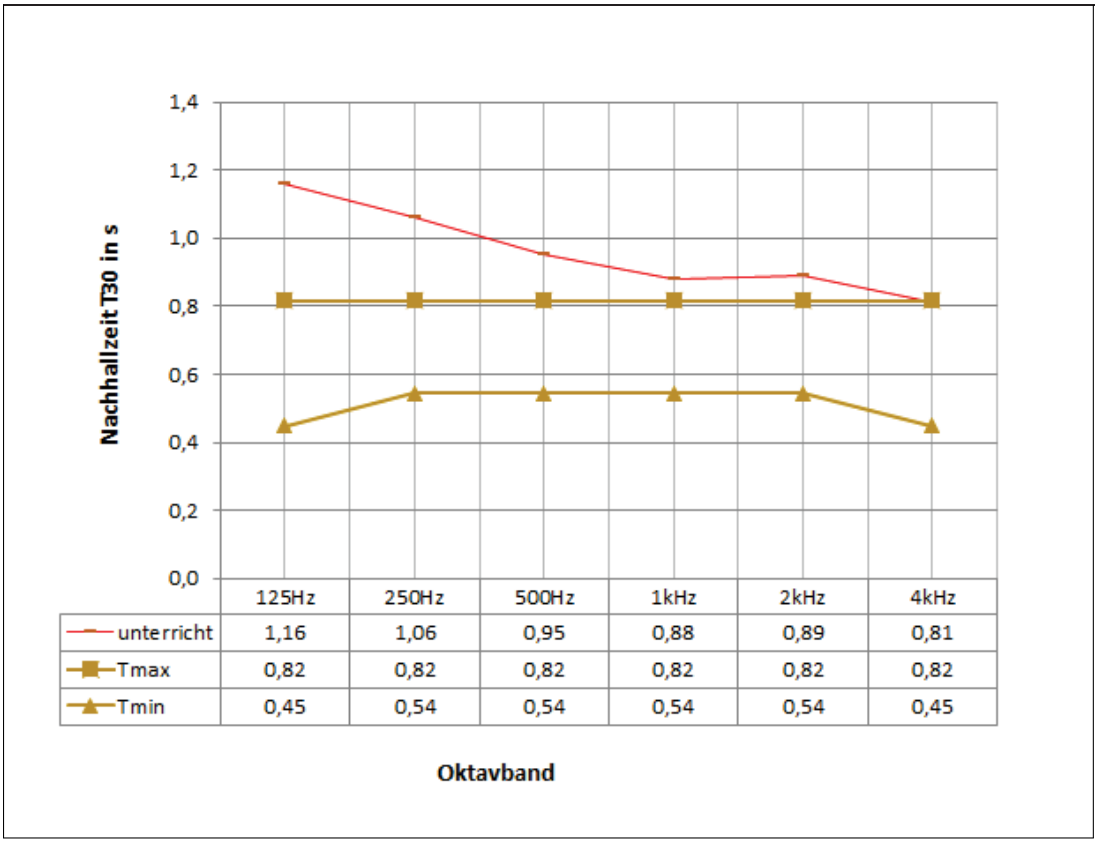
D.3.3 Simulation

Angaben zur Simulation

Detail	Unterrichtsbetrieb
Messauflösung:	0,5 m
Anzahl der Mikrofonpositionen:	24
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Temperatur und Luftfeuchte:	21,3 $°C$, 46,4 %

Tabelle D.8: Angaben zur Simulation

Nachhhallzeit T_{30}



	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
unterricht	1,16	1,06	0,95	0,88	0,89	0,81
Tmax	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
Tmin	0,45	0,54	0,54	0,54	0,54	0,45

Abbildung D.14: Simulierte Nachhallzeit und Toleranzband

Nachhallzeit

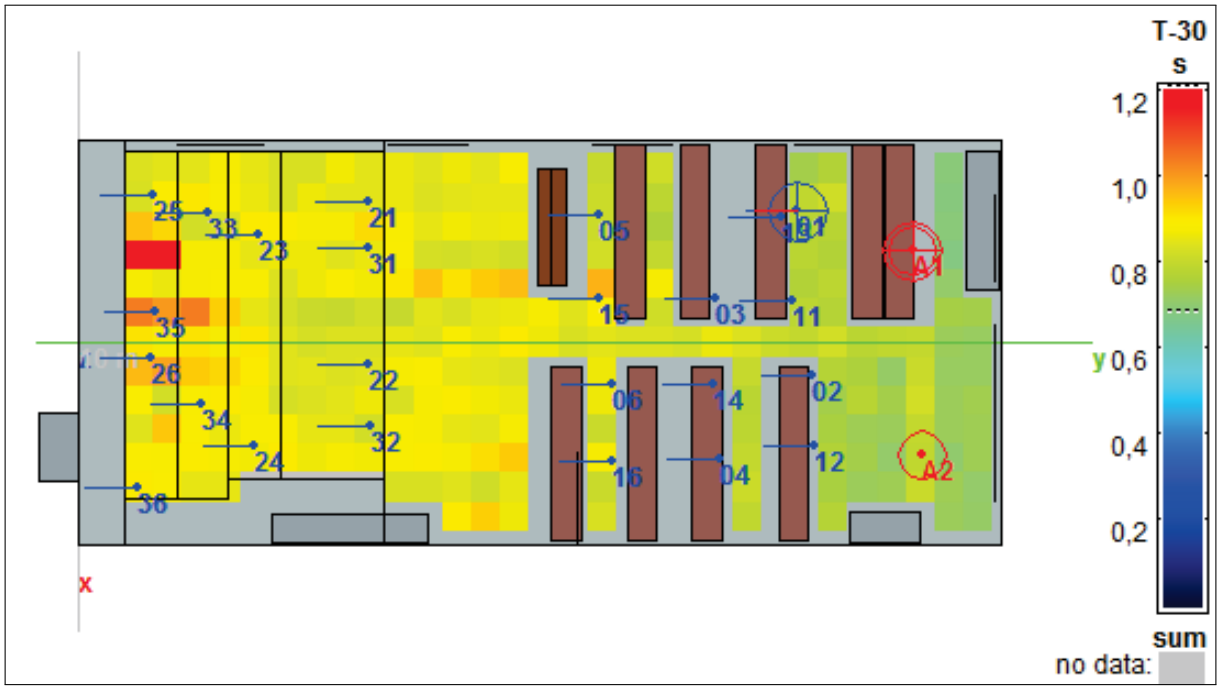


Abbildung D.15: Nachhallzeit T30 in s

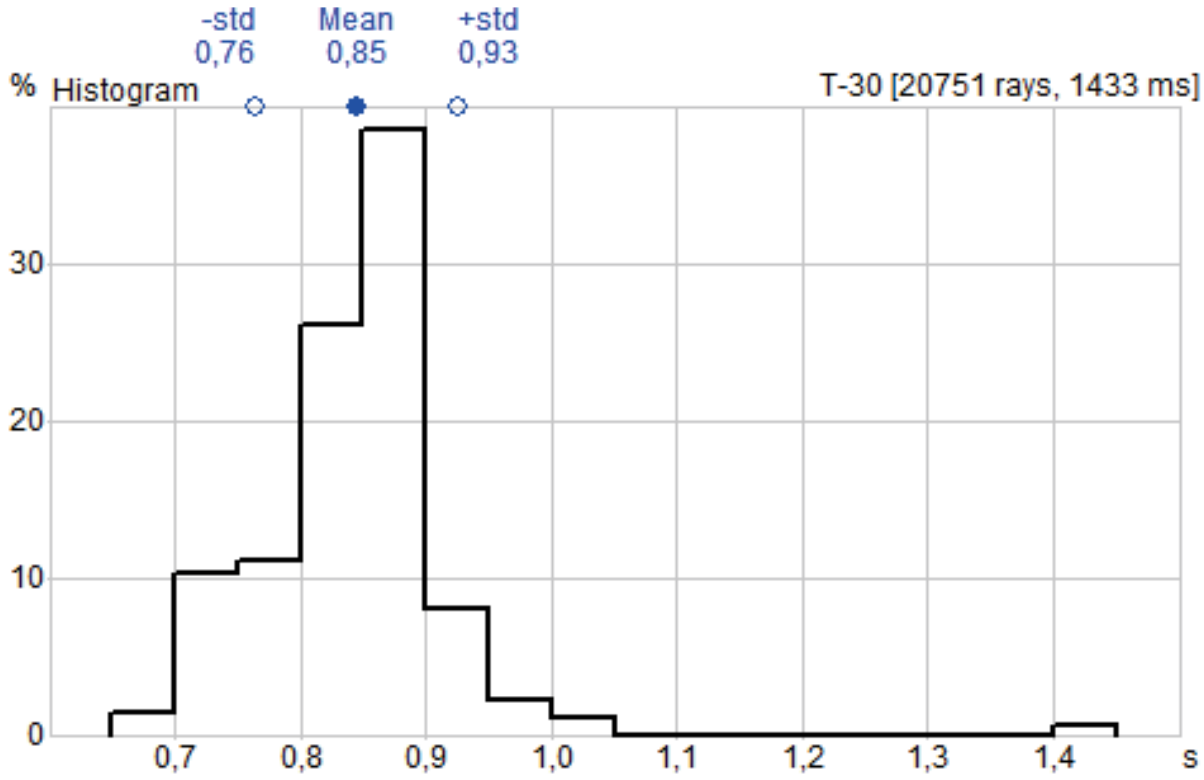


Abbildung D.16: Häufigkeitsverteilung der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung D.15

Sprachübertragungsindex

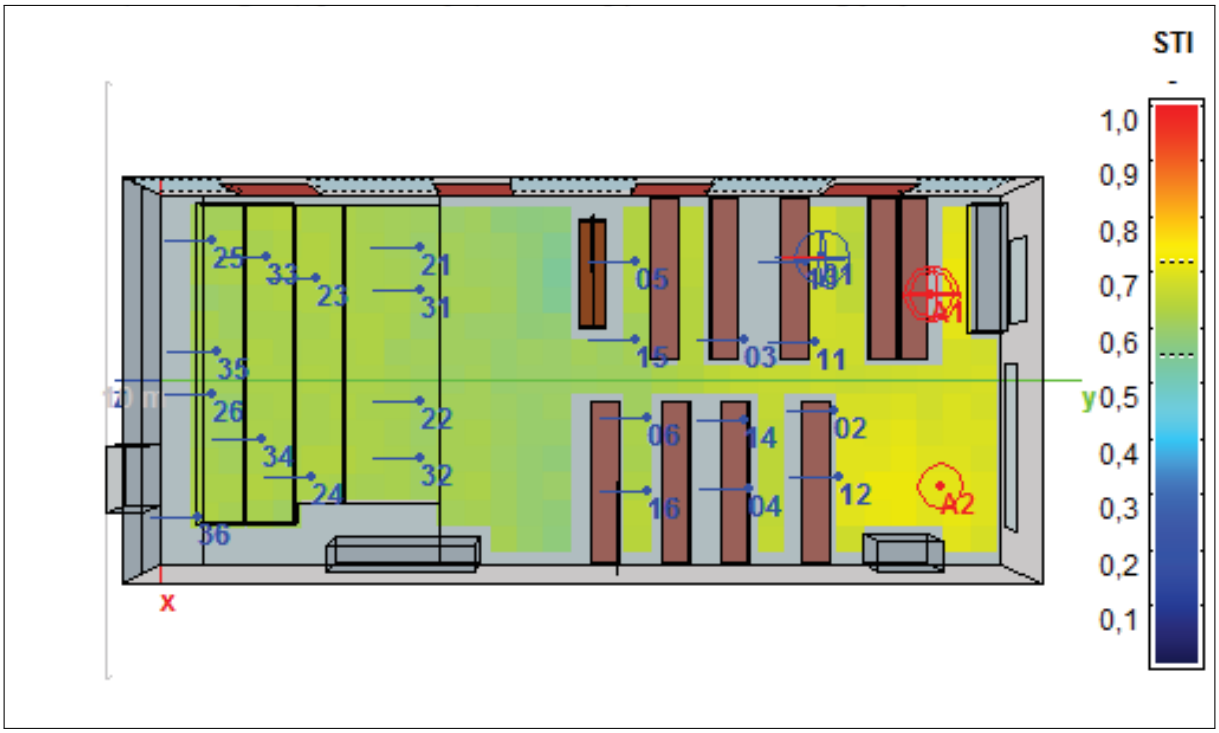


Abbildung D.17: Sprachübertragungsindex STI

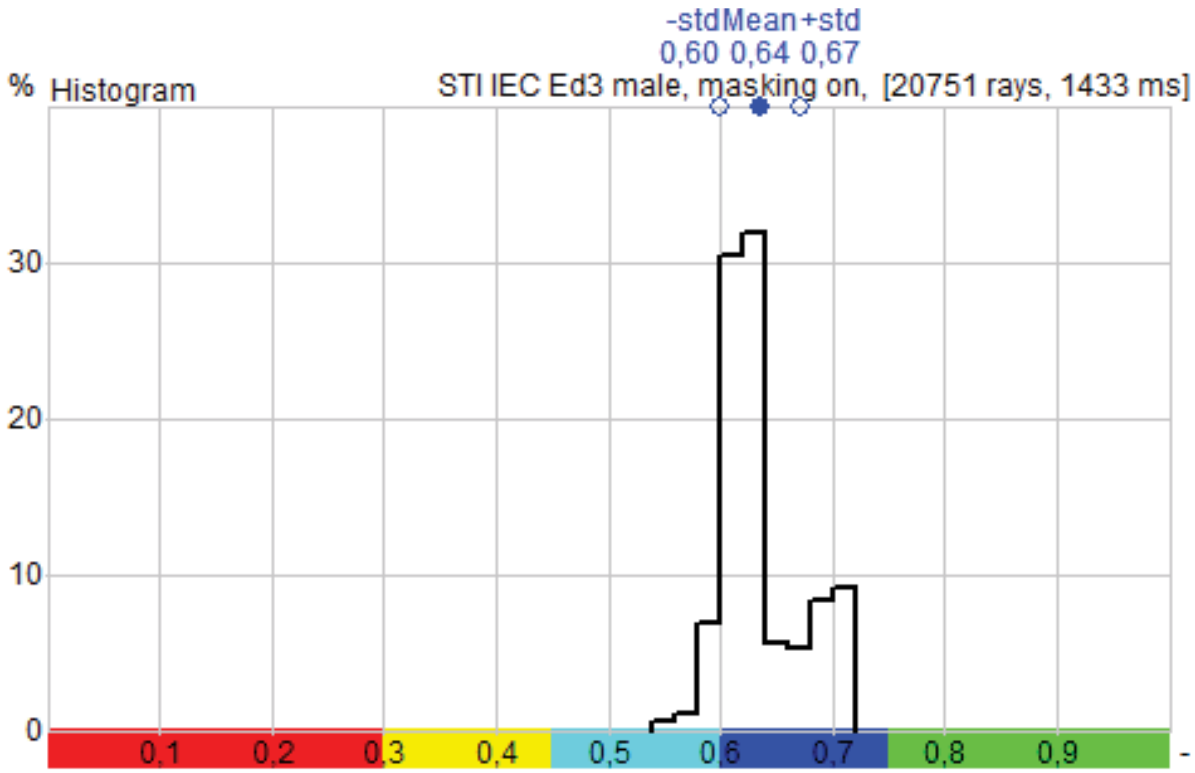


Abbildung D.18: Häufigkeitsverteilung des Sprachübertragungsindex STI zu Abbildung D.17

D.4 Akustisches Datenblatt von Raum 208 im Ensemblebetrieb

D.4.1 Beschreibung und Raumskizze

Raumhöhe:	4,08 m
Raumlänge:	15,93 m
Raumbreite:	7,11 m
Volumen:	456 m^3
Schüleranzahl:	60
Vorhänge:	offen

Tabelle D.9: Raumdaten

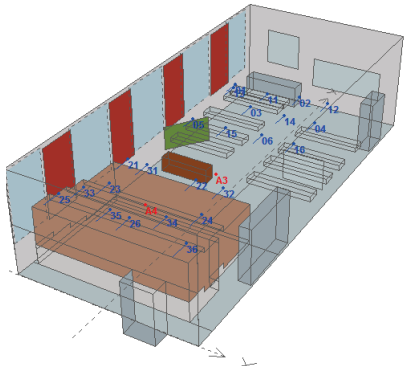


Abbildung D.19: Raum 208 im Ensemblebetrieb

D.4.2 Skizze aus unterschiedlichen Perspektiven

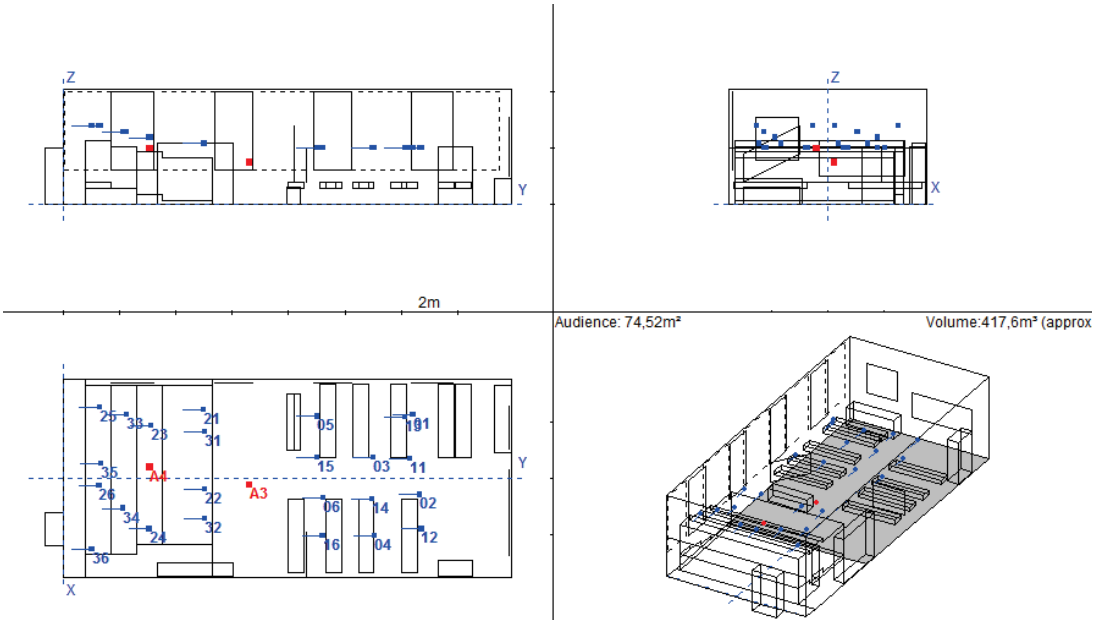


Abbildung D.20: Raum 208 Ensemble - Perspektiven

D.4.3 Simulation

Angaben zur Simulation

Detail	Ensemblebetrieb
Simulationsauflösung:	0,5m
Anzahl der Mikrofonpositionen:	24
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Temperatur und Luftfeuchte:	21,3 $°C$, 46,4 %

Tabelle D.10: Angaben zur Simulation

Nachhhallzeit T_{30} in Oktavbändern

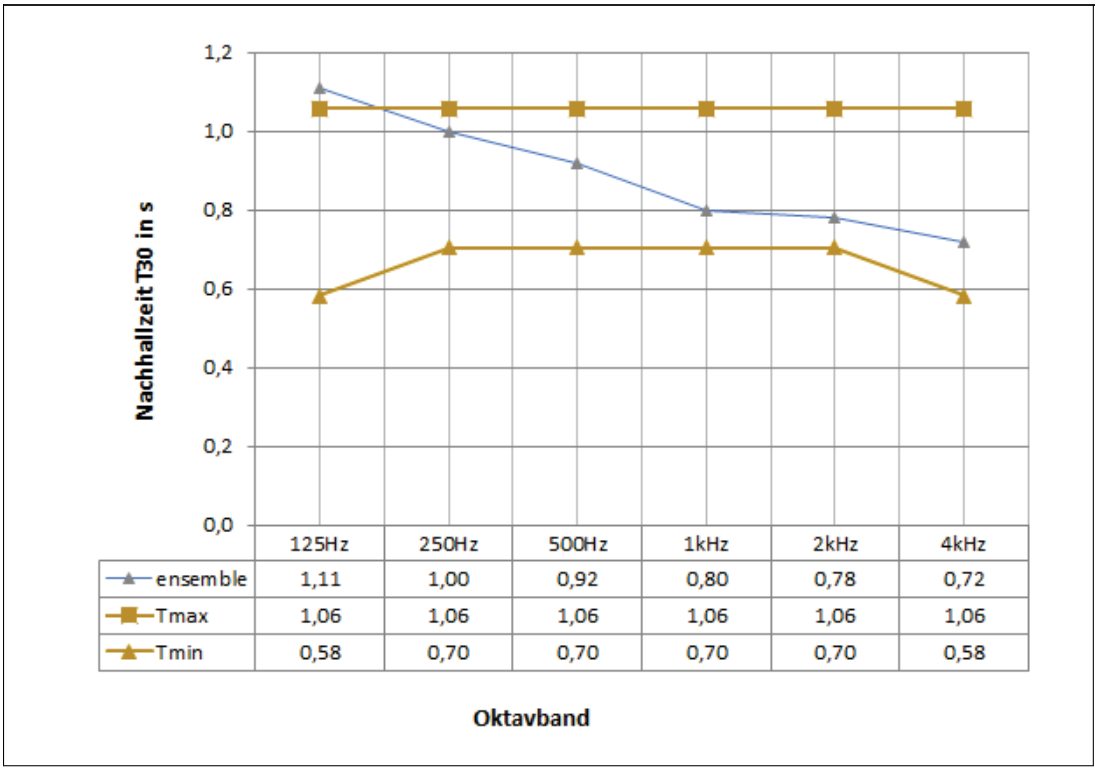


Abbildung D.21: Simulierte Nachhallzeit und Toleranzband

Nachhallzeit

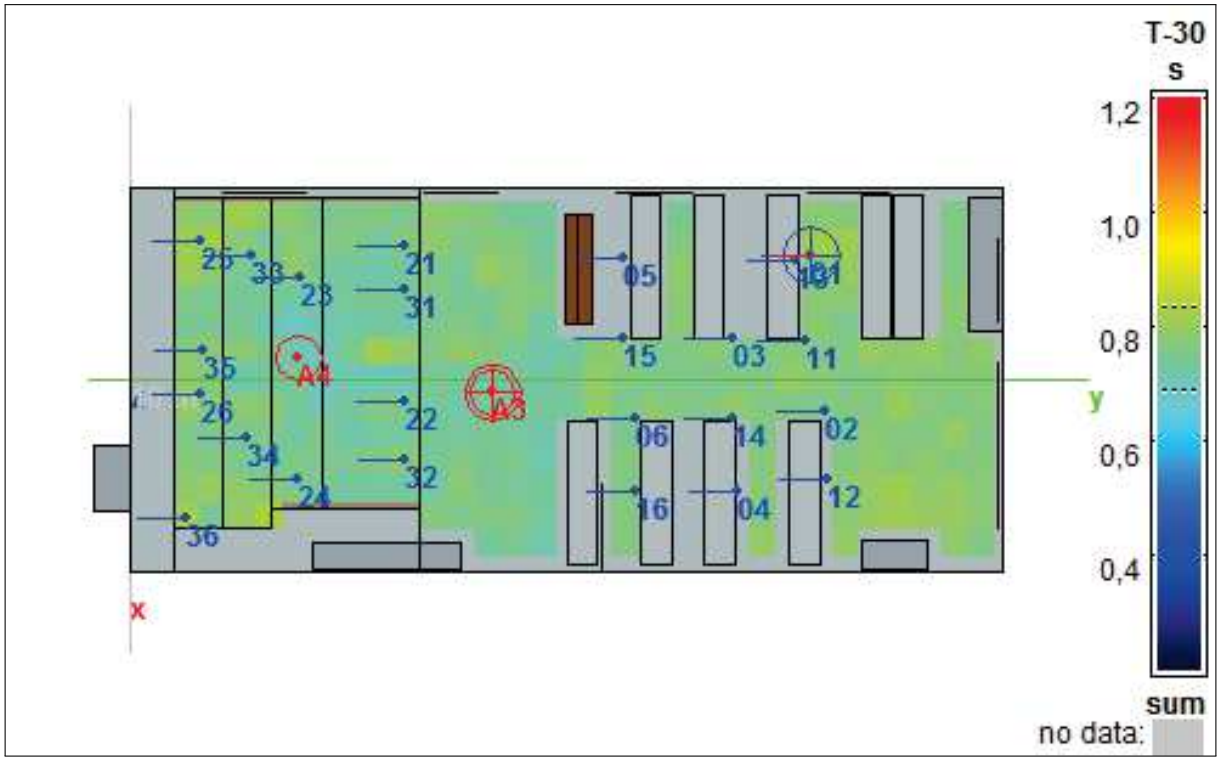


Abbildung D.22: Nachhallzeit T30 in s

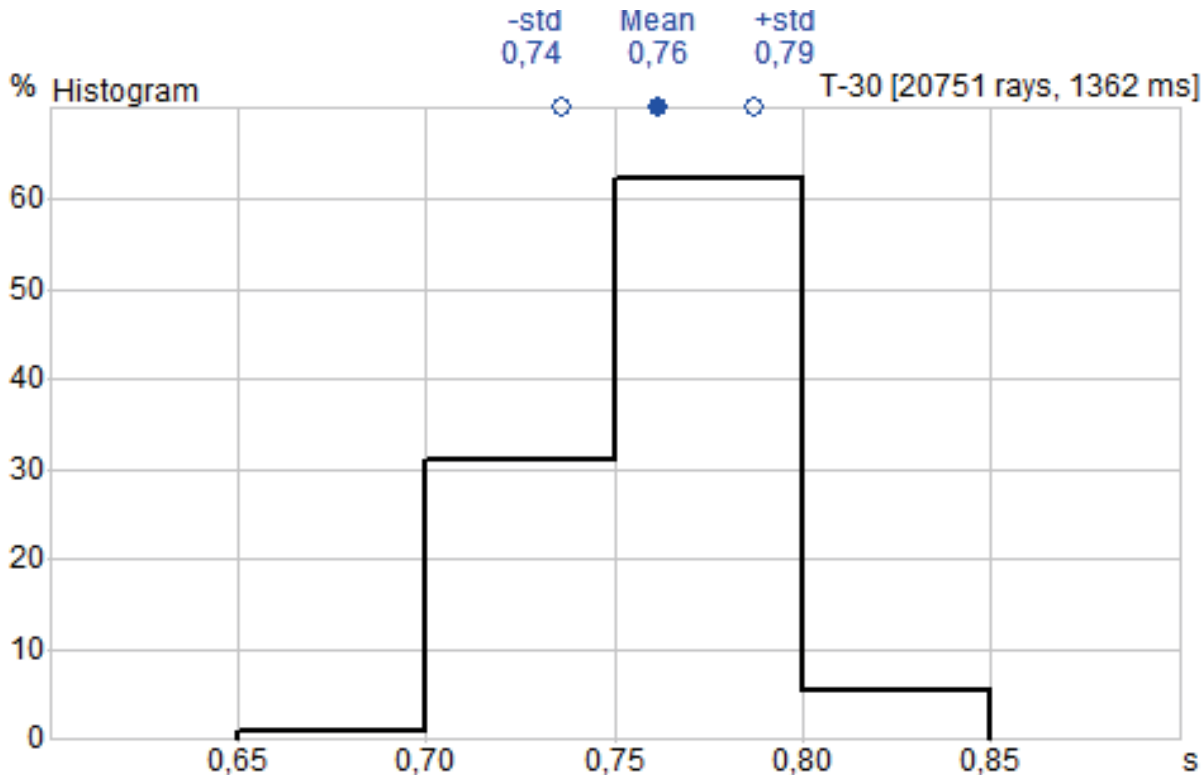


Abbildung D.23: Häufigkeitsverteilung der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung D.22

Schalldruckpegel

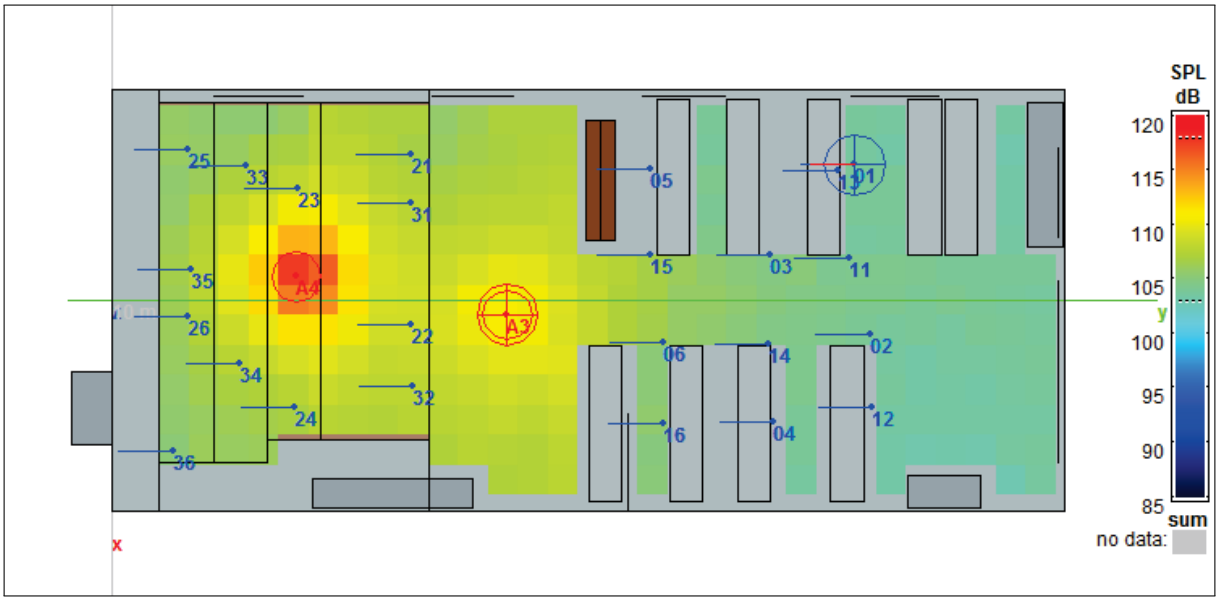


Abbildung D.24: Schalldruckpegel in dB

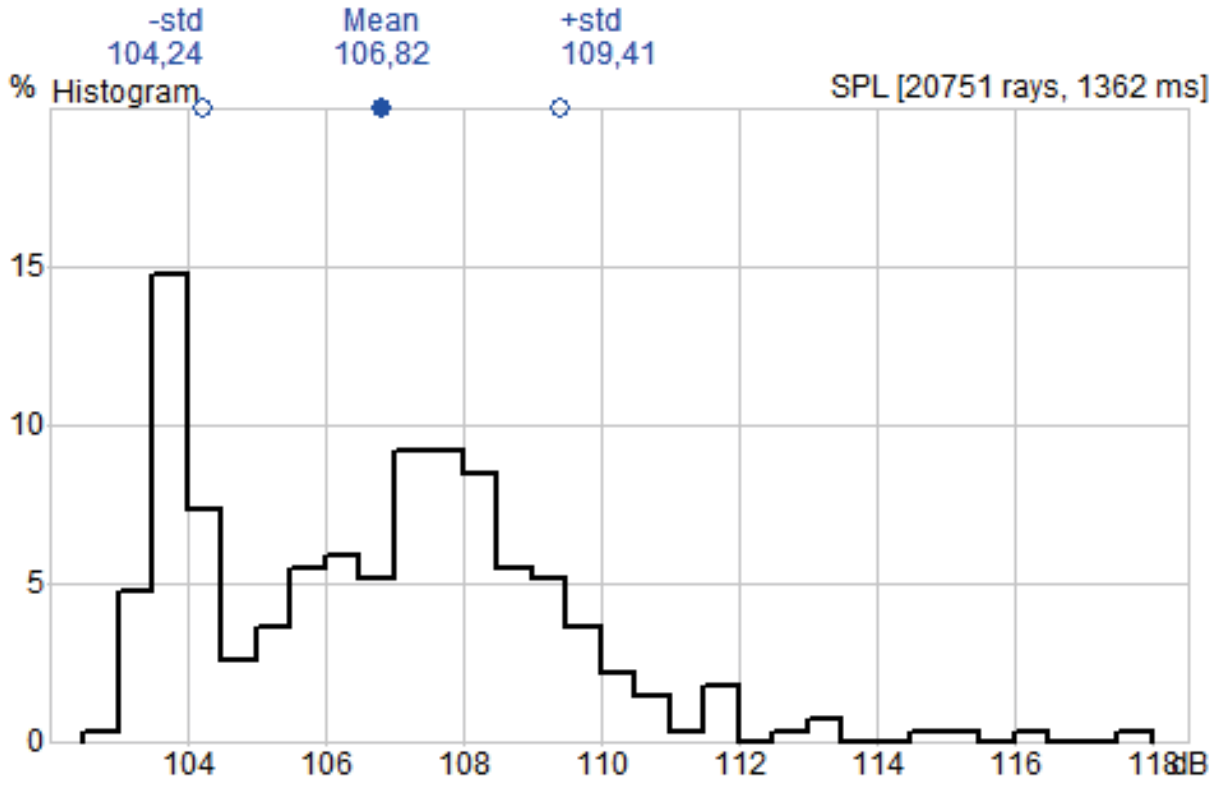


Abbildung D.25: Häufigkeitsverteilung des Schalldruckpegels SPL zu Abbildung D.24

D.5 Akustisches Datenblatt von Raum 208 im vollbesetzten Zustand

D.5.1 Beschreibung und Raumskizze

Raumhöhe:	4,08 m
Raumlänge:	15,93 m
Raumbreite:	7,11 m
Volumen (leer):	456 m^3
Schüleranzahl:	110
Vorhänge:	offen

Tabelle D.11: Raumdaten

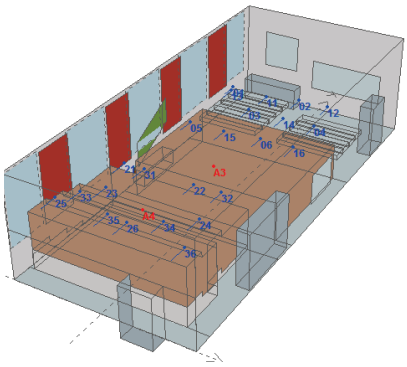


Abbildung D.26: Raum 208 im vollbesetzten Zustand

D.5.2 Skizze aus unterschiedlichen Perspektiven

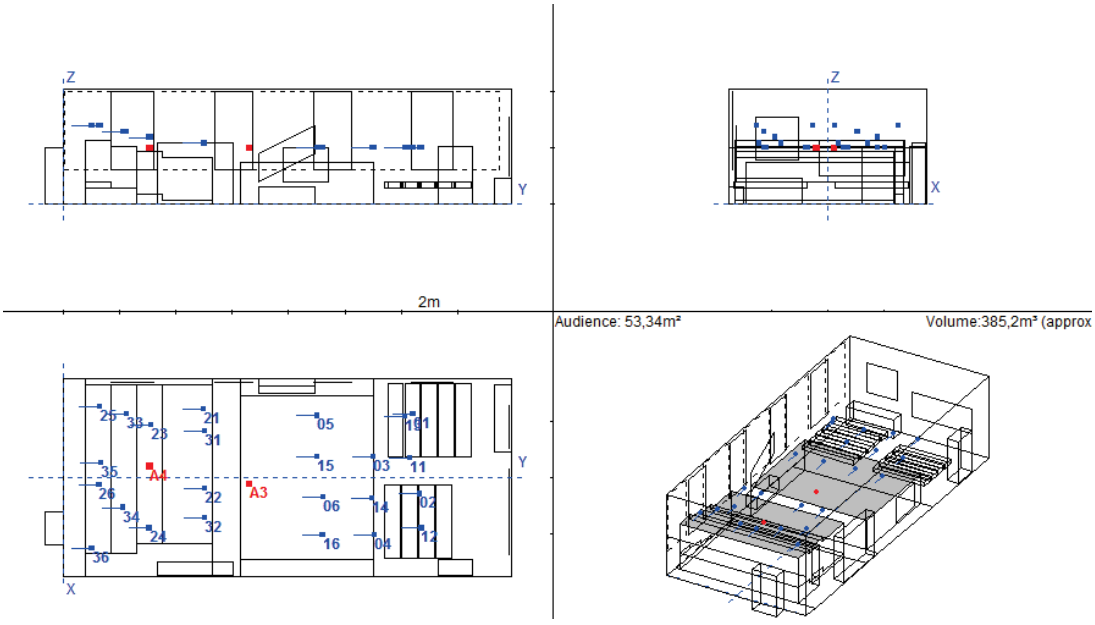


Abbildung D.27: Raum 208 vollbesetzt - Perspektiven

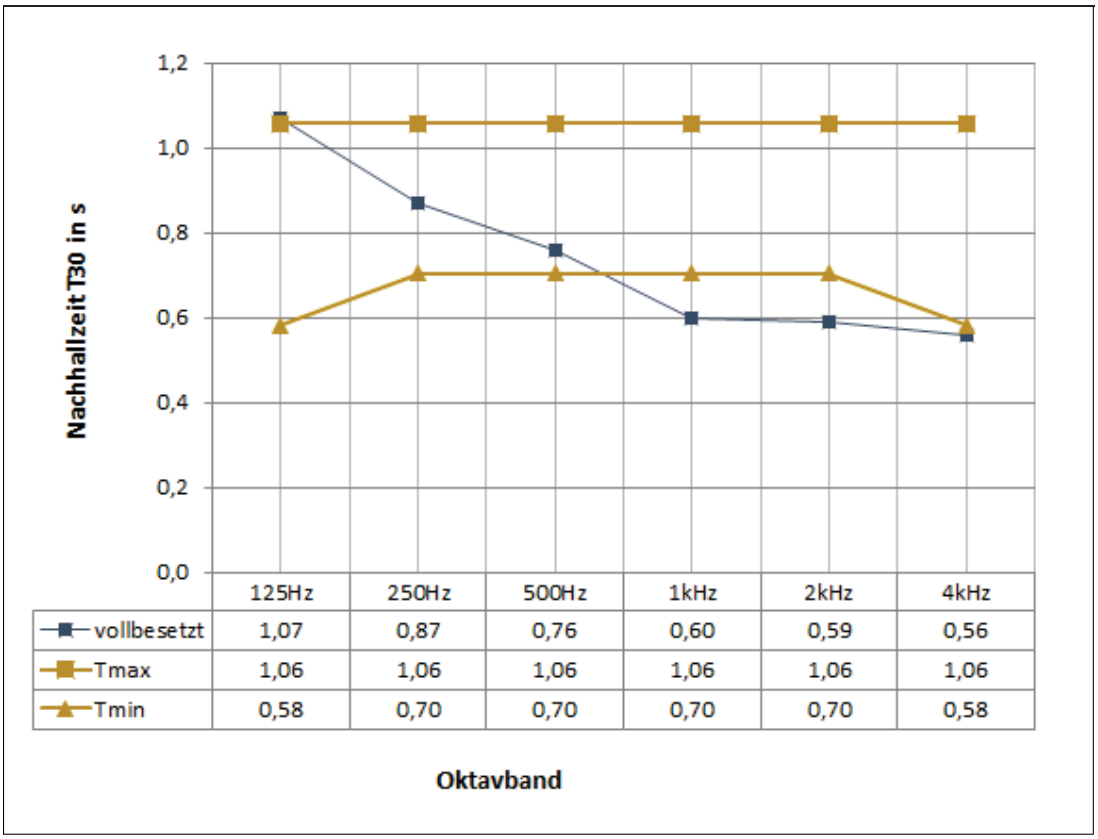
D.5.3 Simulation

Angaben zur Simulation

Detail	"Vollbesetzt"
Simulationsauflösung	0,5m
Anzahl der Mikrofonpositionen:	24
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Temperatur und Luftfeuchte:	21,3 $°C$, 46,4 %

Tabelle D.12: Angaben zur Simulation

Nachhhallzeit T_{30} in Oktavbändern



	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
vollbesetzt	1,07	0,87	0,76	0,60	0,59	0,56
Tmax	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Tmin	0,58	0,70	0,70	0,70	0,70	0,58

Abbildung D.28: Simulierte Nachhallzeit und Toleranzband

Nachhallzeit

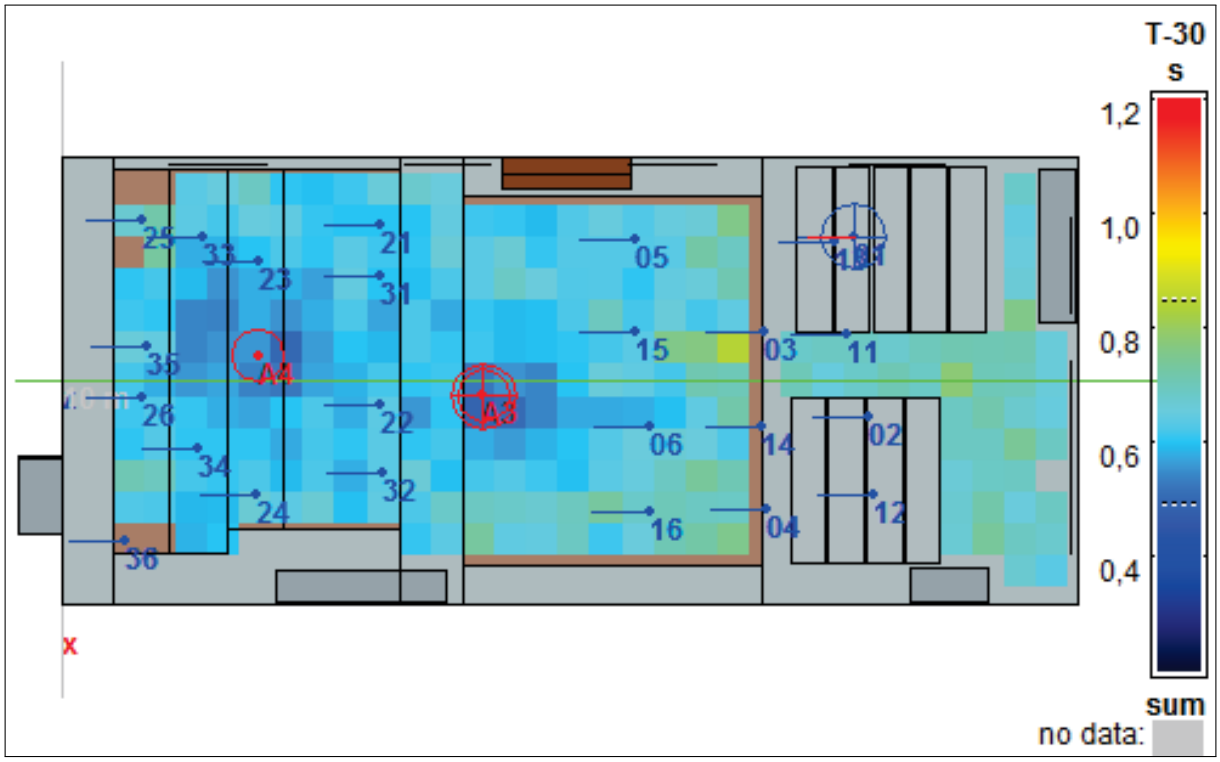


Abbildung D.29: Nachhallzeit T30 in s

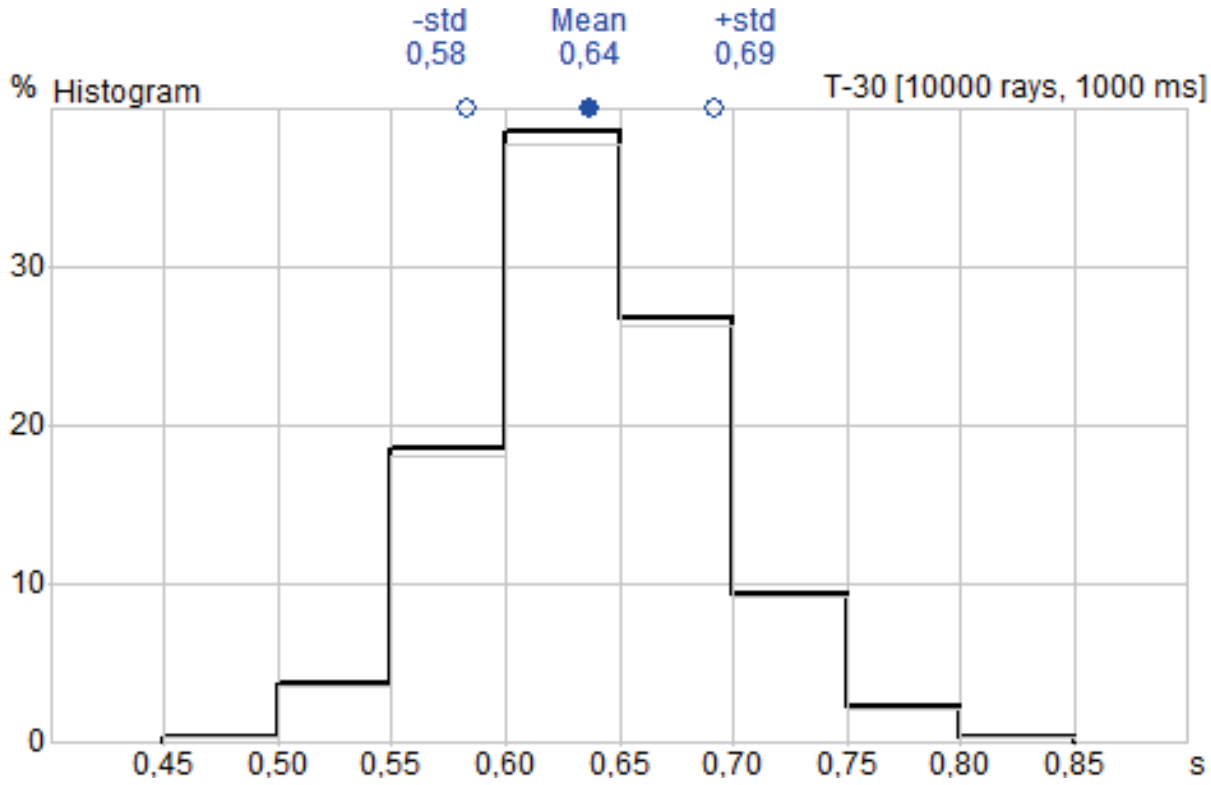


Abbildung D.30: Häufigkeitsverteilung der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung D.29

Schalldruckpegel

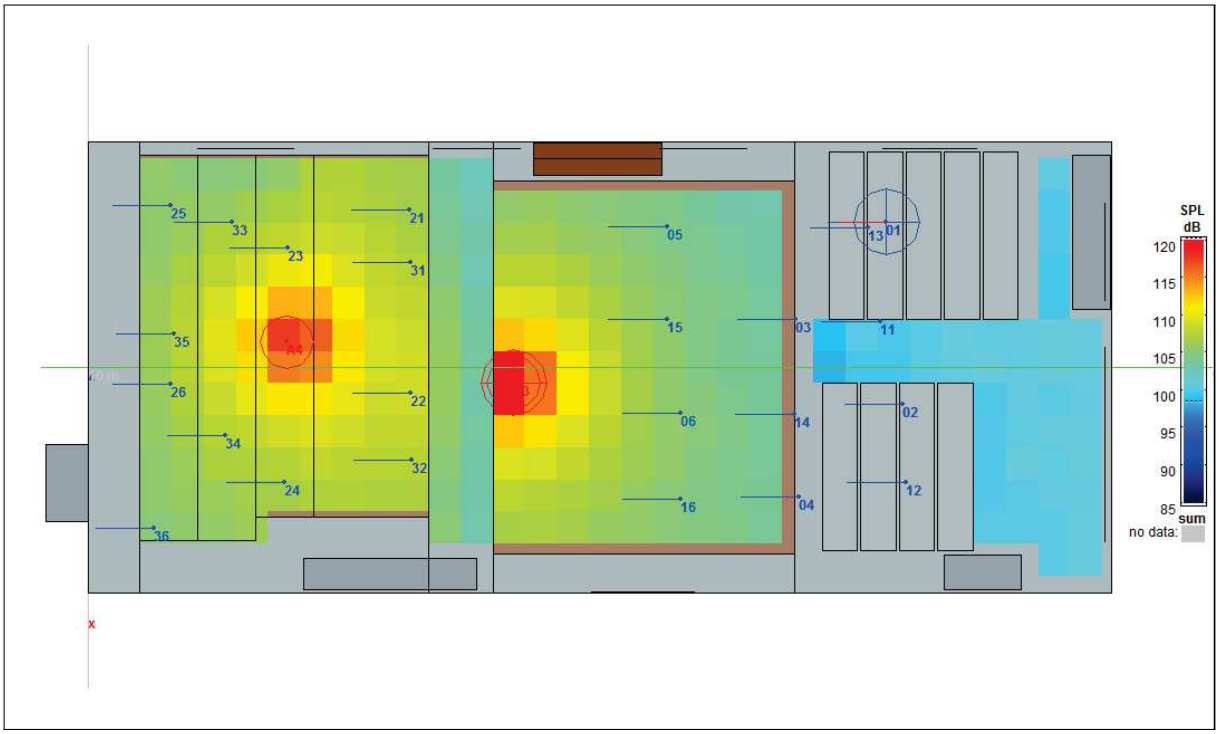


Abbildung D.31: Schalldruckpegel in dB

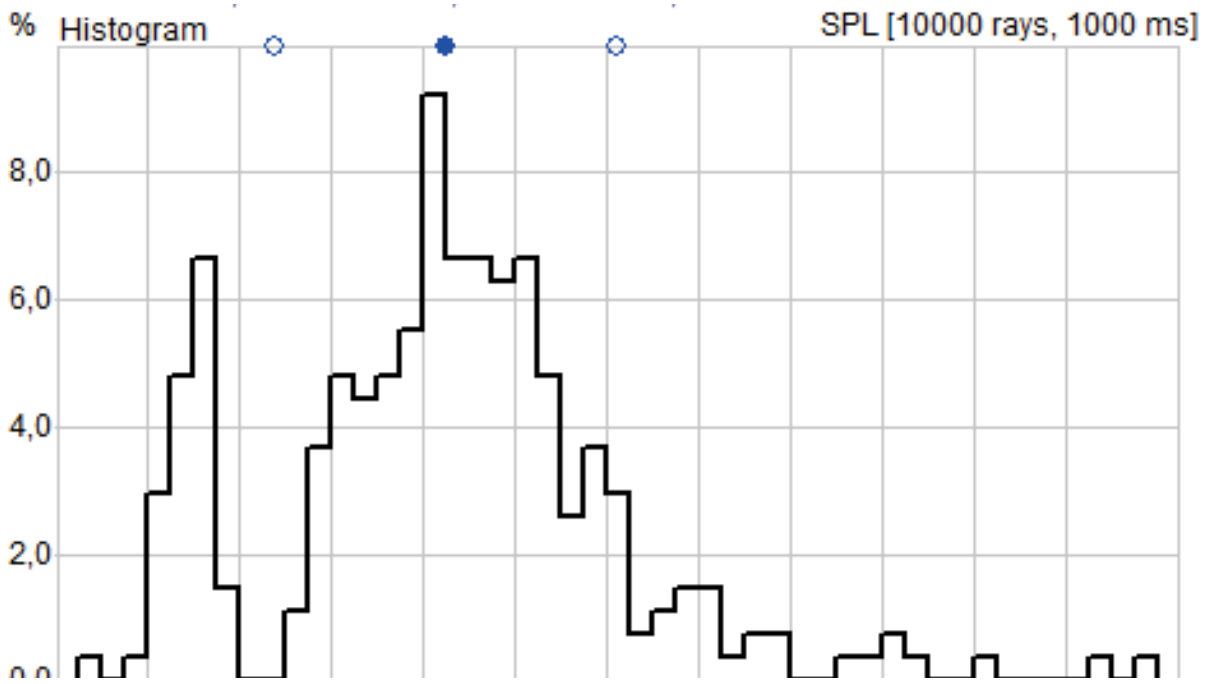


Abbildung D.32: Häufigkeitsverteilung des Schalldruckpegels SPL zu Abbildung D.31

D.6 Akustisches Datenblatt von Raum 208 mit totalabsorbierenden Flächen

D.6.1 Beschreibung und Raumdaten

Beschreibung und Raumskizze

Raumhöhe:	4,08 m
Raumlänge:	15,93 m
Raumbreite:	7,11 m
Volumen (leer):	456 m^3
Schüleranzahl:	110
Vorhänge:	offen
verwendete Absorber	Decke, Wände
	totalabsorbierend

Tabelle D.13: Raumdaten

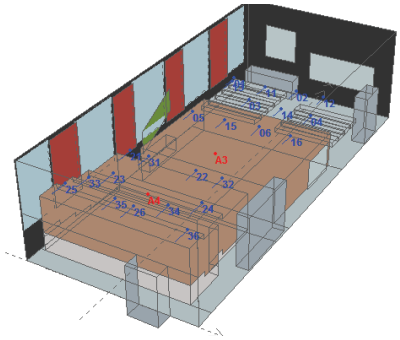


Abbildung D.33: Raum 208 in vollabsorbierendem Zustand

D.6.3 Skizze aus unterschiedlichen Perspektiven

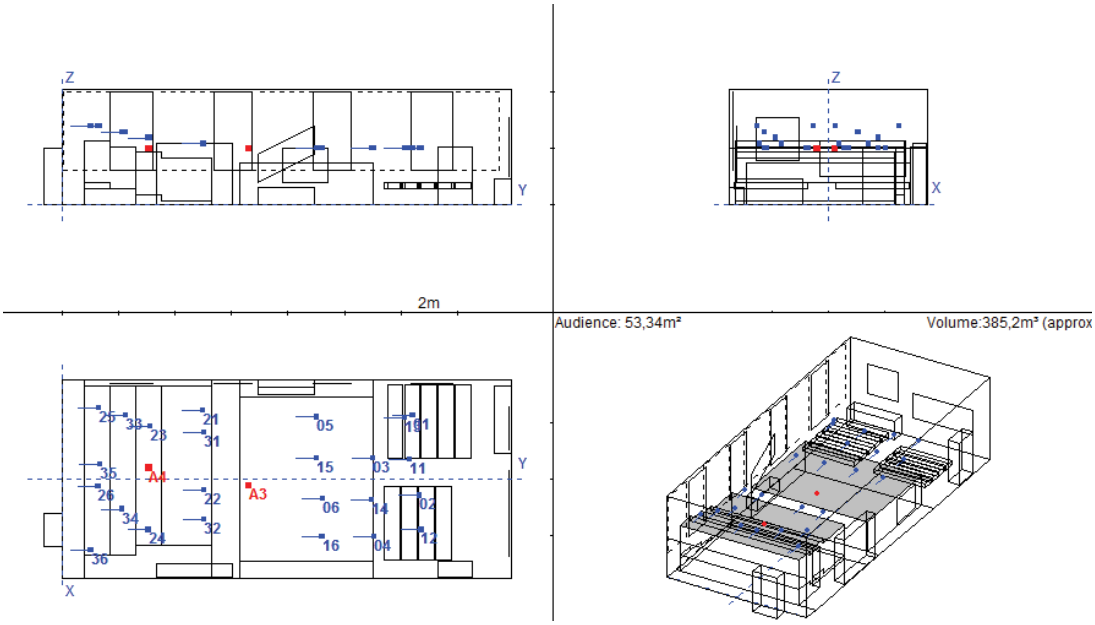


Abbildung D.34: Raum 208 Totalabsorbierend - Perspektiven

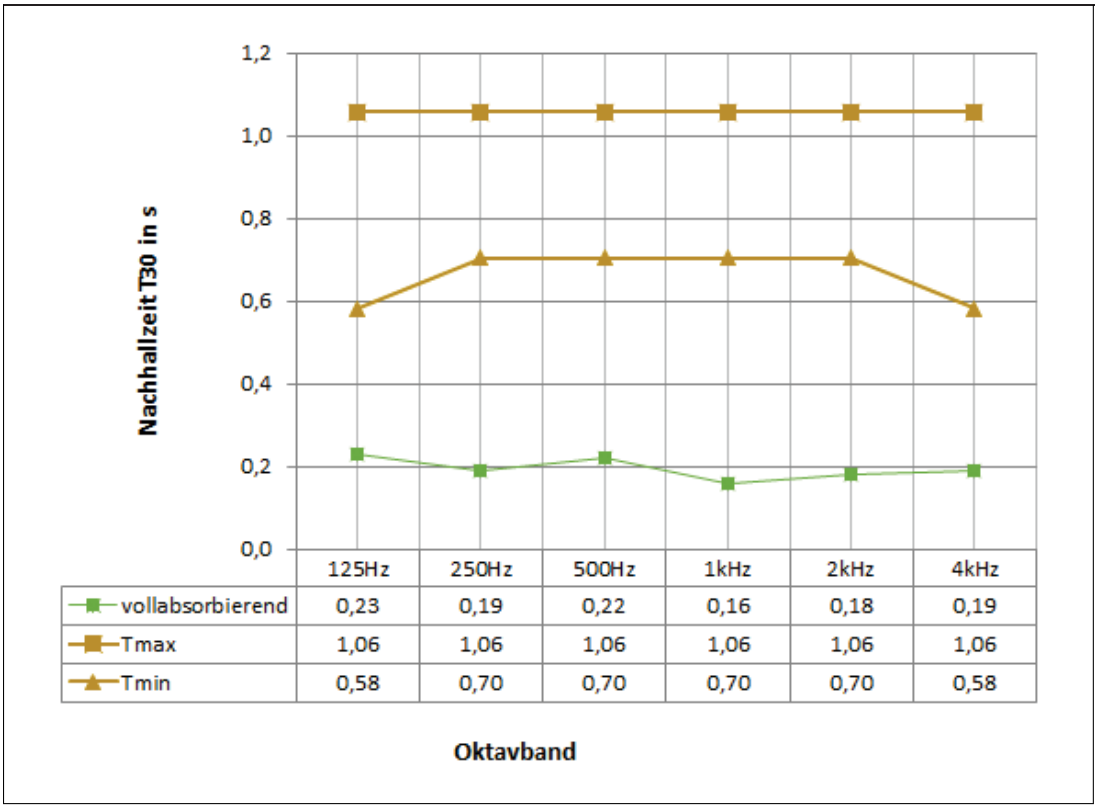
D.6.4 Simulation

Angaben zur Simulation

Detail	Totalabsorbierender Raum
Simulationsauflösung	0,5 m
Anzahl der Mikrofonpositionen:	24
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Temperatur und Luftfeuchte:	21,3 $°C$, 46,4 %

Tabelle D.14: Angaben zur Simulation

Nachhhallzeit T_{30} in Oktavbändern



	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
vollabsorbierend	0,23	0,19	0,22	0,16	0,18	0,19
Tmax	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Tmin	0,58	0,70	0,70	0,70	0,70	0,58

Abbildung D.35: Simulierte Nachhallzeit und Toleranzband

Nachhallzeit

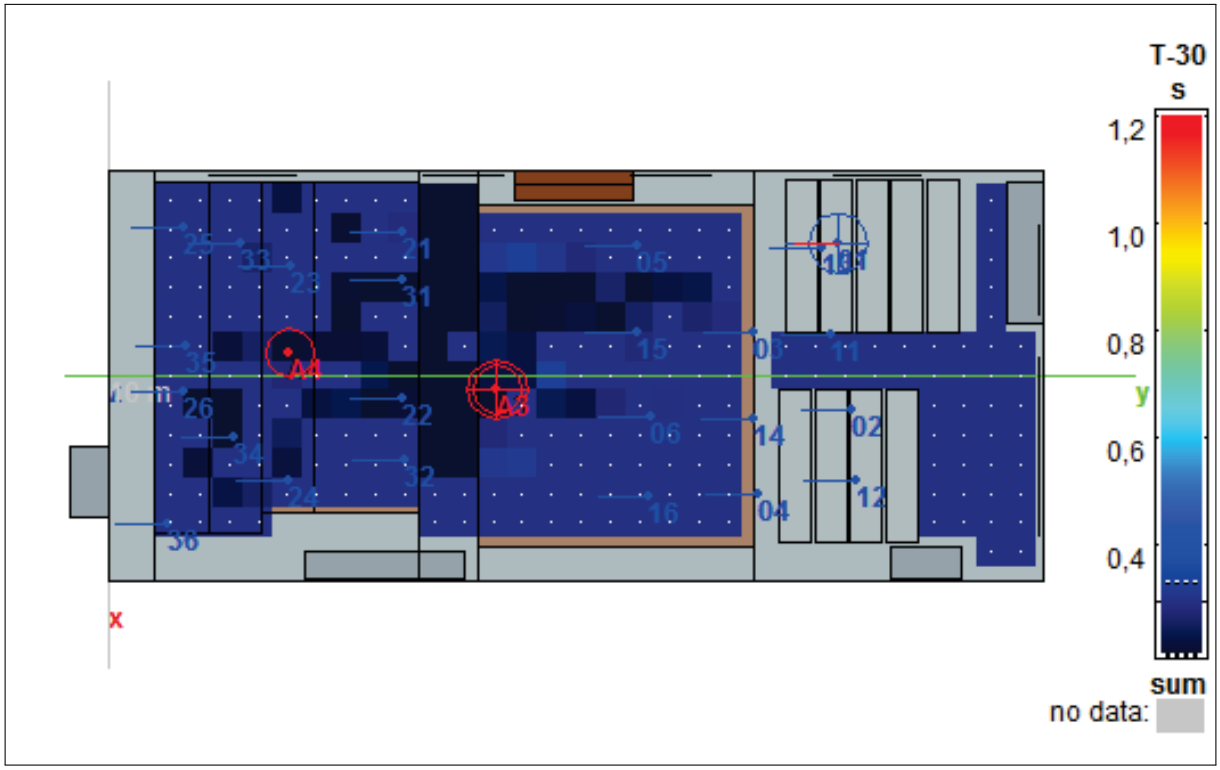


Abbildung D.36: Nachhallzeit T30 in s

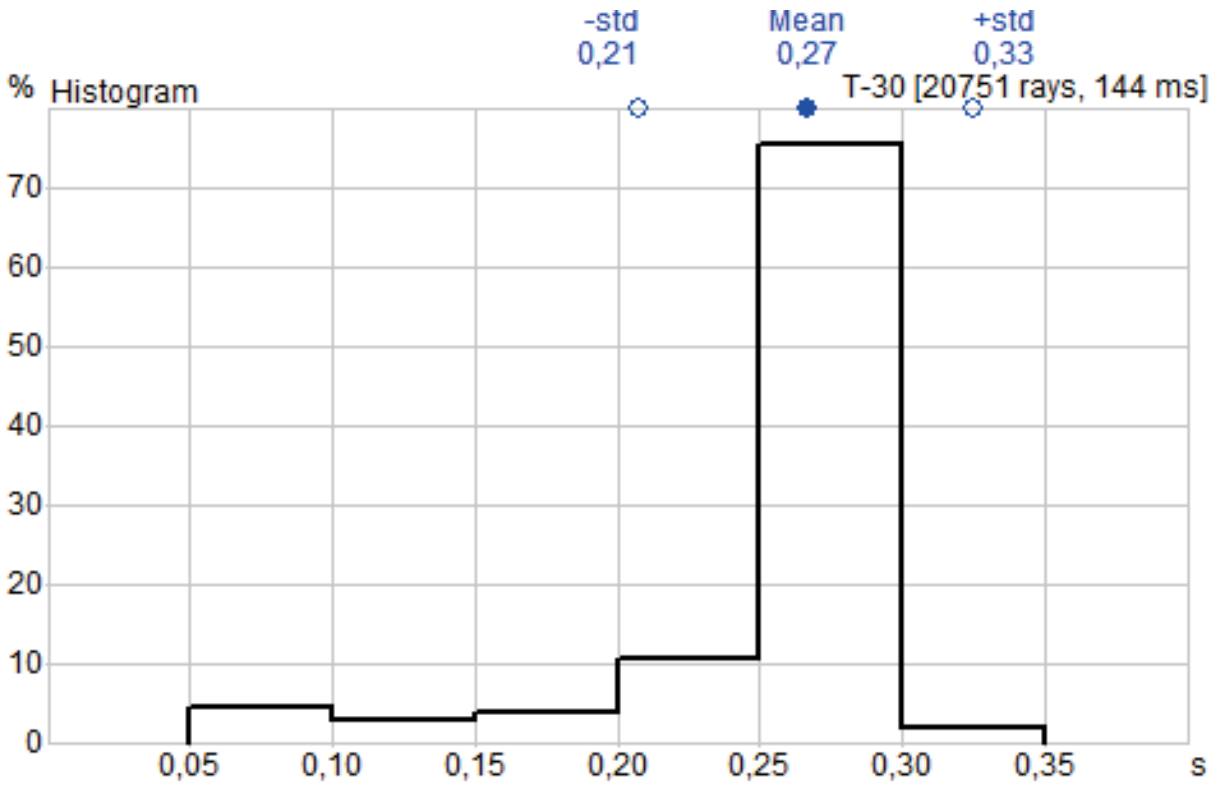


Abbildung D.37: Häufigkeitsverteilung der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung D.36

Schalldruckpegel

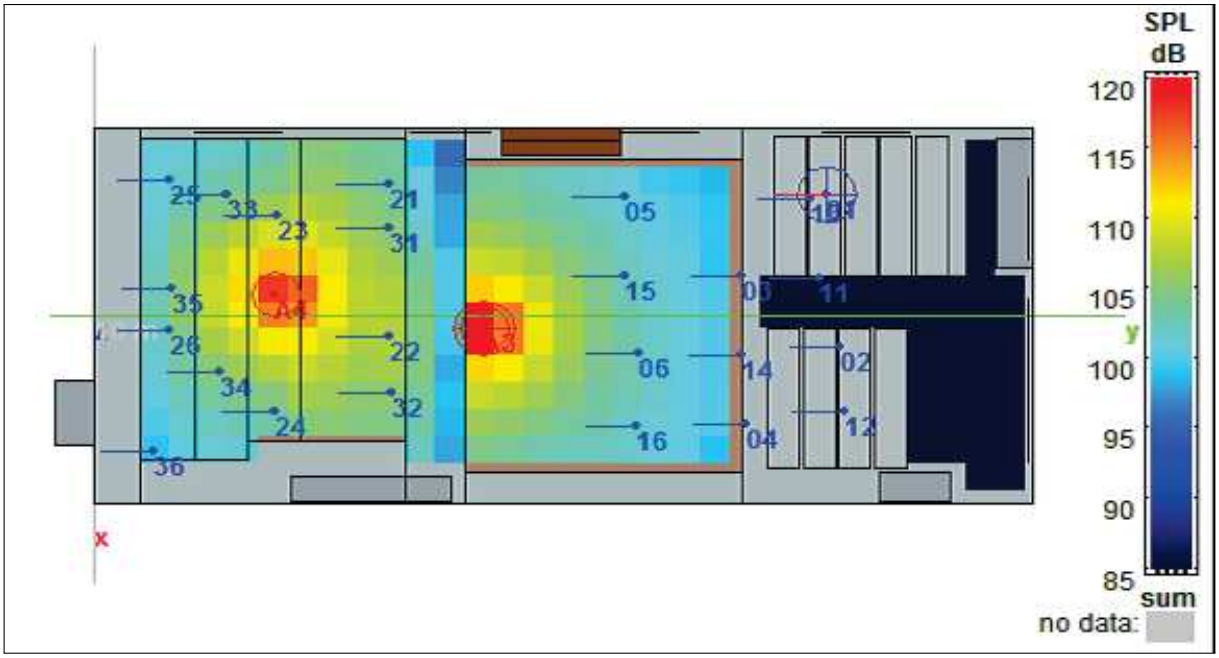


Abbildung D.38: Schalldruckpegel in dB

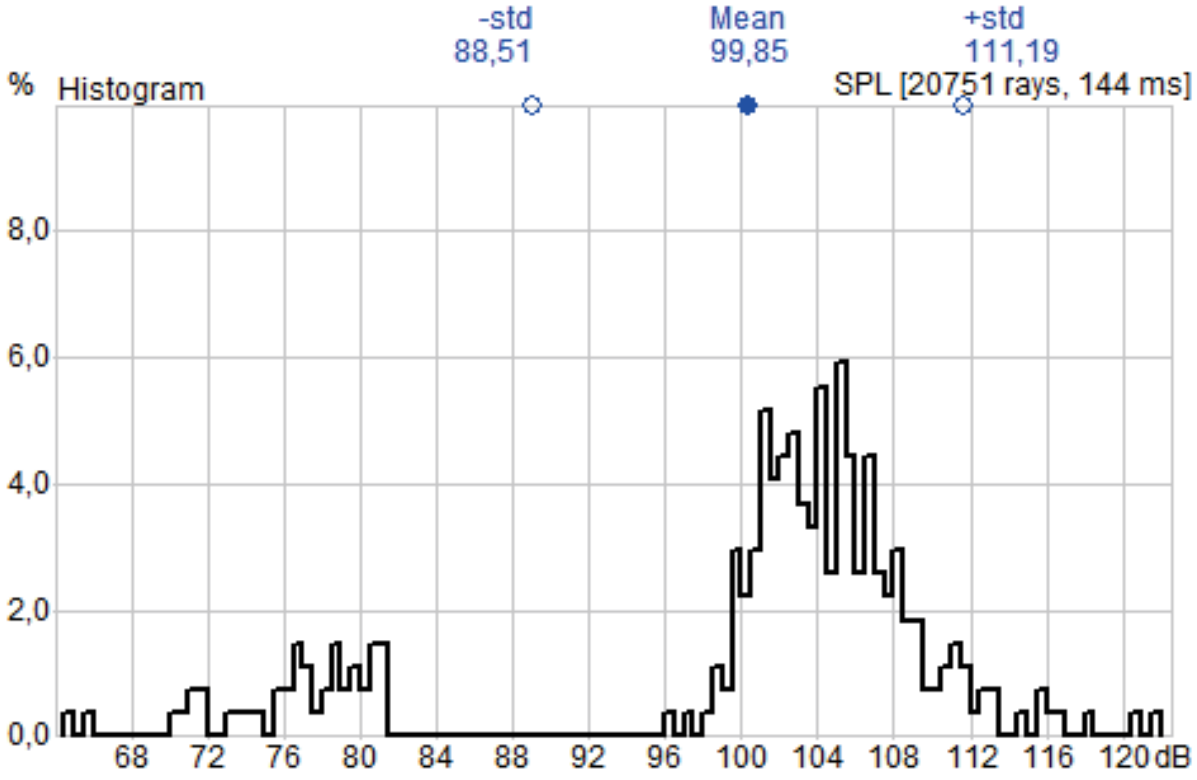


Abbildung D.39: Häufigkeitsverteilung des Schalldruckpegels SPL zu Abbildung D.38

D.7 Akustisches Datenblatt von Raum 208 mit stark absorbierenden Flächen

D.7.1 Beschreibung und Raumskizze

Raumhöhe:	4,08 m
Raumlänge:	15,93 m
Raumbreite:	7,11 m
Volumen:	456 m^3
Schüleranzahl:	110
Vorhänge:	geschlossen

Verwendete Absorber aus Tabelle 12.1	
Decke	Lochplatte (Nr.16)
Alle Wände	Holzwolle (Nr.17)

Tabelle D.15: Raumdaten

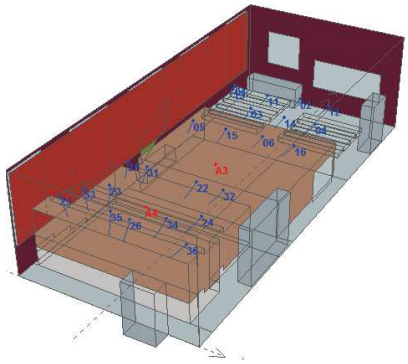


Abbildung D.40: Raum 208 in vollabsorbierendem Zustand

D.7.2 Skizze aus unterschiedlichen Perspektiven

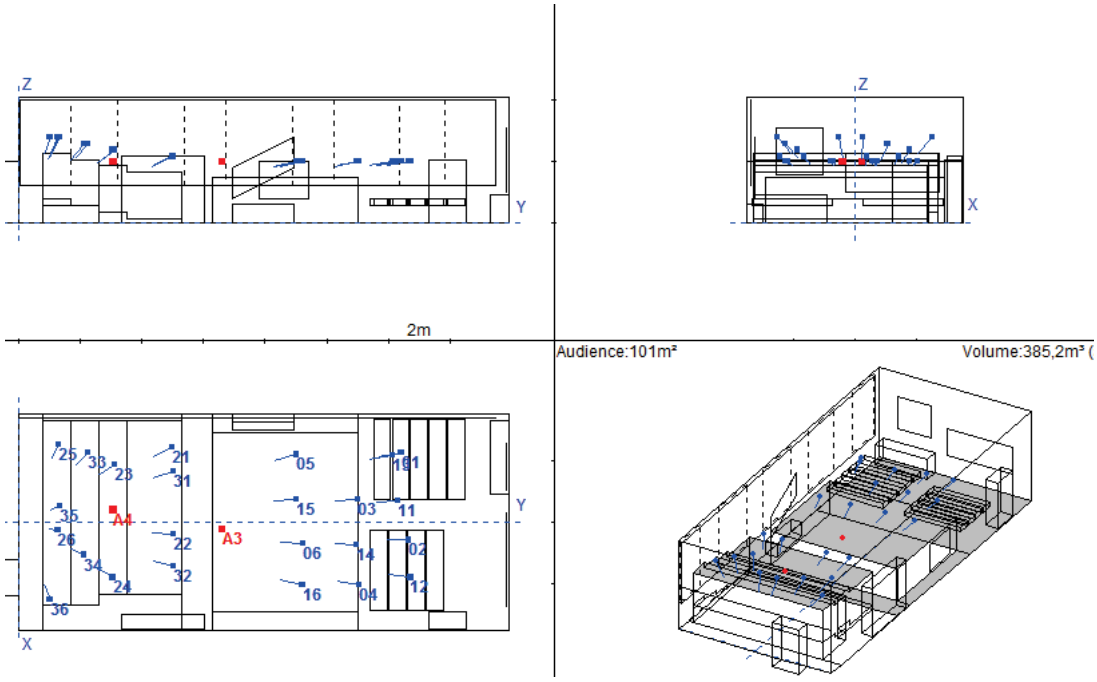


Abbildung D.41: Vollabsorbierender Zustand - Perspektiven

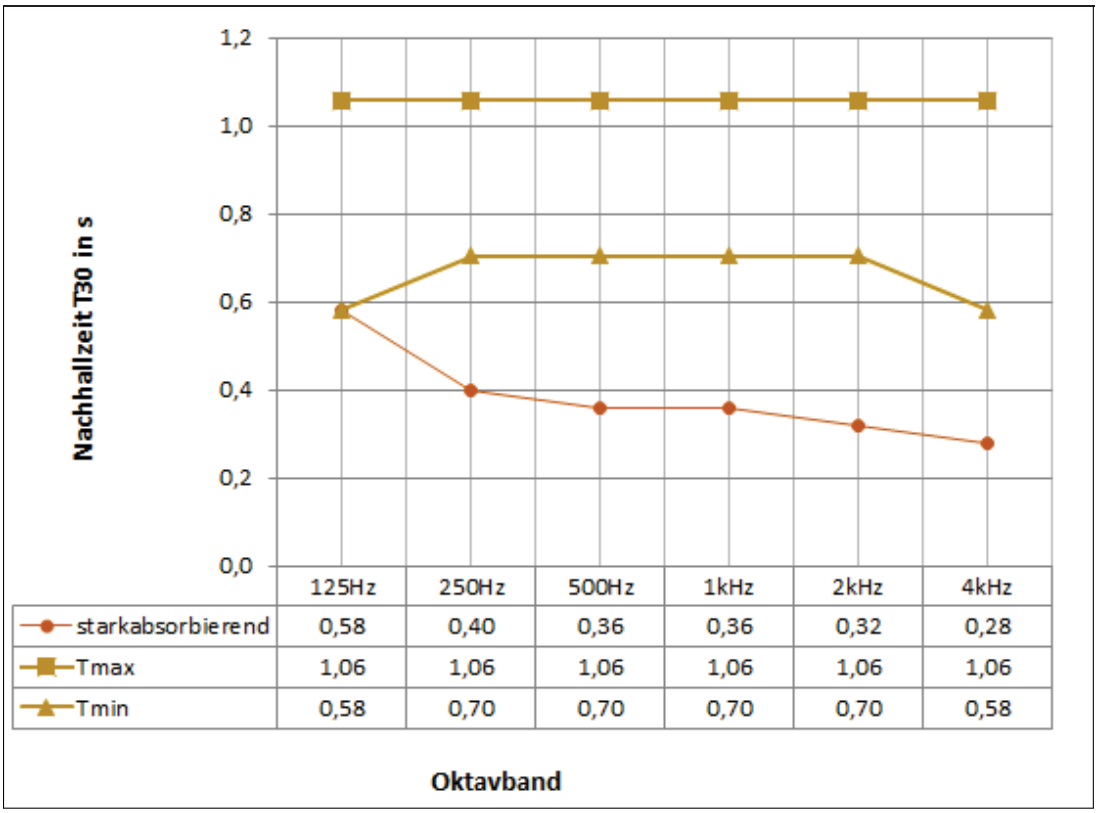
D.7.3 Simulation

Angaben zur Simulation

Detail	Stark absorbierender Raum
Simulationsauflösung	0,5 m
Anzahl der Mikrofonpositionen:	24
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Temperatur und Luftfeuchte:	21,3 $°C$, 46,4 %

Tabelle D.16: Angaben zur Simulation

Nachhhallzeit T_{30}



	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
starkabsorbierend	0,58	0,40	0,36	0,36	0,32	0,28
Tmax	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Tmin	0,58	0,70	0,70	0,70	0,70	0,58

Abbildung D.42: Simulierte Nachhallzeit und Toleranzband

Nachhallzeit

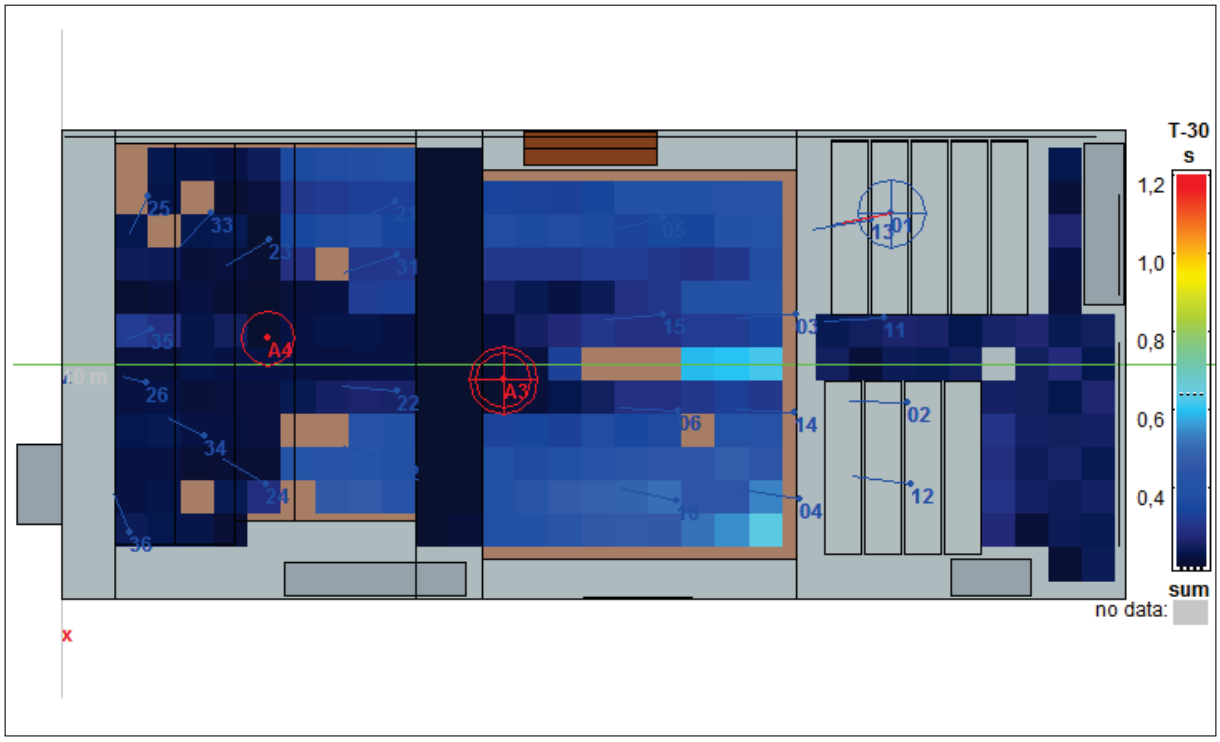


Abbildung D.43: Nachhallzeit T30 in s

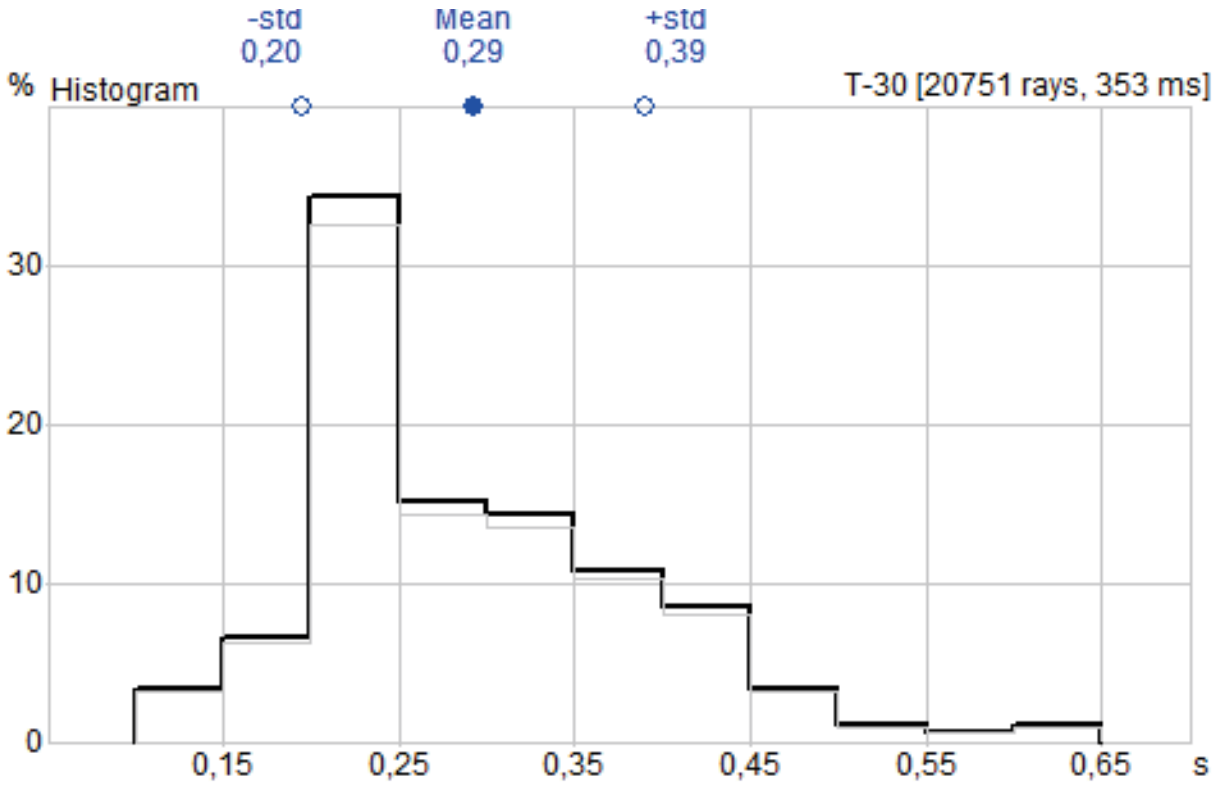


Abbildung D.44: Häufigkeitsverteilung der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung D.43

Schalldruckpegel

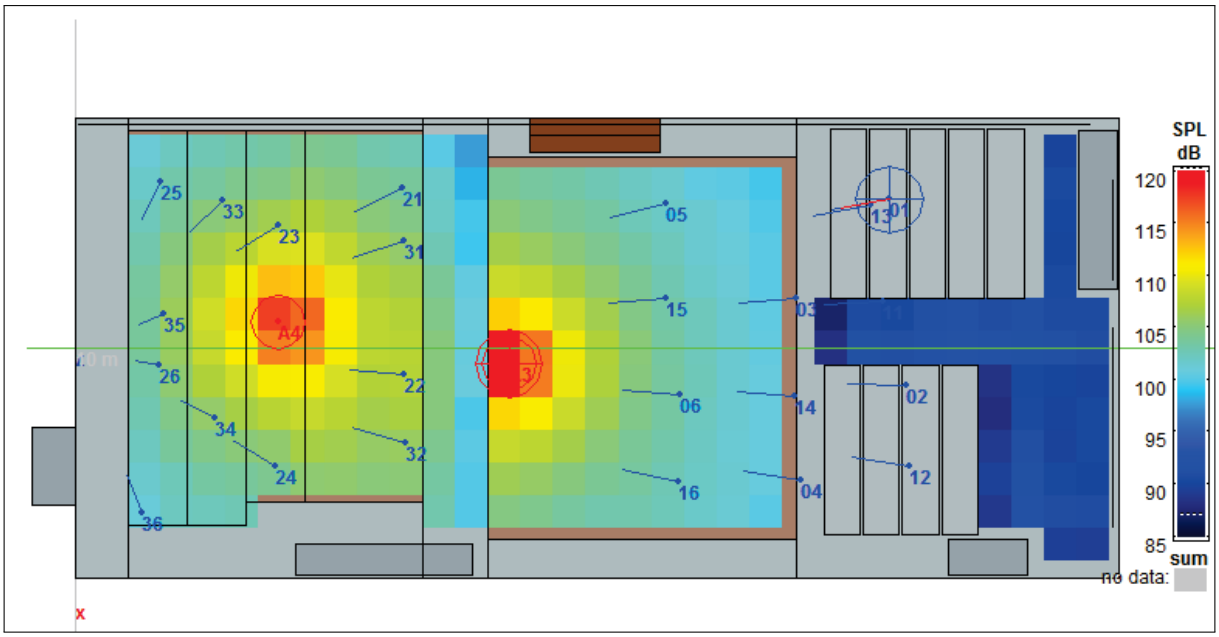


Abbildung D.45: Schalldruckpegel in dB

Abbildung D.46: Häufigkeitsverteilung des Schalldruckpegels SPL zu Abbildung D.45

D.8 Akustisches Datenblatt von Raum 208 mit geschlossenem Vorhang

D.8.1 Beschreibung und Raumskizze

Raumhöhe:	4,08 m
Raumlänge:	15,93 m
Raumbreite:	7,11 m
Volumen:	456 m^3
angenommene Schüleranzahl:	110
Vorhänge:	geschlossen

Tabelle D.17: Raumdaten

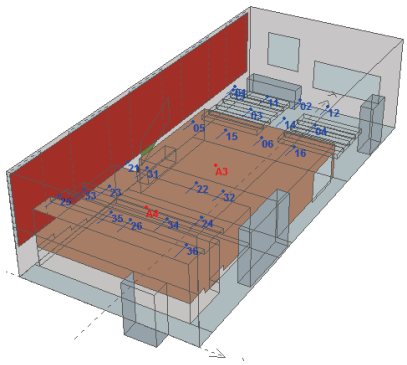


Abbildung D.47: Raum 208 in vorhangzuorbierendem Zustand

D.8.2 Skizze aus unterschiedlichen Perspektiven

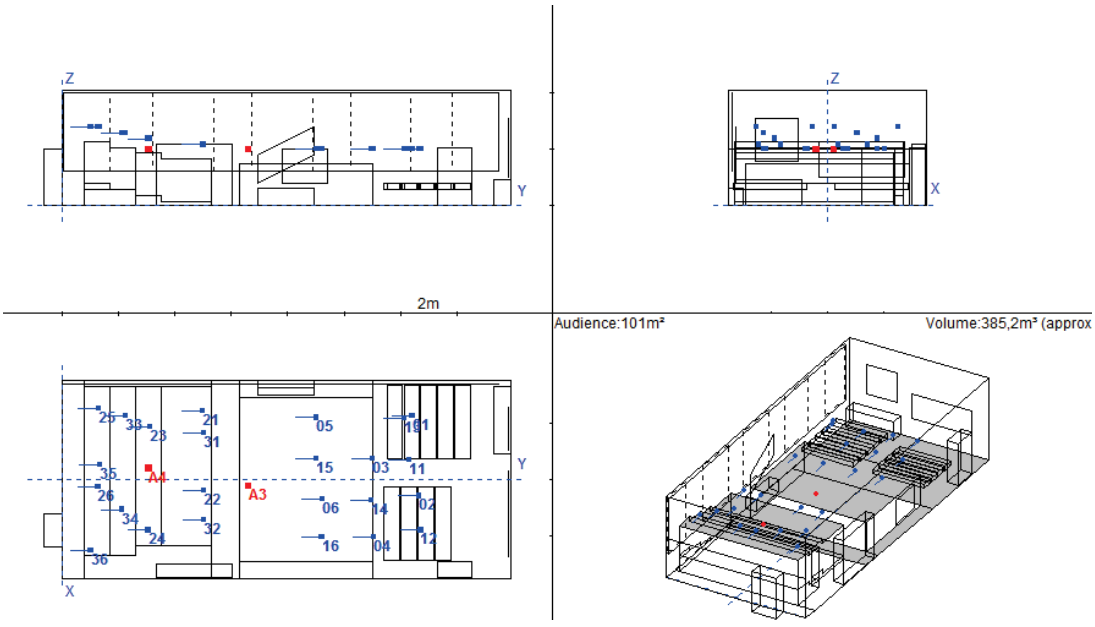


Abbildung D.48: Raum 208 mit Vorhang - Perspektiven

D.8.3 Simulation

Angaben zur Simulation

Detail	geschlossener Vorhang
Simulationsauflösung	0,5m
Anzahl der Mikrofonpositionen:	24
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Temperatur und Luftfeuchte:	21,3 °C, 46,4 %

Tabelle D.18: Angaben zur Simulation

Nachhhallzeit T_{30} in Oktavbändern

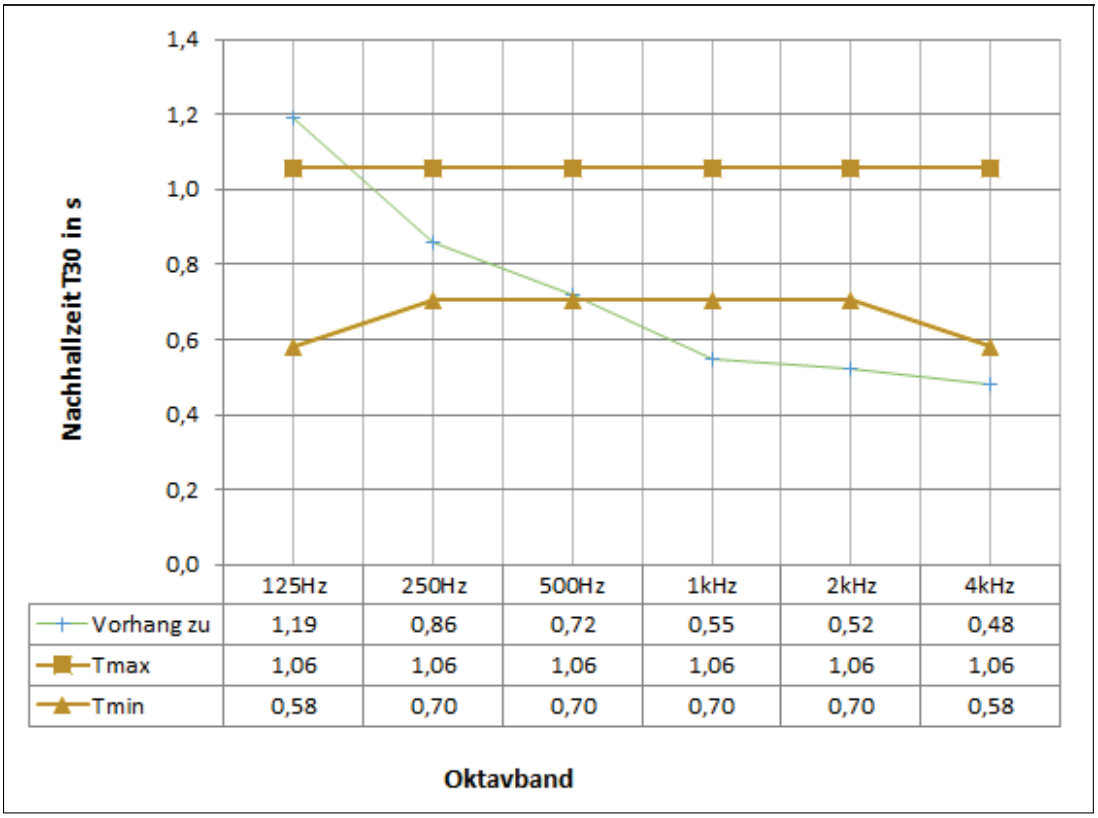


Abbildung D.49: Simulierte Nachhallzeit und Toleranzband

Nachhallzeit

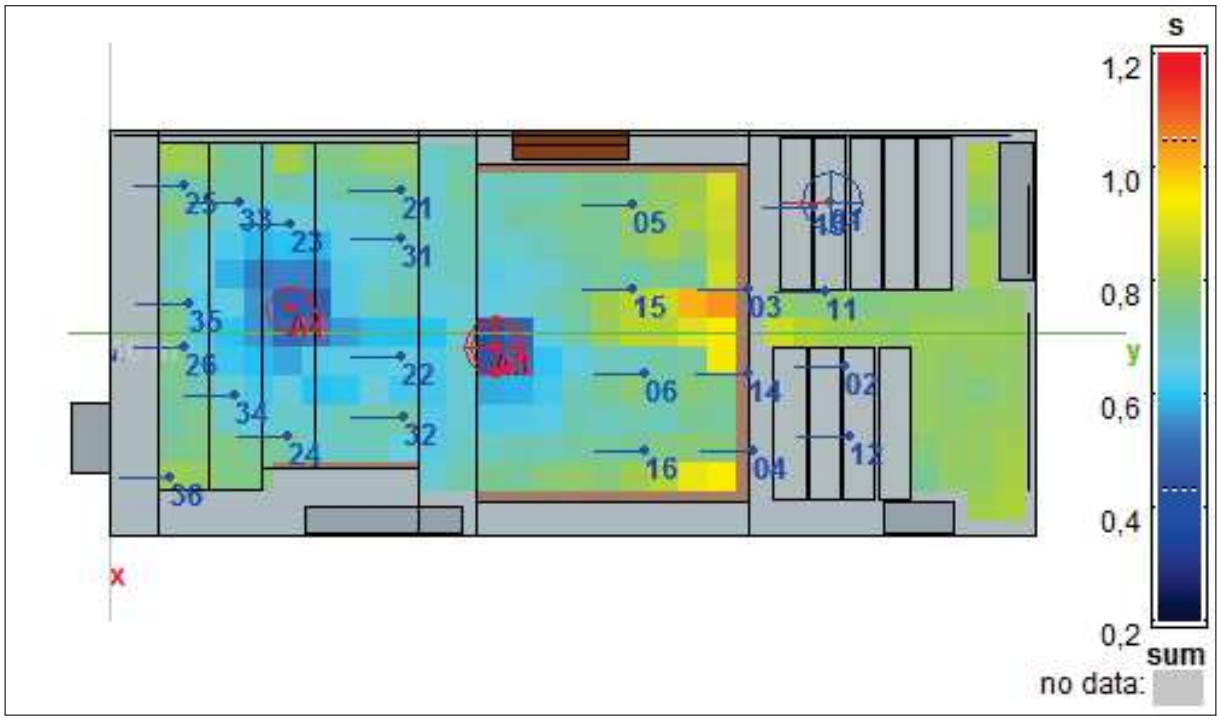


Abbildung D.50: Nachhallzeit T30 in s

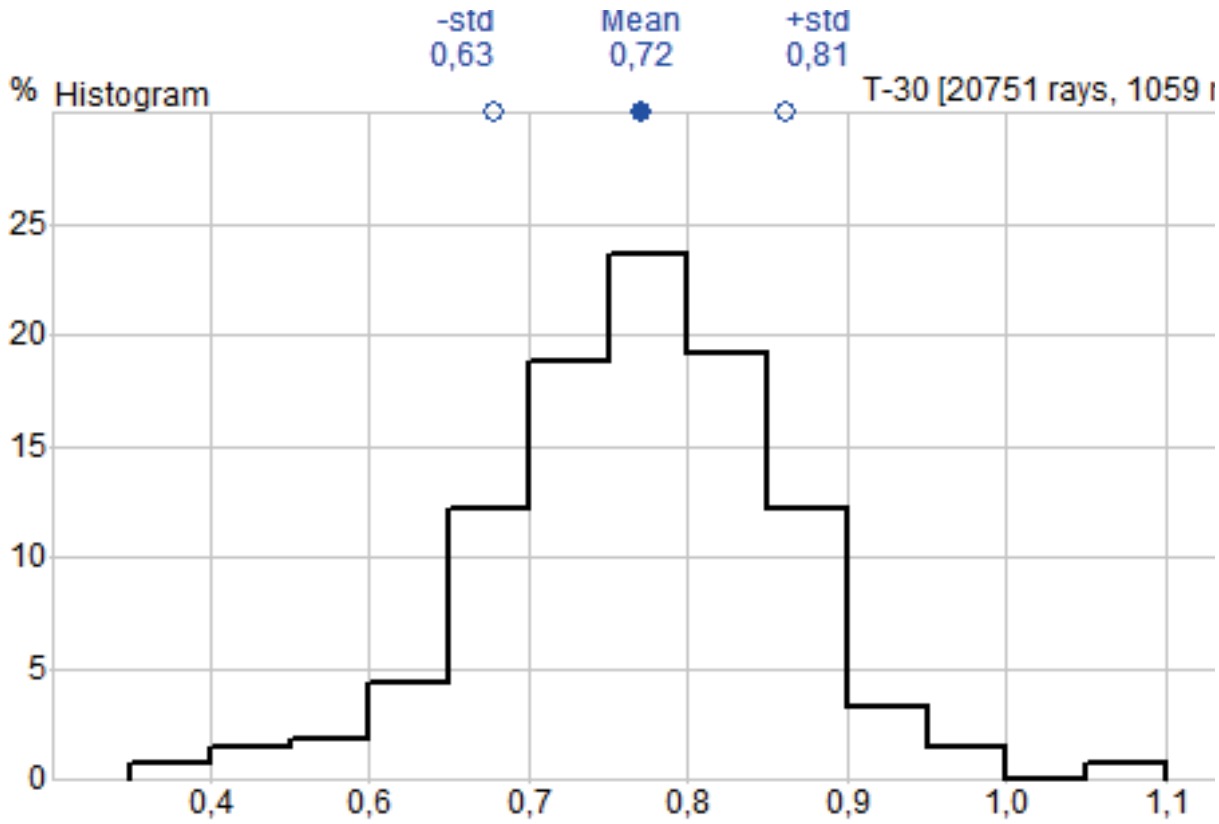


Abbildung D.51: Häufigkeitsverteilung der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung D.50

Schalldruckpegel

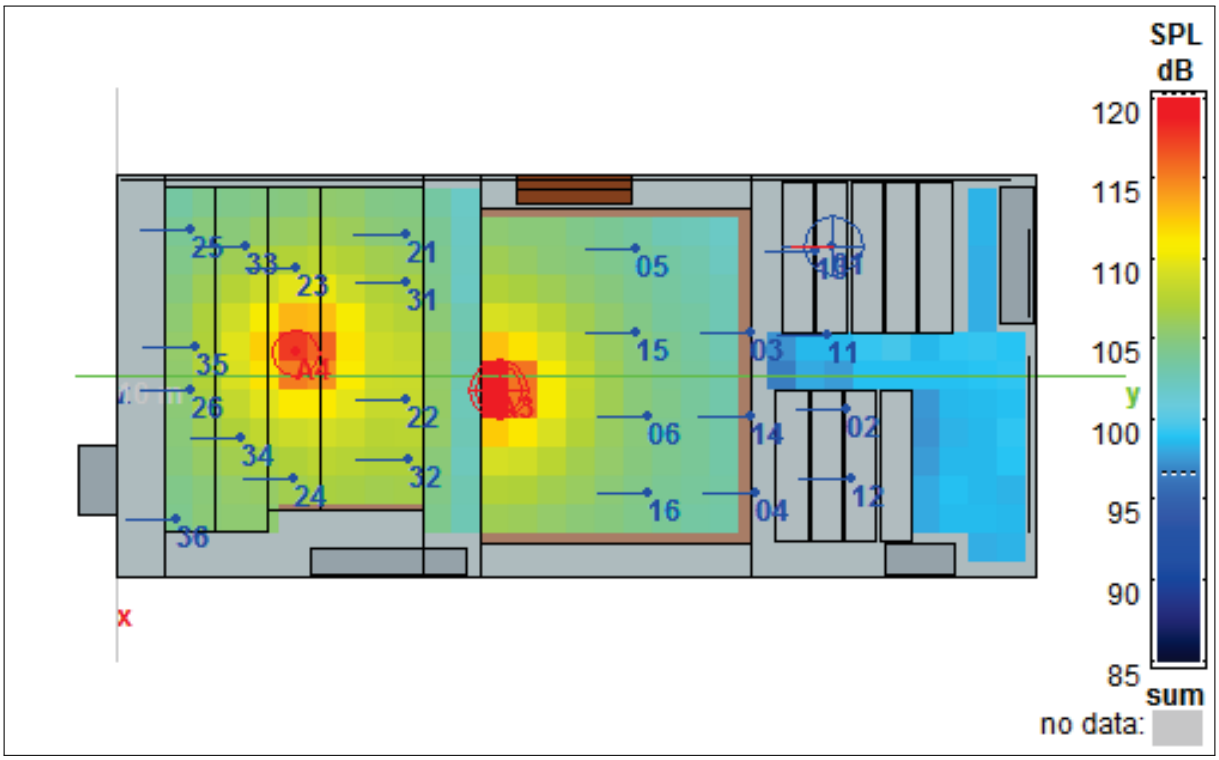


Abbildung D.52: Schalldruckpegel in dB

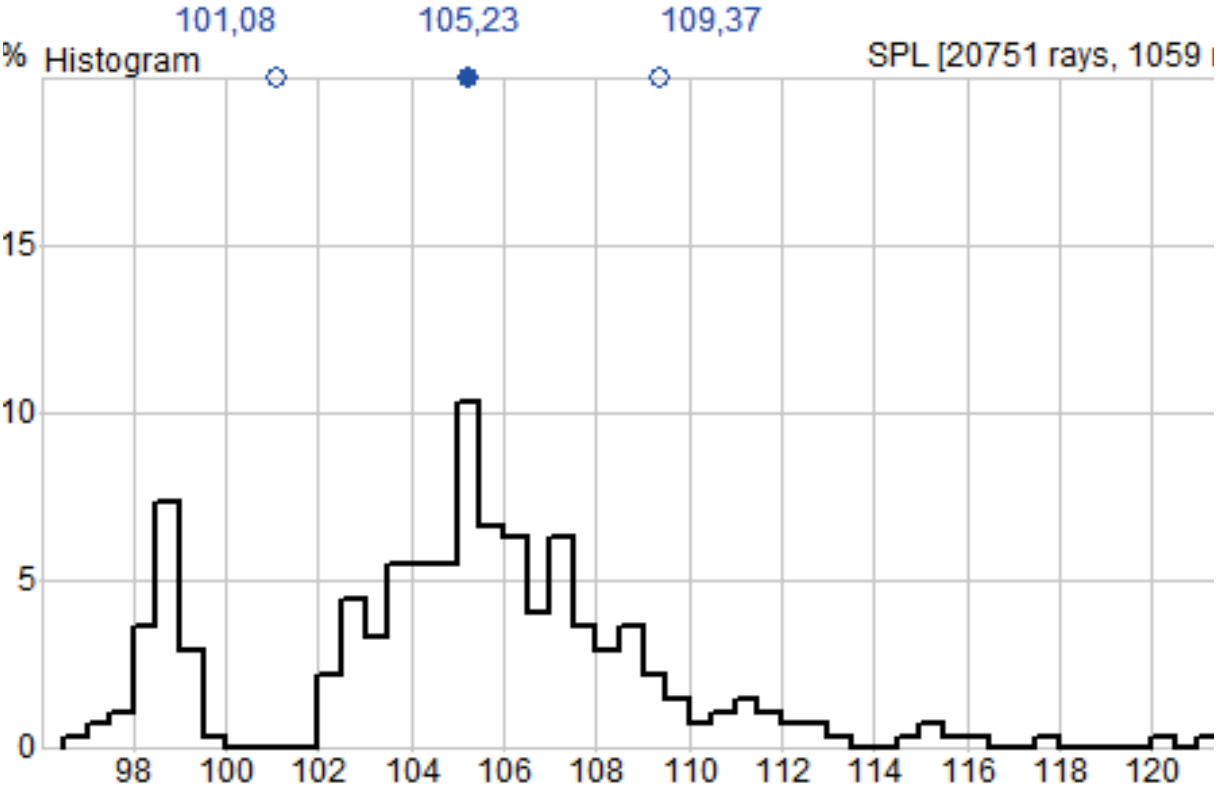


Abbildung D.53: Häufigkeitsverteilung des Schalldruckpegels SPL zu Abbildung D.52

D.9 Akustisches Datenblatt von Raum 208 mit einem Deckenabsorber

D.9.1 Beschreibung und Raumskizze

Raumhöhe:	4,08 m
Raumlänge:	15,93 m
Raumbreite:	7,11 m
Volumen:	456 m^3
angenommene Schüleranzahl:	30
Vorhänge:	offen
verwendete Absorber	Deckenabsorber Gipskartabs450

Tabelle D.19: Raumdaten

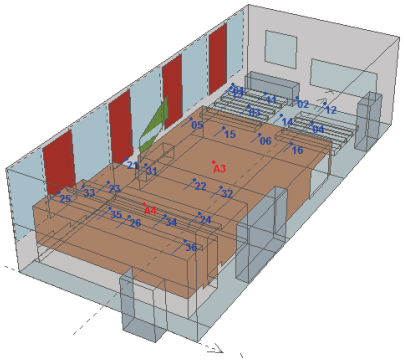


Abbildung D.54: Raum 208 mit absorbierenden Decken

D.9.2 Skizze aus unterschiedlichen Perspektiven

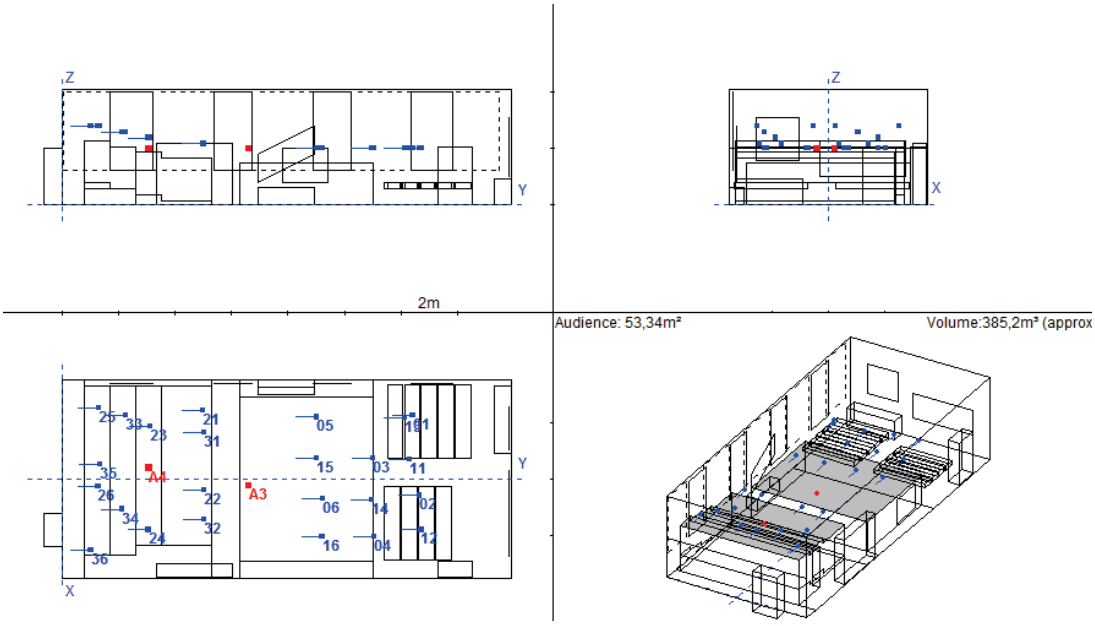


Abbildung D.55: Raum 208 mit Deckenabsorber - Perspektiven

D.9.3 Simulation

Angaben zur Simulation

Detail	Deckenabsorber
Simulationsauflösung:	$0{,}5m$
Anzahl der Mikrofonpositionen:	24
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Temperatur und Luftfeuchte:	21,3 $°C$, 46,4 %

Tabelle D.20: Angaben zur Simulation

Nachhhallzeit T_{30} in Oktavbändern

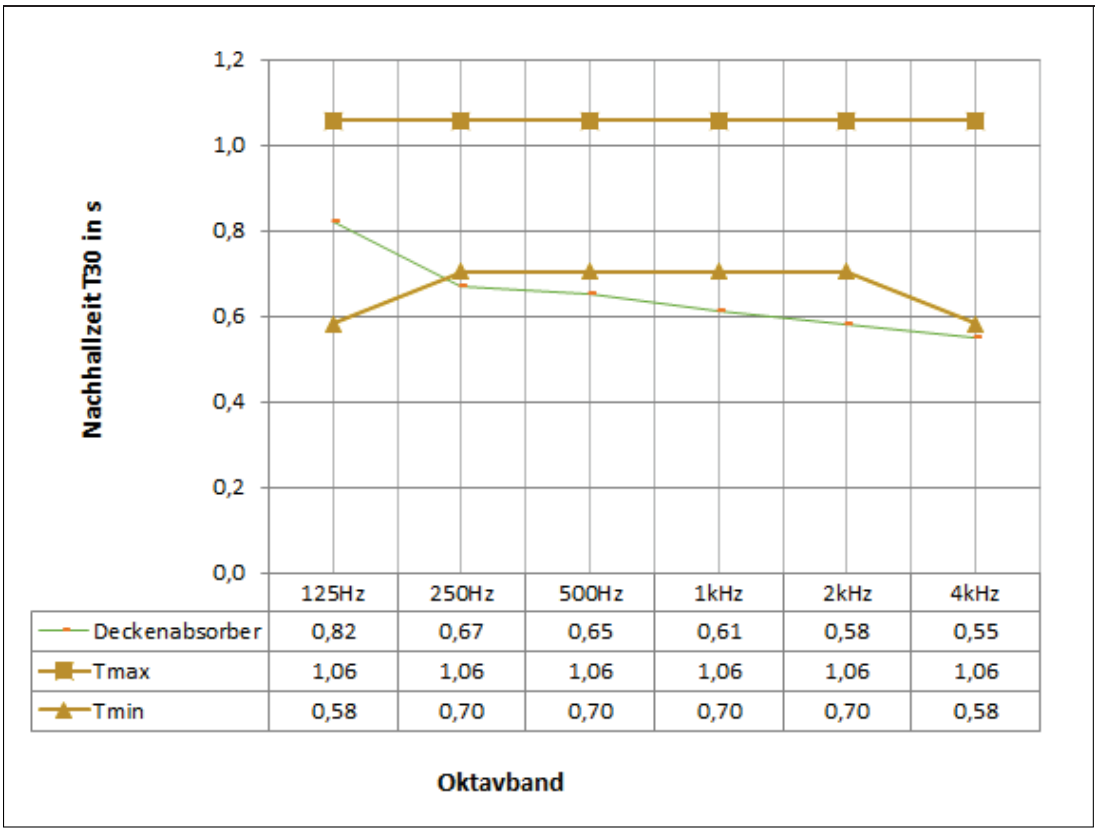


Abbildung D.56: Simulierte Nachhallzeit und Toleranzband

Nachhallzeit

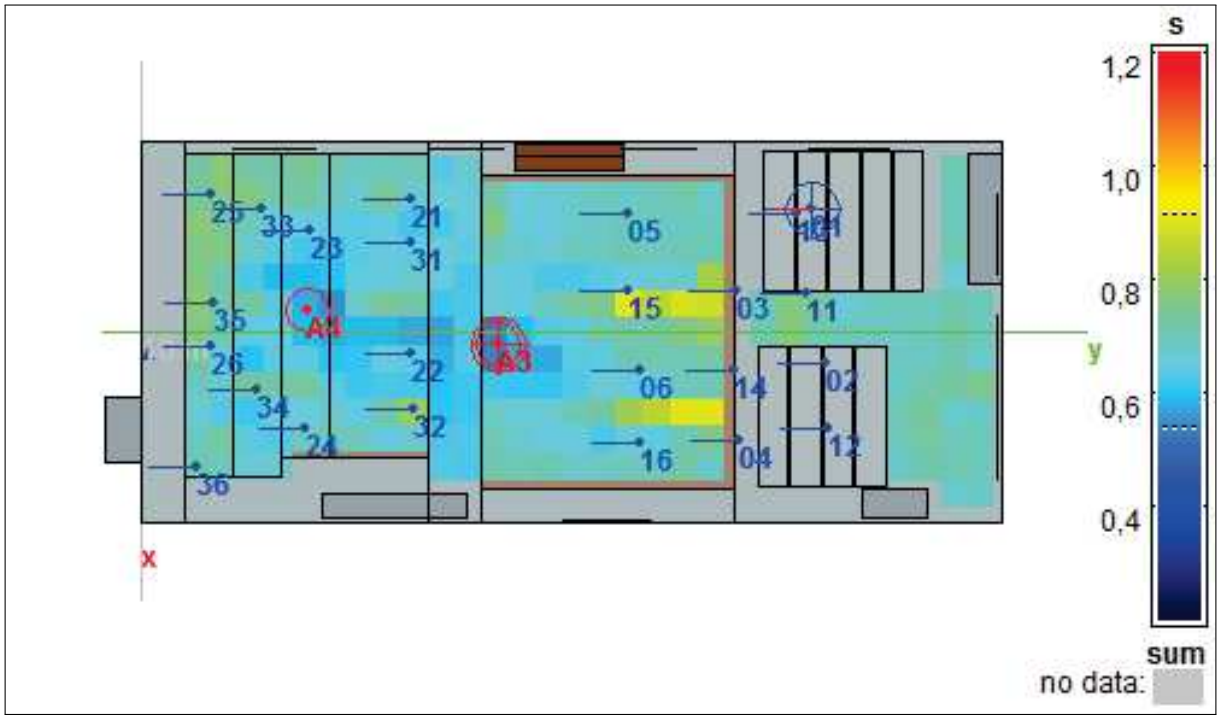


Abbildung D.57: Nachhallzeit T30 in s

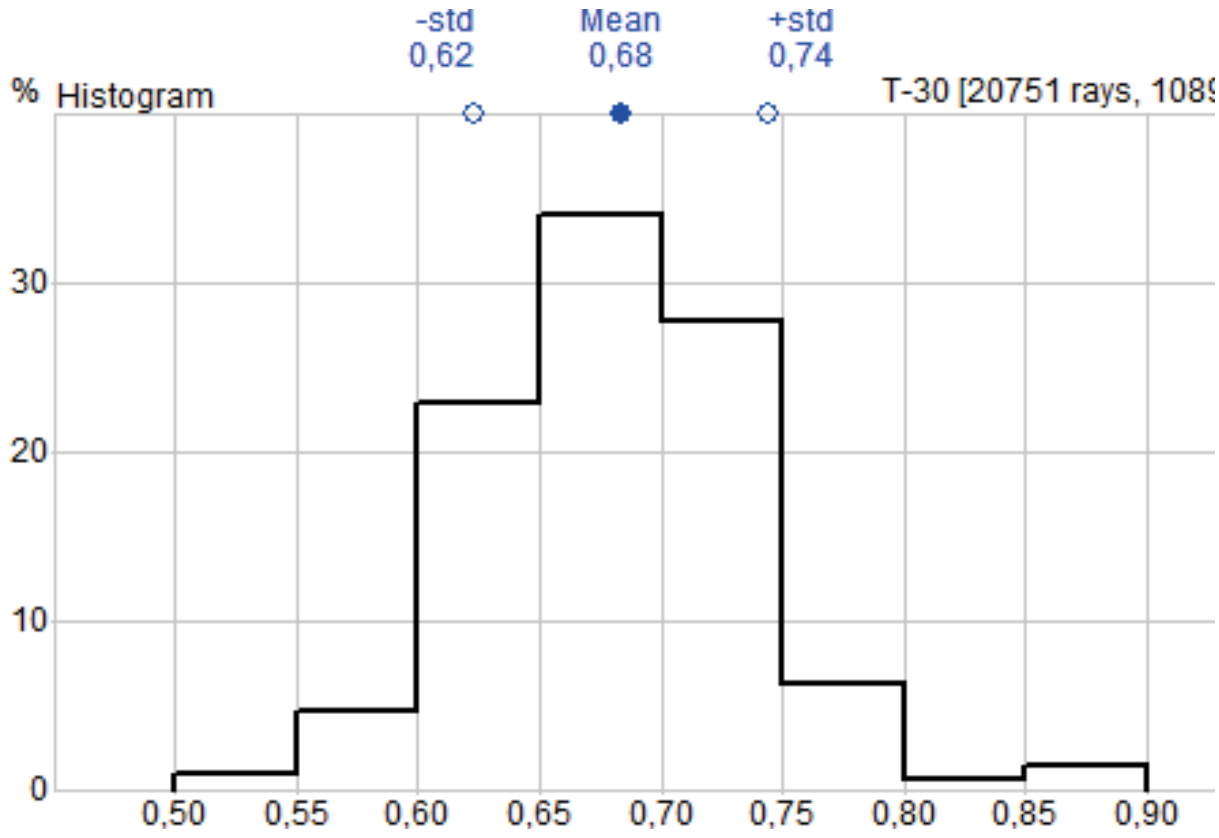


Abbildung D.58: Häufigkeitsverteilung der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung D.57

Schalldruckpegel

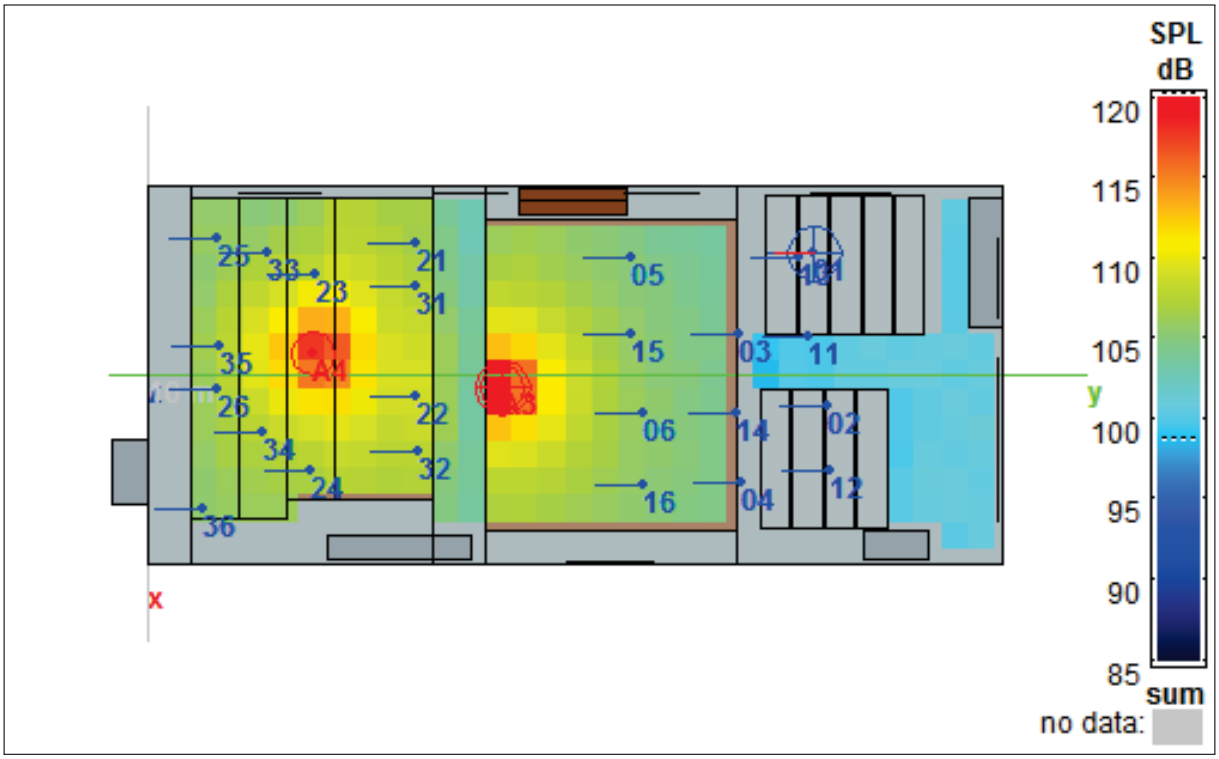


Abbildung D.59: Schalldruckpegel in dB

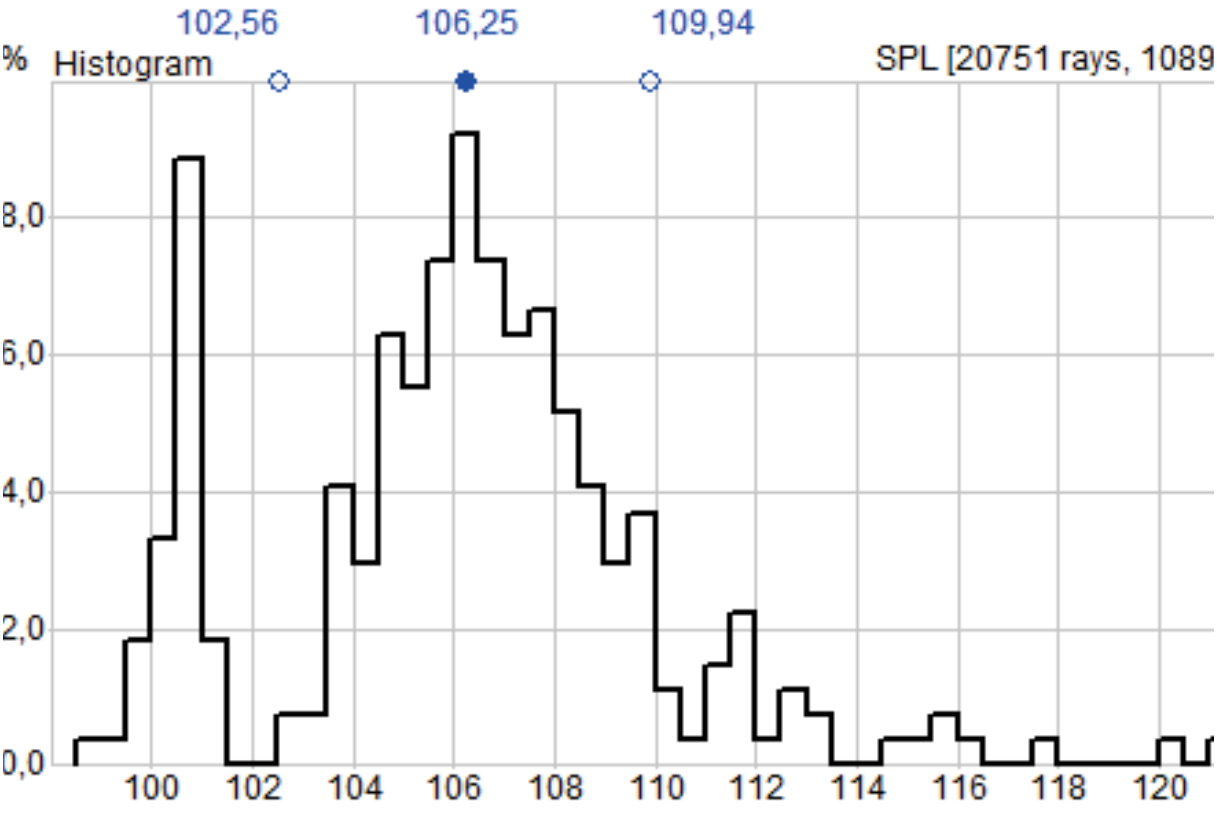


Abbildung D.60: Häufigkeitsverteilung des Schalldruckpegels SPL zu Abbildung D.59

D.10 Akustisches Datenblatt von Raum 208 mit geschlossenem Klappabsorber

D.10.1 Beschreibung und Raumskizze

Raumhöhe:	4,08 m
Raumlänge:	15,93 m
Raumbreite:	7,11 m
Volumen:	456 m^3
angenommene Schüleranzahl:	110
Vorhänge:	stattdessen Absorber
Verwendete Absorber aus Tabelle 12.1	
Klappabsorber	aus Schaumstoff (Nr.7)

Tabelle D.21: Raumdaten

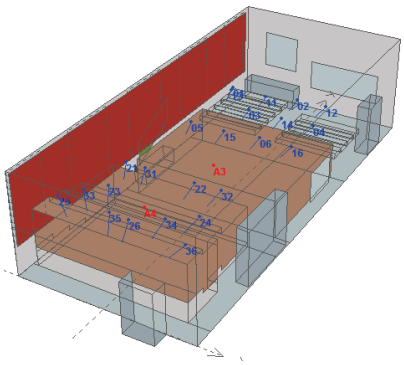


Abbildung D.61: Raum 208 mit Klappabsorber

D.10.2 Skizze aus unterschiedlichen Perspektiven

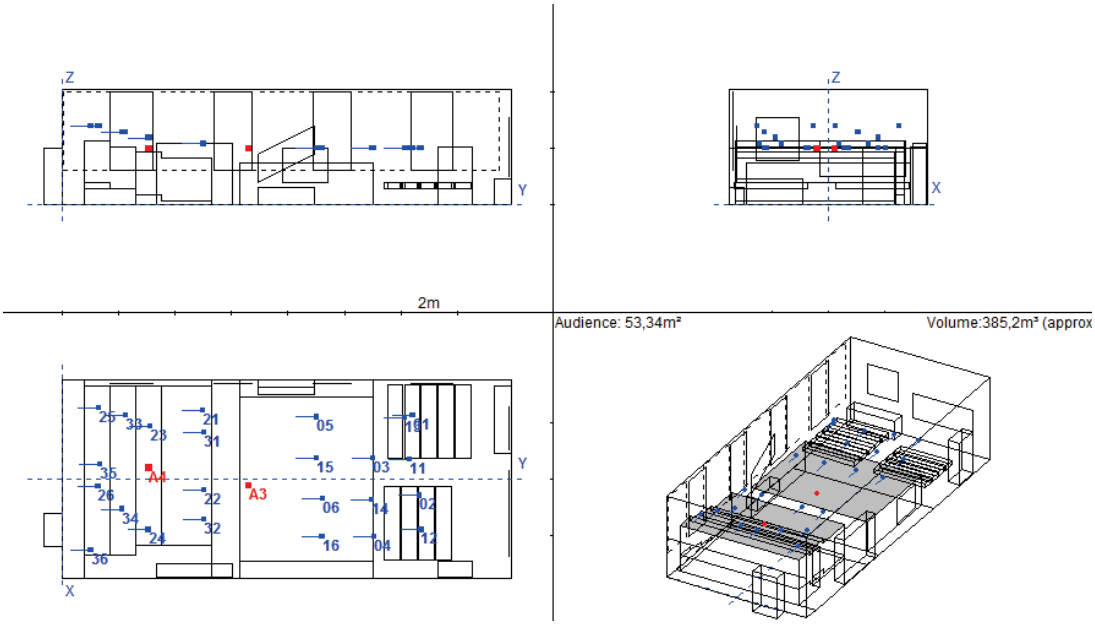


Abbildung D.62: Raum 208 Klappabsorber - Perspektiven

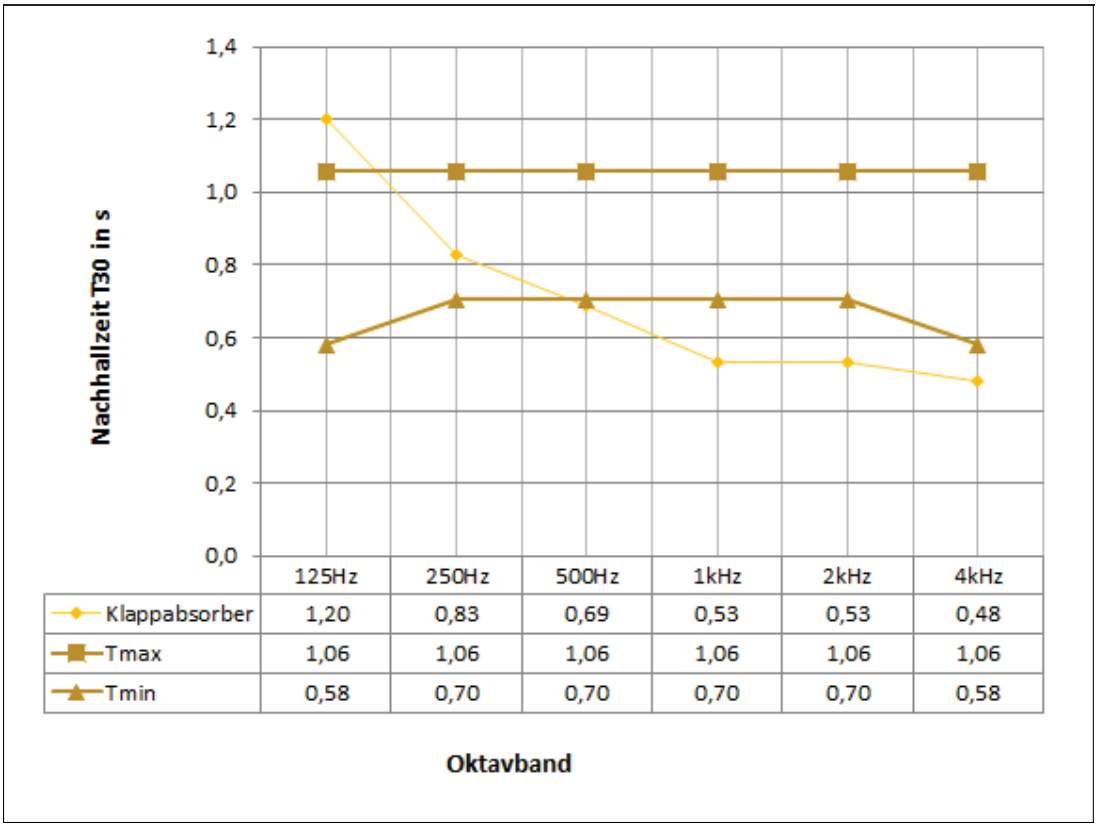
D.10.3 Simulation

Angaben zur Simulation

Detail	Klappabsorber
Simulationsauflösung:	$0{,}5m$
Anzahl der Mikrofonpositionen:	24
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Temperatur und Luftfeuchte:	21,3 $°C$, 46,4 %

Tabelle D.22: Angaben zur Simulation

Nachhhallzeit T_{30} in Oktavbändern



	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Klappabsorber	1,20	0,83	0,69	0,53	0,53	0,48
Tmax	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Tmin	0,58	0,70	0,70	0,70	0,70	0,58

Abbildung D.63: Simulierte Nachhallzeit und Toleranzband

Nachhallzeit

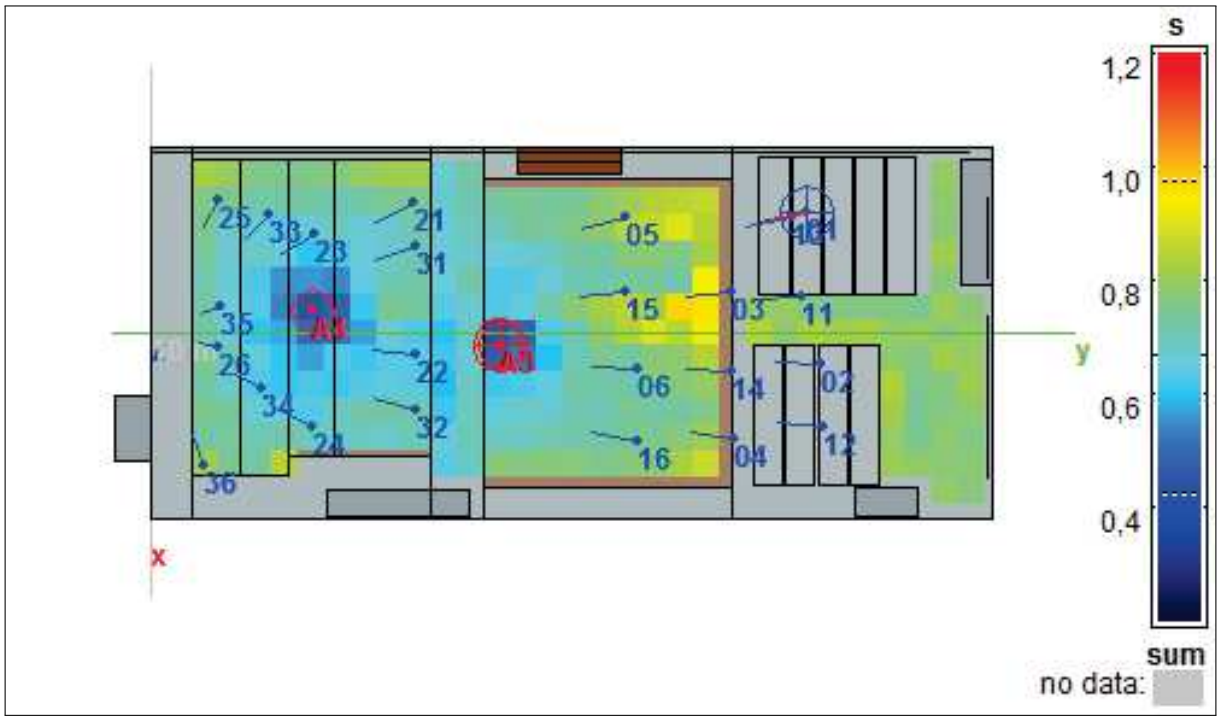


Abbildung D.64: Nachhallzeit T30 in s

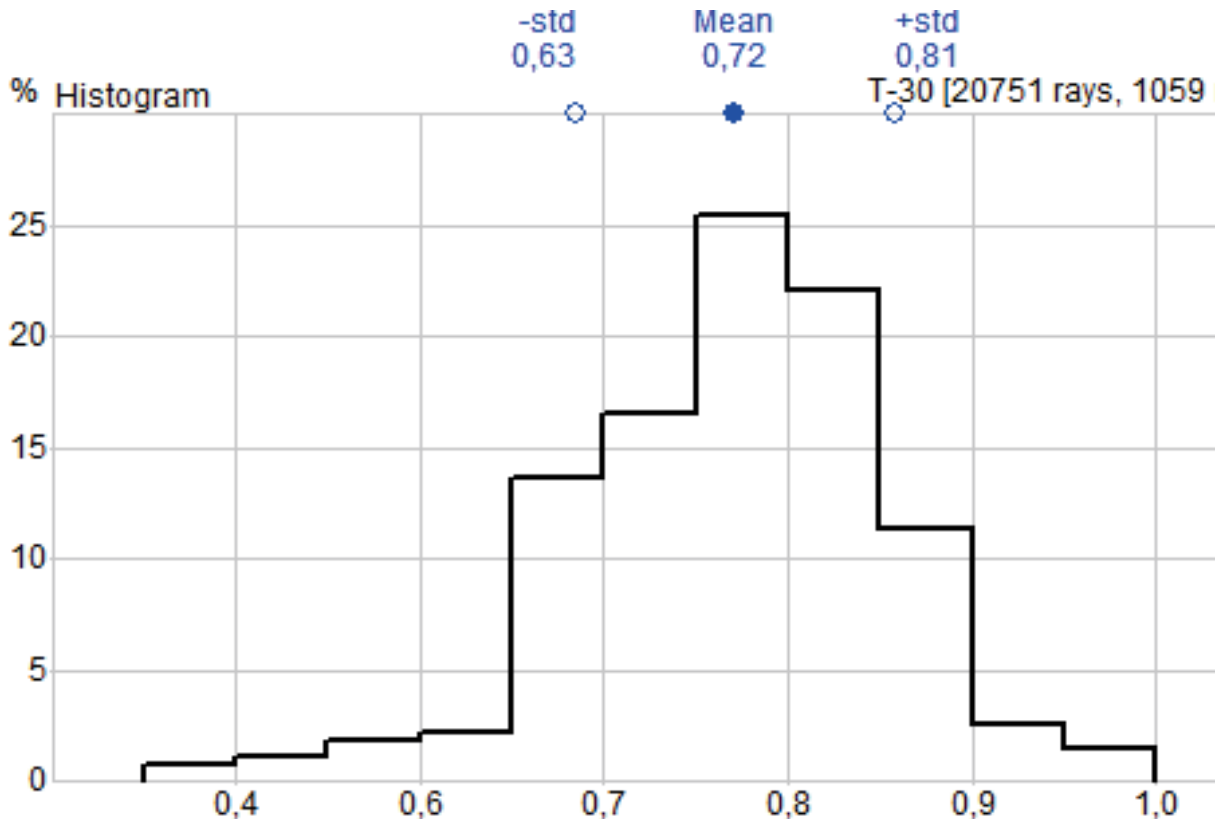


Abbildung D.65: Häufigkeitsverteilung der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung D.64

Schalldruckpegel

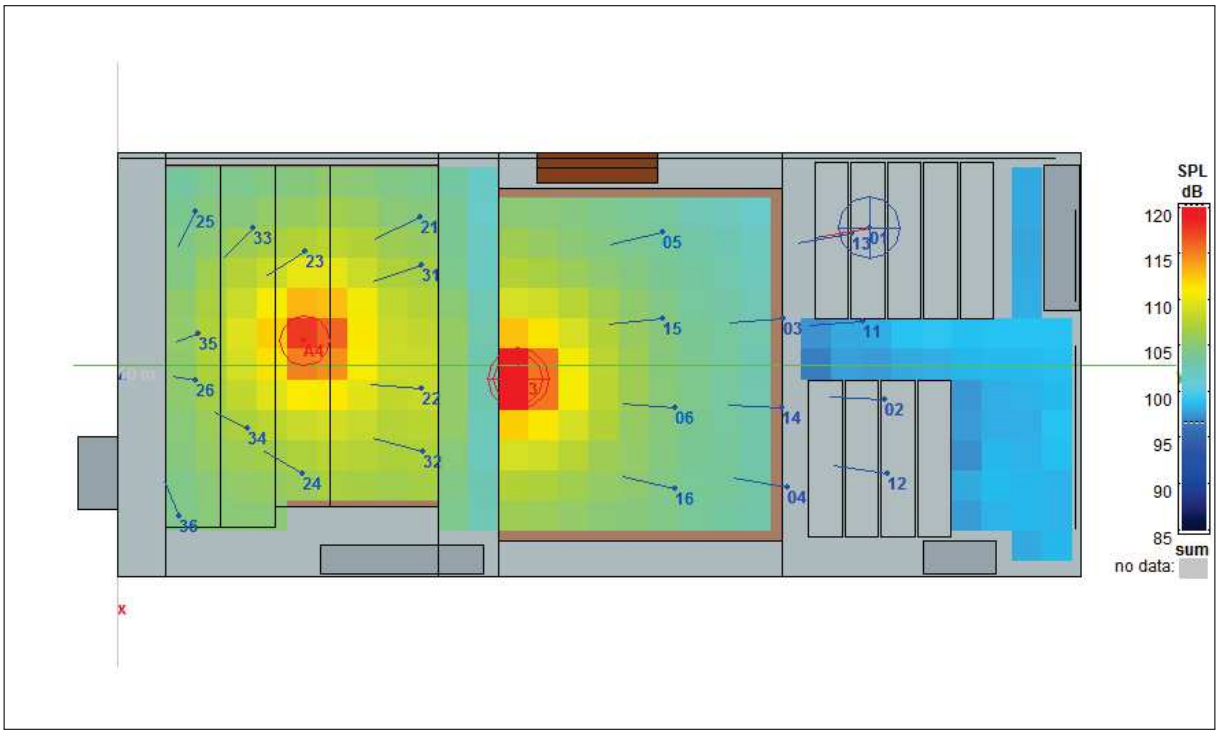


Abbildung D.66: Schalldruckpegel in dB

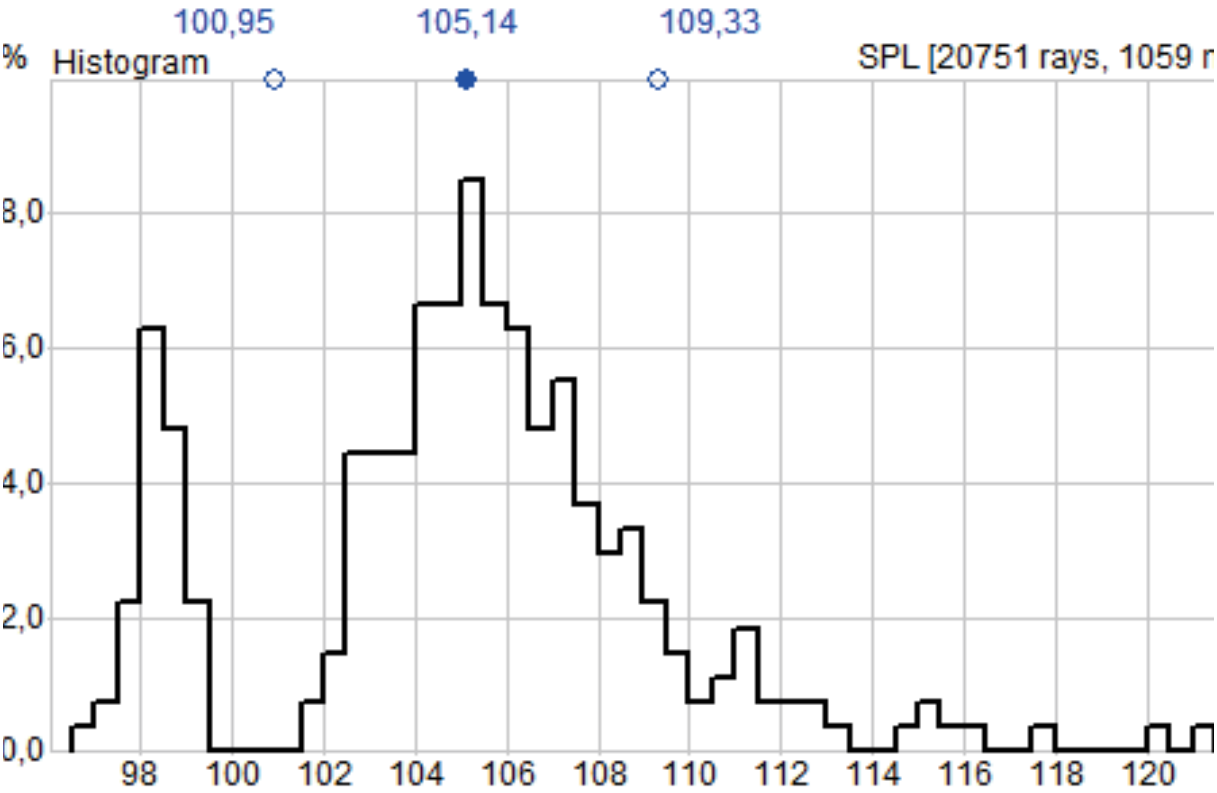


Abbildung D.67: Häufigkeitsverteilung des Schalldruckpegels SPL zu Abbildung D.66

D.11 Akustisches Datenblatt von Raum 208 mit einem Deckensegel/Baldachin

D.11.1 Beschreibung und Raumskizze

Raumhöhe:	4,08 m
Raumlänge:	15,93 m
Raumbreite:	7,11 m
Volumen:	456 m^3
angenommene Schüleranzahl:	30
Vorhänge:	offen
Verwendete Absorber aus Tabelle 12.1	
Deckensegel	Akustikvorhang (Nr.8)

Tabelle D.23: Raumdaten

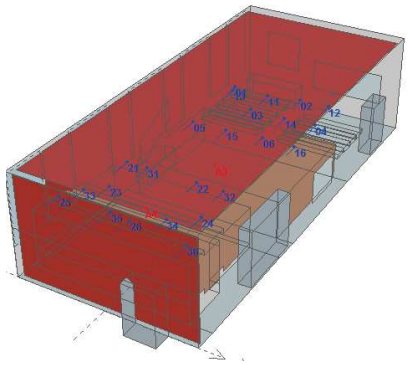


Abbildung D.68: Raum 208 in baldachinorbierendem Zustand

D.11.2 Skizze aus unterschiedlichen Perspektiven

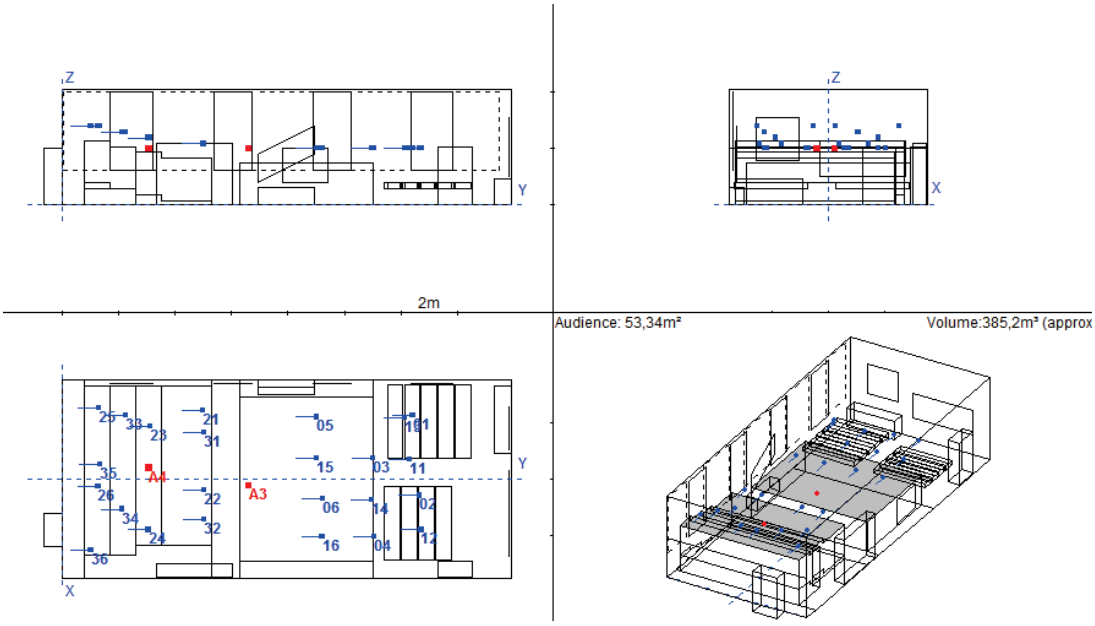


Abbildung D.69: Raum 208 mit Deckensegel - Perspektiven

D.11.3 Simulation

Angaben zur Simulation

Detail	Deckensegel
Simulationsauflösung:	0,5m
Anzahl der Mikrofonpositionen:	24
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Temperatur und Luftfeuchte:	21,3 °C, 46,4 %

Tabelle D.24: Angaben zur Simulation

Nachhhallzeit T_{30} in Oktavbändern

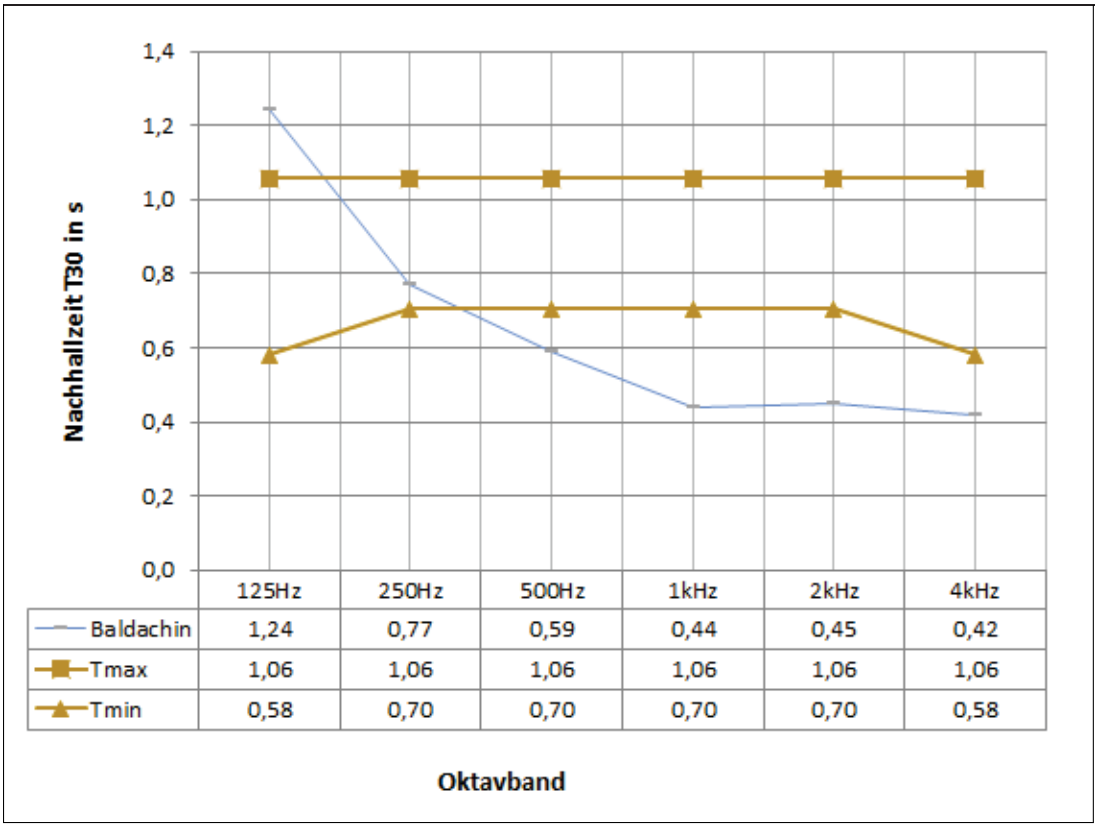


Abbildung D.70: Simulierte Nachhallzeit und Toleranzband

Nachhallzeit

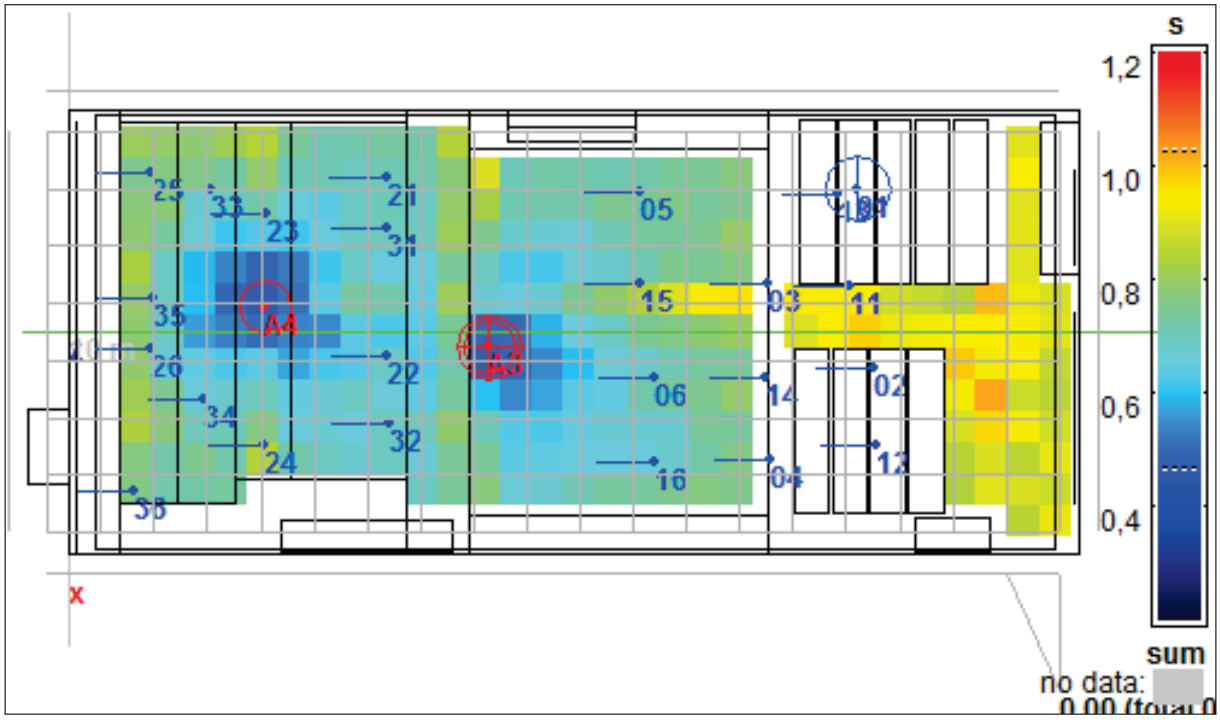


Abbildung D.71: Nachhallzeit T30 in s

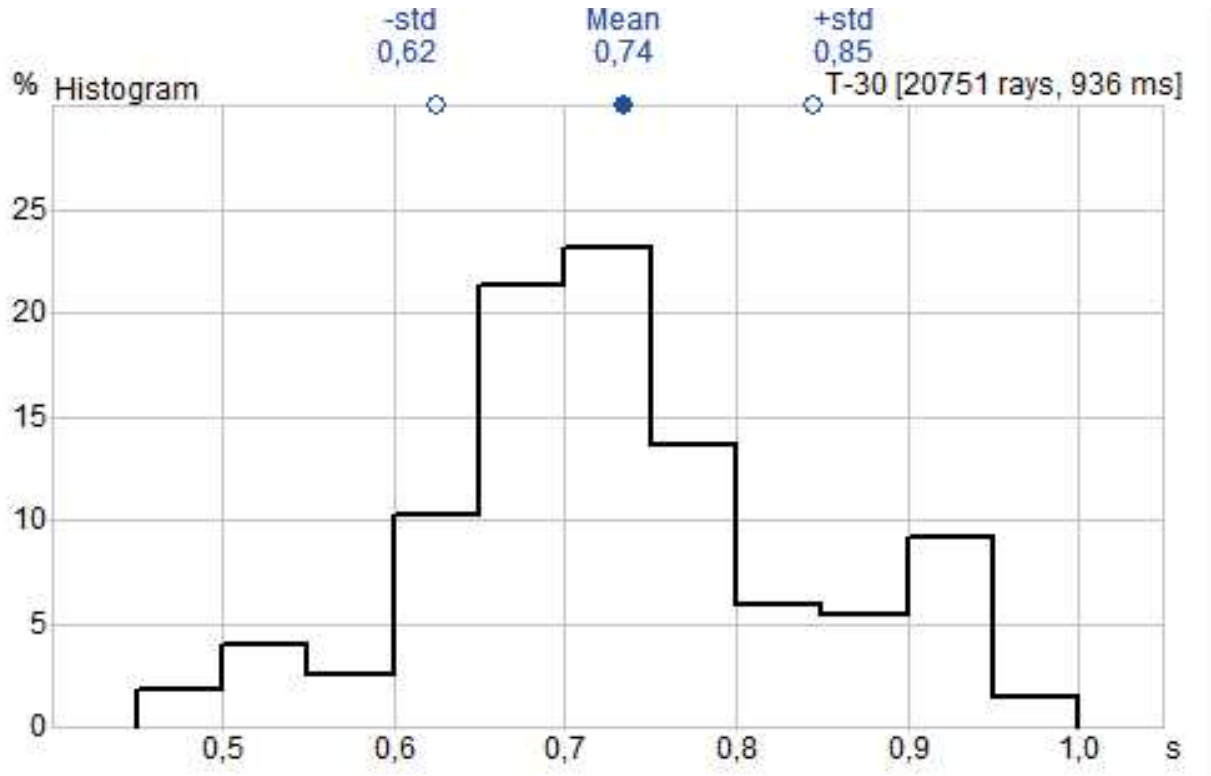


Abbildung D.72: Häufigkeitsverteilung der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung D.71

Schalldruckpegel

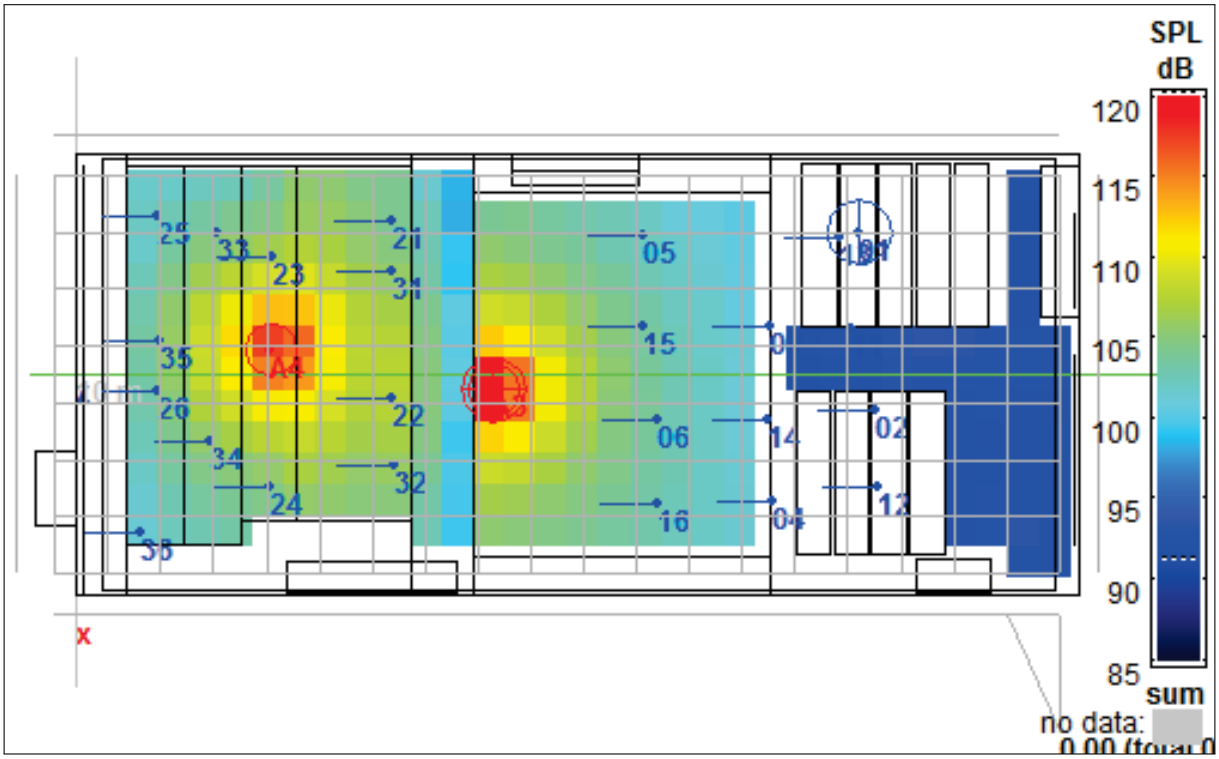


Abbildung D.73: Schalldruckpegel in dB

Abbildung D.74: Häufigkeitsverteilung des Schalldruckpegels SPL zu Abbildung D.73

D.12 Akustisches Datenblatt von Raum 208 bei Unterricht durch Vorhang abgetrennt

D.12.1 Beschreibung und Raumskizze

Raumhöhe:	4,08 m
Raumlänge:	15,93 m
Raumbreite:	7,11 m
Volumen:	456 m^3
Schüleranzahl:	25
Vorhänge:	offen

Tabelle D.25: Raumdaten

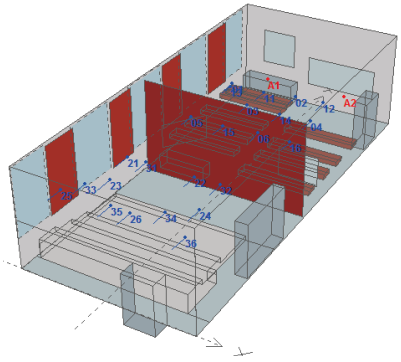


Abbildung D.75: Raum 208 bei Unterricht mit Vorhang hinten

D.12.2 Skizze aus unterschiedlichen Perspektiven

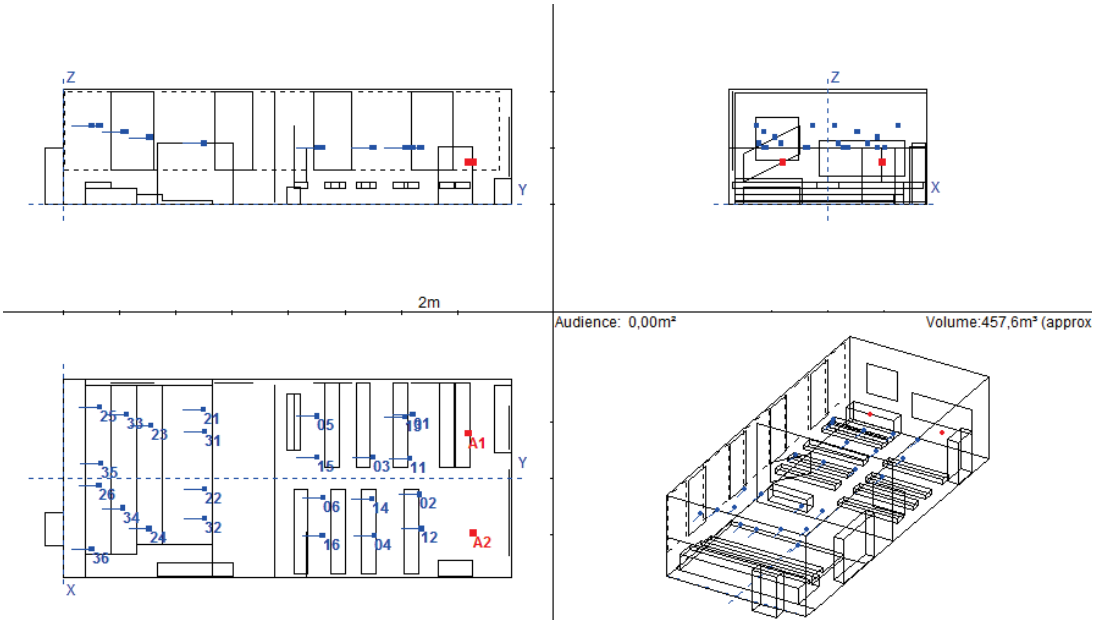


Abbildung D.76: Raum 208 bei Unterricht mit Vorhang - Perspektiven

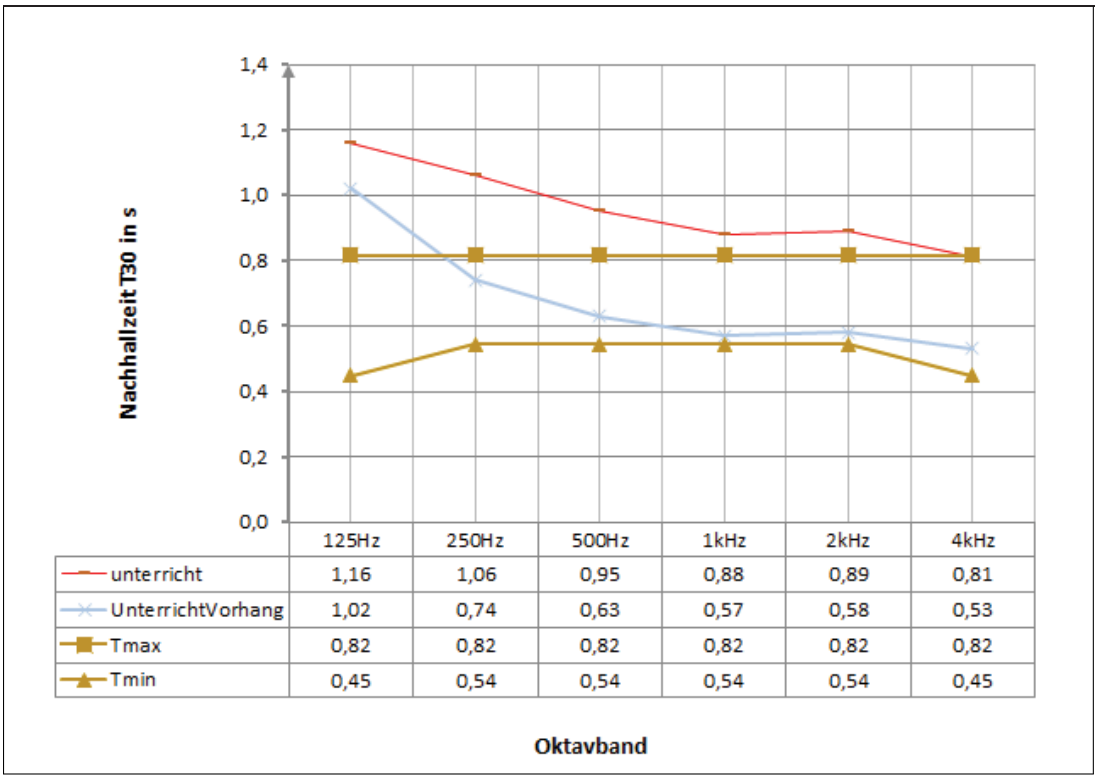
D.12.3 Simulation

Angaben zur Simulation

Detail	Unterricht/Vorhang
Messauflösung:	0,5 m
Anzahl der Mikrofonpositionen:	24
Anzahl der Quellpositionen:	2
Mikrofonhöhe:	1,20 m
Quellhöhe:	1,50 m
Temperatur und Luftfeuchte:	21,3 $°C$, 46,4 %

Tabelle D.26: Angaben zur Simulation

Nachhhallzeit T_{30}



	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
unterricht	1,16	1,06	0,95	0,88	0,89	0,81
UnterrichtVorhang	1,02	0,74	0,63	0,57	0,58	0,53
Tmax	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
Tmin	0,45	0,54	0,54	0,54	0,54	0,45

Abbildung D.77: Simulierte Nachhallzeit und Toleranzband

Nachhallzeit

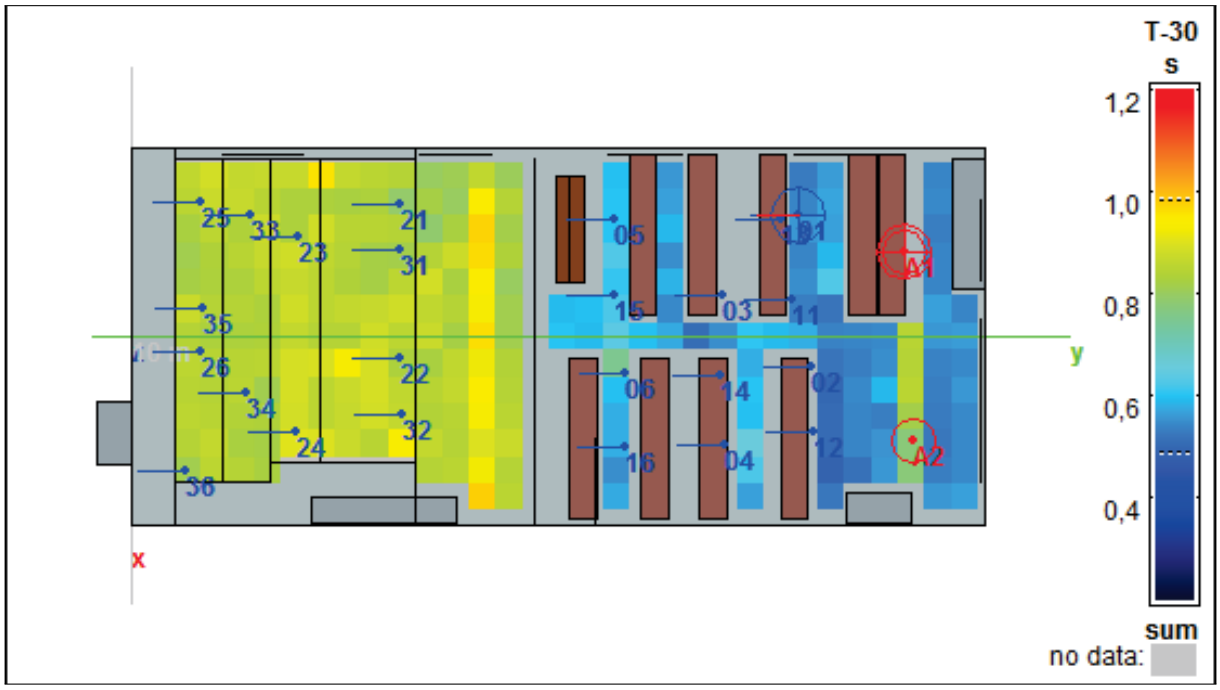


Abbildung D.78: Nachhallzeit T30 in s

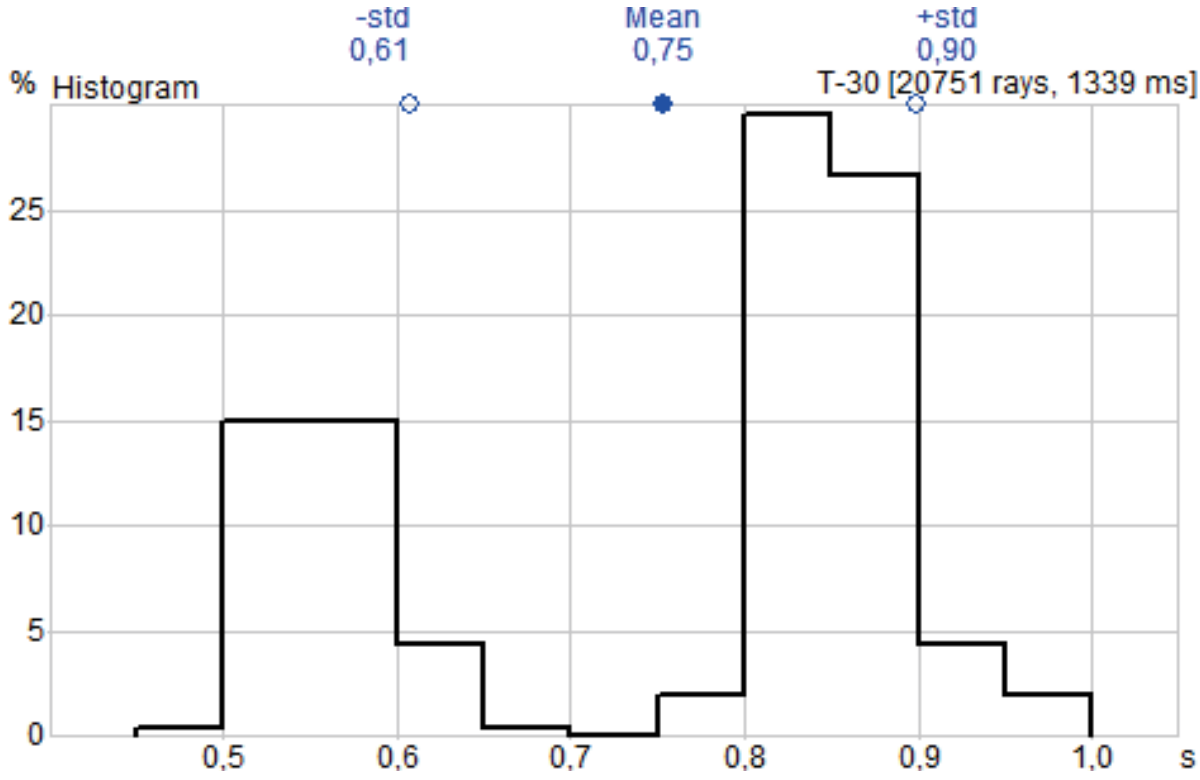


Abbildung D.79: Häufigkeitsverteilung der Nachhallzeiten T30 zu Abbildung D.78

Sprachübertragungsindex

Abbildung D.80: Sprachübertragunsindex STI

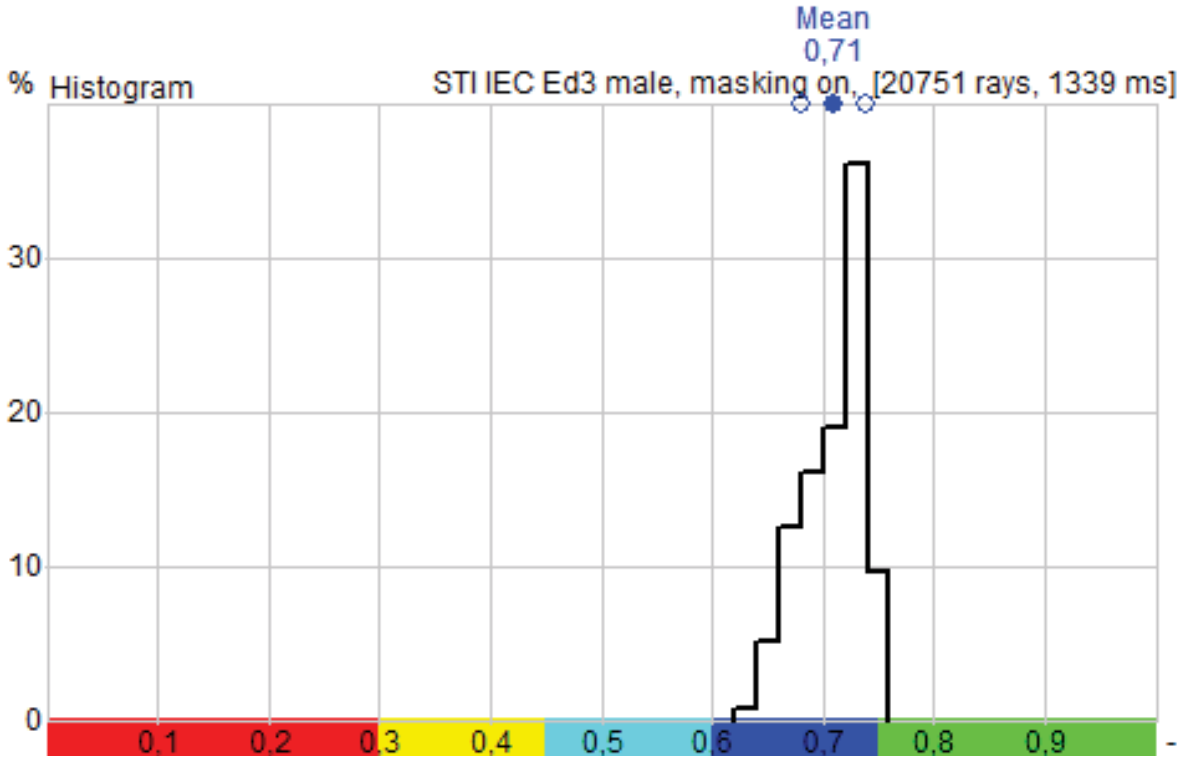


Abbildung D.81: Häufigkeitsverteilung des Sprachübertragungsindex STI zu Abbildung D.80

Literaturverzeichnis

[ÖNORM 3382-1 2009] Normungsinstitut, Österreichisches (Hrsg.): *ÖNORM EN ISO 3382-1 Akustik - Messung von raumakustischen Parametern Teil2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen*. 2009

[ÖNORM 3382-2 2009] Normungsinstitut, Österreichisches (Hrsg.): *ÖNORM EN ISO 3382-2 Akustik - Messung von Raumakustischen Parametern Teil 1: Aufführungsplätze*. aug 2009

[ÖNORM 354 2003] Normungsinstitut, Österreichisches (Hrsg.): *ÖNORM EN ISO 354 Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen*. nov 2003

[ÖNORM 8115-3 2005] Normungsinstitut, Österreichisches (Hrsg.): *ÖNORM B 8115-3 Schallschutz und Raumakustik im Hochbau. Teil 3: Raumakustik*. nov 2005

[Balint 2014] Balint, Jamilla: *Theoretische Planung und messtechnische Evaluierung eines Hallraumes*, Technische Universität Graz, Diplomarbeit, 2014

[Bobran 1967] Bobran, Hans W.: *Handbuch der Bauphysik: Berechnungs- und Konstruktionsunterlagen für Schallschutz, Raumakustik, Wärmeschutz, Feuchteschutz*. Berlin, Frankfurt, Wien : Verlag Ullstein GmbH, 1967

[Cops u. a. 1995] Cops, A. ; Vahaecht, J. ; Leppens, K.: Sound Absorption in a Reverberation Room: Cause of Discrepancies on Measurement Results. Applied Acoustics 46 (1995)

[Dickreiter 1997] Dickreiter, Michael: *Handbuch der Tonstudiotechnik*. Bd. 1. München : Saur, 1997. – ISBN 3598113218 9783598113215 3598113226 9783598113222 359811320X 9783598113208

[Ecophon 2015] Ecophon, Group (Hrsg.): *Focus SQ-PRODUCT-DE.pdf*. 2015. – URL `http://www.ecophon.com/de/produkte/Decken-in-Modulbauweise/Focus/Focus--SQ/`. – Zugriffsdatum: 21.03.2015

[Flohrschütz 2013] Flohrschütz, Michael: *Anwendung und Überarbeitung des "Leitfaden für die akustische Sanierung von Klassenräumen"*, Technische Universität Graz, Bachelorarbeit, 2013

[Graber und Weselak 2009] Graber, Dr. G. ; Weselak, Dr. W.: *Raumakustik - Vorlesungsskript*. 2009

[Graf 2014] Graf, Franz: *Absorptionskoeffizienten-Hefter aus der Raukaustik-Laborübung*. 2014

[IntKlaSim 2015] Ludwig, Raphael ; SPSC (Hrsg.): *Student Project: Entwicklung von Werkzeugen zur Untersuchung der Klassenraumakustik im Unterrichtsbetrieb*. 2015. – URL `https://www.spsc.tugraz.at/student_projects/entwicklung-von-werkzeugen-zur-untersuchung-der-klassenraumakustik-im`. – Zugriffsdatum: 15.04.2015

[Knauf 2015] Knauf (Hrsg.): *TD-D12_ 1.pdf*. 2015. – URL `http://www.knauf.at/fromEpim/TD-D12_1.PDF`. – Datenblatt zur Cleaneo Akustik Lochplattenserie

[Kohlrausch 1996] Kohlrausch, Friedrich: *Praktische Physik, Band 1*. 1996. – URL `http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/buecher/Kohlrausch/Band_1/Akustik/Kohlrausch_1_Akustik_Geraeuschmesstechnik.pdf`. – Zugriffsdatum: 20.4.2015

[Lauber 1953] Lauber, A: *Schallabsorption von Zimmerpflanzen*. 1953. – URL `http://dx.doi.org/10.5169/seals-60547`. – Zugriffsdatum: 26.5.2015

[Mateljan 2014] Mateljan, Ivo: *ARTA User Manual*. Version 1.8.3. ARTALABS, J. Rodina 4, 21215 Kastel Luksic, Croatia: , 2014. – URL `http://www.artalabs.hr`

[Nocke 2014] Nocke, Christian: *Raumakustik im Alltag: Hören, Planen, Verstehen*. Stuttgart : Fraunhofer IRB, 2014. – ISBN 9783816789673 3816789676

[PTB 2003] PTB (Hrsg.): *Absorberdatenbank der Physikalisch Technischen Bundesanstalt*. 2003. – URL `http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_1/1.6_schall/1.63/abstab_wf.xls`

[Reithner 2013] Reithner, Claudia: *Akustische Sanierung von Klassenräumen*, Technische Universität Graz, Diplomarbeit, 2013

[Weselak 2013] Weselak, Dr. W.: *Akustische Messtechnik - Vorlesungsskript, Version 8.0*. 2013