

Akustische Sanierung von Klassenräumen

Diplomarbeit

durchgeführt von

Claudia Reithner

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation
der Technischen Universität Graz

Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot Kubin

Betreuer/Begutachter: Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard, Graber

Graz, Jänner 2013

Eidesstattliche Erklärung

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

Claudia Reithner
Graz, Jänner 2013

Zusammenfassung

Schall definiert sich nicht nur über Druck und Dichteschwankung, welche sich in einem elastischen Medium als Welle ausbreiten, er ist auch ein ständiger Wegbegleiter und die Grundlage für Kommunikation, Orientierung sowie viele weitere Bereiche des Lebens. Überschreitet er ein gewisses Maß an Intensität oder Dauer, so wird dieser jedoch als Lärm empfunden und wirkt entsprechend als psychische sowie physische Belastung.

Gerade im Arbeitsbereich bewirkt Lärm eine Minderung der Leistungsfähigkeit und kann sich in weiterer Folge sogar negativ auf die Gesundheit auswirken. Nicht nur Produktionshallen oder Siedlungsgebiete, auch Bildungseinrichtungen sind von dieser Problematik betroffen. Klassenräume die vor dem 2. Weltkrieg errichtet wurden, weisen oftmals eine schlechte Akustik auf und erschweren somit den Unterricht erheblich. Studien bestätigen diese Problematik, sodass die akustische Sanierung dieser Räume zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Vor allem die Kosten einer Sanierung durch Fachbetriebe sind häufig eine große Hürde für die Realisierung einer akustischen Sanierung. Fokus dieser Diplomarbeit ist es daher, diese Thematik für Laien aufzubereiten sowie ein Modul zu entwickeln, das die selbständige Durchführung einer kostengünstigen Sanierung ermöglicht.

Im speziell dafür erarbeiteten Leitfaden wird ein grundlegendes Verständnis für die zu messenden Parameter und der dafür nötigen technischen Mittel sowie deren Bedienung vermittelt, sodass eine selbständige Messung der akustischen Raumparameter möglich ist. Des Weiteren bietet ein eigens erstelltes Simulationstool die Möglichkeit, die Messdaten normgerecht auszuwerten und zu visualisieren, in welchem Bereich der Norm sich die akustischen Messergebnisse befinden und welche Verbesserung durch eine entsprechende Sanierung erzielt werden kann. Hierzu werden hinsichtlich Aufwand und Kosten unterschiedliche Sanierungsformen erarbeitet, sodass der Benutzer zwischen mehreren, dem Messergebnis sowie den Rahmenbedingungen entsprechenden Varianten, wählen kann. Um diverse Behördengänge zu erleichtern, werden ebenso baurechtliche sowie finanzielle Aspekte näher beleuchtet und ein entsprechendes Präsentationsmaterial für Sponsoren erarbeitet.

Abstract

Sound is more than a compression and density variation which broadens as a wave in an elastic media, it's an important daily attendant and essential for communication, orientation as well as for many further parts in life. If it exceeds a certain limit of intension or duration, it is perceived as noise and therefore affects a physical and psychic exposure.

Especially at work noise causes a decrease of achievement potential and can even influence health. Not only big production halls or cities in general, also institutions of education are affected by this problem. Class rooms from the first half of the 20th century often exhibit a bad acoustic behavior and therefore make it rather difficult to accomplish lessons. Several case studies verify the danger and therefore push the topic.

The costs are the main barrier of acoustic reconstruction. To remove them, a module is developed in this diploma thesis that enables an independent and easy execution to layperson. The guide that was specially developed for this comprises the basic facts of the technical instruments and their appliance to achieve the needed acoustic parameters so that the measurement can be done easily. Moreover a special simulation tool that was developed for this purpose offers the possibility to process the measured data and to show the relation to standards and the possibilities to improve the acoustic parameters. Different improvement solutions concerning costs and effort are developed so that the user can choose one of the appropriate solutions that fits to the measurement as well as to the basic conditions. Planning laws and questions concerning the financial part of the project are treated as well as a presentation program for sponsors and public authorities.

Danksagung

Folgenden Personen, die mich bei der Erstellung meiner Diplomarbeit unterstützt haben, möchte ich meinen Dank aussprechen:

Mein spezieller Dank gilt dem Direktor Hr. Mag. Dr. Pickl und den Lehrkräften des Keplergymnasiums, welche mir die Messung der akustischen Parameter ermöglicht haben und stets als Ansprechpartner zur Verfügung standen.

Auch Hr. Dipl. Ing. William Wallner gilt mein besonderer Dank, da die Besichtigung der akustisch sanierten Räume des akademischen Gymnasiums und die Zusendung von Informationen zu den durch ihn erstellten Sanierungsmaßnahmen wesentliche Anregungen für meine Diplomarbeit waren.

Ebenso bedanken möchte ich mich bei allen Firmen, die durch die Zusendung von Informationen zu Absorbern sowie von Musterangeboten einen wesentlichen Beitrag für die Erstellung der Absorberdatenbank geleistet haben.

Herrn Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Graber gilt ebenso mein großer Dank für die intensive Betreuung im Zuge meiner Diplomarbeit. Nicht nur durch die Unterstützung bei den Messungen im Keplergymnasium, auch durch zahlreiche Betreuungsgespräche trug er wesentlich zum Gelingen meiner Diplomarbeit bei.

Zuletzt möchte ich mich vor allem bei meinen Eltern bedanken, die mich über die gesamte Studienzeit in sämtlichen Belangen stets unterstützt und mir somit das Studium und dessen erfolgreichen Abschluss ermöglicht haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Akustische Probleme in Klassenräumen	9
1.1	Einleitung	9
1.2	Ursachen und Zusammenhänge der Lärmentwicklung	10
1.3	Psychische und physische Auswirkungen durch Lärm.....	13
1.4	Normen und gesetzliche Regelungen	15
1.4.1	Richtwerte für den Störschalldruckpegel	15
1.4.2	Beurteilungspegel an Arbeitsplätzen (Arbeitspegel)	16
1.4.3	Die Nachhallzeit	17
2	Ermittlung der akustischen Parameter	21
2.1	Definition der akustischen Parameter	21
2.2	Festlegung von Messequipment sowie Setup	29
2.2.1	Auswahl des Messequipments	29
2.2.2	Anzahl der Mess- sowie Senderpositionen	31
2.2.3	Positionierung des Messequipments.....	32
2.3	Akustische Messung	35
2.3.1	Messverfahren sowie Anregungssignal	35
2.3.2	Durchführung der Messung mit WinMLS 2004.....	40
2.3.3	Durchführung der Messung mit Arta.....	40
2.4	Analyse der Messergebnisse.....	46
2.4.1	Nachhallzeit (T).....	46
2.4.2	Deutlichkeitsmaß (C_{50}).....	49
2.4.3	Artikulationsverlust (AI_{cons}).....	51
2.4.4	Sprachübertragungsindex (STI).....	52
2.4.5	Äquivalente Absorptionsfläche (A).....	53
3	Einsatz von Absorbern	55
3.1	Absorbertypen	55
3.1.1	Höhenabsorber.....	55
3.1.2	Mittenabsorber.....	56
3.1.3	Tiefenabsorber.....	57
3.2	Anbringung von Absorbern	58
3.3	Erforderliche Absorberfläche	61

4	Akustische Sanierungsvarianten	63
4.1	Absorbermodule	63
4.1.1	Vorgefertigte Absorbermodule	63
4.1.2	Eigenherstellung individueller Absorbermodule	68
4.2	Sanierungsvarianten	78
4.2.1	Sanierung mit Absorbermodulen	78
4.2.2	Innenausbau mit Gipskartonlochplatten	81
5	Simulationstool für die akustische Sanierung	84
5.1	Eingabe der Basisdaten	84
5.2	Import der Messwerte	85
5.3	Verarbeitung & Simulation der akustischen Parameter	86
6	Rahmenbedingungen der Sanierung	90
6.1	Baurechtliche Fragen und Brandschutzvorschriften	90
6.2	Aspekte der Sach- sowie Personenversicherung	94
6.3	Finanzierungsmöglichkeiten	94
6.3.1	Schulbezogene Institutionen	94
6.3.2	Externe Institutionen	94
6.3.3	Diverse Sponsoren	95
6.3.4	Spendengenerierung durch Veranstaltungen	95
6.4	Pädagogische Begleitmaßnahmen	96
6.4.1	Die Zuhörschule	96
6.4.2	OLGA – Ohne Lärm geht’s auch	98

7	Schlussfolgerung und Ausblick	100
8	Literaturverzeichnis	102
9	Abbildungsverzeichnis	108
10	Tabellenverzeichnis	112
11	Anhang A: Messanordnung am BRG Kepler	114
12	Anhang B: Messergebnisse am BRG Kepler	118
13	Anhang C: Messergebnisse d. Absorptionsgradmessung	126
14	Anhang D: Absorberdatenbank und Hersteller bzw. Montagefirmen	129
15	Anhang E: Leitfaden der akustischen Sanierung	131

1 Akustische Probleme in Klassenräumen

1.1 Einleitung

Wissenschaftliche Ermittlungen sowie Befragungen ergaben, dass die Lärmsituation in Klassenräumen einer der wesentlichsten Belastungsfaktoren für LehrerInnen und SchülerInnen ist.¹ Eine der Ursachen für zu hohen Lärmpegel ist eine zu hohe Nachhallzeit, wie dies speziell in Klassenräumen aus dem 19./20.Jdht der Fall ist. Mit einer akustischen Sanierung kann dem entgegengewirkt werden, jedoch ist die Sanierung durch einen Fachbetrieb mit hohen Kosten verbunden, sodass diese auf Grund eines beschränkten Budgets oftmals nicht umgesetzt werden kann.

Inhalt dieser Diplomarbeit ist es daher, sowohl die theoretischen, als auch die praktischen Aspekte einer akustischen Sanierung zu erarbeiten und so aufzubereiten, dass es dem Lehrkörper möglich ist, selbständig eine kostengünstige Sanierung zu realisieren. Basierend auf den im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführten Messungen im BRG Kepler werden hierfür sowohl ein Leitfaden, als auch ein Simulationstool entwickelt.

Kapitel 1 gibt einen einführenden Überblick über die Ursachen und Zusammenhänge der Lärmentwicklung sowie über die physischen und psychischen Auswirkungen durch Lärm. Ebenso werden Normen und gesetzliche Regelungen bzgl. des zulässigen Störschalldruckpegels, dem Arbeitspegel und der Nachhallzeit angeführt.

In Kapitel 2 wird die Ermittlung der akustischen Parameter eines Klassenraumes behandelt. Neben der theoretischen Erörterung der Parameter werden sowohl die Auswahl des Messequipments als auch die Festlegung des Setups vorgestellt. Die Durchführung der akustischen Messung ist ebenso Inhalt dieses Kapitels, wie die Analyse der Messergebnisse.

In Kapitel 3 werden die grundlegenden Absorbertypen sowie die Anbringung von Absorbern vorgestellt. Ebenso wird die Ermittlung der für die Sanierung erforderlichen Absorberfläche erläutert.

¹ Siehe [MÜLLER]

Basierend auf diesen Ergebnissen werden in Kapitel 4 vorgefertigte Absorbermodule sowie die Herstellung individueller Absorbermodule vorgestellt und akustische Sanierungsvarianten erarbeitet. Neben der kostengünstigen, eigenständigen Sanierung wird auch die Sanierung durch einen Fachbetrieb angeführt sowie eine Gegenüberstellung der Sanierungskosten vorgenommen.

In Kapitel 5 wird das entwickelte Simulationstool vorgestellt, welches es dem Laien ermöglicht, sowohl eine normgerechte Auswertung der akustischen Parameter, als auch eine Simulierung des sanierten Zustandes vorzunehmen. Eine Abschätzung, der für die Sanierung anfallenden Materialkosten, ist ebenfalls möglich.

In Kapitel 6 werden baurechtliche Vorgaben, Brandschutzvorschriften, Aspekte der Sach- und Personenversicherung sowie Finanzierungsmöglichkeiten und pädagogische Begleitmaßnahmen erörtert.

Der Leitfaden zur akustischen Sanierung und die Präsentationsunterlagen für die Gewinnung von Sponsoren befinden sich im Anhang.

1.2 Ursachen und Zusammenhänge der Lärmentwicklung

Umfragen der österreichischen Kooperation „ARGE Zuhören“², der Universität Bremen³ und die eines Arbeitskreises des staatlichen Schulamtes in Darmstadt⁴ ergaben, dass der Lärm in den Klassen signifikant häufig als zu laut empfunden wird und dass dies ein wesentlicher Belastungsfaktor im Lehrberuf ist.

Eine der naheliegenden Ursachen für die Lärmentwicklung belegt Shield durch seine umfangreichen Lärmmessungen, welche zeigen, dass eine lineare Korrelation zwischen dem Geräuschpegel und der Anzahl der Schüler im Klassenraum besteht. Pro Schüler ist ein Anstieg um ca. 1dB zu verzeichnen.⁵

Schönwälder kam bei Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass die individuellen Merkmale jeder Schulklasse, das Alter der SchülerInnen, die pädagogischen Fähigkeiten des Lehrkörpers und die pädagogischen Maßnahmen einen großen Einfluss auf die Lautstärkeentwicklung haben, nicht aber der Schulzweig⁶.

² [ARGE, [www.zuhoeren.at\(2009\)](http://www.zuhoeren.at(2009))]

³ Siehe [SCHOENWAELDER2, S.142]

⁴ Siehe [RICKES]

⁵ Vgl. [SHIELD, S.730-738]

⁶ Vgl. [SCHOENWAELDER,S.50]

Zusätzlich zu den genannten Faktoren ist in der Studie von Hecker festgehalten, dass im Verlauf des Tages der Schallpegel allgemein ansteigt.⁷

Neben dem Geräuschpegel auf Grund von SchülerInnen und LehrerInnen sind weitere Lärmquellen zu betrachten. MacKenzie⁸ fasst die typischen Lärmquellen innerhalb und außerhalb des Klassenraumes, wie in Tabelle 1 dargestellt, zusammen:

Tabelle 1: Typische Lärmquellen nach [MACKENZIE]

Typische Lärmquellen wie sie in Klassenräumen auftreten		
Innenbereich (Klassenbereich)	Innenbereich (Schule)	Außenbereich
Heizungsanlage; Lüftungsgebläse; Computer; Drucker; Trittschall vom Boden; Lärmwirkung der Tischplatte; Knacken des Dachstuhls (Wärmeausdehnung); Mechanische Öffnungsvorrichtungen für Fenster; Overhead-Projektoren; Vögel (am Dachfenster) Leuchtstoffröhrenlampen	Stimmen vom Korridor; Türschließen; Einwirkung von Lärm am Boden; Luftschall (durch zerlegbare Trennwände); Singen; Gymnastik; Musik; Periodisches Läuten;	Verkehrslärm: Fahrzeuge, Flugzeuge, Züge, Hubschrauber; Geräte zum Rasenschneiden; Bäume Windgeräusche; Regengeräusche auf Gebäudeteilen

Wie Tabelle 1 verdeutlicht, gibt es eine Vielzahl von Lärmquellen, welche alle Einfluss auf den Lärmpegel im Unterricht haben. Diese Lärmquellen, kombiniert mit einer hohen Nachhallzeit, führen zur sogenannten Lärmkaskade in Abbildung 1:

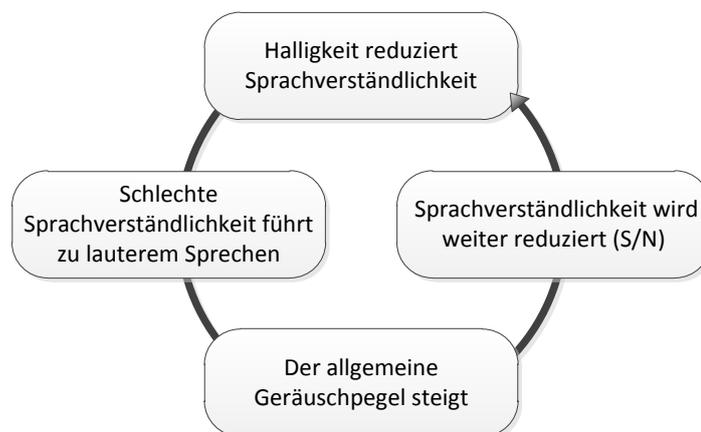


Abbildung 1: Lärmkaskade in Anlehnung an [TIESLER7, S.13]

⁷ Vgl. [HECKER, S.90-98]

⁸ [MACKENZIE]

Die Halligkeit reduziert die Sprachverständlichkeit, was zu lauterem Sprechen des Lehrkörpers und der SchülerInnen führt. Dieses Phänomen wird als Lombard Effekt bezeichnet. Dabei handelt es sich um den Effekt des automatischen Sprechpegelanstiegs von 0,3 - 1dB pro 1 dB Umgebungsgeräuschpegel. Zusätzlich zum Sprechpegelanstieg verhalten sich SchülerInnen in halligen Räumen lauter, wodurch der allgemeine Geräuschpegel angehoben wird. Das wiederum führt zu einer Absenkung des Signal-Geräuschabstandes und somit zu einer Reduzierung der Sprachverständlichkeit. Im Englischen wird dieses Verhältnis als „Signal/Noise Ratio“ bezeichnet und mit S/N abgekürzt. Dieser Teufelskreis wird unter anderem von Tiesler als „Lärmkaskade“ bezeichnet, die nur durch Reduzierung der Nachhallzeit gebrochen werden kann.⁹

Weitere Einflussfaktoren auf den Lärmpegel sind laut Machner¹⁰ und Oberdörster¹¹ die Form des Schulbetriebes und die Arbeitsform (Frontalunterricht vs. differenzierte Arbeitsform).

Abbildung 2 stellt zusammenfassend dar, welche Faktoren den Lärmpegel in Klassenräumen beeinflussen.



Abbildung 2: Variablen, von denen der Lärmpegel in Klassenräumen abhängig ist [MÜLLER, S.38]

Im nächsten Kapitel werden nun die psychischen sowie physischen Auswirkungen eines zu hohen Lärmpegels behandelt.

⁹ Vgl. [TIESLER7]

¹⁰ Siehe [MACHNER]

¹¹ Siehe [OBERDOERSTER]

1.3 Psychische und physische Auswirkungen durch Lärm

Bei der Eruiierung der psychischen und physischen Auswirkungen durch Lärm stellt sich die Frage, wann ein Geräusch als Lärm empfunden und somit zur Belastung wird. Kalivoda nannte situative (Ort, Zeitpunkt, Situation,...), akustische (physikalische Charakteristik) sowie persönliche Faktoren (emotionale sowie kognitive Bezüge zum Geräusch) als Basis für die Entscheidung, ob ein Geräusch als Lärm empfunden wird oder nicht.¹²

Einen Überblick über alle Lärmwirkungen verschaffen die WHO Richtlinien aus dem Jahr 1999.¹³ Folgende Auswirkungen werden unter anderem angeführt:

- Lärmbedingte Hörschäden
- Interferenz mit der Sprachkommunikation
- Beeinträchtigung der Ruhephase und des Schlafes
- Kardiovaskuläre und physiologische Effekte
- Psychische Gesundheitseffekte
- Leistungsbeeinträchtigungen

Wie diese Aufzählung bereits zeigt, kann Lärm sowohl physische als auch psychische Schäden bewirken. Erstere sind im üblichen Pegelbereich von Unterricht nicht zu erwarten, psychische Auswirkungen können jedoch sehr wohl gegeben sein. Sind LehrerInnen oder SchülerInnen dauerhaft einem zu hohen Lärmpegel ausgesetzt, so ist der Lärm ein Belastungsfaktor bzw. ein sogenannter Stressor, welcher unter anderem zu folgenden psychonervalen und vegetativen Reaktionen führen kann:¹⁴

- Aufmerksamkeits- sowie Konzentrationsverlust
- Beeinträchtigung der Handlungsregulation
- Herzfrequenz/- sowie Blutdruckanstieg
- Schlafstörungen
- Erhöhung des Muskeltonus (Schreibdruck)

Wie die Studie „LehrerIn 2000“¹⁵ ergibt, werden Lärmpegel unterschiedlich wahrgenommen. Bei gleichem Lärmpegel empfinden Frauen eine höhere Lärmbelastung als Männer und ältere LehrerInnen eine höhere als jüngere. Auch wenn das subjektive Empfinden unterschiedlich ist, so können doch objektive Auswirkungen festgestellt werden. Tiesler untersuchte den Zusammenhang zwischen Geräuschpegel und Herzfrequenz und stellte fest, dass diese nahezu idente Verläufe aufweisen. Bei einer Steigerung des Schallpegels um 5-8 dB steigt die Herzfrequenz um 5-10 Schläge pro Minute, was zu einer schnelleren Ermüdung führt.¹⁶

¹² Vgl. [KALIVODA, S.103]

¹³ [WHO]

¹⁴ Vgl. [AIÖ1]

¹⁵ Siehe [SORA]

¹⁶ Vgl. [TIESLER1, S.341-342]

Neben den bereits genannten psychischen und physischen Auswirkungen gibt es noch einen weiteren Bereich, der durch Lärm mittlerer Intensität, wie dies bei Klassenräumen der Fall ist, beeinträchtigt wird. Die auditive Wahrnehmung ist mit dem Kurzzeitgedächtnis verbunden, was zu einer unmittelbaren Beeinflussung der kognitiven Leistung führt. Vor allem Vor- und GrundschülerInnen sind davon betroffen und haben dadurch Probleme das Gesagte richtig zu verstehen, zu verarbeiten sowie zu behalten.¹⁷ Abbildung 3 zeigt, dass sich die Klassenraumgeräusche unter dem Einfluss der Nachhallzeit auf die kognitiven Fähigkeiten der SchülerInnen auswirken. Je größer die Anstrengungen für das akustische Verständnis sind, desto weniger Aufmerksamkeit können die SchülerInnen dem Inhalt entgegenbringen.

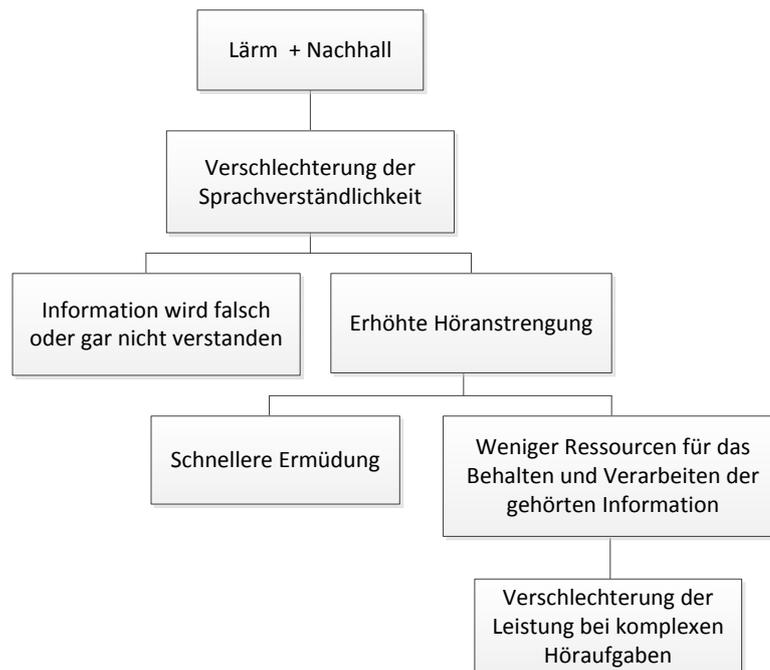


Abbildung 3: Wirkungen von Lärm und Nachhall auf das Hörverstehen vgl. [SCHICK2, S.19]

Leistungsbeeinträchtigung durch Hintergrundschall mittlerer Intensität wird auch als „Irrelevant Sound Effekt“ bezeichnet, welchen Klatte folgendermaßen definiert: „Leistungsbeeinträchtigung bei der unmittelbaren Wiedergabe von visuell dargebotenen Sequenzen unverbundener Items („serial recall“) durch sprachlichen Hintergrundschall, welcher in keinem Bezug zur Aufgabe steht und instruktionsgemäß zu ignorieren ist.“¹⁸

Vereinfacht dargestellt bedeutet dies, dass sprachlicher Hintergrundschall, ebenso wie Hintergrundmusik, die Fähigkeit visuell dargebotene Informationen zu behalten erschwert. Auch Leistner bestätigt in seiner Studie, bei der Kinder Pseudowörter unterscheiden mussten, dass ungünstige Nachhallzeiten das Behalten sprachlicher Informationen im Arbeitsgedächtnis beeinträchtigen.¹⁹

¹⁷ Vgl. [SCHICK2],

¹⁸ [KLATTE7, S.518]

¹⁹ Vgl. [LEISTNER]

1.4 Normen und gesetzliche Regelungen

Es gibt eine Vielzahl an Normen und gesetzlichen Regelungen hinsichtlich zulässiger Schallpegel. Fokus von Kapitel 1.4 sind Normen bezüglich dem Störschalldruckpegel, dem Arbeitspegel sowie der Nachhallzeit.

1.4.1 Richtwerte für den Störschalldruckpegel

Nach DIN18041²⁰ wird zwischen dem Störschalldruckpegel der Betriebsgeräusche und dem Störschalldruckpegel bauseitiger Geräusche unterschieden. Der Störschalldruckpegel der Betriebsgeräusche ist jener Schalldruckpegel der von Geräten, die im Raum betrieben werden, verursacht wird. Der Störschalldruckpegel bauseitiger Geräusche ($L_{NA,Bau}$) ist jener Schalldruckpegel, der von Außengeräuschen, Geräuschen aus Nachbarhäusern, von haustechnischen Anlagen, Sanitärinstallationen und den fest installierten medientechnischen Geräten erzeugt wird.²¹ Die DIN 18041 legt für drei Raumnutzungsarten, eingeteilt an Hand der schalltechnischen Anforderung, folgende Maximalwerte für den bauseitigen Störschalldruckpegel fest:

Tabelle 2: Einstufung des Störschalldruckpegels bauseitiger Geräusche nach Anforderungen an die Raumnutzung [DIN 18041]

Schall-technische Anforderungen an die Raumnutzung	Störschalldruckpegel der bauseitigen Geräuschen $L_{NA, Bau}$ [dB(A)]	Eignung für die jeweilige Entfernung zwischen Sprecher und Hörer		Eignung für Personen mit Hörverlusten	Eignung für die Wahrnehmung schwieriger oder fremdsprachiger Texte
		mittlere ^{b,c}	größere ^b		
I (Mindestanf.)	≤ 40	+	-	-	-
II (Mittlere Anf.)	≤ 35	+	o	o	o
III (Hohe Anf.)	≤ 30	+	+	+	+

Anmerkung: „+“ geeignet, „o“ bedingt geeignet, „-“ nicht geeignet
^b Für eine mittlere Entfernung zwischen Sprecher und Hörer kann üblicherweise eine Abstand von 5m bis 8m, für größere Entfernungen > 8m angenommen werden
^c Auch geeignet für geringere Entfernungen zwischen Sprecher und Hörer bis etwa 5m

Der zulässige Störschalldruckpegel für Betriebs- sowie Publikumsgeräusche sollte die in Tabelle 2 angeführten Maximalwerte ebenfalls nicht überschreiten.²²

²⁰ [DIN18041]

²¹ Vgl. [DIN18041, S.6]

²² Vgl. [DIN18041, S.11]

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO)²³ legte 1999 für Lärm in speziellen Umweltbereichen Empfehlungswerte fest, die nicht überschritten werden sollen. Für das Schulumfeld werden folgende Grenzwerte angeführt:

Tabelle 3: "Guideline values" der WHO für Lärm [WHO, S. 47], Übersetzung nach [BABISCH2]

Umweltbereich	Kritische Effekte	Mittelungspegel Leq [dB(A)]	Zeitbasis	Maximalpegel Lmax, [dB(A)]
Klassenräume und Vorschulen (innen)	Sprachverständlichkeit, Störung v. Informationsaufnahme, Mitteilungen und Kommunikation	35	Unterricht	- (keine Angabe)
Vorschul- Schlafräume (innen)	Schlafstörung	30	Ruhezeit	45
Schule, Spielplatz (außen)	Störung und Belästigung	55	Spielzeit	- (keine Angabe)

In dieser sogenannten „Guideline for community noise“ wird für Klassenräume ein maximaler Mittelungspegel von 35 dB(A) angegeben. Der Mittelungspegel entspricht der über einen gewissen Zeitraum gemittelten Schallenergie, also einem energie-äquivalenten Dauerschallpegel.²⁴

1.4.2 Beurteilungspegel an Arbeitsplätzen (Arbeitspegel)

Der Verein Deutscher Ingenieure publizierte 1999 die in Tabelle 4 angegebenen Grenzwerte für Tätigkeiten an Arbeitsplätzen. Es handelt sich hierbei um A-bewertete Beurteilungspegel. Der Beurteilungspegel ist ein Maß, das die an einem bestimmten Ort wirkende Schallemission kennzeichnet, wobei durch die Frequenzbewertung der Frequenzgang des menschlichen Gehörs berücksichtigt wird. Der Beurteilungspegel ist somit ein Maß für die Geräuschbelastung. Gemäß DIN 45645-2 wird ein Beurteilungszeitraum von acht Stunden festgelegt. Der betrachtete Frequenzbereich wird auf 16 Hz -16 kHz beschränkt, Geräusche außerhalb dieser Bandbreite werden nicht berücksichtigt.²⁵

Tabelle 4: Grenzwerte für Tätigkeiten an Arbeitsplätzen [VDI 2058 B1.3]

Grenzwerte	Tätigkeiten
55 dB (A)	Bei überwiegend geistiger Tätigkeit (hohe Komplexität)
70 dB (A)	Bei einfachen oder überwiegend mechanisierten Bürotätigkeiten (mittlere Komplexität)
85 dB (A)	Bei allen sonstigen Tätigkeiten

²³ [WHO]

²⁴ Vgl. [DICKREITER2, S.456]

²⁵ Vgl. [VDI 2058 B1.3]

Auf Klassenräume ist die erste Kategorie mit 55 dB als Grenzwert zutreffend, welcher laut Müller in der Praxis jedoch häufig überschritten wird.²⁶ Die in Tabelle 4 angeführten Grenzwerte sind als höchst zulässiger „Arbeitspegel“ wie folgt definiert:²⁷

$$L_{A,r} = L_{A,EX,T_0} + K$$

$L_{A,r}$	Beurteilungspegel
L_{A,EX,T_0}	Lärmexpositionspegel (Mittelungspegel mit T_0 als Beurteilungszeitraum)
K	Zuschlag für Impuls- oder Tonhaltigkeit.

In der Verordnung für Lärm und Vibrationen (VOLV) §5 ist, im Vergleich zu den in Tabelle 4 angeführten Werten, das Limit für Arbeitsplätze, an denen vorwiegend geistige Tätigkeiten ausgeführt werden, mit 50 dB(A) angeführt.²⁸ Auch der Grenzwert für Bürotätigkeiten ist um 5 dB geringer festgelegt.

Es stellt sich nun die Frage, ob die Schule überhaupt als Arbeitsplatz betrachtet werden kann. Tiesler und Machner stellten fest, dass die Institution Schule weder für SchülerInnen, noch für Lehrkräfte als Arbeitsplatz betrachtet wird.²⁹ Tiesler analysierte diese Thematik wie folgt:

„Es handelt sich zwar nicht um einen Produktionsbereich im klassischen Sinne der Arbeitswissenschaft, dennoch sind hier Menschen tätig, die einer Aufgabe nachgehen und einen großen Teil ihres Arbeitstages in dieser Umgebung verbringen. Vergleichbar ist dieser Arbeitsplatz in jedem Fall aber mit einem Dienstleistungsunternehmen. Im Sinne einer „Humanisierung der Arbeitswelt“ ist es nur legitim auch die Schule unter einem solchen Gesichtspunkt zu betrachten und genauer zu analysieren.“³⁰

Nach Tiesler sind Schulen also als Arbeitsplatz zu werten, wodurch auch hier die entsprechenden Normen und Richtlinien anzuwenden sind.

1.4.3 Die Nachhallzeit

Auch für die Nachhallzeit gibt es definierte Grenzwerte nach Norm, die nicht überschritten werden sollen. Im Gegensatz zum Störschalldruckpegel gibt es für die Nachhallzeit allerdings nicht nur Begrenzungen durch Maximalwerte, sondern auch Forderungen für einen Mindestlevel. Nur wenn sich die Nachhallzeit innerhalb dieses definierten Bereiches befindet, ist eine, der Raumnutzung entsprechende, zufriedenstellende Akustik gegeben.

²⁶ Vgl. [MÜLLER, S.16-20]

²⁷ Siehe [VOLV, S.8]

²⁸ Siehe [VOLV]

²⁹ Vgl. [TIESLER3]

³⁰ [TIESLER3]

In der DIN 18041³¹ bzw. in der ÖNORM B 8115-3³² werden diese Sollwerte genau definiert. Der Sollwert für den Unterricht, in Abhängigkeit vom Raumvolumen, wird mit folgender Formel berechnet:

$$T_{soll} = (0,32 \log\left(\frac{V}{m^3}\right) - 0,17) s$$

Neben dem Sollwert sieht die DIN 18041 für Unterricht und Sprache auch ein Toleranzband vor, in dem sich die Nachhallzeit befinden soll. Wie in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt, beträgt dieser anzustrebende Bereich in den Oktavbändern von 250Hz bis 2000Hz +/- 20% vom Sollwert.

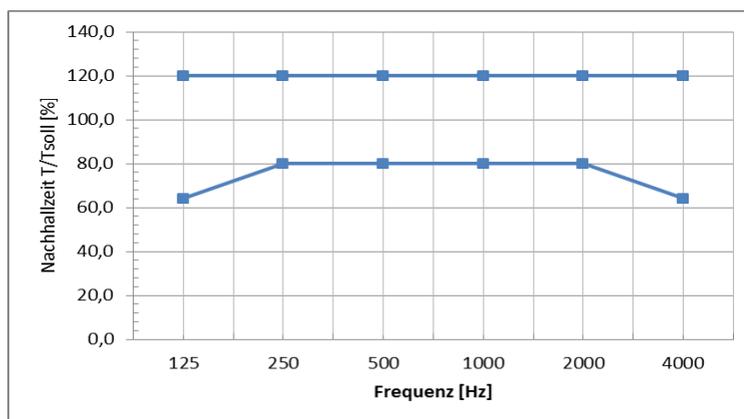


Abbildung 4: Toleranzbereich der empfohlenen Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Frequenz, normiert auf T_{soll} gemäß DIN 18041

Für einen typischen Klassenraum von 200 m^3 sieht das Toleranzband wie folgt aus:

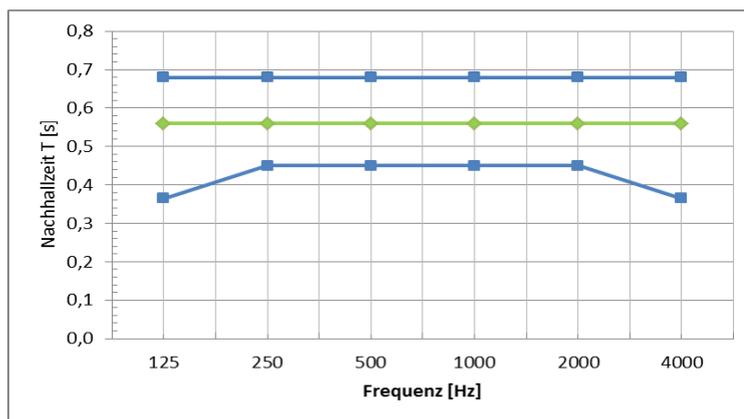


Abbildung 5: Toleranzband der Nachhallzeit nach DIN 18041 für einen Unterrichtsraum mit $T_{soll} = 0,56s$

³¹ [DIN18041]

³² [ÖNORM B 8115-3]

Müller³³ konnte durch Messungen in Unterrichtsräumen belegen, dass die Nachhallzeit in nicht sanierten Schulgebäuden aus dem 19. Jahrhundert zu hoch ist, wie Abbildung 6 und Abbildung 7 repräsentativ für sein Gesamtresümee zeigen.

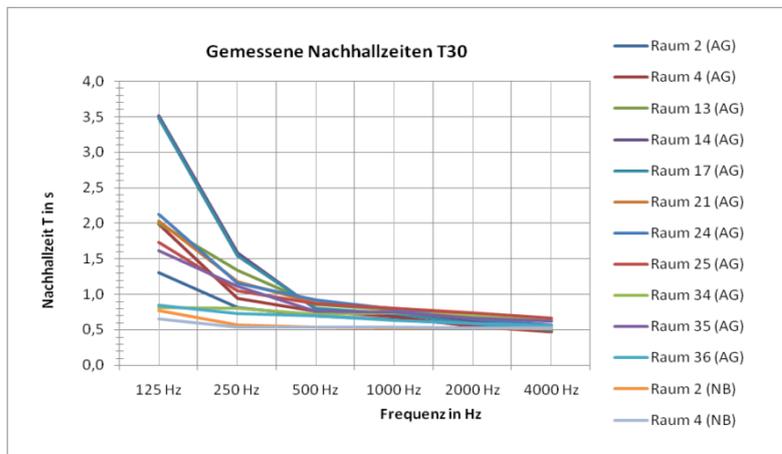


Abbildung 6: Nachhallzeitmessungen der Grundschule Wiltz/Luxemburg (Personen eingerechnet) [MÜLLER, S.161]

Die Abkürzung „AG“ bezeichnet die Messungen im alten Gebäude der Grundschule Wiltz, „NB“ bezieht sich auf die Messungen im Neubau.

Abbildung 7 zeigt, dass die Nachhallzeit des alten Gebäudes im Bereich von 125 Hz bis 500 Hz deutlich außerhalb des Toleranzbereiches liegt. Im Gegensatz dazu liegt die Nachhallzeit in den neuen Gebäuden zur Gänze im Toleranzband.

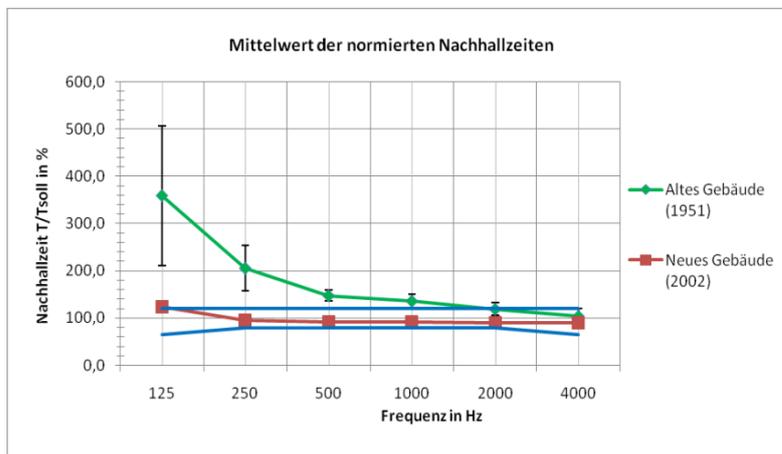


Abbildung 7: Mittelwert und Standardabweichung der normierten Nachhallzeiten für das alte und das neue Gebäude der Grundschule Wiltz/Luxemburg [MÜLLER, S.161]

³³ [MÜLLER]

Auch die Messungen in der Bundeshandelsakademie Grazbachgasse zeigten, dass die Nachhallzeiten im alten Gebäude sehr stark erhöht sind. Aber nicht nur im alten Gebäude, auch im neuen Gebäude wird das Toleranzband überschritten, vor allem im tieffrequenten Bereich.

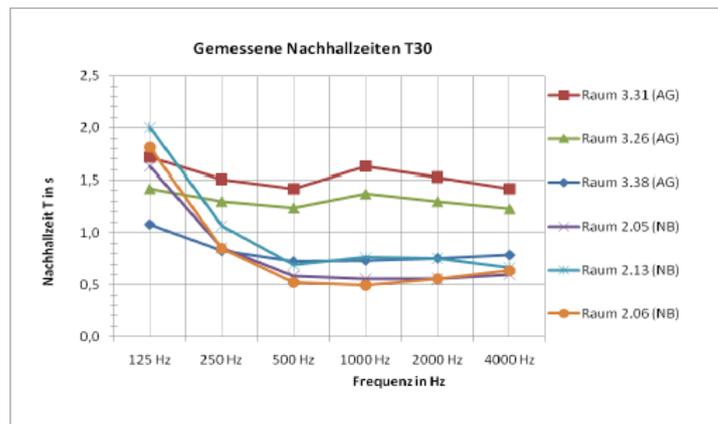


Abbildung 8: Nachhallzeitmessungen der Bundeshandelsakademie Grazbachgasse (Personen eingerechnet) [MÜLLER, S.234]

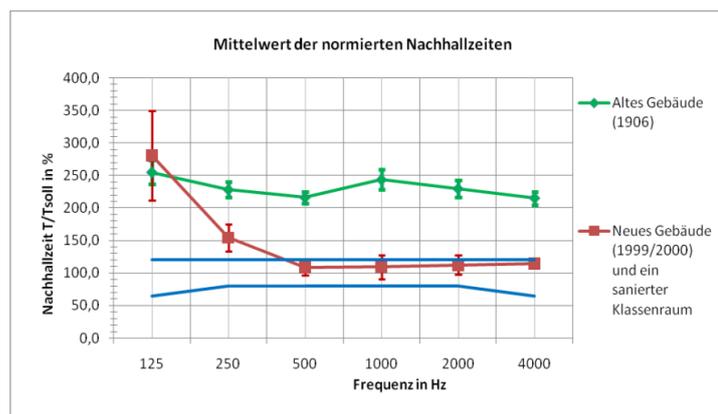


Abbildung 9: Mittelwert und Standardabweichung der normierten Nachhallzeiten für das alte und das neue Gebäude der Bundeshandelsakademie Grazbachgasse. [MÜLLER, S.234]

Im alten Gebäude wird die Sollnachhallzeit laut Norm im gesamten Frequenzbereich um 200 bis 250% überschritten. Eine akustische Sanierung ist somit erforderlich.

Um geeignete Sanierungsmaßnahmen festlegen zu können, müssen im ersten Schritt die akustischen Parameter ermittelt werden. Die Messung sowie Analyse dieser akustischen Parameter ist Inhalt des folgenden Kapitels.

2 Ermittlung der akustischen Parameter

Um die theoretisch gewonnenen Erkenntnisse in der Praxis zu überprüfen, sowie Messdaten und daraus Sanierungsvarianten gewinnen zu können, wurden im Bundesrealgymnasium Kepler akustische Messungen durchgeführt. Das BRG Kepler ist eine Schule aus dem 19. Jahrhundert und weist somit eine typische Klassenraumhöhe von durchschnittlich vier Meter auf, welche in Relation zur Sollnachhallzeit nach DIN18041³⁴ eine stark erhöhte Nachhallzeit zur Folge hat. Der Grundrissplan inklusive Positionierung des Messequipments sowie die detaillierten Messergebnisse sind aus Gründen der Übersichtlichkeit in Anhang A und Anhang B angeführt.

In Kapitel 2.1 werden alle akustischen Parameter, die im Zuge der Messung am BRG Kepler ermittelt werden, vorgestellt. In Kapitel 2.2 erfolgt die Auswahl des Messequipments sowie die Festlegung des Setups der Messung. Durch die akustische Messung, die in Kapitel 2.3 beschrieben ist, werden die akustischen Parameter gewonnen und anschließend in Kapitel 2.4 analysiert. Sie dienen als Basis für die Erarbeitung der akustischen Sanierungsvarianten.

2.1 Definition der akustischen Parameter

In diesem Kapitel werden jene akustischen Parameter vorgestellt, welche im Rahmen der Messungen am BRG Kepler ermittelt wurden.

Nachhallzeit (T)

Einer der Indikatoren für die akustische Güte eines Raumes ist, wie bereits im ersten Kapitel erörtert, die Nachhallzeit, welche in der OENORM EN ISO 9921 wie folgt definiert ist:

„Nachhallzeit ist die Dauer zwischen dem Abschalten der Quelle und dem Zeitpunkt, an dem die räumliche Schallenergiegedichte um 60 dB abgenommen hat. Sie wird in Sekunden angegeben und mit T bezeichnet. T kann aus einem kleineren Dynamik-Bereich als 60 dB ermittelt und auf eine Abklingzeit bei 60 dB extrapoliert werden. Sie wird dann entsprechend gekennzeichnet. Wird T aus der Zeit genommen, in der die Abklingkurve erstmalig die Werte 5 dB und 25 dB unter dem Anfangspegel erreicht, wird sie als T_{20} bezeichnet. Werden Abklingwerte von 5 dB bis 35 dB unter dem Anfangspegel verwendet, wird sie als T_{30} bezeichnet.“³⁵

³⁴ [DIN18041]

³⁵ [OENORM EN ISO 9921]

Als Abklingkurve wird die zeitliche Abnahme des Schalldruckpegels an einem Ort in einem Raum nach Verstummen der Schallquelle bezeichnet. Dieser Abklingvorgang kann entweder nach dem tatsächlichen Abschalten einer kontinuierlich betriebenen Schallquelle im Raum gemessen oder aus einer Rückwärtsintegration der quadrierten Impulsantwort des Raumes abgeleitet werden. Diese beiden Messverfahren werden in Kapitel 2.3.1 näher erörtert. Abbildung 10 zeigt die Sollnachhallzeit nach DIN18041³⁶ abhängig von der Raumgröße und dem Verwendungszweck.

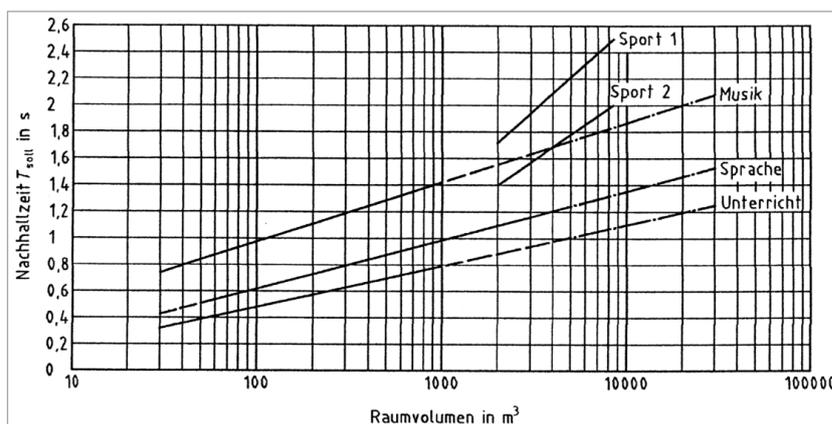


Abbildung 10: Sollwert der Nachhallzeit für unterschiedliche Nutzungsarten [DIN18041]

Diese Sollwerte aus Abbildung 10 beziehen sich auf den besetzten Zustand. Im nicht besetzten Zustand sollten diese Werte um weniger als 0,2 Sekunden überschritten werden. Der Sollwert für die Nachhallzeit wird laut DIN18041 nach folgender Formel berechnet:

$$T_{soll} = (0,321g \frac{V}{m^3} - 0,17)s$$

Wird die Nachhallzeit im unbesetzten Zustand gemessen, so kann die Absorptionsfläche der SchülerInnen rechnerisch integriert werden oder man verwendet eine laut DIN18041 adäquate Menge an Bühnenmolton (siehe Ende Kapitel 2.1) Zusätzlich zum Besetzungszustand des Raumes ist die Nachhallzeit auch von der Luftfeuchtigkeit und der Raumtemperatur abhängig, da die Schallgeschwindigkeit von diesen Parametern beeinflusst wird. Der Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Temperatur wird mit folgender Formel beschrieben:

$$c_{Luft} \approx 331,5 \frac{m}{s} \sqrt{1 + \frac{\vartheta / ^\circ C}{273,15}}$$

Die Schallgeschwindigkeit steigt mit der Temperatur ϑ , allerdings nur geringfügig. Auch der Einfluss von Feuchtigkeit ist sehr gering, sodass laut DIN18041 der Einfluss von Temperatur ϑ und Feuchtigkeit nur für eine Präzisionsmessung von Bedeutung ist. Bei den Messungen im BRG Kepler wurde das Standardverfahren angewendet. Die Erhebung dieser Parameter war somit nicht erforderlich. Die unterschiedlichen Messverfahren nach DIN18041 werden in Kapitel 2.3.1 näher erläutert.

³⁶ [DIN 18041]

Artikulationsverlust (Al_{cons})

Der Artikulationsverlust gesprochener Konsonanten, nach Peutz³⁷ und Klein³⁸, ist ein Kriterium für die Verständlichkeit von Sprache. Wie der nachstehenden Formel zu entnehmen ist, steigt der Artikulationsverlust mit steigender Nachhallzeit sowie mit steigender Entfernung zwischen Schallquelle und Hörer.

$$Al_{cons} \approx 0,652 \cdot \left(\frac{r_{LH}}{r_R}\right)^2 \cdot T \quad \text{bzw.} \quad Al_{cons} = 200 \cdot \frac{r_{LH}^2 \cdot T^2}{\gamma \cdot V}$$

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

Voraussetzung für die genannte Formel ist ein Signal Störabstand von mindestens 35 dB. Sinkt der Signal Störabstand auf unter 35 dB, so erhöht, also verschlechtert sich der Artikulationsverlust und muss korrigiert werden. Abbildung 11 zeigt die Abhängigkeit des Al_{cons} vom Signal-Rausch-Verhältnis (SNR bzw. S/N) und von der Nachhallzeit T . L_r bezeichnete den Diffusschallpegel und L_d den Direktschallpegel.

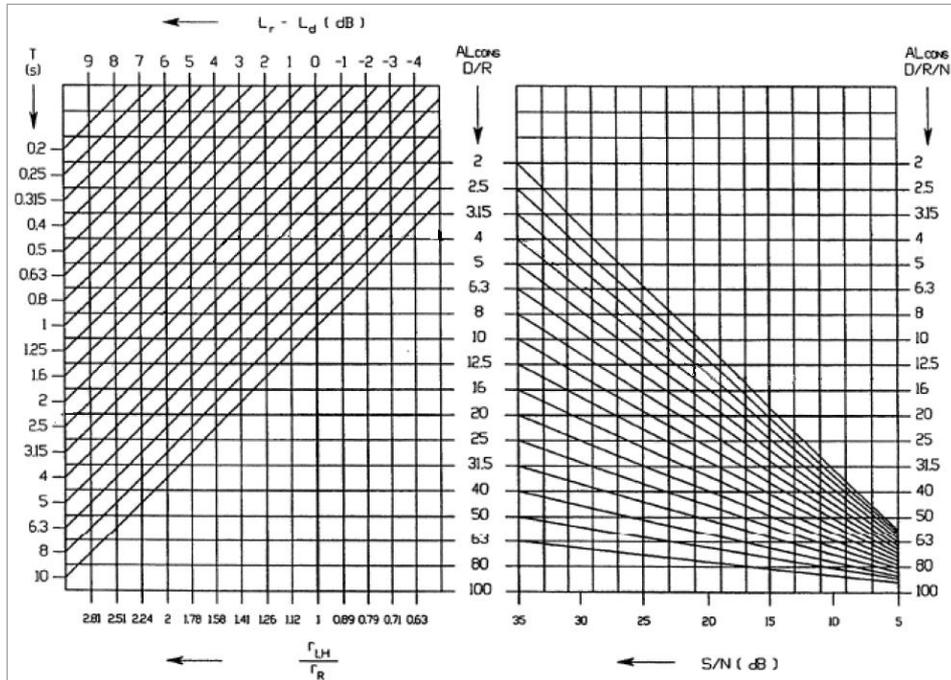


Abbildung 11: Artikulationsverlust in Abhängigkeit der Pegeldifferenz des Diffusschalls, des Direktschalls und der Nachhallzeit T . Al_{cons} wird in der rechten Abbildung für den jeweiligen S/N korrigiert. [AHNERT]

³⁷ [PEUTZ]

³⁸ [KLEIN]

Folgende Wertebereiche gelten für den Artikulationsverlust:

- $Al_{cons} < 2\%$ ideale Verständlichkeit
- $2\% < Al_{cons} < 7\%$ gute Verständlichkeit
- $7\% < Al_{cons} < 20\%$... befriedigende Verständlichkeit
- $20\% < Al_{cons}$ unbrauchbare Verständlichkeit

Sprachübertragungsindex (STI)

Die Sprachverständlichkeit wird vom Nachhall, von Störgeräuschen, aber auch von unterschiedlichsten Signalveränderungen am Weg vom Sender zum Empfänger beeinflusst. Diesem Phänomen wird beim sogenannten Speech Transmission Index (STI) Rechnung getragen.

Der STI wird laut ÖNORM EN ISO 9921³⁹ in folgende Bereiche eingeteilt:

- 0 bis 0,3..... schlecht, bad
- 0,3 bis 0,45... schwach, poor
- 0,45 bis 0,6.... angemessen, fair
- 0,6 bis 0,75.... gut, good
- 0,75 bis 1..... ausgezeichnet, excellent

Wie Abbildung 12 darstellt, sinkt der Sprachübertragungsindex mit steigender Nachhallzeit. Befindet sich der Hörer im Fernfeld, so gilt Abbildung 13, die den Zusammenhang zwischen STI, dem SNR und der Nachhallzeit T veranschaulicht.

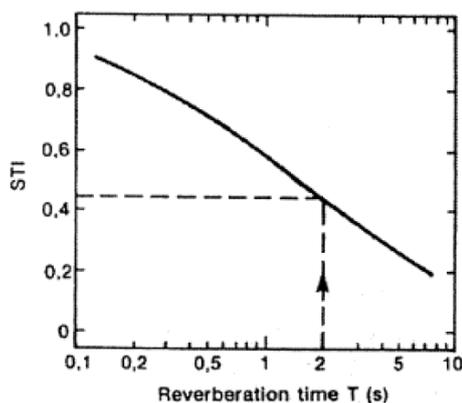


Abbildung 12: STI in Abhängigkeit von T

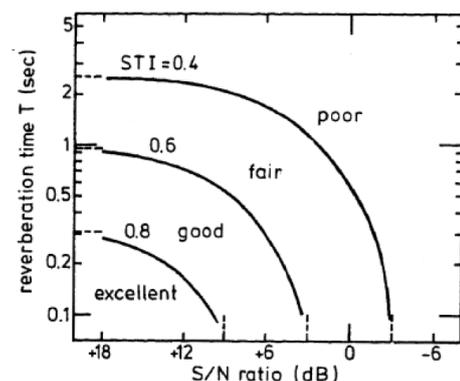


Abbildung 13: Kurven von konstantem STI als Funktion des SNR und der Nachhallzeit im Fernfeld. [HOUTGAST]

³⁹ [ÖNORM EN ISO 9921]

Deutlichkeitsgrad (D_{50})

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Der Deutlichkeitsgrad D_{50} wurde von Thiele eingeführt und ist ein Maß für die sogenannte „Hörsamkeit“ eines Raumes.⁴⁰ Gute Hörsamkeit besagt, dass auch ohne den Einsatz von elektroakustischen Anlagen eine gute Sprachverständlichkeit gegeben ist. Entscheidend für die Hörsamkeit eines Raumes sind jene Reflexionen, die innerhalb von 100 – 200ms nach dem Direktschall beim Hörer eintreffen. Reflexionen mit einer Verzögerung bis 50ms erhöhen sogar die Deutlichkeit der Sprache.

Der Deutlichkeitsgrad ist das Verhältnis der Schallenergie, die in den ersten 50ms eintrifft zur Gesamtenergie und wird in Prozent ausgedrückt. Je mehr Schallenergie in den ersten 50ms eintrifft bzw. je größer der Anteil an Direktschall ist, desto besser ist die Verständlichkeit.

Deutlichkeitsmaß (C_{50})

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Das Deutlichkeitsmaß ist als der zehnfache Logarithmus des Deutlichkeitsgrades definiert. Es basiert auf denselben Ausgangswerten, lediglich das Ergebnis muss anders interpretiert werden. Fasold⁴¹ und Veres legen folgende Grenzwerte fest:

- $C_{50} > 2 \text{ dB}$... sehr gute Verständlichkeit
- $2 \text{ dB} > C_{50} > -3 \text{ dB}$... gute Verständlichkeit
- $-3 \text{ dB} > C_{50} > -8 \text{ dB}$...noch ausreichende Verständlichkeit

Äquivalente Schallabsorptionsfläche (A)

Die äquivalente Schallabsorptionsfläche A ist in der DIN 18041 wie folgt definiert:

„Gedachte Fläche mit vollständiger Schallabsorption ($\alpha = 1$), die den gleichen Teil der Schallenergie absorbieren würde wie die gesamte Oberfläche eines Materials, eines Raumes oder wie Gegenstände und Personen.“⁴²

⁴⁰ Vgl. [FASOLD]

⁴¹ [FASOLD]

⁴² [DIN 18041, S.8]

Vereinfacht gesagt weist eine Fläche mit Schallabsorptionsgrad $\alpha=1$ denselben Absorptionsgrad auf wie ein offenes Fenster. Das bedeutet, dass auf Grund der vollständigen Absorption kein Schall reflektiert wird.

Die äquivalente Schallabsorptionsfläche eines Raumes kann bei bekannten Schallabsorptionsgraden α_i aus den einzelnen Teilflächen S_i und der Schallabsorption der Gegenstände bzw. Personen innerhalb des Raumes nach folgender Gleichung berechnet werden:⁴³

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times S_i + \sum_{j=1}^k A_j + 4 \times mV$$

α_i Schallabsorptionsgrad der Teilfläche

S_i Teilflächen

A_j Äquivalente Schallabsorptionsfläche nicht flächenhafter Materialien, Gegenstände und Personen innerhalb des Raumes [m²]

m Dämpfungskonstante der Luft nach DIN EN 12354-6:2002-03, Tab. 1 [m⁻¹]

V Gesamtes Raumvolumen in m³

Ist sowohl das Volumen, als auch die Nachhallzeit eines Raumes bekannt, so kann die äquivalente Absorptionsfläche auch durch die Sabine'sche Nachhallzeitformel berechnet werden:⁴⁴

$$A = 0,161 \cdot \frac{V}{T}$$

Überschreitet die Nachhallzeit eines Raumes die laut Norm geforderte Sollnachhallzeit, so wird zusätzliche Schallabsorptionsfläche benötigt, um die Nachhallzeit reduzieren zu können. Die zusätzliche äquivalente Schallabsorptionsfläche, die nötig ist um T_{soll} zu erreichen, wird mit Hilfe folgender Formel berechnet:

$$A_{zus} = 0,163 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{T_{soll}} - \frac{1}{T_{ist}} \right) [m^2]$$

V Raumvolumen [m³]

T_{soll} ... Soll-Nachhallzeit laut Norm [s]

T_{ist} Ist-Nachhallzeit des Raumes [s]

A_{zus} ... Zusätzlich äquivalente Schallabsorptionsfläche um T_{soll} zu erreichen [m²]

Wie in Kapitel 1.4.3 angeführt, gibt es nach der Norm DIN18041 sowohl für den leeren, als auch für den besetzten Zustand Sollwerte für die Nachhallzeit. Bezieht man sich bei der Berechnung der zusätzlichen äquivalenten Absorptionsfläche auf den Sollwert im besetzten Zustand, so benötigt man auch bei T_{ist} die Nachhallzeit im besetzten Zustand. Ist eine Messung mit einer der Raumnutzung entsprechenden Anzahl an Personen nicht möglich oder nicht erwünscht, so ist es ebenso möglich, die Nachhallzeit im leeren Zustand zu ermitteln und die absorbierende Wirkung des Publikums rechnerisch zu integrieren.

⁴³ Siehe [DIN18041, S.8]

⁴⁴ Siehe [DICKREITER1, S.32]

Die dafür nötigen Werte der frequenzabhängigen, äquivalenten Schallabsorptionsfläche von Personen und Gestühl nach DIN18041 sind nachfolgend in Tabelle 5 angeführt.⁴⁵

Tabelle 5: Frequenzabhängige äquivalente Absorptionsfläche in m² [DIN 18041]

	Äquivalente Schallabsorptionsfläche A [m ²]					
	je Frequenzband [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
1 m ² /Person sitzend auf Holzstühlen (Zeile 2)	0,18	0,26	0,55	0,68	0,78	0,78
3 m ² /Person (Schüler an Holztischen)	0,05	0,33	0,43	0,32	0,38	0,37

Da die Messungen im BRG Kepler für zwei Räume (Raum 005 sowie Raum 012) sowohl im leeren als auch im besetzten Zustand erfolgten, war es möglich, die Simulation des besetzten Zustandes den tatsächlichen Werten gegenüberzustellen. Abbildung 14 zeigt die Simulation mit den Werten für 3 m²/Person, Abbildung 15 mit den Werten für 1 m²/Person.

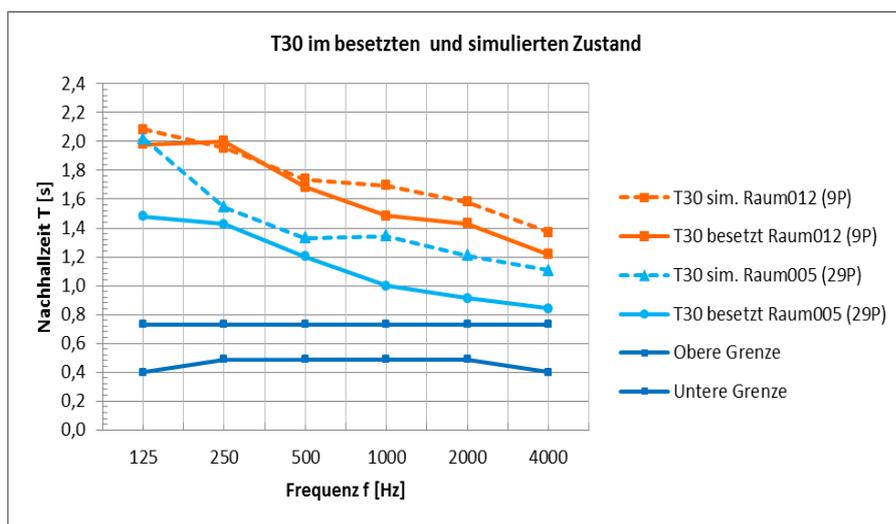


Abbildung 14: T30 im besetzten und simulierten Zustand mit A_{Schüler}=3m²

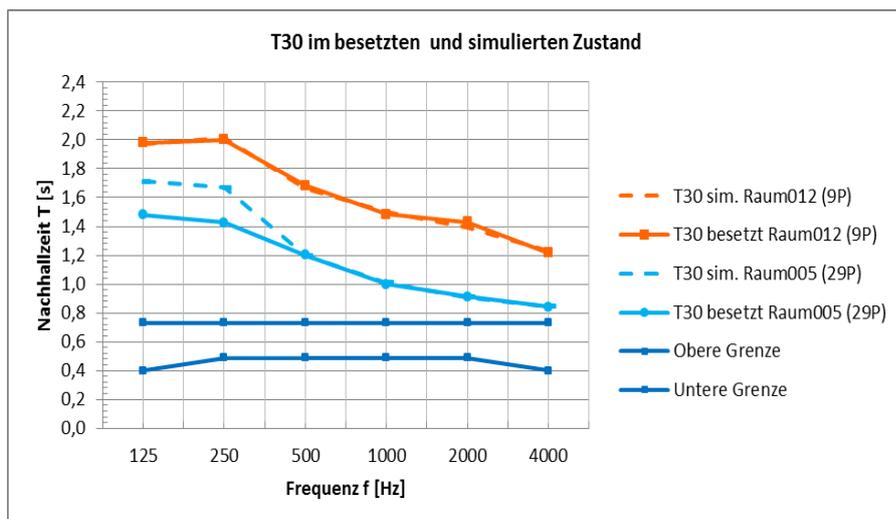


Abbildung 15: T30 im besetzten und simulierten Zustand mit A_{Schüler}=1m²

⁴⁵ Siehe [DIN18041, S.32]

In Abbildung 14 liegen die simulierten Werte bei beiden Räumen deutlich über den tatsächlichen Messwerten. In Abbildung 15 decken sich Simulation und Messung im besetzten Zustand bei Raum 012 zur Gänze, bei Raum 005 jedoch nur oberhalb von 500 Hz. Die unterschiedlichen Ergebnisse liegen darin begründet, dass unterschiedlich viele Personen bei der Messung anwesend waren und zudem die in der Norm angeführte äquivalente Schallabsorptionsfläche im Bereich unterhalb von 500 Hz zu klein ist. Je weniger Personen anwesend sind, desto geringer fließt die Abweichung der Normwerte in das Endergebnis mit ein und desto besser stimmen Simulation und Messung überein.

Basierend auf den Messergebnissen von Raum 005 und Raum 012 wurde die äquivalente Schallabsorptionsfläche für 125 Hz sowie für 250 Hz gemäß folgender Formel neu berechnet:

$$A_{Schüler/Molton} = 0,163 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{T_{Schüler/Molton}} - \frac{1}{T_{leer}} \right) [m^2]$$

Tabelle 6: Äquivalente Schallabsorptionsfläche in m² basierend auf DIN18041-Zeile 2 mit Korrektur der Werte unterhalb von 500 Hz. Die Anpassung basiert auf den Messungen im BRG Kepler

	Äquivalente Schallabsorptionsfläche A [m ²]					
	je Frequenzband [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
1 m ² /Person sitzend auf Holzstühlen	0,32	0,41	0,55	0,68	0,78	0,78
	(korrigiert)		(siehe DIN 18041-Zeile 2)			

Abbildung 16 zeigt die Gegenüberstellung von Simulation und Messwert, wobei die Simulation auf den in Tabelle 6 angeführten Werten basiert. Im Vergleich zu Abbildung 15 konnte für Raum 005 die Abweichung von 0,2 Sekunden zur Gänze behoben werden. Die Simulation für Raum 012 verschlechterte sich um ca. 0,1 Sekunden, jedoch konnte die Maximalabweichung zwischen Simulation und Messwert um 0,1 Sekunden verringert werden. In Summe konnte die Simulation also verbessert werden.

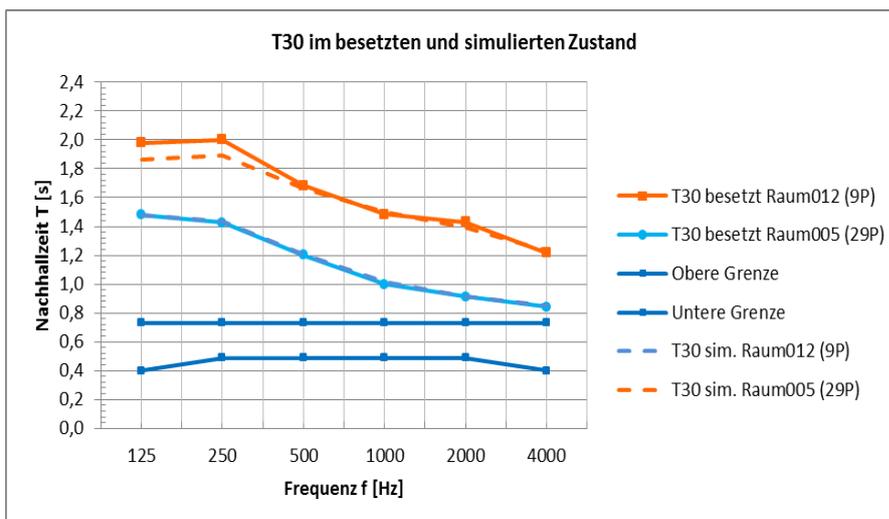


Abbildung 16: T30 im besetzten und simulierten Zustand mit der auf den Messungen basierenden äquivalenten Absorptionsfläche der SchülerInnen

Die in diesem Kapitel definierten akustischen Parameter sind die Basis für die Erstellung von Sanierungsvarianten. Das für diese Messung der akustischen Parameter erforderliche Messequipments sowie das Setup der Messung werden im nachfolgenden Kapitel erörtert.

2.2 Festlegung von Messequipment sowie Setup

Um bei der Ermittlung der akustischen Parameter normgerechte Werte zu erhalten, basieren die folgenden Überlegungen für das Messequipment und den Messaufbau auf der dafür entsprechenden OENORM EN ISO 3382-2⁴⁶. Diese Norm beinhaltet Richtlinien zur Messung der Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen, wie beispielsweise Klassenräume. Zusätzlich zur Norm werden die diesbezüglich durchgeführten Literaturrecherchen sowie die praktisch gewonnenen Erkenntnisse von Müller⁴⁷ miteinbezogen.

2.2.1 Auswahl des Messequipments

Bei der Auswahl des Messequipments sind mehrere Kriterien relevant, welche in diesem Kapitel näher beleuchtet werden. Die entsprechende Norm, technische Aspekte und die Messgenauigkeit, bei gleichzeitig möglichst geringem Messaufwand, waren die Basis für die Auswahl des Equipments.

Lautsprecher

Laut Norm muss die Schallquelle möglichst ungerichtet sein. Dodekaeder erfüllen diese Forderung, die meisten Modelle sind auf Grund des Gewichtes jedoch unhandlich. Ein zwei Weg System ist handlicher, dessen Abstrahlcharakteristik jedoch wesentlich gebündelter. Da der Fokus im Rahmen dieser Diplomarbeit auf Klassenräumen und somit auf Sprache liegt, welche ebenfalls gebündelt abgestrahlt wird, ist ein Lautsprecher wie der Genelec 1030 A für die Messungen im Zuge einer Grobsanierung von Klassenräumen eine zulässige Alternative. Die Norm fordert ebenfalls, dass der Sender einen Schalldruckpegel erzeugen kann, welcher Abklingkurven mit dem erforderlichen Mindest-Dynamik-Bereich liefert. Der Genelec 1030A erfüllt auch diese Anforderung.



Abbildung 17: Genelec 1030A

⁴⁶ [OENORM EN ISO 3382-2]

⁴⁷ [MÜLLER]

Mikrofon

Das Mikrofon muss laut Norm ungerichtet sein und darf maximal einen Membrandurchmesser von 14mm aufweisen. Das Ausgangssignal muss direkt einem Verstärker, einem Filter und einem Gerät zur Darstellung der Abklingkurve oder einem Analysegerät zur Ableitung der Impulsantwort zugeleitet werden.⁴⁸ Das AKG C 480 B erfüllt diese Kriterien und zeichnet sich des Weiteren durch eine hohe Übertragungsqualität aus.



Abbildung 18: AKG C 480 B

Audio Interface

Als Audio Interface wurde das Fireface 400 von RME gewählt. Es ist im Vergleich zu anderen Modellen sehr kompakt, verfügt aber über alle, für die Messung nötigen, Ein- und Ausgänge. Auf der Frontseite des Fireface 400 befinden sich Instrumenten-, Mikrofon- und Line-Eingänge, ein Stereo Line-/Kopfhörerausgang, ein Drehencoder mit 7-Segment Anzeige, sowie mehrere Status und MIDI LEDs. Auf der Rückseite des Fireface 400 befinden sich vier analoge Eingänge, sechs analoge Ausgänge, ein Netzteilanschluss, sowie digitale Ein- und Ausgänge.



Abbildung 19: Frontansicht des RME Fireface 400



Abbildung 20: Rückseite des RME Fireface 400

⁴⁸ Vgl. [OENORM EN ISO 3382-2]

2.2.2 Anzahl der Mess- sowie Senderpositionen

Die Mindestanzahl an Mess- und Senderpositionen für eine gute Abdeckung des Raumes ist abhängig von der gewünschten Messgenauigkeit. Die ÖNORM EN ISO 3382-2 beschreibt folgende mögliche Messverfahren:⁴⁹

Kurzverfahren

Dieses Verfahren ist für Messungen im Schallschutz sowie für Messungen bzgl. Luftschall- und Trittschalldämmung geeignet. Messungen nach diesem Verfahren werden ausschließlich in Oktavbändern durchgeführt, wobei die Messungen der Nachhallzeit an mindestens einer Senderposition durchzuführen ist. Der Durchschnitt der Ergebnisse ist von mindestens zwei Mikrofonpositionen zu bestimmen. Es wird davon ausgegangen, dass die Nenngenauigkeit bei Oktavbändern besser als 10% ist. Nenngenauigkeit bedeutet, dass bei Einhaltung der genannten Bedingungen eine Messgenauigkeit von 10% zu erwarten ist.

Standardverfahren

Das Standardverfahren ist für die Überprüfung der Gebäudeeigenschaften beim Vergleich mit Spezifikationen der Nachhallzeit oder der Raumabsorption geeignet. Die Nenngenauigkeit bei Oktavbändern ist besser als 5%, jene bei Terzbändern besser als 10%. Die Messung der Nachhallzeit ist an mindestens zwei Senderpositionen durchzuführen, wobei mindestens sechs unabhängige Sender – Mikrofonkombinationen erforderlich sind.

Präzisionsverfahren

Wenn eine sehr hohe Messgenauigkeit gefordert ist, so sollte das Präzisionsverfahren zum Einsatz kommen. Es wird davon ausgegangen, dass die Nenngenauigkeit bei Oktavbändern besser als 2,5% und bei Terzbändern besser als 5% ist. Die Messung der Nachhallzeit ist an mindestens zwei Senderpositionen durchzuführen. Des Weiteren sind mindestens zwölf unabhängige Sender – Mikrofonpositionen erforderlich.

Leistner⁵⁰ verwendet in seiner Studie 5 Mikrofon- und 3 Lautsprecherpositionen, womit er die Kriterien des Präzisionsverfahrens erfüllt. Müller⁵¹ verwendet vier Mess- und zwei Senderpositionen, da aus seiner Sicht der räumliche Bereich, in dem sich SchülerInnen befinden dadurch ausreichend erfasst ist bzw. auf Grund des Inventars nicht mehr Positionen möglich sind.

Für die Messungen am BRG Kepler wurde entsprechend der Eignungsempfehlung der Norm sowie in Anlehnung an Müller das Standardverfahren gewählt, da zum einen dessen Messgenauigkeit ausreichend und der damit verbundene Messaufwand für einen Laien vertretbar ist. Da die Klassenräume im BRG Kepler größer sind als jene der Testmessungen von Müller und zudem zur Gänze genutzt werden, wurden jedoch fünf statt vier Messpositionen gewählt.

⁴⁹ Vgl. [ÖNORM EN ISO 3382-2]

⁵⁰ [LEISTNER]

⁵¹ [MÜLLER]

Hinsichtlich der Anzahl an Senderpositionen wurden Testmessungen mit zwei, aber auch mit drei Senderpositionen durchgeführt, um überprüfen zu können, ob der erhöhte Messaufwand des Modells von Leistner gerechtfertigt ist. Abbildung 21 zeigt für Raum 002 sowie für Raum 012 die Abweichung des Messergebnisses bei drei Senderpositionen vom Messergebnis mit zwei Senderpositionen in %. Die Maximalabweichung liegt im tieffrequenten Bereich bei 2% und oberhalb von 250 Hz unter 0,5%. Im Rahmen einer Standardmessung ist diese Abweichung vertretbar, sodass zugunsten des geringeren Messaufwandes zwei Senderpositionen festgelegt werden.

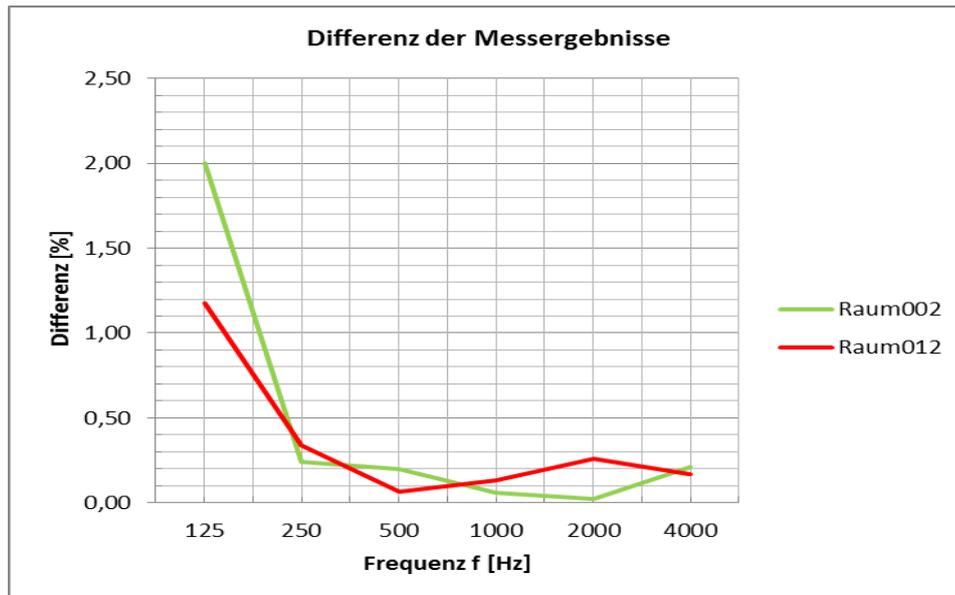


Abbildung 21: Differenz zwischen 2 und 3 Senderpositionen

2.2.3 Positionierung des Messequipments

Laut ÖNORM EN ISO 3382-2⁵² sollte die Senderposition möglichst der realen Nutzung des Raumes entsprechen. Im Fall eines Klassenzimmers bedeutet dies, dass die Lautsprecher dort positioniert werden sollen, wo sich der Lehrkörper im Unterricht typischer Weise befindet. Bei klassischen Unterrichtsstilen sind dies der Bereich nahe der Tafel und der Bereich nahe dem Lehr Pult.

Auch für die Positionierung der Mikrofone gibt es Richtlinien laut Norm, um sowohl den Einfluss des Direktschalls als auch der Raummoden zu berücksichtigen. Der Abstand zwischen den Mikrofonen sollte mindestens eine halbe Wellenlänge der tiefsten eingesetzten Frequenz sein. Bei 125 Hz als tiefste Frequenz beträgt der Mindestabstand also 1,4m. Der Abstand vom Mikrofon zur nächstgelegenen, reflektierenden Oberfläche, einschließlich des Bodens, sollte vorzugsweise mindestens ein Viertel der Wellenlänge der tiefsten eingesetzten Frequenz betragen. Im Fall von 125 Hz beträgt der Mindestabstand also 0,7m.

⁵² [ÖNORM EN ISO 3382-2]

Ebenfalls zu berücksichtigen ist, dass die Mikrofonpositionen nicht zu nahe an einer Senderposition liegen, da sich ansonsten ein zu starker Direktschall-Einfluss ergibt. Der Mindestabstand des Mikrofons zum Lautsprecher wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$d_{\min} = 2\sqrt{\frac{V}{c\hat{T}}}$$

V ... Volumen [m³]
 c ... Schallgeschwindigkeit [m/s]
 \hat{T} ... Schätzwert der erwarteten Nachhallzeit [s]

Zusammenfassend sind laut Norm folgende Positionierungskriterien einzuhalten:

- Positionierung des Senders entsprechend der realen Nutzung des Raumes
- Minimalabstand zwischen den Mikrofonen: 1,4 m
- Minimalabstand von Mikrofon bzw. Lautsprecher zu reflektierenden Flächen: 0,7 m
- Minimalabstand zwischen Lautsprecher und Mikrofon: d_{\min}

Zusätzlich zur Norm wurde noch das Modell von Leistner sowie das Modell von Müller betrachtet. Leistner sieht 5 Mikrofon- und 3 Lautsprecherpositionen vor. Die Abstände im Modell aus Abbildung 22 sind in Meter angegeben.

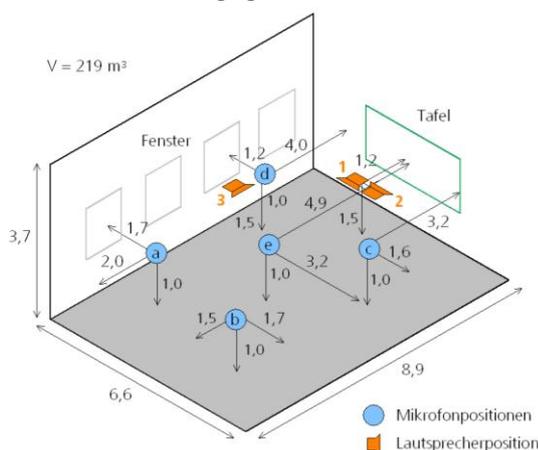


Abbildung 22: Mikrofon- und Lautsprecherposition nach Leistner [LEISTNER]

Bis auf Position „d“, deren Abstand zum Lautsprecher laut Norm zu gering ist, entspricht diese Anordnung den Forderungen der Norm und wäre somit als Basis für die Positionierung des Equipments geeignet. Müller stellte auf Grund seiner Messungen allerdings fest, dass dieses Modell aus mehreren Gründen nicht direkt übernommen werden kann⁵³. Zum einen ist die Lautsprecherposition 2 nicht möglich, da dadurch die Tafel zu stark in Schwingung versetzt wird, zum anderen erlaubt es das restliche Inventar meist nicht das Equipment exakt nach diesen Angaben zu positionieren. Da bei den Messungen von Müller die SchülerInnen auf Grund von Spielecken oder Sofas überwiegend im hinteren Klassenbereich zentriert saßen, waren im Vergleich zum Modell von Leistner vier Messpositionen ausreichend. Die nachfolgende Abbildung 23 zeigt die von Müller gewählte Messanordnung.

⁵³ Vgl. [MUELLER, S.127]

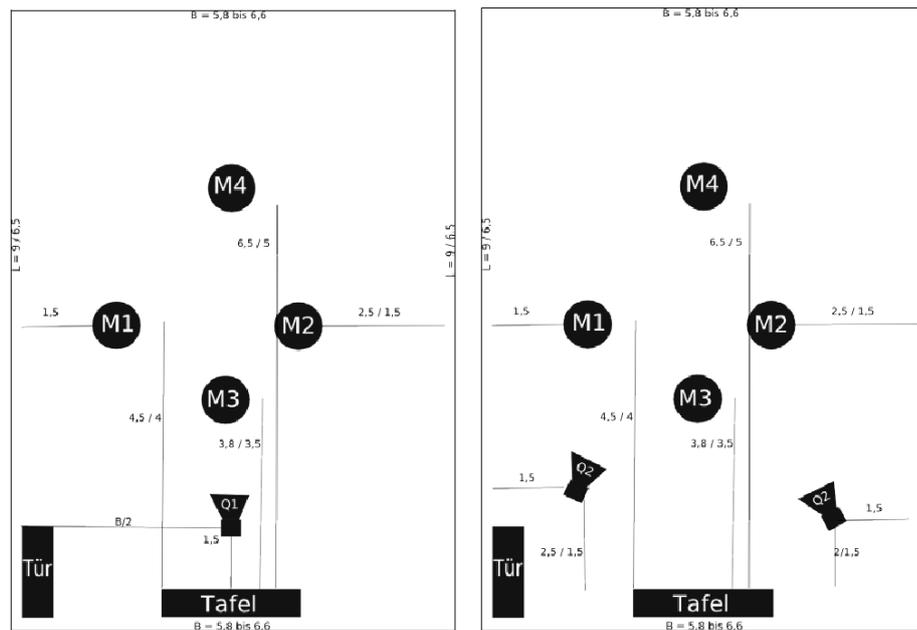


Abbildung 23: Mikrofon und Lautsprecherpositionen nach Müller [MÜLLER]

Die linke Anordnung aus Abbildung 23 wird für kleine Klassenräume mit einer durchschnittlichen Länge von 6,5m empfohlen, die rechte Abbildung ist für große Klassenräume mit einer durchschnittlichen Länge von 9m geeignet.

Da das Inventar in Klassenräumen stets anderes gestaltet wird und das Ziel dieser Diplomarbeit ein universell anwendbarer Leitfaden ist, wurde kein fixer Positionierungsplan entworfen. Um normgerechte Messergebnisse zu erhalten wird empfohlen, die Positionierungskriterien der ÖNORM EN ISO 3382-2⁵⁴ einzuhalten.

Ergänzend sei an dieser Stelle noch die Thematik der Raummoden erwähnt. Sie werden auch Raumresonanz oder Stehwelle genannt und entstehen durch Reflexion. Im Gegensatz zu sich frei ausbreitenden Schallwellen, bei der der Schallpegel gleichmäßig abnimmt, bilden sich bei stehenden Wellen über den Raum verteilt Schalldruckminima und –Maxima.⁵⁵ Dies bedeutet, dass das Schallfeld im Raum ortsabhängig ist. Für die Beschallung von Konzertsälen oder ähnlichen Einrichtungen stellt dies ein Problem dar und muss durch entsprechende Bau- oder Beschallungsmaßnahmen verhindert werden. Auch in Klassenräumen entstehen Raummoden, welche auf Grund der hohen Anzahl an Messpunkten bzw. an Messwiederholungen sowie der Mittelung die Messung der Nachhallzeit allerdings nicht beeinflussen. Eine spezielle Rücksichtnahme auf Raummoden ist bei der Positionierung des Messequipments somit nicht erforderlich.

Nachdem die Anzahl der Mess- und Senderpositionen sowie die Platzierung des Messequipments fixiert sind, wird in Kapitel 2.3 nun die akustische Messung näher betrachtet.

⁵⁴ [ÖNORM EN ISO 3382-2]

⁵⁵ Vgl. [DICKREITER1, S.43]

2.3 Akustische Messung

Neben grundsätzlichen Überlegungen zum Messverfahren sowie zum Anregungssignal werden für die Durchführung der Messung zwei Softwaretools für Audiomessungen und Audioanalyse getestet und hinsichtlich der Kosten bzw. der Benutzerfreundlichkeit gegenübergestellt. Zusätzlich zur Bedienung der Software werden auch die einzelnen Schritte der Messung und die Gewinnung der akustischen Parameter erläutert.

2.3.1 Messverfahren sowie Anregungssignal

Für die Ermittlung der in Kapitel 2.1 angeführten raumakustischen Parameter benötigt man die Impulsantwort eines Raumes. Aus raumakustischer Sicht ist die Impulsantwort die Darstellung des in einem Raum empfangenen Schalldrucks als Funktion der Zeit, bewirkt durch die Anregung des Raumes mit einem Impuls. Theoretisch wäre ein Dirac Impuls das ideale Anregungssignal, da dieser unendlich schmal und unendlich hoch ist. Das bedeutet, dass der Dirac-Impuls alle Frequenzen mit konstanter Amplitude beinhaltet.⁵⁶ Da die Anregung des Raumes durch elektronische sowie mechanische Komponenten der Messvorrichtung beschränkt ist, können in der Realität keine idealen Dirac-Impulse erzeugt werden, sodass alternative Anregungssignale eingesetzt werden müssen

In der OENORM EN ISO 3382-2⁵⁷ werden zur Gewinnung der Impulsantwort das Verfahren des abgeschalteten Rauschens sowie das Verfahren der integrierten Impulsantwort genannt. Die in diesen Verfahren eingesetzten Anregungssignale sind eine mögliche Alternative zum Dirac Impuls und werden nachfolgend näher erläutert.

Verfahren des abgeschalteten Rauschens

Beim Verfahren des abgeschalteten Rauschens wird der Raum mit breitbandigem statistischem oder pseudo-statistischem Rauschen angeregt und die Abklingkurven (Definition siehe Kapitel 2.1) durch direkte Aufzeichnung des abklingenden Schalldruckpegels bestimmt.⁵⁸ Die Anregungsdauer muss so lang sein, dass das Schallfeld den stationären Zustand erreicht, bevor der Abklingvorgang einsetzt. Das Signal muss daher mindestens so lange angestrahlt werden, wie die Hälfte der erwarteten Nachhallzeit beträgt. Laut Norm ist die Nachhallzeit jene Dauer, die zwischen dem Abschalten der Quelle und dem Zeitpunkt, an dem die räumliche Schallenergiedichte um 60 dB abgenommen hat, vergeht. Da in der Praxis ein Abfall von 60dB jedoch oft nicht realisiert werden kann, wird anstatt dessen häufig die sogenannte T_{30} gemessen. Für die Ermittlung von T_{30} wird, wie in Abbildung 24 dargestellt, der Bereich von 5dB bis 35 dB unterhalb des stationären Pegels ausgewertet. Innerhalb dieses Bereiches ist die Abklingkurve je Terz- bzw. Oktavband rechnerisch durch eine Gerade mit kleinster quadratischer Abweichung anzunähern. Die Neigung der Geraden ergibt die Abklingrate d in dB/s, woraus die Nachhallzeit errechnet wird.

⁵⁶ Vgl. [GROENINGEN]

⁵⁷ [OENORM EN ISO 3382-2]

⁵⁸ Vgl. [OENORM EN ISO 3382-1]

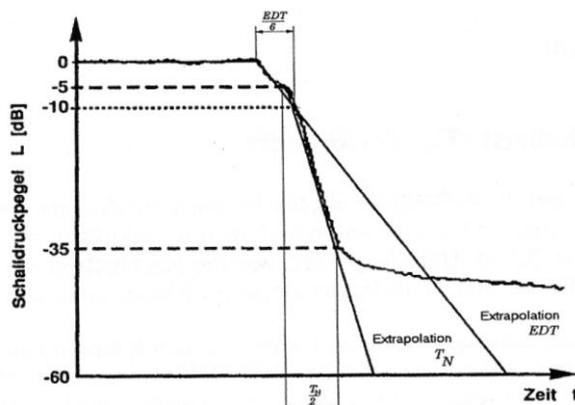


Abbildung 24: Abklingkurve eines Raumes [FASOLD, S.141]

Ergänzend sei an dieser Stelle noch die in Abbildung 24 eingezeichnete EDT (Early Decay Time) erklärt. Diese ist für die subjektive Wahrnehmung der Nachhallzeit entscheidend und wird durch extrapolieren aus den ersten 10dB Abfall ermittelt.⁵⁹

Auf Grund des Zufallscharakters des Anregungs-Signals hängt beim Verfahren des abgeschalteten Rauschens die Messgenauigkeit von der Anzahl der Messpunkte sowie der Anzahl an Messungen und Mittelungen ab. Die Scharmittelung und die Mittelung einzelner Werte der Nachhallzeit weisen die gleiche Abhängigkeit von der Anzahl der Mittelungen auf. Die Standardabweichung des Messergebnisses $\sigma(T_{20})$ oder $\sigma(T_{30})$ kann nach folgenden Gleichungen abgeschätzt werden⁶⁰:

$$\sigma(T_{20}) = 0,88 \times T_{20} \sqrt{\frac{1+1,90/n}{NBT_{20}}} \quad \sigma(T_{30}) = 0,55 \times T_{30} \sqrt{\frac{1+1,52/n}{NBT_{30}}}$$

B.....Bandbreite, in Hertz

n.....Anzahl der an jeder Position gemessenen Abklingvorgänge

N.....Anzahl der unabhängigen Messpunkte

T_{20} ...Nachhallzeit, in Sekunden, bei einem Untersuchungsbereich von 20 dB

T_{30} ...Nachhallzeit, in Sekunden, bei einem Untersuchungsbereich von 30 dB

Für einen Oktavfilter gilt $B = 0,71 \times f_c$ und für ein Terzfilter $B = 0,23 \times f_c$.

Beim Verfahren des abgeschalteten Rauschens wird rosa Rauschen eingesetzt, da dessen Leistungsdichtespektrum relativ gut mit jenem von Musik und Sprache übereinstimmt. Die Amplitude nimmt pro Frequenzverdopplung um 3 dB ab, d.h. die spektrale Leistungsdichte ist umgekehrt proportional zur Frequenz.⁶¹ Nachteil der Anregung mit Rauschen ist allerdings, dass auf Grund der breitbandigen Anregung nur begrenzte Energie in den Raum eingebracht werden kann, da die Gesamtenergie auf die gesamte Bandbreite aufgeteilt wird. Rauschen erfüllt die Eigenschaften eines Dirac-Impulses unzureichend und ist daher nur bedingt für die Ermittlung der Raumimpulsantwort geeignet.

⁵⁹ Vgl. [FASOLD]

⁶⁰ Vgl.[OENORM EN ISO 3382, S.12]

⁶¹ Vgl. [DICKREITER3]

Verfahren der integrierten Impulsantwort

Während beim Verfahren des abgeschalteten Rauschens die Abklingkurve direkt durch Aufzeichnung des abklingenden Schalldruckpegels bestimmt wird, wird beim Verfahren der integrierten Impulsantwort die Abklingkurve (Definition siehe Kapitel 2.1) für jedes Oktav- oder Terzband durch Rückwärtsintegration der quadrierten, gefilterten Impulsantwort bestimmt. Bei der sogenannten „Schröder Rückwärtsintegration“ wird die „Energy Decay Curve“ (EDC), die man durch Quadrieren der Impulsantwort gewinnt, auf integriert.⁶² Da sich die integrierte Impulsantwort theoretisch auf die Mittelwertbildung aus einer unendlichen Anzahl an Anregungen mit abgeschaltetem Rauschen bezieht, ist, im Gegensatz zum Verfahren des abgeschalteten Rauschens, keine zusätzliche Mittelung erforderlich um die statistische Messgenauigkeit zu erhöhen.

Ein laut OENORM EN ISO 3382-2⁶³ mögliches Anregungssignal für das Verfahren der integrierten Impulsantwort ist z.B. ein Pistolenschuss, da dieser einem Dirac-Impuls sehr ähnlich ist. Bei dieser Anregung kann die Impulsantwort direkt gemessen werden. Nachteile dieser Anregungsform sind aber sowohl der geringe Energieanteil im tieffrequenten Bereich als auch die schlechte Reproduzierbarkeit. Besser geeignet sind Schallsignale wie Sinus-Sweep oder pseudostatistisches Rauschen wie MLS. Bei Anregung mit diesen Signalen wird die Impulsantwort erst durch die Verarbeitung des aufgezeichneten Mikrofonsignals ermittelt, wodurch ein besserer Signal-Störabstand erreicht wird.

Eine „Maximum Length Sequence“ (MLS) ist ein periodisches, zweiwertiges, pseudo-statistisches Rauschen das reproduzierbar ist. Die Impulsantwort wird mittels Korrelationsmesstechnik bestimmt, sodass nicht das Anregungssignal selbst einem idealen Dirac-Impuls gleichen muss, sondern die Autokorrelationsfunktion des Anregungssignals. Dadurch kann im Gegensatz zur Anregung mit rosa Rauschen die Aussteuerung des Messsystems und somit auch der resultierende Signal-Störabstand deutlich verbessert werden. Ebenso von Vorteil ist es, dass auf Grund der Kreuzkorrelation Anteile, die nicht mit dem MLS-Signal korrelieren herausfallen. Die MLS-Messung ist somit nicht anfällig für Umgebungsgeräusche. Weiterer Vorteil der MLS ist der kleine Crest Faktor. Der Crest Faktor, oder auch Scheitelwert genannt, beschreibt das Verhältnis von Scheitelwert zu Effektivwert einer Wechselgröße, also die „Impulshaftigkeit“ eines Signals. Der Effektivwert eines MLS Signals ist durch die Zuordnung der logischen Zustände 0 und 1 auf die physikalischen Werte +1 und -1 unabhängig von der Periode immer gleich 1 und gleicht daher dem Maximalwert des MLS-Signals. Der Crest Faktor beträgt somit 1 was dem Minimalwert entspricht. Nachteil der MLS ist der stark unetige Verlauf, der auf Grund der schnellen Wechsel zwischen maximalen Auslenkungszuständen leicht zu Verzerrungen oder Übersteuerung der beteiligten Messgeräte führen kann, sodass ein niedriger Pegel verwendet werden muss. Der ursprüngliche Vorteil des höheren SNR auf Grund der Korrelation wird dadurch geringfügig reduziert.

⁶² Vgl. [KARJALAINEN]

⁶³ [OENORM EN ISO 3382-2]

Um den SNR zu erhöhen, kann die Messung aus mehreren aufeinanderfolgenden synchronen Einzelmessungen bestehen deren Ergebnisse gemittelt werden. Dadurch wird zwar der SNR erhöht, allerdings steigt auch die Anfälligkeit gegenüber Zeitvarianzen. Diese können durch unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Schall infolge geänderter Luftfeuchte oder Temperatur auftreten.⁶⁴

Ein weiteres nach OENORM EN ISO 3382- 2⁶⁵ zulässiges Anregungssignal für das Verfahren der integrierten Impulsantwort ist der Exponential Sweep, oder auch Gleitsinus genannt. Der Exponential Sweep ist ein fortlaufendes Sinussignal, das über die Zeit exponentiell frequenzmoduliert wird.⁶⁶ Im Vergleich zu Rauschen stellt der Gleitsinus eine stetige Funktion der Frequenz dar. Dies hat den Vorteil, dass harmonische Verzerrungsanteile bei Störungen im Messweg gut von der Impulsantwort separiert werden können.⁶⁷ Ein weiterer Vorteil des Gleitsinus ist, dass zu jedem Zeitpunkt der Anregung nur eine Frequenz abgestrahlt wird, und somit im Vergleich zum Rauschen mehr Energie in das System eingebracht und dadurch ein höherer SNR erreicht werden kann. Sansouci⁶⁸ stellte in Untersuchungen fest, dass der Exponential Sweep zwar einen höheren SNR liefert als MLS, dafür aber empfindlicher für transiente Störungen wie Umgebungsgeräusche ist, weshalb er nur bedingt für Messungen im besetzten Zustand in Frage kommt.⁶⁹ Die Impulsantwort wird gebildet, indem die Fouriertransformierte der Systemantwort mit der Fouriertransformierten des inversen Sweeps multipliziert wird. Der Realteil der inversen Fouriertransformierten ergibt schließlich die gewünschte Impulsantwort. Für nähere Informationen zur Fourier Transformation wird an dieser Stelle auf das Werk „Zeitdiskrete Signalverarbeitung“ von Oppenheim, Schaffer und Buck verwiesen.⁷⁰

Ergänzend zu den Verfahren sowie zu den Anregungssignalen werden an dieser Stelle noch die grundlegenden Aspekte wie Messpegel und Frequenzbereich betrachtet. Beim Verfahren des abgeschalteten Rauschens muss der Messpegel des Senders ermöglichen, dass der Beginn der Abklingkurve mindestens 35 dB über dem Störpegel im jeweiligen Frequenzband liegt. Ist T_{30} zu messen, muss ein Pegel erzeugt werden, der mindestens 45 dB oberhalb des Störpegels liegt. Beim Verfahren der integrierten Impulsantwort ist es auf Grund der Korrelation nicht erforderlich, dass das Anregungssignal einen Mindestpegel oberhalb des Störpegels erreicht. Laut OENORM EN ISO 3382-2 soll die Anregung gemäß der Nutzung des Raumes erfolgen. Im Falle von Klassenräumen ist dies die Sprechlautstärke von Erwachsenen die bei Männern üblicher Weise maximal 76dBA und bei Frauen 68 dBA beträgt.⁷¹

⁶⁴ Vgl. [MÖSER]

⁶⁵ [OENORM EN ISO 3382- 2]

⁶⁶ Vgl. [MATELJAN, S.71]

⁶⁷ Vgl. [MÖSER]

⁶⁸ [SANSOUCI]

⁶⁹ Vgl. [SANSOUCI]

⁷⁰ [OPPENHEIM]

⁷¹ Vgl. [DICKREITER1, S.65]

Neben diesen Parametern wird in der OENORM EN ISO 3382-2⁷² auch der zu betrachtende Frequenzbereich angegeben. Für das in Kapitel 2.2.2 festgelegte Standardverfahren ist für Oktavbänder ein Bereich von mindestens 125 Hz bis 4 kHz bzw. bei Terzbändern von 100 Hz bis 5 kHz vorgegeben. Die menschliche Stimme umfasst beim Erwachsenen in etwa 125 Hz bis 10 kHz. Für die Messung der Nachhallzeit sind allerdings vorwiegend die tiefen Frequenzen unterhalb von 5 kHz von Interesse, da die Nachhallzeit vorwiegend in diesem Bereich stark erhöht ist. Der Frequenzbereich wird daher auf diesen Bereich eingeschränkt.

Nach den theoretischen Aspekten zu den Messverfahren und den Anregungssignalen werden nun noch ergänzend die praktischen Erkenntnisse von Müller⁷³ betrachtet. Müller stellte im Rahmen seiner Messungen fest, dass die Anregung mit einem Sweep praktische Vorteile gegenüber einer Anregung mit MLS hat. Durch die Anregung mit MLS gerieten immer wieder Gegenstände wie Tafel oder Heizkörper in Schwingung. Bei der Anregung mittels Sweep konnte gut festgestellt werden, welcher Gegenstand vibrierte. Dies war bei MLS nicht möglich, da die Gegenstände gleichzeitig zu schwingen begannen.

Um diese von Müller genannten Phänomene zu überprüfen sowie die Messergebnisse bei unterschiedlicher Anregung gegenüberstellen zu können, wurden bei den Messungen im Bundesrealgymnasium Kepler sowohl MLS, als auch der Exponential Sweep als Anregungssignal eingesetzt. Die von Müller beschriebenen Vibrationen auf Grund von Resonanzfrequenzen konnte im BRG Kepler in keinem der vermessenen Räume festgestellt werden. Die Abweichung des Messergebnisses bei Anregung mit Exponential Sweep im Vergleich zur Anregung mit MLS ist in Abbildung 25 dargestellt.

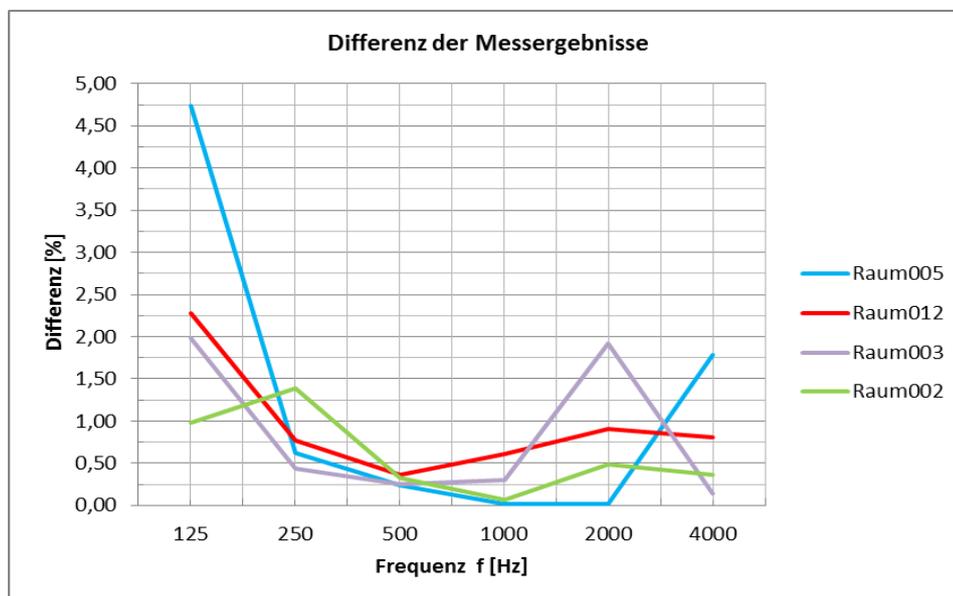


Abbildung 25: Differenz zwischen den Messergebnissen je Raum

⁷² [OENORM EN ISO 3382-2]

⁷³ [MÜLLER]

Abweichungen treten primär im Bereich von 125 Hz -250 Hz sowie im Bereich von 2kHz bis 4kHz auf. Bis auf den Maximalwert bei Raum005 bei 125 Hz beträgt die Abweichung maximal 2% was in etwa vier hundertstel Sekunden entspricht. Im Rahmen einer Standardmessung können diese Ergebnisse somit als äquivalent betrachtet werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass im Gegensatz zum Verfahren mit abgeschaltetem Rauschen für die Ermittlung der Impulsantwort sowohl die MLS als auch der Exponential Sweep gut geeignet sind. Da bei MLS Verzerrungen auftreten können und beim Exponential Sweep vibrierende Gegenstände leichter identifizierbar sind, ist im leeren Zustand die Anregung mittels Sweep zu bevorzugen. Für den besetzten Zustand ist auf Grund der Empfindlichkeit des Exponential Sweep gegenüber transienten Störungen die Anregung mit MLS besser geeignet. In Kapitel 2.3.2 sowie in Kapitel 2.3.3 wird nun die Durchführung der Messung näher erläutert.

2.3.2 Durchführung der Messung mit WinMLS 2004

WinMLS 2004 ist eine Software für die Durchführung sowie die Analyse von Audio-, Akustik- und Schwingungsmessungen. WinMLS ermöglicht mit unterschiedlichen Setups eine relativ einfache Messung der raumakustischen Parameter. Eine intuitive Bedienung ist ein wesentliches Kriterium, da es Laien möglich sein soll, diese bedienen zu können. Auch die tabellarische und grafische Darstellung aller akustischen Parameter überzeugt hinsichtlich Handhabung und Übersichtlichkeit. Entscheidender Nachteil dieser Software ist jedoch der Preis. Es handelt sich um eine professionelle Software mit mehreren sogenannten Levels. Für die Messung der raumakustischen Parameter benötigt man mindestens Level 4, welcher einen Preis von 499 US\$ aufweist. Da der Fokus dieser Diplomarbeit eine kostengünstige Sanierung von Klassenräumen ist, scheidet diese Software auf Grund des unverhältnismäßig hohen Preises aus.

2.3.3 Durchführung der Messung mit Arta

Arta ist wie WinMLS ein Programm zur Messung der Impulsantwort. Der Leistungsumfang von Arta ist wesentlich kleiner als jener von WinMLS und auch die grafische Darstellung ist einfacher gehalten. Die in Kapitel 2.1 genannten akustischen Parameter werden dennoch normgerecht ermittelt und die Bedienung ist sehr intuitiv. Der größte Vorteil von Arta ist der günstige Preis von 79 €. Für die Messung der Impulsantwort durch Laien im Rahmen einer kostengünstigen Sanierung ist Arta also besser geeignet als WinMLS. In Abschnitt 2.3.3 werden nun der Ablauf der Messung und die Gewinnung der akustischen Parameter mit Arta erklärt.

Abbildung 26 zeigt zusammenfassend die wesentlichen Schritte der Messung.

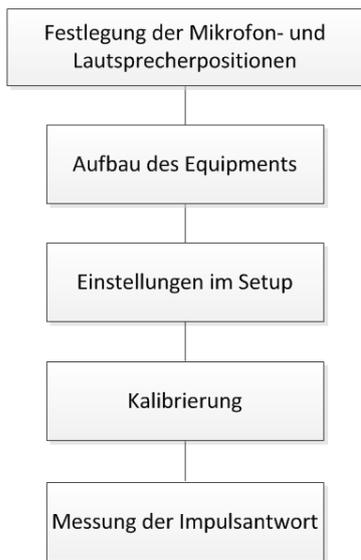


Abbildung 26: Ablauf der Messung mit Arta

Die Festlegung der Mikrofon- und Lautsprecherpositionen erfolgt an Hand der Angaben in Kapitel 2.2.3. Nachdem das Equipment entsprechend positioniert und in Betrieb genommen wurde, müssen die Setup Einstellungen vorgenommen werden. Diese befinden sich in der Menüleiste unter „Setup“ wie Abbildung 27 zeigt.

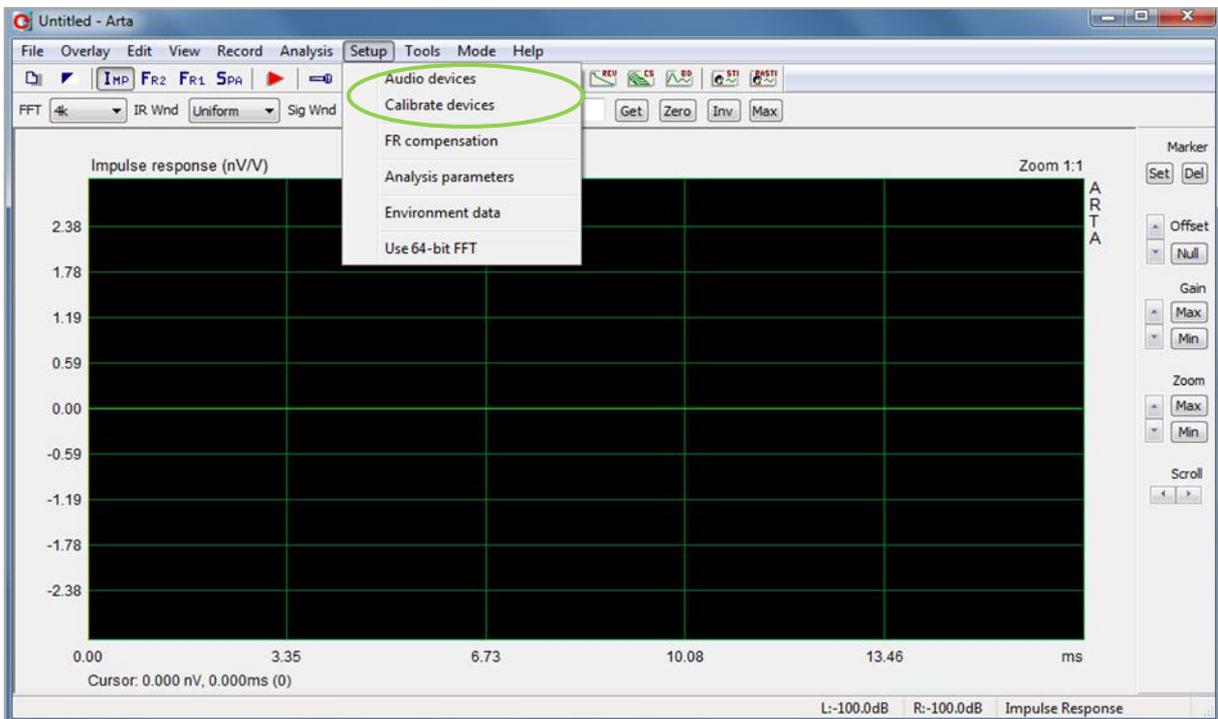


Abbildung 27: Bedienoberfläche von Arta

In den Einstellungen der Audio Devices sind, wie in Abbildung 28 dargestellt, die Ein- & Ausgänge entsprechend der Belegung anzugeben.

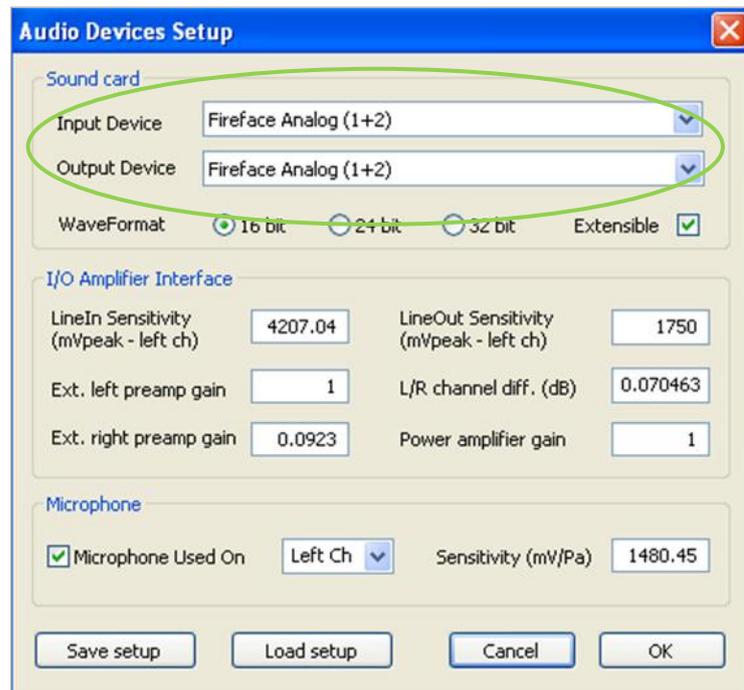


Abbildung 28: Angabe der Ein- und Ausgänge

Um eine reproduzierbare Messung gewährleisten zu können, muss das Mikrofon kalibriert werden. Für die Kalibrierung verwendet man einen geeichten Kalibrator. Wie in Abbildung 29 dargestellt, ist dessen Frequenz (Preamp gain, meist 1 kHz) sowie dessen Schalldruckpegel (Pressure, meist 94 dB) unter Setup – Calibrate Devices einzutragen.

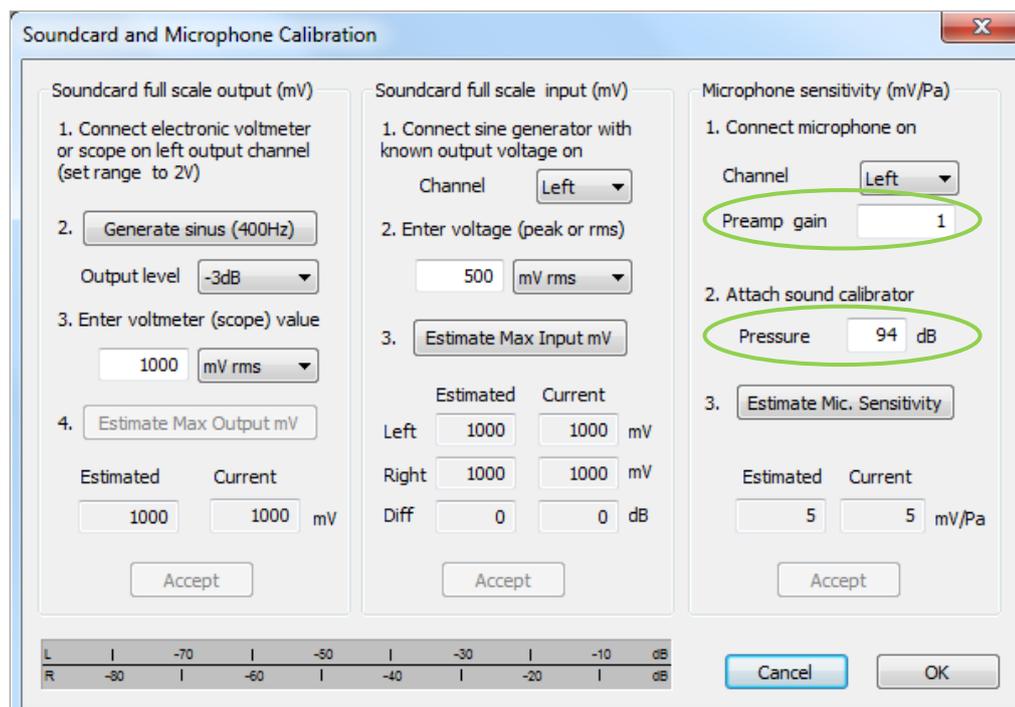


Abbildung 29: Einstellungen für die Kalibrierung des Mikrofons

Anschließend wird der Kalibrator, wie in Abbildung 30 dargestellt, über dem Mikrofon positioniert und der Input Level festgelegt. Sobald dieser gut ausgesteuert ist (ca. -10 dB) kann die Kalibrierung durch Bestätigung mit „ok“ abgeschlossen werden.



Abbildung 30: Positionierung des Kalibrators über dem Mikrofon

Sobald die Setup Einstellungen sowie die Kalibrierung abgeschlossen sind, kann das Anregungssignal ausgewählt und die Messung durchgeführt werden. Wie in Abbildung 31 dargestellt, stehen unter dem Menüpunkt „Record - Impulse Response Measurement“ vier Signalarten als Anregungssignal zur Auswahl.

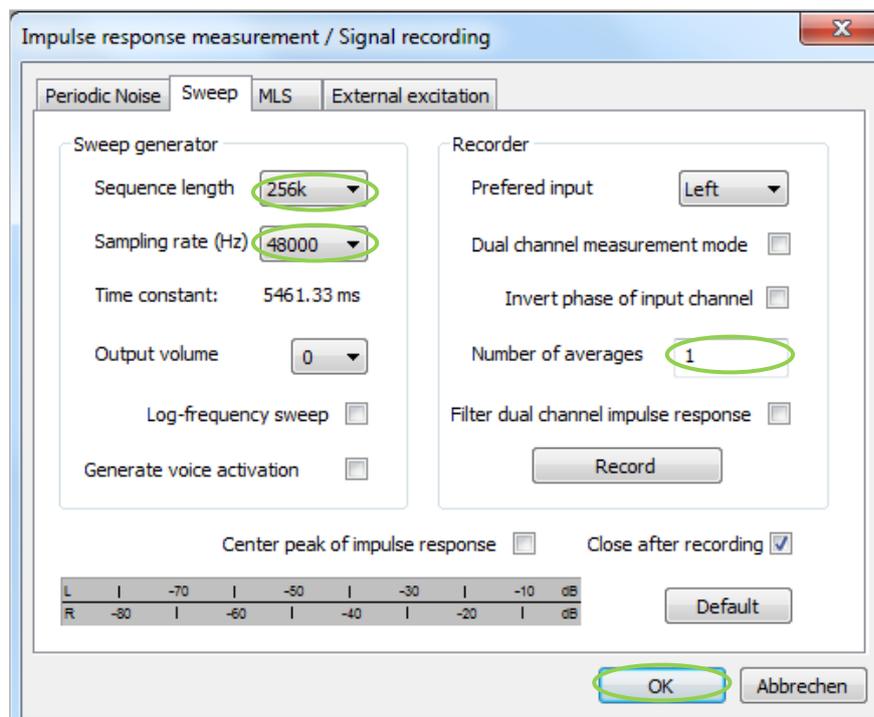


Abbildung 31: Auswahl des Anregungssignals

In Abbildung 31 wurden exemplarisch die Einstellungen für den Sweep Generator sowie die Aufzeichnung vorgenommen.

Nach Festlegung dieser Parameter kann nun die Impulsantwort des Raumes gemessen werden. Wie in Abbildung 32 dargestellt, zeigt Arta diese automatisch nach Abschluss der Messung am Bildschirm an.

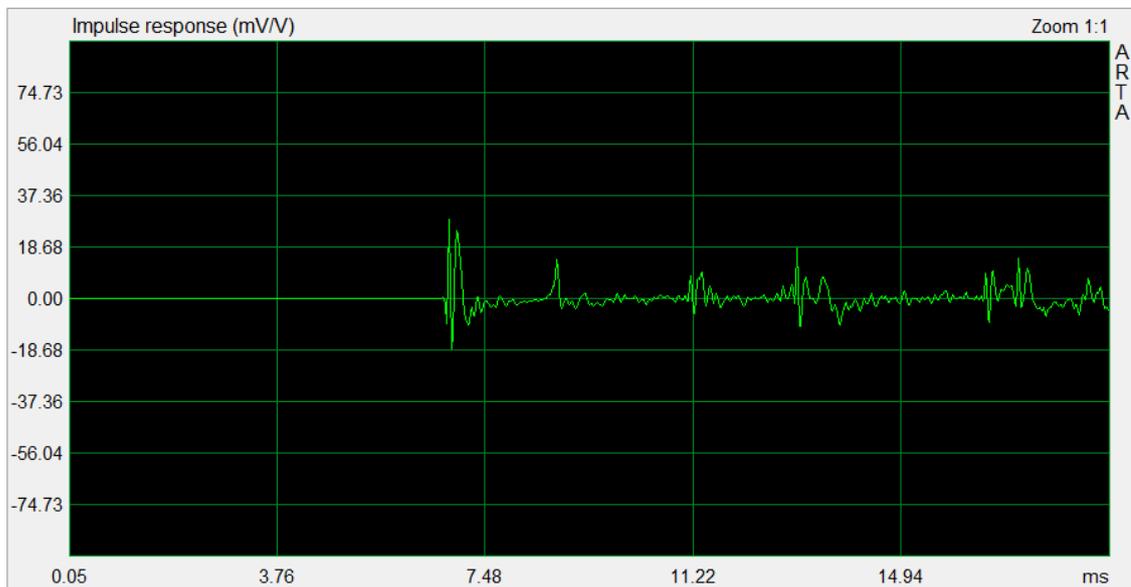


Abbildung 32: Impulsantwort

Wie in Abbildung 33 dargestellt, ist es in Arta möglich, auf Grund der gemessenen Impulsantwort alle akustischen Parameter der OENORM EN ISO 3382⁷⁴ in tabellarischer Form auszugeben sowie für die Weiterverarbeitung in Excel zu exportieren.

F (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T30 (s)	1.691	1.398	1.469	1.215	1.019	0.908	0.854	0.702
rT30	-0.995	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999	-1.000	-1.000	-1.000
T20 (s)	1.549	1.438	1.491	1.186	1.001	0.905	0.853	0.686
rT20	-0.991	-0.997	-0.998	-0.998	-0.998	-0.999	-1.000	-1.000
T10 (s)	1.405	1.384	1.604	1.285	0.862	0.924	0.874	0.693
rT10	-0.969	-0.997	-0.995	-0.991	-0.996	-0.995	-0.999	-0.999
EDT (s)	0.801	1.373	1.346	1.259	0.862	1.024	0.860	0.686
C80 (dB)	7.09	0.94	-0.05	1.47	3.98	4.71	6.66	7.75
C50 (dB)	3.29	-1.72	-3.35	-0.50	0.67	2.15	4.15	4.42
D50 (%)	68.07	40.25	31.60	47.13	53.86	62.15	72.21	73.47
T _s (ms)	123.288	115.176	110.523	82.536	61.539	56.113	42.998	37.511
BR	1.339							

Buttons: Save (ASCII), Save (.csv), Copy, OK

Abbildung 33: Raumakustische Parameter nach ISO3382

⁷⁴ [OENORM EN ISO 3382]

Neben der tabellarischen Darstellung ist auch eine grafische Anzeige möglich. Abbildung 34 zeigt exemplarisch die grafische Darstellung der Nachhallzeit:

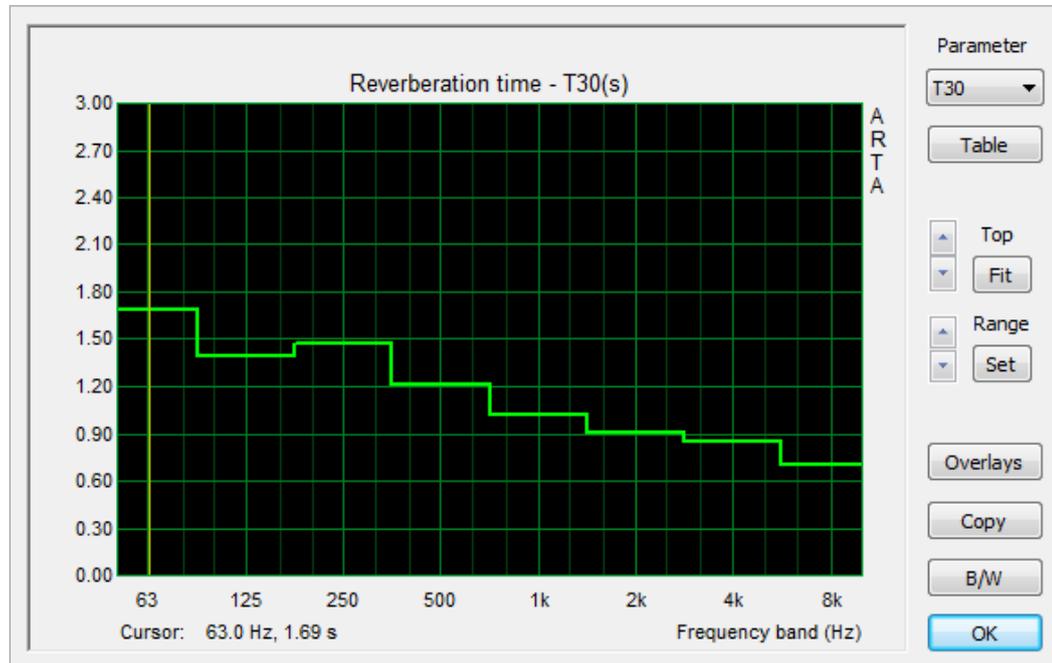


Abbildung 34: Nachhallzeit T30

Nach Abspeichern der Messdatei im Excel-Format kann diese weiter verarbeitet und analysiert werden. Die Analyse der Messergebnisse ist Inhalt des folgenden Kapitels 2.4.

2.4 Analyse der Messergebnisse

Im Zuge der Messungen am BRG Kepler wurden die in Kapitel 2.1 definierten akustischen Parameter für vier Klassenräume ermittelt. Raum 002 und Raum 003 wurden im leeren Zustand vermessen, für Raum 005 und Raum 012 wurden zusätzlich auch Messungen im besetzten Zustand durchgeführt. Da für jeden Raum, entsprechend der Norm, mehrere Messungen durchgeführt wurden, müssen im ersten Schritt der Analyse die Messungen gemittelt werden.

Zur Bestimmung räumlicher Mittelwerte können die gemessenen Ergebnisse entweder für getrennt ausgewiesene Flächenbereiche oder für den gesamten Raum kombiniert werden. Folgende Verfahren sind laut OENORM EN ISO 3382-2 möglich⁷⁵:

- a.) Arithmetische Mittelung der Nachhallzeiten. Es wird der Mittelwert der einzelnen Nachhallzeiten für alle unabhängigen Sender- und Mikrofonpositionen gebildet.
- b.) Scharmittelung der Abklingkurven. Die einzelnen Abklingvorgänge werden mit synchronisierten Anfangspunkten überlagert.

Da in Kapitel 2.3 für die akustische Messung der Impulsantwort das Verfahren der integrierten Impulsantwort gewählt wurde, wird die Bildung der räumlichen Mittelwerte entsprechend nach Variante a.) umgesetzt.

Um die gemittelten Daten nun zu bewerten und somit die gegebene akustische Situation verifizieren zu können, werden nachfolgend die ermittelten Parameter mit den Sollwerten verglichen. Anschließend wird eruiert, wie viel äquivalente Absorptionsfläche nötig ist, um die geforderten Sollwerte der Nachhallzeit zu erreichen. Die detaillierten Messergebnisse der einzelnen Räume sind aus Übersichtsgründen in Anhang B.

2.4.1 Nachhallzeit (T)

Für die Ermittlung der Nachhallzeit wird je Oktavband der Mittelwert aller Messpunkte berechnet. Der Sollwert sowie das Toleranzband für die Nachhallzeit basieren, wie in Kapitel 1.4.3 bereits geschildert, auf den Angaben in DIN18041⁷⁶ und beziehen sich auf den besetzten Zustand. Da anwesende Personen wie SchülerInnen oder LehrerInnen eine absorbierende Wirkung haben, sind die Messwerte im leeren Zustand höher als jene im besetzten Zustand. T_{soll} sollte im leeren Zustand dennoch um nicht mehr als 0,2 Sekunden, also um ca. 30%, überschritten werden. Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen für Raum 005 und Raum 012 die Abweichung der Nachhallzeit von T_{soll} im leeren sowie im besetzten Zustand. Die höhere Nachhallzeit von Raum 012 im Vergleich zu Raum 005 erklärt sich durch die deutlich geringere Besetzung. In Raum 005 waren 25 Personen anwesend, in Raum 012 nur 9 Personen.

⁷⁵ Siehe [OENORM EN ISO 3382-2]

⁷⁶ [DIN18041]

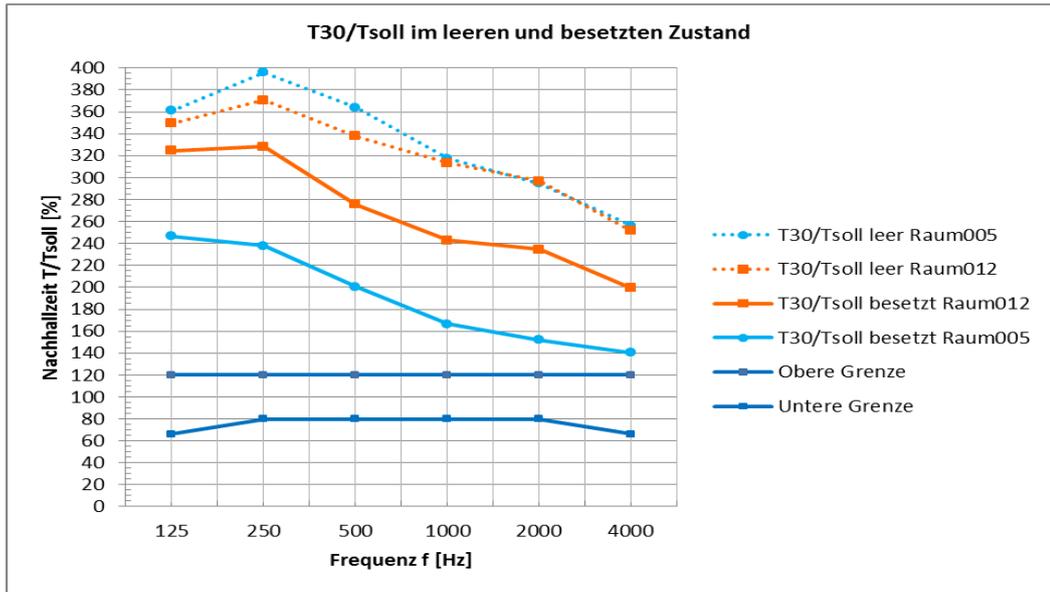


Abbildung 35: Verhältnis von T30/Tsoll im leeren und im besetzten Zustand

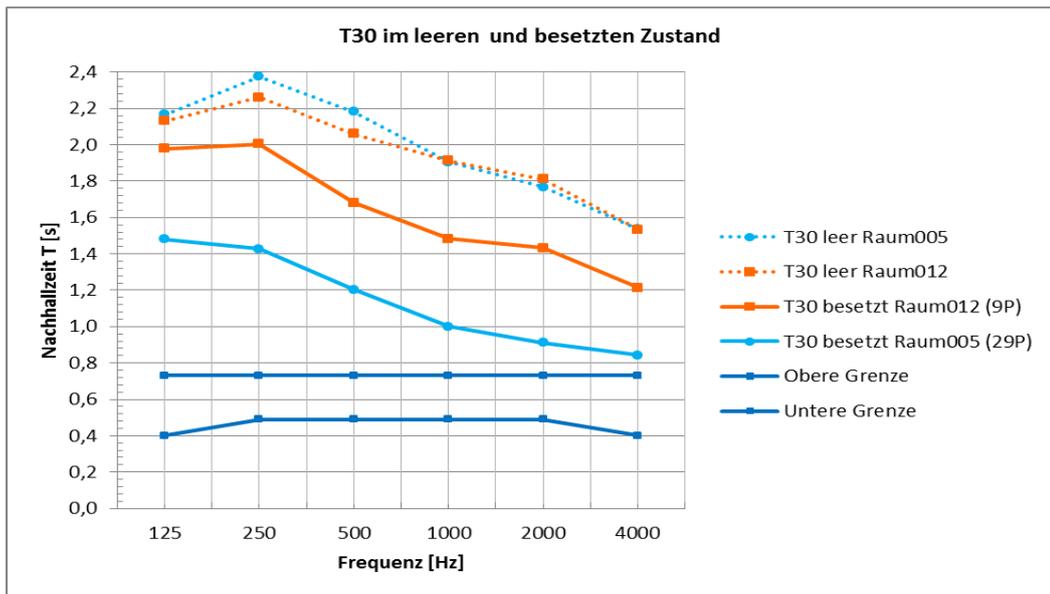


Abbildung 36: Nachhallzeit im leeren und im besetzten Zustand

Wie Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen, liegt die Nachhallzeit in beiden Räumen deutlich außerhalb des Toleranzbereiches.

Zusätzlich zu den anwesenden Personen hat auch das vorhandene Inventar eine absorbierende Wirkung. Abbildung 37 zeigt die Nachhallzeit aller gemessenen Räume im leeren Zustand sowie den Einfluss der absorbierenden Fläche von Inventar. Die Räume 003, 005, sowie 012 sind sowohl im Volumen als auch in der Ausstattung sehr ähnlich, sodass auch die gemessenen Nachhallzeiten ähnliche Verläufe aufweisen. Raum 002 ist um ca. 10 Quadratmeter kleiner und besitzt zudem mehr absorbierende Oberflächen auf Grund der zwölf im Raum befindlichen PCs. Diese zusätzliche Absorptionsfläche bewirkt im tieffrequenten Bereich unter 500 Hz eine deutlich geringere Nachhallzeit im Vergleich zu den anderen Räumen. In Bezug auf die Norm liegen die Nachhallzeiten aller vier Räume deutlich über dem vorgesehenen Toleranzbereich.

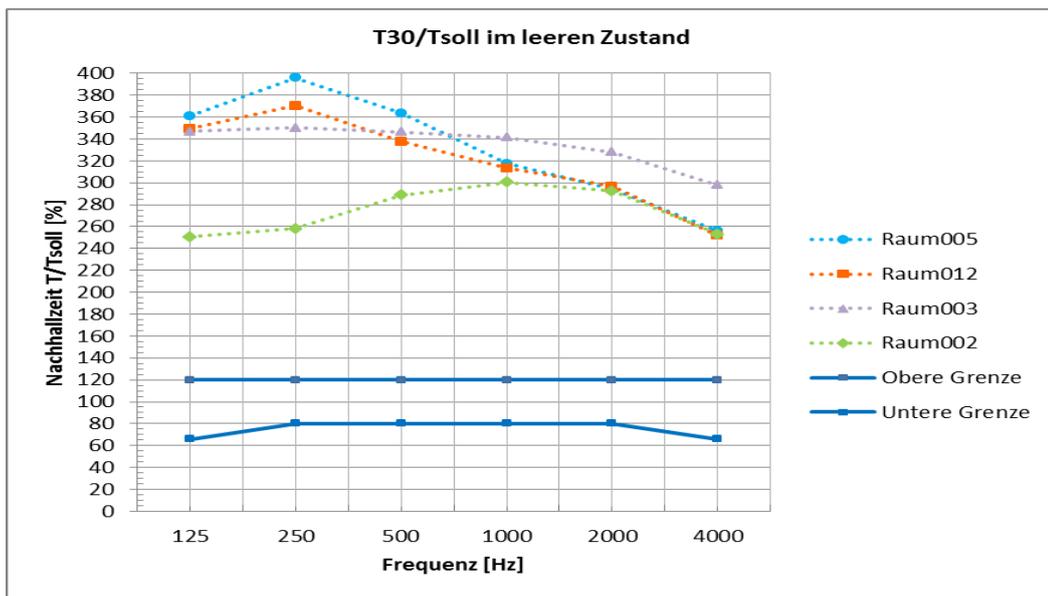


Abbildung 37: Verhältnis von T30 zu Tsoll im leeren Zustand

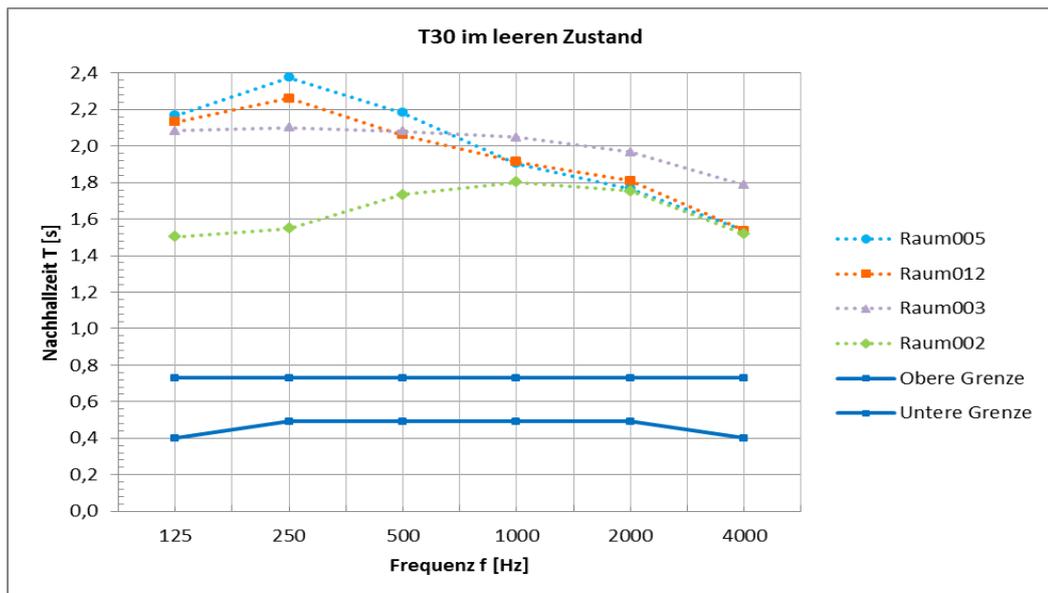


Abbildung 38: Gegenüberstellung der Nachhallzeiten im leeren Zustand

2.4.2 Deutlichkeitsmaß (C_{50})

Das Deutlichkeitsmaß wird, wie die Nachhallzeit, direkt aus Arta exportiert. Der Wertebereich für C_{50} ist nach Fasold und Veres wie folgt:⁷⁷

- $C_{50} > 2$ dB... sehr gute Verständlichkeit
- 0 dB $> C_{50} > -3$ dB... gute Verständlichkeit
- -3 dB $> C_{50} > -8$ dB... noch ausreichende Verständlichkeit

In Abbildung 39 und Abbildung 40 ist für Raum 005 sowie Raum 012 sowohl das Deutlichkeitsmaß für den leeren, als auch für den besetzten Zustand angeführt.

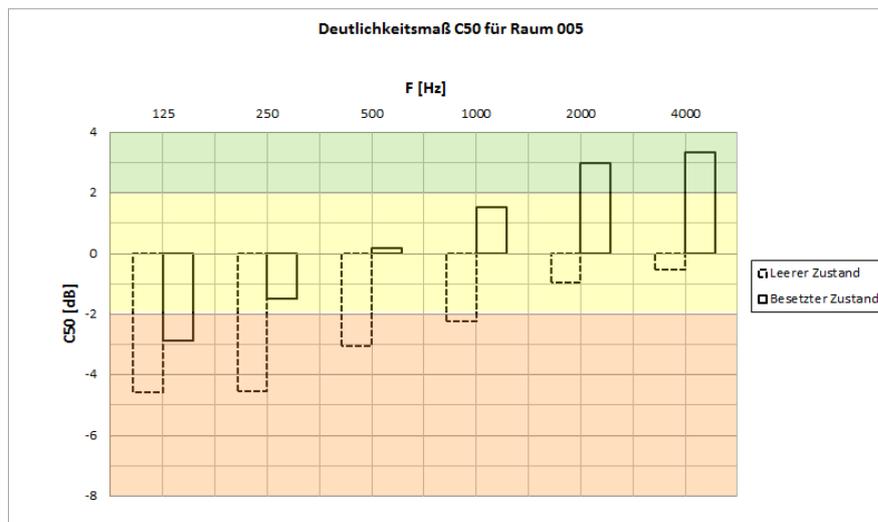


Abbildung 39: Deutlichkeitsmaß für Raum 005

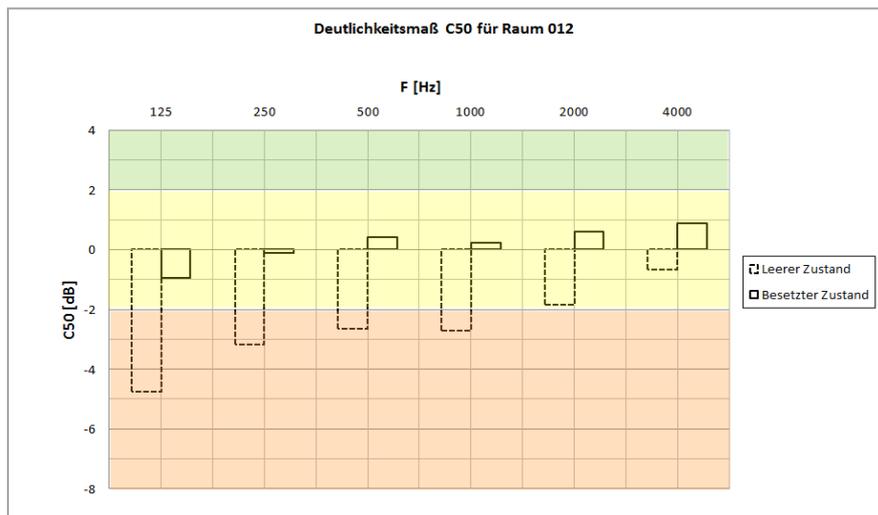


Abbildung 40: Deutlichkeitsmaß für Raum 012

Die Werte des Deutlichkeitsmaßes liegen im leeren Zustand für beide Räume im Bereich zwischen „noch ausreichende Verständlichkeit“ und „gute Verständlichkeit“.

⁷⁷ [FASOLD]

Im besetzten Zustand wird für die Räume 005 und 012 durchschnittlich eine gute Verständlichkeit ausgewiesen. Abbildung 41 und Abbildung 42 zeigen das Deutlichkeitsmaß für Raum 002 und Raum 003.

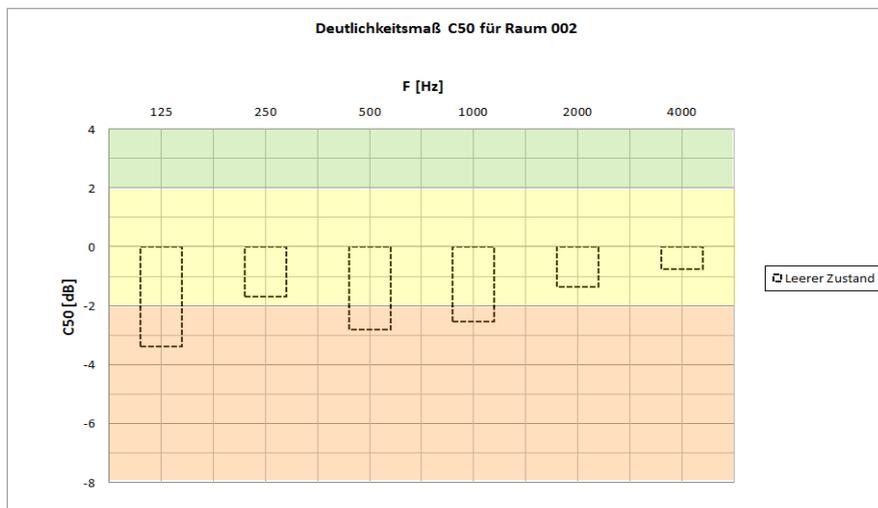


Abbildung 41: Deutlichkeitsmaß für Raum 002

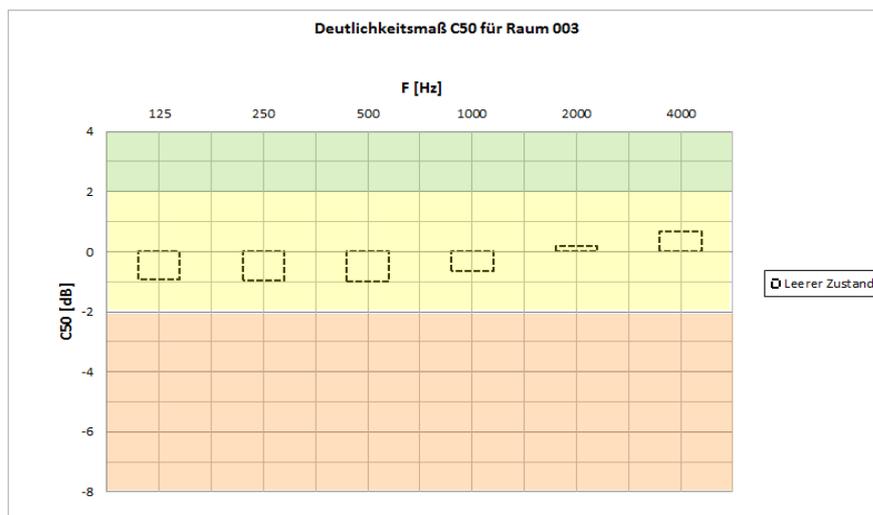


Abbildung 42: Deutlichkeitsmaß für Raum 003

Auch für diese beiden Räume liegt das Deutlichkeitsmaß im leeren Zustand überwiegend im Bereich „gute Verständlichkeit“. Diese Ergebnisse sind entgegen den Erwartungen, da die gemessene Nachhallzeit sowohl im leeren, als auch im besetzten Zustand weit außerhalb des Toleranzbereiches liegt.

Da C_{50} ein Parameter für Sprachverständlichkeit ist, und Sprache primär im Bereich 500 Hz bis 2 kHz liegt, kann der logarithmische Mittelwert von den Oktavbändern in diesem Bereich gebildet werden um für die Bewertung des Raumes einen Einzahlwert zur Orientierung zu erhalten. Die Berechnung des logarithmischen Mittelwerts erfolgt an Hand folgender Formel:

$$L_m = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right]$$

Der logarithmische Mittelwert von Raum 005 im leeren Zustand beträgt z.B. -1,9 dB.

2.4.3 Artikulationsverlust (Al_{cons})

Auch der Artikulationsverlust kann, wie die Nachhallzeit und das Deutlichkeitsmaß C_{50} , direkt aus Arta exportiert werden. Der Wertebereich für Al_{cons} ist nach Peutz⁷⁸ und Klein⁷⁹ wie folgt:

	Al_{cons}	< 2%	ideale Verständlichkeit
2% <	Al_{cons}	< 7%	gute Verständlichkeit
7% <	Al_{cons}	< 20% ...	befriedigende Verständlichkeit
20% <	Al_{cons}	unbrauchbare Verständlichkeit

In Abbildung 43 sind die Ergebnisse der Messung für den Al_{cons} angeführt. Für Raum 002 und Raum 003 werden die Werte für den besetzten Zustand mit folgender Formel simuliert:

$$Al_{cons} \approx 200 \cdot \frac{r_{LH}^2 \cdot T_{besetzt}^2}{\gamma \cdot V}$$

r_{LH} bezeichnet den Abstand von Schallquelle zu Hörer und wird in dieser Formel entsprechend der Klassenraumgröße mit einem Mittelwert von 3 Meter festgelegt.

$T_{besetzt}$ wird an Hand folgender Formel simuliert:

$$T_{besetzt} = \frac{0,163 \cdot T_{leer} \cdot V}{A_{Schüler} \cdot T_{leer} + 0,163 \cdot V}$$

Da der Bündelungsgrad unabhängig vom Besetzungszustand des Raumes ist, kann γ an Hand folgender Formel aus den Messwerten des leeren Zustandes berechnet werden:

$$\gamma \approx 200 \cdot \frac{r_{LH}^2 \cdot T_{leer}^2}{V \cdot Al_{cons_{leer}}}$$

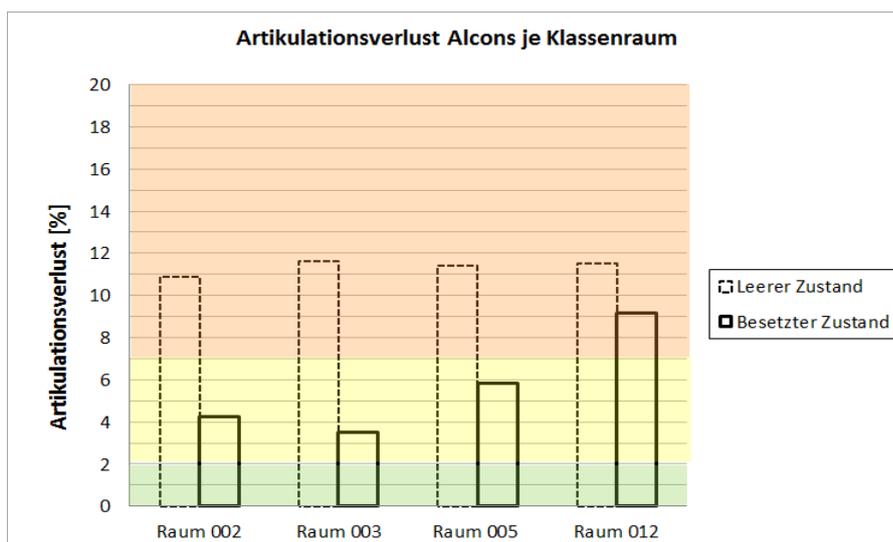


Abbildung 43: Artikulationsverlust Al_{cons}

⁷⁸ [PEUTZ]

⁷⁹ [KLEIN]

Im leeren Zustand liegt der Artikulationsverlust aller Räume im Bereich „befriedigende Verständlichkeit“. Im besetzten Zustand liegen die Werte größtenteils im Bereich „gute Verständlichkeit“. Wie bereits beim Deutlichkeitsmaß, sind auf Grund der hohen Nachhallzeit auch diese Ergebnisse unerwartet.

2.4.4 Sprachübertragungsindex (STI)

Der Sprachübertragungsindex kann ebenso wie die restlichen akustischen Parameter direkt aus Arta exportiert werden. Der Wertebereich für den STI ist nach OEVE/OENORM EN 60 268-16⁸⁰ wie folgt:

0,75 bis 1..... ausgezeichnet

0,6 bis 0,75... gut

0,45 bis 0,6.... angemessen

0,3 bis 0,45... schwach

0 bis 0,3..... schlecht

In Abbildung 44 sind die Messergebnisse für den STI angeführt. Für Raum 002 und Raum 003 wurden die Werte für den besetzten Zustand an Hand folgender Formel simuliert:

Sprachübertragungsindex:⁸¹ $STI = -0,1845 \cdot \ln(\% Al_{cons}) + 0,9842$

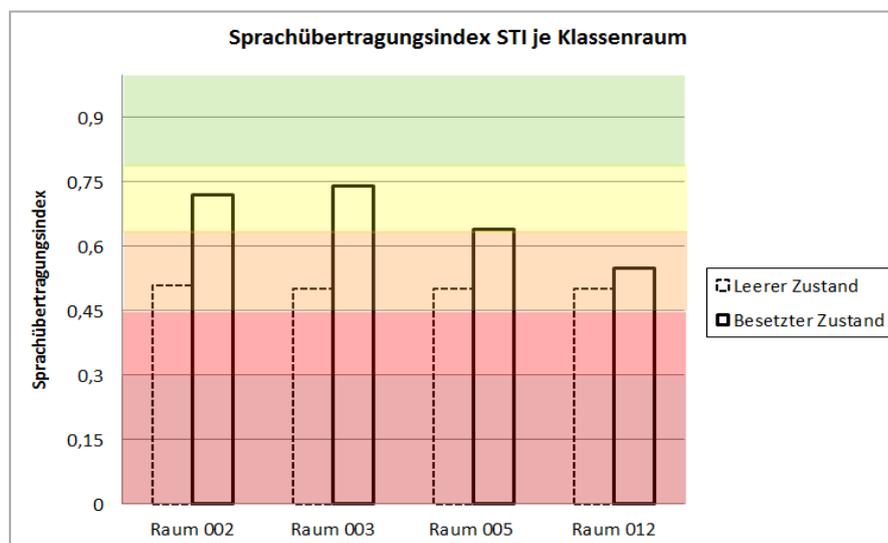


Abbildung 44: Sprachübertragungsindex STI

Im leeren Zustand liegt der STI bei allen Räumen im Bereich „angemessen“. Für den besetzten Zustand sind die Simulationenwerte von Raum 002 und Raum 003 etwas besser als die realen Werte von Raum 005 und Raum 012. Auch beim Sprachübertragungsindex sind die Werte besser als auf Grund der gemessenen Nachhallzeit zu erwarten war.

⁸⁰ [OEVE]

⁸¹ Siehe [MATELJAN, S.129]

2.4.5 Äquivalente Absorptionsfläche (A)

Für die Erarbeitung von Sanierungsvarianten ist es wesentlich, die erforderliche äquivalente Absorptionsfläche, die nötig ist, um T_{soll} zu erreichen, zu ermitteln. Wie in Kapitel 2.1 bereits geschildert, reduziert sich durch die anwesenden Personen im Raum die Nachhallzeit und somit auch die benötigte Absorberfläche zur Erreichung von T_{soll} . Abbildung 45 zeigt für Raum 005 und Raum 012 exemplarisch die erforderliche äquivalente Absorptionsfläche im leeren und im besetzten Zustand.

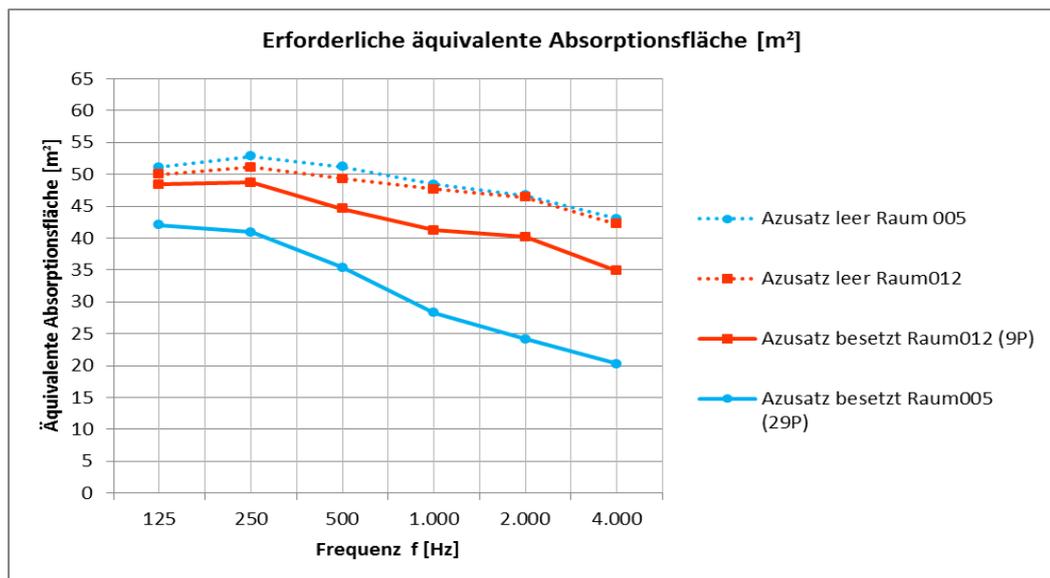


Abbildung 45: Erforderliche äquivalenten Absorptionsfläche (Azusatz) bei leerem sowie besetztem

Da die Nachhallzeit mit zunehmender Frequenz sinkt, ist im hochfrequenten Bereich entsprechend weniger Absorptionsfläche notwendig. Die zusätzliche Reduzierung der nötigen Absorptionsfläche auf Grund der anwesenden Personen ist in Tabelle 7 angeführt.

Tabelle 7: Reduzierung der benötigten äquivalenten Absorptionsfläche durch die anwesenden SchülerInnen

	Frequenzband [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Reduktion v. Azusatz für Raum 005 [m ²]	9,1	11,9	15,8	20,1	22,5	22,7
Reduktion v. Azusatz für Raum 005 [%]	17,8	22,5	30,8	41,5	48,2	52,8
Reduktion v. Azusatz für Raum 012 [m ²]	1,5	2,4	4,7	11,2	6,2	7,3
Reduktion v. Azusatz für Raum 012 [%]	3,0	4,7	9,5	23,5	13,4	17,3

Wie diese Gegenüberstellung zeigt, wirken die anwesenden Personen im hochfrequenten Bereich stärker absorbierend als im tieffrequenten Bereich, sodass die Reduktion der erforderlichen äquivalenten Absorptionsfläche zu hohen Frequenzen hin stärker ist.

Ergänzend ist in Abbildung 46 noch ist die erforderliche äquivalente Absorptionsfläche für alle Räume im leeren Zustand und in Abbildung 47 für den besetzten Zustand dargestellt.

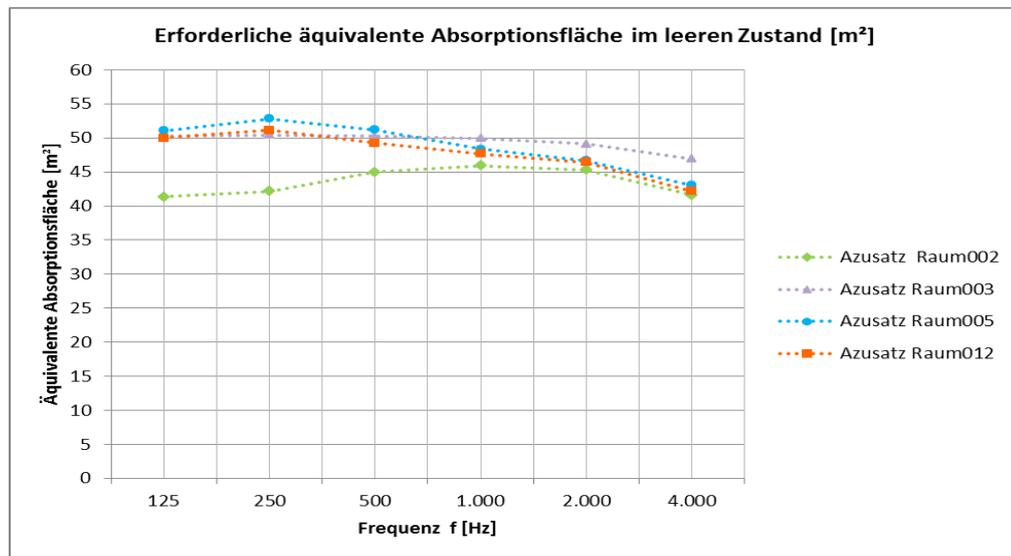


Abbildung 46: Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche im leeren Zustand

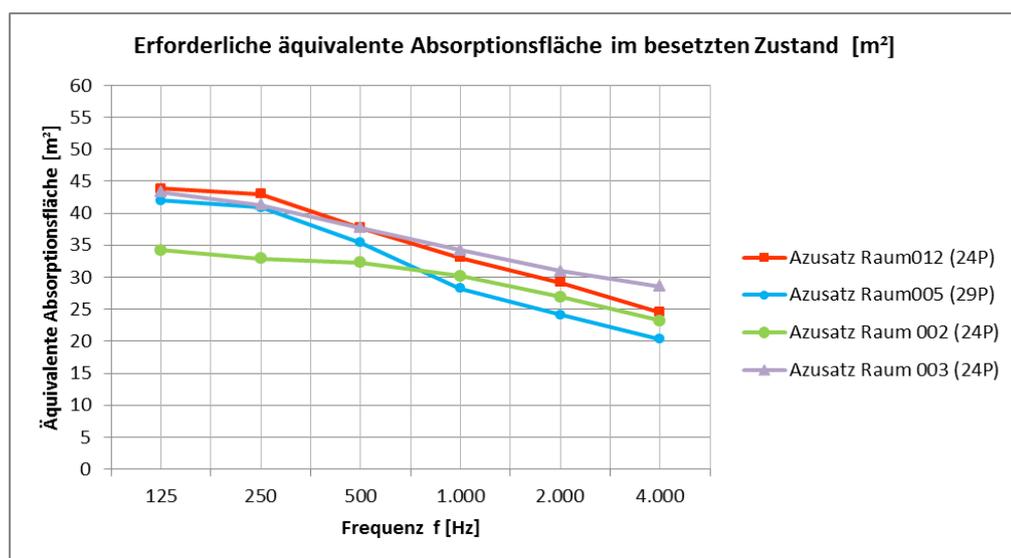


Abbildung 47: Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche im besetzten Zustand

Um für alle Räume die der Nutzung entsprechende benötigte äquivalente Absorptionsfläche angeben zu können, wurde neben Raum 002 und Raum 003 auch für Raum 012 eine simulierte Nachhallzeit für einen Besetzungszustand von 24 SchülerInnen herangezogen.

Nächster Schritt ist nun die Umrechnung der äquivalenten Absorptionsfläche in die sozusagen „tatsächliche“ Absorberfläche, die in den Raum einzubringen ist. Die Menge der benötigten Absorberfläche ist abhängig vom Absorptionsgrad der wiederum vom Material sowie der Anbringung des Absorbers abhängig ist. Diese Thematik wird im nachfolgenden Kapitel 3 näher erörtert.

3 Einsatz von Absorbern

Nach der Ermittlung der akustischen Parameter in Kapitel 2 wird nun erarbeitet, welche Absorber in Hinsicht auf die Messergebnisse für die Sanierung von Klassenräumen eingesetzt werden können. Einer der wesentlichsten Aspekte bei der Auswahl eines Absorbers ist dessen Absorptionsgrad, da von ihm die „tatsächliche“ Absorberfläche abhängig ist. Der Absorptionsgrad selbst wird von Faktoren wie Material oder Anbringung bestimmt. Allem voran werden daher in Kapitel 3.1 die grundsätzlichen Absorbertypen vorgestellt und anschließend in Kapitel 3.2 die Anbringung und deren Auswirkung auf den Absorptionsgrad untersucht. Basierend auf diesen Ergebnissen wird in Kapitel 3.3 exemplarisch die erforderliche Absorberfläche für Raum 005 ermittelt.

3.1 Absorbertypen

Im Hinblick auf die spektrale Wirksamkeit unterscheidet man Höhenabsorber, Mittenabsorber sowie Tiefenabsorber. Nachfolgend werden die Funktionsprinzipien sowie der Absorptionsgrad dieser Absorbertypen angeführt.

3.1.1 Höhenabsorber

Der Wirkungsbereich von Höhenabsorber liegt vorwiegend im hochfrequenten Bereich ab ca. 500 Hz. Sie sind meist als poröse Absorber ausgeführt, die vorwiegend aus Faser- oder Schaumstoffen gefertigt sind. Die Luft strömt durch die offenen Poren in den Absorber. Diese Reibung erzeugt Wärmeenergie und reduziert somit die Schallenergie, sodass eine Dämpfung erfolgt. Wesentlich bei diesem Absorbertyp ist die Porosität des Materials, da diese die Ursache für die Dämpfung ist und nicht die Rauigkeit der Oberfläche. Abbildung 48 zeigt den Unterschied zwischen Rauigkeit und Porosität. Der linke sowie der mittlere Absorber weisen eine raue Oberfläche auf, der linke Absorber ist jedoch nicht porös, sodass dort keine Luft eindringen kann. Der rechte Absorber weist im Gegensatz zum mittleren Absorber eine glatte Oberfläche auf, es sind aber beide porös und somit beide absorbierend.

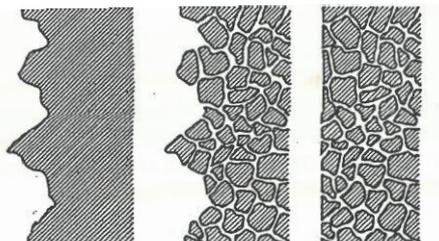


Abbildung 48: Links: rau und nicht porös, Mitte: rau und porös , Rechts: glatt und porös [Cremer S.105]

Abbildung 49 zeigt den typischen Verlauf des Absorptionsgrades eines Höhenabsorbers mit unterschiedlicher Anbringung (a: direkt auf die Wand gesetzt, b: auf Lattenrost, 2,2 cm vor der Wand befestigt). Der Unterschiedliche Absorptionsgrad auf Grund der Anbringung wird in Kapitel 3.2 näher erklärt.

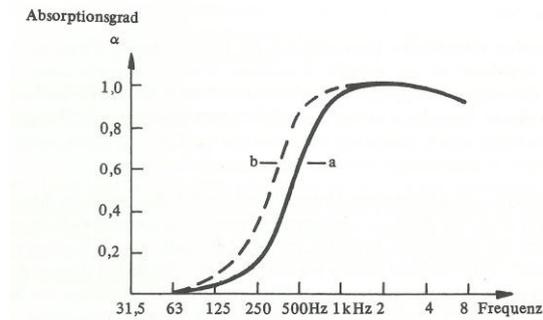


Abbildung 49: Typischer Absorptionsverlauf eines Höhenabsorbers [DICKREITER, S.20]

3.1.2 Mittenabsorber

Durch konstruktive Maßnahmen an Höhenabsorbern, wie vergrößerter Wandabstand, größere Schichtdicke oder perforierte Abdeckung des Absorbers, wird der wirksame Bereich des Absorbers auf den mittleren Frequenzbereich erweitert. Neben den porösen Absorbern kommen in diesem Bereich auch Lochabsorber, sogenannte Helmholtz-Resonatoren, zum Einsatz. Diese Resonatoren sind ein schwingungsfähiges, luftgefülltes Hohlraumssystem, dessen Funktionsprinzip auf einem akustischen Masse- Feder Prinzip beruht, dass bei der Resonanzfrequenz die stärkste Absorption aufweist.

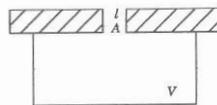


Abbildung 50: Funktionsprinzip des Helmholtz-Resonators [GRABER]

Die Resonanzfrequenz eines Helmholtz-Resonators ist sowohl vom Querschnitt des Halsloches (A), dessen Länge (l), sowie dem dahinterliegenden Volumen abhängig:

$$f_{\text{Res}} = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{A}{V \cdot (l + 2\Delta l)}}$$

Abbildung 51 zeigt den typischen Absorptionsverlauf eines Helmholtz-Resonators.⁸²

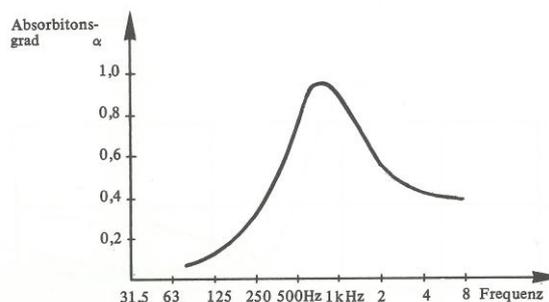


Abbildung 51: Typischer Absorptionsverlauf eines Helmholtz-Resonators [DICKREITER, S.22]

⁸² Vgl. [DICKREITER1, S.17-24]

3.1.3 Tiefenabsorber

Tiefenabsorber sind meist als Plattenabsorber ausgebildet und können somit die großen Schallenergien im tieffrequenten Bereich absorbieren. Die Platten des Absorbers werden vor einer Wand montiert und der Zwischenraum mit schalldämpfenden Faserstoffen ausgefüllt. Durch die Schwingung der Platte entsteht eine innere Reibung, die, so wie die Dämpfung der bewegten Luft im Fasermaterial, zu einer absorbierenden Wirkung führt. Bei entsprechender Dimensionierung können auch Helmholtz – Resonatoren als Tiefenabsorber eingesetzt werden. Der Vorteil des Plattenabsorbers ist die im Vergleich zu porösen Absorbieren relativ geringe Einbautiefe. Abbildung 52 zeigt exemplarisch den Aufbau eines Plattenabsorbers.⁸³



Abbildung 52: Schematische Darstellung eines Plattenabsorbers [GRABER]

Plattenabsorber sind vorwiegend dünne Platten die durch den Schall angeregt werden und auf Grund der inneren Steifigkeit dem Schallfeld Energie entziehen. Das eingeschlossene Luftvolumen hinter der Platte wirkt wie ein Masse-Feder-System und sorgt somit zusätzlich für Dämpfung, sofern der Abstand der Platte vom Bauwerk wesentlich kleiner ist, als die Wellenlänge des zu absorbierenden Schalls:

$$d < \left(\frac{\lambda_0}{12} = \frac{28}{f_0} \right)$$

Abbildung 53 zeigt den typischen Absorptionsverlauf eines Tiefenabsorbers: (a: Plattenabsorber, b: nicht hinterpolsterte Platte)

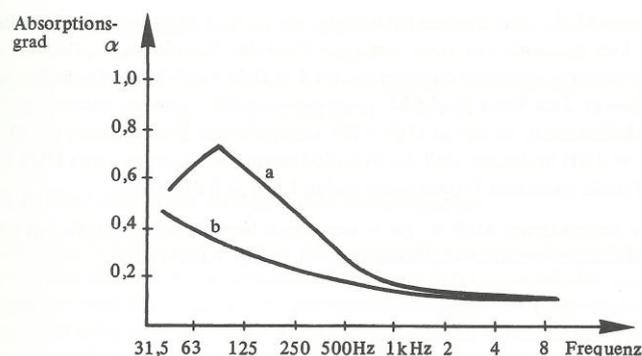


Abbildung 53: Typischer Absorptionsverlauf eines Tiefenabsorbers [DICKREITER, S.23]

Die Nachhallzeit der untersuchten Klassenräume ist, wie in Kapitel 2 geschildert, in allen Frequenzbereichen stark erhöht, besonders aber im Bereich von 250 Hz bis 1000 Hz.

Die Mittenabsorber decken diesen Bereich am besten ab, sodass der Fokus in den nachfolgenden Kapiteln auf poröse Mittenabsorber aus Schaumstoff gelegt wird. Ergänzend werden für Klassenräume mit hohen Nachhallzeiten im tieffrequenten Bereich auch Tiefenabsorber in Form von Plattenabsorbieren vorgestellt.

⁸³ Vgl. [DICKREITER1, S.17-24]

3.2 Anbringung von Absorbern

Bei der Anbringung von Absorbern ist allem voran zu ermitteln, welcher Anteil der gesamten Raumfläche grundsätzlich akustisch nutzbar ist. Nachdem die Auskleidung des Bodens mit einem absorbierenden Teppich aus Gründen des Brandschutzes sowie der Hygiene keine Option ist, können nur die Seitenwände und die Deckenfläche einbezogen werden. Bei den Wandflächen sind die Flächen von Fenstern, Türen, der Tafel und sonstigem Inventar, das nicht mit Absorbern verkleidet werden kann, abzuziehen. Die Auskleidung der Deckenfläche wird meist durch kein Inventar eingeschränkt, die abgehängte Beleuchtung ist allerdings bei der Montage der Absorber zu berücksichtigen. Zusätzlich ist zu beachten, dass für die Verbesserung der Sprachverständlichkeit ein akustischer Spiegel von ca. 20% der Deckenfläche benötigt wird, das bedeutet, dass ca. 80% mit Absorbern ausgekleidet werden können.

In Tabelle 8 wird für Raum 005 exemplarisch ein Überblick über die Einzel- und Gesamtfläche sowie die davon akustisch nutzbare Fläche gegeben.

Tabelle 8: Akustisch nutzbare Fläche von Raum 005

	Gesamtfläche	Akustisch nutzbare Fläche	Akustisch nutzbare Fläche
Bodenfläche	65 m ²	0 m ²	0%
Deckenfläche	65 m ²	ca. 52 m ²	80%
Wandfläche	135 m ²	ca. 97 m ²	72%
Gesamtfläche	265 m ²	149 m ²	56 %

Bei der Wandfläche wurde neben der Tafel- sowie der Türfläche auch die gesamte Fensterwand abgezogen, da die Flächen zwischen den Fenstern von Vorhängen bedeckt waren. Ist dies nicht der Fall, kann auch dieser Zwischenraum für die akustische Sanierung genutzt werden.

Nachdem die prinzipiell zur Verfügung stehende, akustische Fläche festgelegt wurde, ist die Anbringung näher zu betrachten, da für die positive Beeinflussung der Raumakustik gewisse Grundregeln existieren. Die Norm DIN18041⁸⁴ zeigt günstige sowie ungünstige Varianten auf:

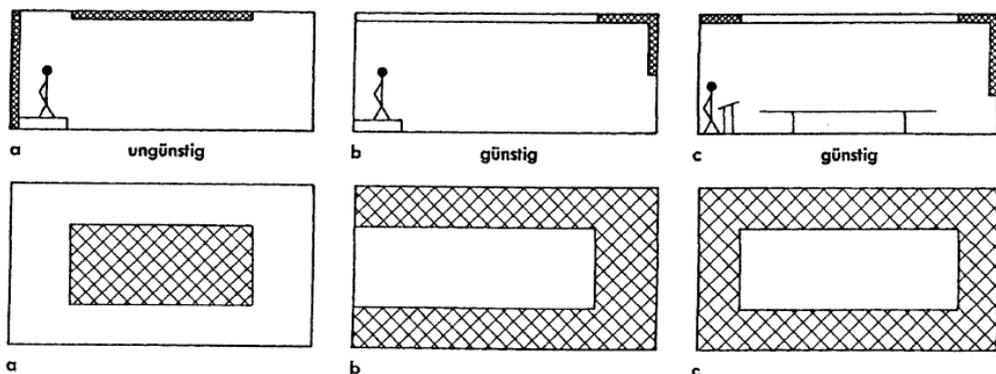


Abbildung 54: Anbringung von Absorbern [DIN18041]

⁸⁴ [DIN18041]

Variante a ist nicht zu empfehlen, da die für die Verständlichkeit wichtigen Reflexionen über die Decke absorbiert werden. Zudem besteht die Gefahr von Flatterechos. Wesentlich bessere Ergebnisse sind mit Variante b und c zu erzielen, da durch diese Anordnung die erforderlichen Deckenreflexionen gegeben sind, gleichzeitig aber unerwünschte Reflexionen von der Rückseite absorbiert werden. Ergänzend sei erwähnt, dass Schallabsorber mit bevorzugter Wirksamkeit im tieffrequenten Bereich in Schallquellennähe sowie in Raumkanten-/ecken am wirkungsvollsten sind.

Zusätzlich zur akustisch sinnvollen Positionierung an den Wandflächen ist auch der Abstand des Absorbers zur Wand zu betrachten, da dieser einen Einfluss auf das Absorptionsverhalten hat. Auf Grund der Reflexion an der Wand entstehen Stehwellen. An einer schallharten Wand, die komplett reflektiert, ist die Schallschnelle, also die Geschwindigkeit mit der sich die Luftmoleküle um ihre Ruhelage bewegen, null und nimmt mit der Entfernung zur Wand zu. Bei einer Entfernung von $\lambda/4$ ist die Schallschnelle maximal. Die Effektivität des Absorbers ist in wandnaher Aufstellung also geringer als im Bereich von $\lambda/4$. Um beispielsweise die Absorbierung bei 125 Hz zu optimieren, müsste der Absorber im Abstand von 69 cm montiert werden.

Wie Abbildung 55 zeigt, kann durch den Abstand des Absorbers immer nur ein bestimmter Frequenzbereich optimiert werden, da es für jede Konstellation Wellenlängen gibt, die im Absorberbereich nicht ein Schnellemaximum, sondern ein Schnelleminimum haben, wodurch die Dämpfung minimal ist.

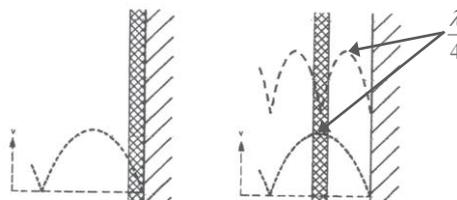


Abbildung 55: Vorschaltung eines Luftpolsters [Cremer, S.137]

Um diesen Effekt auch in der Praxis überprüfen zu können, wurden mit einem Impedanzrohr Absorptionsgradmessungen durchgeführt. Das Impedanzrohr eignet sich besonders gut für die Ermittlung akustischer Materialparameter, da für die Messung laut ISO 110543-1 eine eindimensionale Welle mit senkrechter Reflexion benötigt wird. Diese Bedingung kann mit dem Impedanzrohr, das an einem Ende durch einen Lautsprecher angeregt wird und am anderen Ende mit der Materialprobe abgeschlossen ist, erfüllt werden. Im Rahmen der Messung wurde der Absorptionsgrad von drei unterschiedlichen Schaumstoffen sowie der Effekt eines vorgeschalteten Luftpolsters ermittelt.

In Abbildung 56 sowie in Tabelle 9 sind exemplarisch die Daten zu den Messergebnissen mit Melaminharzschaum, dem bei akustischen Sanierungen am häufigsten eingesetzten Schaumstoff, dargestellt. Die vollständigen Messergebnisse befinden sich in Anhang C.

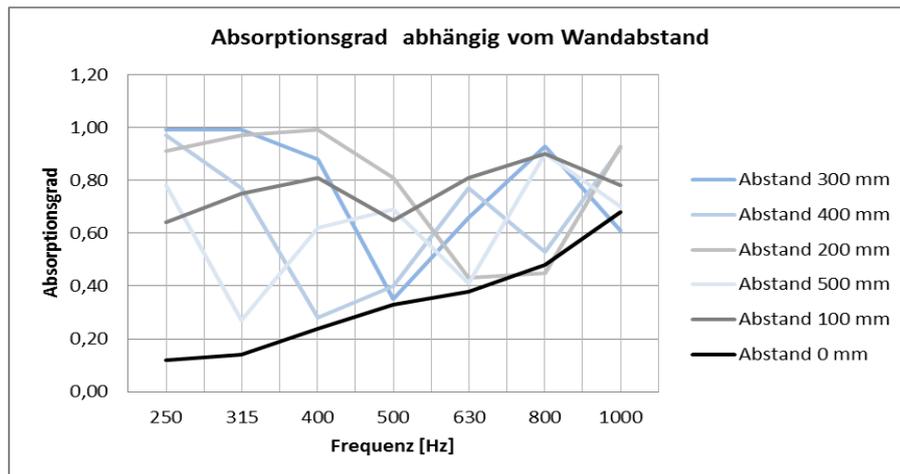


Abbildung 56: Absorptionsgrad von Melaminharzschaum ($d=4\text{cm}$) mit unterschiedlichen Luftpolstern

Ergänzend sei an dieser Stelle angeführt, dass die ebene Schallwellenausbreitung im Impedanzrohr durch die Geometrie des Rohres festgelegt ist. Das bedeutet, dass der zulässige Messbereich des Impedanzrohres von dessen Abmessungen abhängig ist. Dies ist der Grund, warum der Frequenzbereich in Abbildung 56 auf 250 Hz bis 1kHz beschränkt ist.

Tabelle 9: Absorptionsgrad von Melaminharzschaum ($d=4\text{cm}$) mit unterschiedlichen Luftpolstern

F [Hz]	Absorptionsgrad in Abhängigkeit vom Abstand zur Wand					
	0 mm	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm	500 mm
250	0,12	0,64	0,91	0,99	0,97	0,78
315	0,14	0,75	0,97	0,99	0,77	0,27
400	0,24	0,81	0,99	0,88	0,28	0,62
500	0,33	0,65	0,81	0,35	0,40	0,69
630	0,38	0,81	0,43	0,66	0,77	0,41
800	0,48	0,90	0,45	0,93	0,53	0,90
1000	0,68	0,78	0,93	0,61	0,92	0,70

Wie in Tabelle 9 hervorgehoben, verschiebt sich der maximale Absorptionsgrad mit zunehmendem Abstand hin zu tiefen Frequenzen. Abbildung 56 wiederum verdeutlicht, dass der Absorptionsgrad ohne Abstand einen kontinuierlichen Verlauf und mit Abstand einen für bestimmte Frequenzbereiche erhöhten Absorptionsgrad aufweist. Betrachtet man beispielsweise einen Abstand von 200 mm, so liegt der Absorber für 400 Hz bei ca. $\lambda/4$, also im Schnellemaximum. Für diese Frequenz ist somit ein höherer Absorptionsgrad gegeben als ohne Abstand. Für eine Frequenz von 700 Hz liegt der Absorber mit diesem Abstand in etwa im Bereich von $\lambda/2$, also im Schnelleminimum, weshalb der Absorptionsgrad in diesem Bereich nicht zusätzlich erhöht werden kann.

Für die akustische Sanierung von Klassenräumen bedeutet dies, dass durch einen zusätzlichen Abstand des Absorbers der Absorptionsgrad für gewisse Frequenzen verbessert und die benötigte erforderliche Absorberfläche somit verringert werden kann. Basierend auf den in Kapitel 3 gewonnenen Erkenntnissen wird im folgenden Kapitel 3.3 nun exemplarisch die zur Sanierung des Raumes 005 erforderliche Absorberfläche ermittelt.

3.3 Erforderliche Absorberfläche

Die zur Sanierung erforderliche Absorberfläche ergibt sich aus der äquivalenten Absorptionsfläche, die zur Erreichung von T_{soll} nötig ist und dem Absorptionsgrad des verwendeten Materials. Der Absorptionsgrad eines Absorbers liegt zwischen 0 (Vollständige Reflexion) und 1 (Vollständige Absorption). Dies bedeutet, dass z.B. bei einer geforderten äquivalenten Absorptionsfläche von dreißig Quadratmeter und einem Absorptionswert von 0,5 doppelt so viel Absorbermaterial benötigt wird, also sechzig Quadratmeter. Die Ermittlung der erforderlichen Absorberfläche für Raum 005 wird im Folgenden exemplarisch mit dem im Zuge der Impedanzrohrmessung aus Kapitel 3.2 vermessenen Melaminharzschaum durchgeführt.

Abbildung 57 zeigt die erforderliche Absorberfläche für Raum 005 im besetzten Zustand. Auf Grund der unterschiedlichen Abstände des Absorbers zur Wand ergeben sich, wie in Kapitel 3.2 bereits geschildert, entsprechend unterschiedliche Absorptionsgrade und somit auch unterschiedlich viel Absorberfläche.

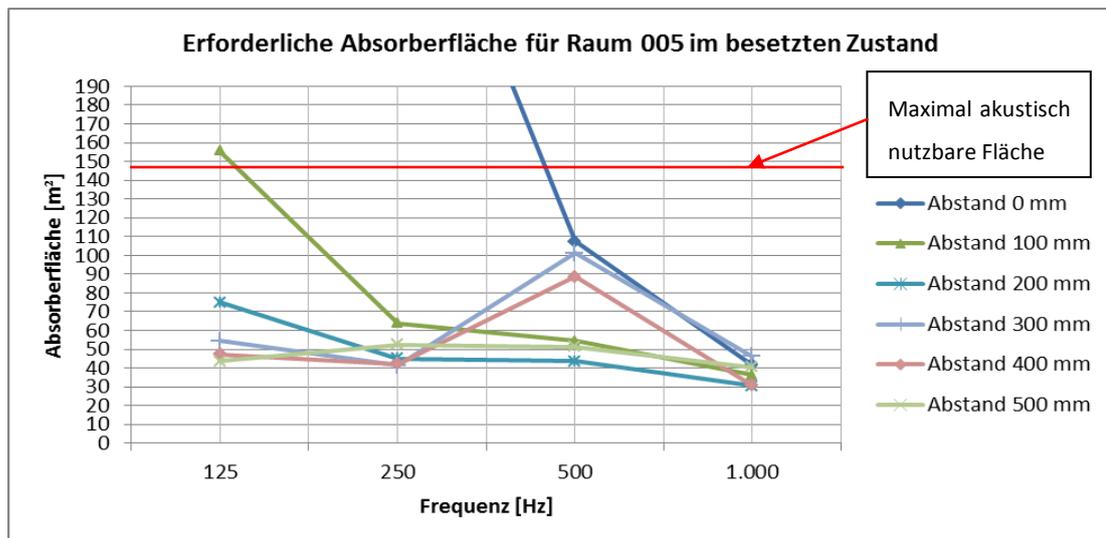


Abbildung 57: Erforderliche Absorberfläche (Melaminharzschaum) für Raum 005 im besetzten Zustand

Da der Absorptionsgrad des vermessenen Melaminharzschaumes bei 125 Hz für 0 mm Abstand lediglich 0,03 beträgt, ergibt sich eine Absorberfläche von über 1000 Quadratmeter und wird in Abbildung 57 somit nicht angezeigt, da der Wertebereich ansonsten zu groß ist um alle Kurven leserlich darstellen zu können.

Wie in Kapitel 3.2 bereits ermittelt, steht bei Raum 005 eine Fläche von 149 m^2 zur akustischen Sanierung zur Verfügung. Würde man die gesamte Sanierung mit diesem Melaminharzschaum vornehmen, so müsste dieser mindestens in einem Abstand von 200 mm angebracht werden, da ansonsten mehr Fläche benötigt wird, als aus akustischer Sicht überhaupt zur Verfügung steht. Wenn man den Abstand weiter vergrößert, kann vor allem im tieffrequenten Bereich zusätzlich Absorbermaterial eingespart werden.

Betrachtet man die in Abbildung 57 dargestellte Absorberfläche, so stellt sich auf Grund der unterschiedlichen Fläche je Frequenz die Frage, wie viel Quadratmeter Absorbermaterial nun tatsächlich eingesetzt werden sollen. Da im Zuge der akustischen Sanierung vor allem die Bedämpfung des mittleren bis tieffrequenten Frequenzbereiches wichtig ist, beziehen sich die Angaben der einzubringenden Absorberfläche in den nachfolgenden Kapiteln auf die Flächenangabe bei 125 Hz. Für den hochfrequenten Bereich wäre theoretisch weniger Absorberfläche erforderlich um die Sollnachhallzeit nach Norm zu erreichen, allerdings ist es wichtig sicherzustellen, dass der tieffrequente Bereich ausreichend bedämpft wird. Bringt man im Raum die geforderte Absorberfläche von 125 Hz ein, so werden die tiefen Frequenzen optimal bedämpft und die hohen Frequenzen etwas stärker als erforderlich, sie befinden sich aber dennoch innerhalb des Toleranzbereiches.

Basierend auf den in Kapitel 3 gewonnen Erkenntnissen bzgl. den Eigenschaften sowie dem Einsatz von Absorbern werden im nachfolgenden Kapitel nun unterschiedliche Absorbermodule präsentiert sowie Sanierungsvarianten erarbeitet.

4 Akustische Sanierungsvarianten

In diesem Kapitel werden basierend auf den in Kapitel 2 ermittelten akustischen Parameter und den in Kapitel 3 vorgestellten Absorbertypen exemplarisch akustische Sanierungsvarianten für Raum 005 erarbeitet. Fokus hierbei ist eine kostengünstige Grobsanierung, aber auch die Komplettsanierung durch einen Fachbetrieb wird als mögliche Alternative angeführt. Zu Beginn werden in Kapitel 4.1 vorgefertigte Absorbermodule vorgestellt sowie die Eigenherstellung individueller Absorbermodule erläutert. In Kapitel 4.2 werden schließlich unterschiedliche Sanierungsvarianten erarbeitet. Neben der Sanierung mit den Absorbermodulen aus Kapitel 4.1 wird auch der Innenausbau mit Gipskartonplatten als Alternative angeführt. Am Ende des Kapitels werden zusammenfassend die Kosten der erarbeiteten Sanierungsvarianten gegenübergestellt.

4.1 Absorbermodule

In Kapitel 4.1 werden sowohl vorgefertigte Absorbermodule als auch die Eigenherstellung individueller Absorbermodule erläutert. Sämtliche bei der akustischen Sanierung eingesetzte Materialien müssen gewissen Brandschutzanforderungen genügen. Nähere Informationen zu den Vorgaben bzgl. des Brandschutzes befinden sich in Kapitel 6.1.

4.1.1 Vorgefertigte Absorbermodule

Handelsübliche Absorbermodule sind sowohl für die akustische Sanierung der Wandflächen als auch für die akustische Sanierung der Deckenfläche erhältlich. Da es eine Vielzahl an unterschiedlichen Absorbermodulen gibt, werden an dieser Stelle nur grundlegende Wand- und Deckenabsorber vorgestellt. Eine detaillierte Auflistung aller für die Sanierung von Klassenräumen ausgewählten Module befindet sich in Anhang D.

Vorgefertigte Wandmodule

Für Wandabsorber werden bevorzugt Akustikplatten aus Melaminharzschaum (Handelsname: Basotect) eingesetzt, da sie sich durch hohe Absorptionswerte und eine leichte Verarbeitung auszeichnen. Der Preis ist abhängig von der Dicke des Materials, dessen Farbe und der Verarbeitung des Plattenabschlusses. Viele Hersteller bieten Akustikplatten mit abgeschrägten Kanten, auch Fase genannt, an. Dieser Abschluss ist optisch ansprechender als eine gerade Kante, jedoch auch mit Mehrkosten von ca. 10 - 15% verbunden.

Die Farbe des Melaminharzschaumes ist standardmäßig grau oder weiß, es gibt bei einzelnen Herstellern aber auch die Möglichkeit gegen Aufpreis eine farbliche Kaschierung anzubringen ohne die Absorbereigenschaften zu beeinträchtigen. Dies bietet die Option, neben dem akustischen Aspekt auch die optische Raumgestaltung miteinzubinden.

Bezüglich Größe gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Plattenabmessungen, wobei kleinere Platten im Durchschnitt etwas teurer sind als größere. Zusätzlicher Vorteil der größeren Platten ist die schnellere Montage. Diese erfolgt mittels Klebstoff, sodass die Anbringung auch durch Laien erfolgen kann. Es wird jedoch empfohlen, im Vorfeld durch einen Fachexperten überprüfen zu lassen, ob die Wandoberfläche dafür geeignet ist.

Abbildung 58 und Abbildung 59 zeigen exemplarisch Akustikplatten aus Melaminharzschaum in den grundlegenden, zuvor beschriebenen Ausführungen.

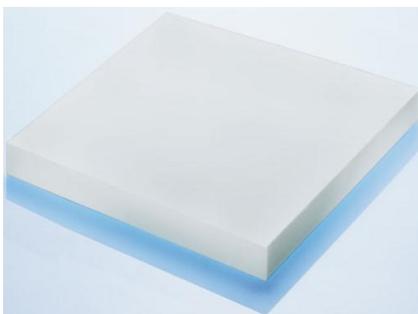


Abbildung 58: Akustikplatte aus Melaminharzschaum ohne Fase, weiß
[SONATECH]

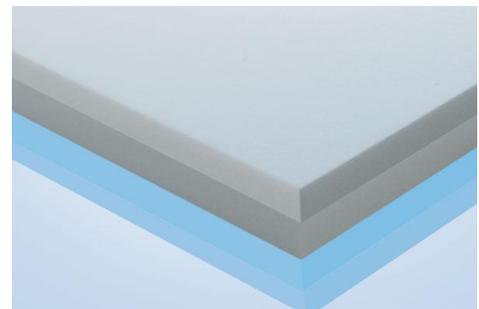


Abbildung 59: Akustikplatte aus Melaminharzschaum mit Fase, hellgrau
[SONATECH]

In Tabelle 10 sind exemplarisch die Absorptionswerte sowie der Quadratmeterpreis von ausgewählten Melaminharzschaumplatten angeführt.

Tabelle 10: Exemplarische Absorptionswerte für Melaminharzschaumplatten (Direktanbringung)

Dicke [mm]	Absorptionswerte						Preis/m ² [€]
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
30	0,15	0,25	0,66	0,92	0,92	0,92	ca. 27,00
50	0,30	0,58	1,00	1,00	1,00	1,00	ca. 34,00
70	0,62	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	ca. 64,00

Bei größeren Dicken wird vor allem der tieffrequente Bereich von 125 Hz bis 250 Hz deutlich besser bedämpft. Im Frequenzbereich oberhalb von 250 Hz ist die absorbierende Wirkung ebenfalls höher, allerdings nur geringfügig. In Summe wird mit zunehmender Dicke also weniger Absorbermaterial benötigt um T_{soll} zu erreichen.

Je nach Absorptionsgrad des Materials kann es sein, dass durch den Einsatz eines Absorbers mit größer Dicke in Summe deutlich weniger Absorbermaterial benötigt wird, sodass diese Variante trotz eines höheren Quadratmeter Preises günstiger ist.

Abbildung 60 zeigt die erforderliche Absorberfläche, wenn für den gesamten Raum 005 die in Tabelle 10 angeführten Absorber eingesetzt werden. In diesem Fall würden bei Verwendung des 70mm dicken Absorbers tatsächlich um 2/3 weniger Absorbermaterial benötigt werden als bei Verwendung des 50mm dicken Absorbers. Die Sanierung mit den 70mm starken Platten wäre somit um fast 50% günstiger, als jene mit den 50mm starken Platten.

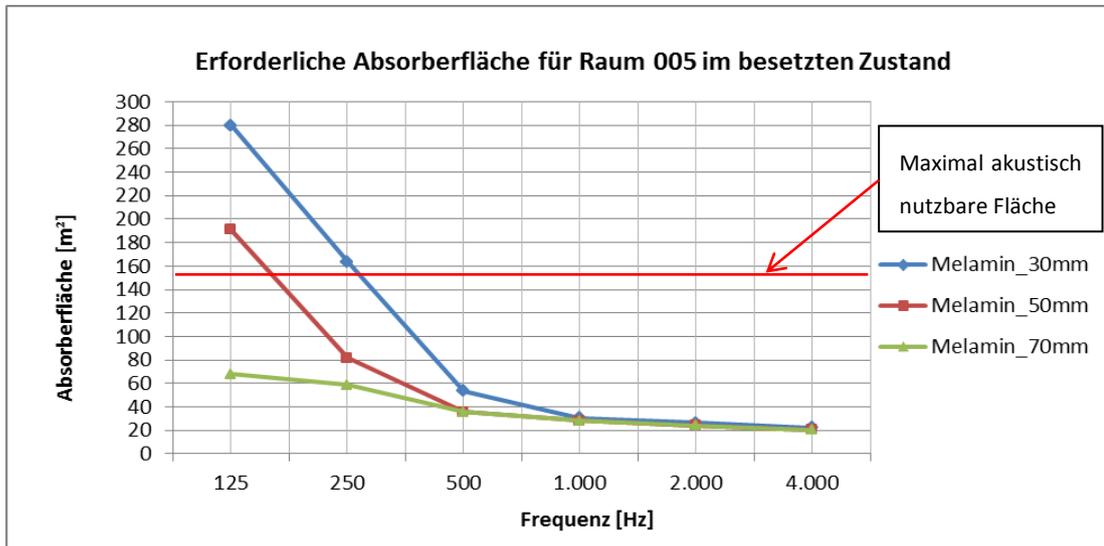


Abbildung 60: Erforderliche Absorberfläche bei Verwendung der vorgefertigten Melaminharzschaumplatten (Direktanbringung)

Würde die Sanierung ausschließlich mit der Direktanbringung dieser Melaminharzschaumplatten realisiert werden, so müssten die Absorberplatten mindestens eine Dicke von 70mm aufweisen, da ansonsten mehr Absorberfläche benötigt wird, als an akustisch nutzbarer Fläche zur Verfügung steht (siehe Tabelle 8). Wie in Kapitel 3.3 bereits angeführt, kann durch die Zwischenschaltung eines Luftpolsters ein höherer Absorptionsgrad erreicht werden, sodass weniger Absorbermaterial benötigt wird. Die Messungen im Impedanzrohr (siehe Kapitel 3.2) ergaben, dass durch den zusätzlichen Abstand die nötige Absorberfläche um durchschnittlich 38% reduziert wird. Umgelegt auf die Ergebnisse aus Abbildung 60 bedeutet dies, dass bei der Verwendung der 30mm dicken Platten durch einen zusätzlichen Abstand nur ca. 174 Quadratmeter nötig sind, und im Fall der 50mm dicken Platten ca. 118 Quadratmeter. Durch den zusätzlichen Abstand ist der Einsatz der 50mm dicken Platten also doch möglich, da die zur Verfügung stehende akustische Fläche nun nicht mehr überschritten wird. Die Herstellung eines Wandabsorbers mit Luftpolster wird in Abschnitt 4.1.2 näher erläutert. Zusätzlich zu den Empfehlungen in Kapitel 3.2 sollte bei der Anbringung noch bedacht werden, dass Schaumstoffabsorber leicht beschädigt werden können, sodass eine Montage an den Wänden nur oberhalb von 2m Raumhöhe sinnvoll ist. Die Wandfläche unterhalb von 2m Raumhöhe sollte stattdessen mit Plattenabsorbern aus Spanplatten od. Weichfaserplatten aus Holz genutzt werden, da diese robuster sind. Dies bietet nicht nur den Vorteil, dass die Nachhallzeit im tieffrequenten Bereich zusätzlich verbessert werden kann, diese Absorber können beispielsweise auch als Pinnwand oder zum Aufhängen von Zeichnungen genutzt werden. Die Herstellung von Plattenabsorbern sowie individuellen Wandmodulen wird in Kapitel 4.1.2 beschrieben.

Vorgefertigte Deckenmodule

Die zuvor genannten Wandmodule können durch Direktanbringung an der Decke auch als Deckenabsorber genutzt werden. Durch Abhängen der Akustikplatten erzielt man jedoch einen noch besseren Absorptionsgrad, sodass diese sogenannten Deckensegel gegenüber direkt angebrachten Absorbern zu bevorzugen sind. Deckenabsorber sind, wie auch die zuvor angeführten Wandmodule, meist aus Melaminharzschaum gefertigt und bieten zusätzlich zum verbesserten Absorptionsgrad den Vorteil einer optischen Verkleinerung des Raumes.

Deckensegel sind in unterschiedlicher Ausführung hinsichtlich Größe, Konstruktion und Farbe erhältlich. Eine kostengünstigste Variante ist, wie in Abbildung 62 dargestellt, eine Schaumstoffplatte ohne Alurahmen, die mittels Draht- oder auch Nylonseil von der Decke abgehängt wird. Die rückseitige Aluschiene dient zur zusätzlichen Stabilisierung. Alternativ ist es auch möglich, die Seile an Haken (siehe Abbildung 63) die direkt in den Absorber eingedreht werden, zu befestigen. Abbildung 61 zeigt ein farblich kaschiertes Deckensegel mit Alurahmen. Diese Variante ist optisch ansprechender, die zusätzliche Farbe und der hochwertige Alurahmen erhöhen allerdings den Preis des Moduls.



Abbildung 61: Farbiges Deckensegel aus Melaminharzschaum mit Alurahmen [SCHAUMSTOFFLAGER.DE]



Abbildung 62: Deckensegel aus Melaminharzschaum mit Aluschiene zur Stabilisierung [SCHAUMSTOFFLAGER.DE]



Abbildung 63: Hacken für das Deckensegel ohne Alurahmen

Das Deckensegel aus Abbildung 61 muss von einer facheinschlägigen Firma montiert werden, da auf Grund des Alurahmens bei unsachgemäßer Montage eine hohe Verletzungsgefahr für die im Raum anwesenden Personen besteht. Das Deckensegel aus Abbildung 62 hat keinen Alurahmen und dadurch ein wesentlich geringeres Gewicht. Da somit keine hohe Verletzungsgefahr besteht, ist eine Montage durch den Laien möglich, wobei dennoch empfohlen wird, die Eignung der Bausubstanz im Vorfeld überprüfen zu lassen, um gewährleisten zu können, dass eine Montage an der Decke möglich ist.

Tabelle 11 führt exemplarisch die Absorptionswerte sowie den Quadratmeterpreis ausgewählter Deckensegel an.

Tabelle 11: Exemplarische Absorptionswerte für Deckensegel

Dicke [mm]	Absorber (Abstand zur Decke)	Absorptionswerte						Preis/m ² [€]
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
20	Deckensegel (100mm)	0,18	0,47	0,96	1,00	1,00	1,00	ca. 45,00
20	Deckensegel (300mm)	0,38	0,50	0,80	1,00	1,00	1,00	ca. 45,00
40	Deckensegel (300mm)	0,31	0,79	1,00	1,00	1,00	1,00	ca. 80,00

Wie bereits in Kapitel 3.3 erörtert, ist auch an Hand dieses Beispiels zu sehen, dass der Absorptionsgrad im tieffrequenten Bereich durch vergrößern des Abstandes zur Wand verbessert werden kann. Abbildung 64 zeigt die erforderliche Absorberfläche, wenn für den gesamten Raum 005 ausschließlich die in Tabelle 11 angeführten Deckenabsorber eingesetzt werden. „D“ bezeichnet die Dicke, „A“ bezeichnet den Abstand zur Wand.

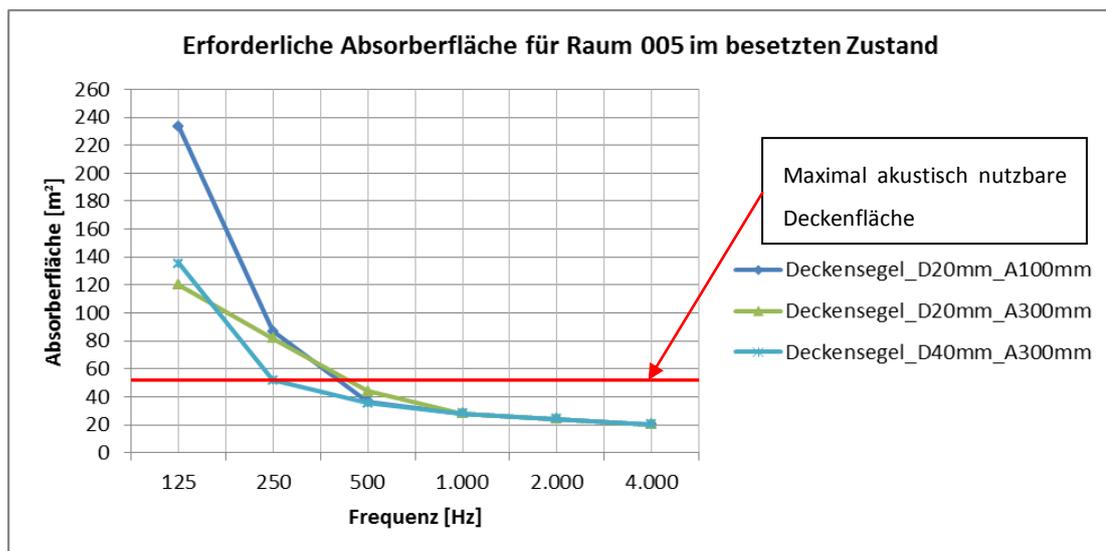


Abbildung 64: Erforderliche Absorberfläche bei Verwendung der vorgefertigten Deckensegel aus Tabelle 11

Werden für die akustische Sanierung ausschließlich die in Tabelle 11 angeführten Deckensegel verwendet, so ist die Erreichung von T_{soll} nicht möglich, da mehr Absorberfläche benötigt wird, als an akustisch nutzbarer Deckenfläche zur Verfügung steht. Um die Sollnachhallzeit nach Norm erreichen zu können, müssen zusätzliche Absorbermodule eingesetzt werden. Die unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten und Sanierungsvarianten werden in Kapitel 4.2 vorgestellt.

4.1.2 Eigenherstellung individueller Absorbermodule

Fertige Absorbermodule bieten den Vorteil, dass sie direkt vom Fachhandel bezogen werden können, haben aber den Nachteil relativ hoher Materialkosten. In diesem Kapitel wird daher die kostengünstige Eigenherstellung individueller Absorbermodule als Alternative präsentiert. Es werden sowohl Wandmodule also auch Deckenmodule erarbeitet. Auch bei diesen Absorbern sollte bereits im Vorfeld ein Fachexperte zur Überprüfung der Bausubstanz herangezogen werden, um sicherstellen zu können, dass die Montage der Absorbermodule möglich ist.

Eigenherstellung von Wandmodulen

Neben dem klassischen Melaminharzschaum können auch Materialien wie Steinwolle oder Weichfaserplatten aus Holz verwendet werden. Diese Materialien weisen ähnliche bzw. zum Teil sogar bessere Absorptionswerte als Melaminharzschaum auf und sind zudem durchschnittlich um mehr als 50% günstiger. Da diese Materialien optisch nicht so ansprechend und vor allem nicht so stabil sind wie Akustikplatten aus Basotect, sollten sie in einen Holzrahmen eingebettet werden. Im Vergleich zum Schaumstoff ohne Verkleidung bietet dieses Modul die Möglichkeit eines zusätzlichen Luftpolsters. Außerdem kann durch die Verkleidung des Holzrahmens mit Stoff der Raum farblich gestaltet und die Module leichter gereinigt werden. Schaumstoffabsorber ohne Verkleidung können auf Grund der Sonneneinstrahlung mit der Zeit vergilben. Zusätzlich setzt sich Staub ab, der vorsichtig entfernt werden muss um die Absorber nicht zu beschädigen. Stoffe sind in der Regel leichter zu reinigen und auch in Bezug auf Lichtempfindlichkeit besser.

In Abbildung 66 ist eine Weichfaserplatte aus Holz dargestellt, in Abbildung 65 eine Dämmmatte aus Steinwolle.



Abbildung 66: Weichfaserplatte aus Holz



Abbildung 65: Dämmmatte aus Steinwolle

Weichfaserplatten aus Holz sind, wie auch Melaminharzschaumplatten, gesundheitlich unbedenklich. Bei der Verwendung von Steinwolle ist es allerdings wichtig, dass ausschließlich Produkte mit dem RAL-Gütezeichen verwendet werden, da laut Gefahrenstoffverordnung nur diese als unbedenklich gelten.

Tabelle 12 zeigt exemplarisch die Absorptionswerte und den Quadratmeterpreis für ausgewählte Weichfaserplatten aus Holz sowie Dämmmatten aus Steinwolle.

Tabelle 12: Exemplarische Absorptionswerte für Weichfaserplatten aus Holz sowie Steinwolle

Dicke [mm]	Material	Abstand zur Wand/Decke [mm]	Absorptionswerte						Preis/m ² [€]
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
80	Holzfaser	0	0,18	0,43	0,86	0,96	0,88	0,88	ca. 9,00
40	Holzfaser	0	0,10	0,21	0,42	0,81	0,78	0,78	ca. 4,50
30	Steinwolle	0	0,04	0,29	0,74	0,92	0,97	1,00	ca. 7,00
30	Steinwolle	270	0,72	0,78	0,89	0,93	0,97	1,00	ca. 7,00
60	Steinwolle	0	0,24	0,83	1,00	1,00	0,99	1,00	ca. 14,00

Abbildung 67 zeigt die für Raum 005 nötige Absorberfläche bei Verwendung der Absorber aus Tabelle 12. „D“ bezeichnet die Dicke, „A“ bezeichnet den Abstand zur Wand.

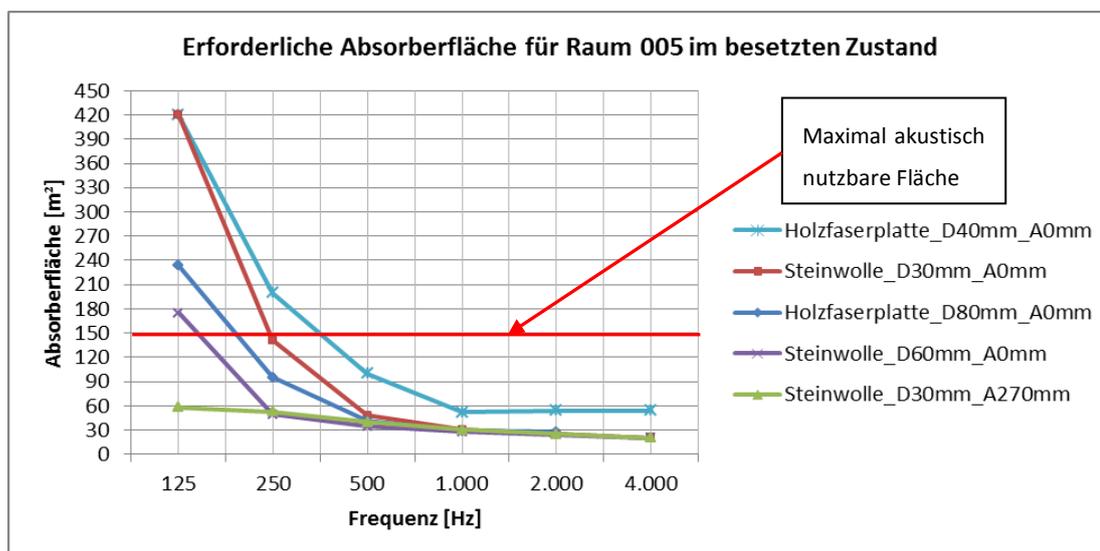


Abbildung 67: Erforderliche Absorberfläche bei Verwendung von Holzfaser bzw. Steinwolle

Auch aus dieser Grafik geht deutlich hervor, wie groß der Vorteil eines zusätzlichen Luftpolsters ist. Bei der Verwendung von Steinwolle der Dicke 30mm ohne Abstand würde man für die ausreichende Bedämpfung des tieffrequenten Bereichs über 400 Quadratmeter Absorberfläche und somit mehr als an akustisch nutzbarer Fläche zur Verfügung steht benötigen. Durch einen Luftpolster von 270 mm reduziert sich die nötige Absorberfläche auf nur 58 Quadratmeter. Für die Holzfaserplatte sowie die Steinwolle mit 60mm Dicke liegen die Absorptionswerte für 0mm Abstand vor. Deren Absorptionswert ist daher trotz der größeren Dicke kleiner als jener der 30mm dicken Steinwolle. Mit Abstand zur Wand kann aber auch für diese Materialien der Absorptionsgrad entsprechend verbessert werden. Da die Steinwolle bei vergleichbarer Dicke eine höheren Absorptionsgrad aufweist als die Weichfaserplatte aus Holz, wird für die nachfolgende Konstruktion des individuell gestaltbaren Wandmoduls Steinwolle verwendet.

Konstruktion des Wandmoduls

Zur Stabilisierung der Steinwolle- bzw. Holzfaserplatten benötigt man einen Holzrahmen, in den die Materialien eingebettet werden. Für diesen Holzrahmen können handelsübliche Glattkantbretter aus dem Baumarkt verwendet werden. Eine preislich hochwertigere, aber auch stabilere Alternative ist Brettschichtholz. Brettschichtholz besteht aus mehreren verleimten Holzschichten und zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass im Gegensatz zu Vollholz keine Rissbildung entsteht und es zudem formstabiler ist.

Die Abmessungen des Moduls können nach Belieben variabel gestaltet werden. Da die Herstellung mit einem gewissen Zeitaufwand verbunden ist, sollte die Größe so gewählt werden, dass möglichst wenige Module angefertigt werden müssen. Die Montage wird mit zunehmender Größe allerdings aufwendiger, daher wird eine maximale Größe von 1m x 2m empfohlen.

Im ersten Schritt sind, wie in Abbildung 68 dargestellt, die Elemente des Rahmens mit Winkeln zu verbinden. Alternativ können diese auch auf Gehrung geschnitten und verleimt werden. Hierzu ist es nötig den Rahmen nach Verleimung mit einem Spanngurt zu fixieren und je nach verwendetem Leim die empfohlene Dauer (siehe Produktbeschreibung) trocknen zu lassen.

Für die Stabilisierung des Rahmens sind, wie in Abbildung 69 dargestellt, in der Mitte des Rahmens zwei zusätzliche Stege anzubringen. Zwischen den zwei Stegen muss, wie in der oberen Abbildung der technischen Zeichnung aus Abbildung 69 ersichtlich, ein Spalt von 2-3 Millimeter sein, damit das für die Fixierung des Dämmmaterials erforderliche Drahtnetz durchgehend gespannt werden kann. Diese Mittelstege können ebenfalls mit Winkel durch Verleimung oder durch stirnseitiges Verschrauben montiert werden.



Abbildung 68: Verbindung der Rahmenelemente mit einem Winkel



Abbildung 69: Modulrahmen mit Stabilisierungsbalken

Für die stabile Einbettung der Dämmmatten sowie die Einschaltung eines Luftpolsters ist anschließend, wie in Abbildung 70 dargestellt, ein Drahtnetz zu spannen. Hierfür müssen Holz- bzw. Ösenschrauben angebracht werden. Damit das Holz beim Eindrehen nicht springt, sollten Löcher vorgebohrt werden, in die die Schrauben schließlich eingedreht werden. Wichtig ist, dass die Schrauben ca. 15mm von der Rahmenfrontseite entfernt sind, da das Dämmmaterial auf Grund seiner weichen Struktur über den Draht hinausreicht und bei zu geringem Abstand den Akustikstoff ausbeult, wodurch das Modul optisch unförmig wird. Ebenso sollten die Schrauben nicht zu Gänze eingedreht werden, sodass das Drahtseil durch das Eindrehen später noch gespannt werden kann.

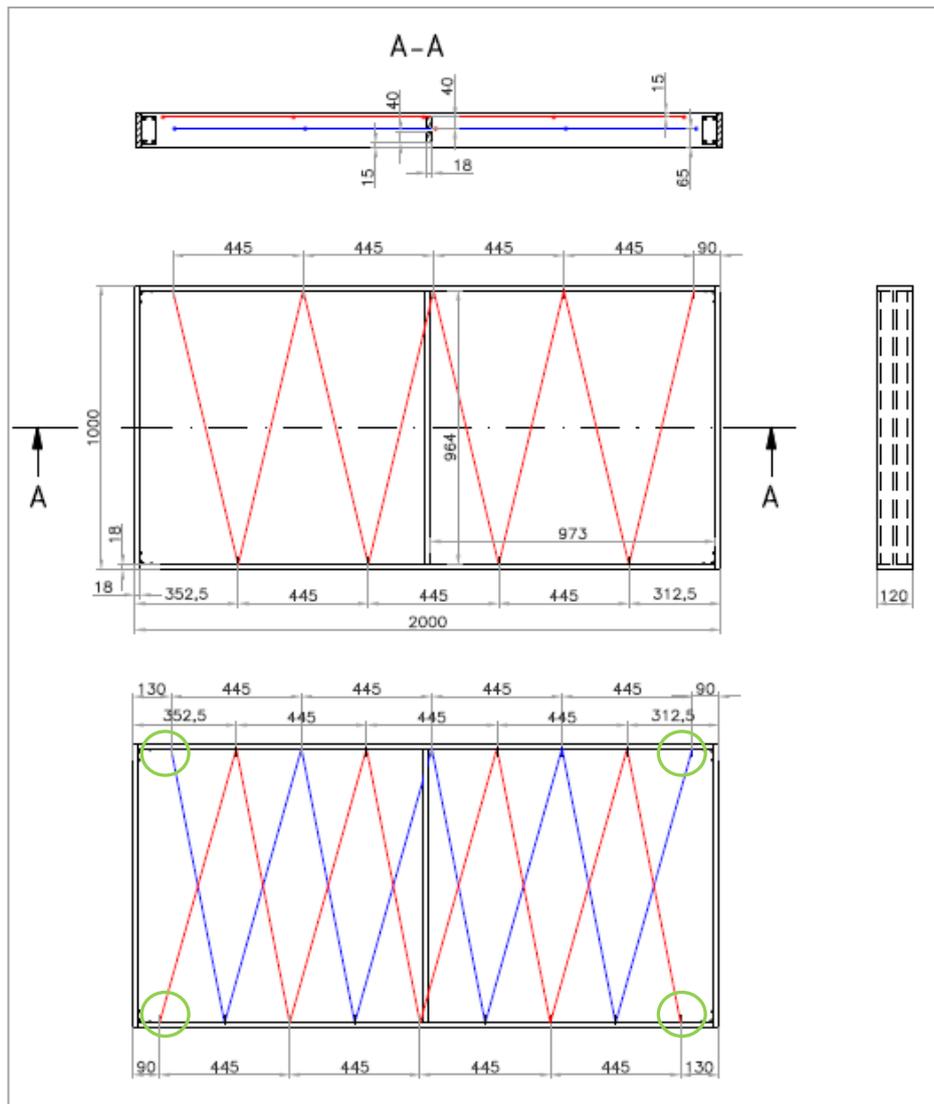


Abbildung 70: Anbringung des Stabilisierungsnetzes beim Wandabsorber

Da das Dämmmaterial von beiden Seiten stabilisiert werden muss, ist es notwendig, zwei Ebenen mit dem Drahtseil einzuziehen. Das mittlere Bild aus Abbildung 70 zeigt die Anbringung der ersten Ebene, das untere Bild zeigt die zweite Ebene (blau dargestellt) die zur ersten Ebene gegengleich und leicht versetzt angebracht wird. Nachdem die erste Drahtebene eingezeichnet und gespannt ist, wird das Dämmmaterial eingelegt. Anschließend kann die zweite Drahtebene montiert werden.

Die Fixierung des Drahtes erfolgt in beiden Ebenen durch Verdrillen bei den äußeren Ösenschrauben (siehe grüne Markierung Abbildung 70 sowie Abbildung 71). Die Nachspannung des Netzes erfolgt durch das weitere Eindrehen der Ösenschrauben in das Holz. Die Größe des in Abbildung 72 grün markierten Luftpolsters auf der Rückseite des Wandmoduls ergibt sich in Abhängigkeit von der Dimensionierung des Holzbrettes sowie des Dämmmaterials.

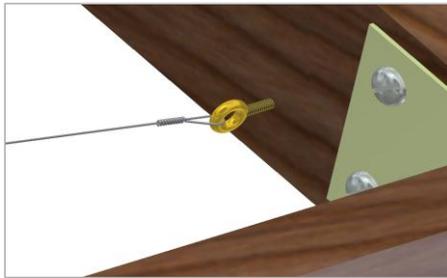


Abbildung 71: Fixierung des Drahtseils

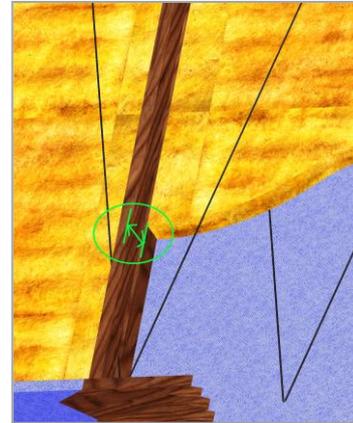


Abbildung 72: Detail des Wandabsorbers

Im letzten Schritt wird der Akustikstoff aufgezogen. Anstatt des Akustikstoffes kann auch „normaler“, kostengünstigerer Stoff eingesetzt werden, er sollte aber möglichst schalldurchlässig sein, damit die absorbierende Wirkung des Moduls nicht verringert wird. Ebenso muss er den in Kapitel 6.1 angeführten Brandschutzvorschriften genügen. Wie beim Tapezieren von Polstermöbel ist der Stoff von der Front ausgehend nach hinten zu ziehen und auf der Innenseite mit einem Druckluft Klammergerät zu fixieren. Auch die Rückseite sollte mit Stoff verschlossen werden, damit die Fasern des Dämmmaterials nicht in den Raum gelangen können. Die Fixierung des Stoffes erfolgt wie auch beim Stoff auf der Frontseite durch Festklammern auf der Schmalseite des Holzrahmens. Abbildung 73 zeigt die einzelnen Ebenen des fertigen Wandmoduls, wobei die in hellblau angerissene Fläche die Rückseite des Wandabsorbers darstellt.

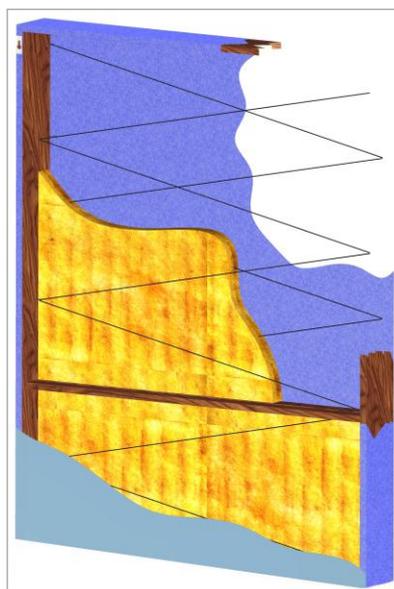


Abbildung 73: Fertiges Wandmodul

Die Montage des Wandmoduls erfolgt, wie in den Abbildung 74 und Abbildung 75 dargestellt, über ein an den Rahmen montiertes Lochblech. Je nachdem ob die Befestigungsschrauben sichtbar sein dürfen oder nicht, kann man zwischen Variante A und Variante B wählen. Soll das Modul bündig an der Wand aufliegen, muss das Lochblech im Holzrahmen um die Blechstärke versenkt werden.

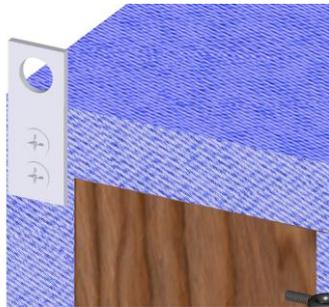


Abbildung 75: Wandmontage des Absorbermoduls – Variante A

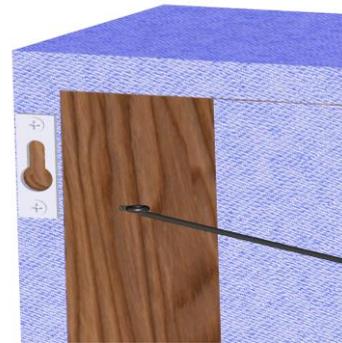


Abbildung 74: Wandmontage des Absorbermoduls – Variante B

Tabelle 13 gibt einen Überblick über die für den Modulbau benötigten Materialien und deren Kosten.

Tabelle 13: Benötigtes Material und Materialkosten für ein Wandmodul (1m x 2m)

Material	Preis [€]	Materialkosten je Modul [€]
Glattkantbrett (120mm x 18mm x 3000mm)	ca. 1,00/m	7,00
Alternativ: Brettschichtholz	ca. 2,00/m	14,00
Winkel	ca. 1,00/Stk.	8,00
Ösenschrauben	ca. 0,06/Stk.	1,00
Drahtseil für Stabilisierungsnetz	ca. 0,10/m	2,00
Stoff	ca. 4,00/m ²	20,00
Alternativ: Akustikstoff	ca. 9,00/m ²	45,00
Steinwolle (60mm)	ca. 14,00/m ²	28,00
Gesamtkosten für die günstigste Variante des Moduls:		63,00
Quadratmeterpreis des Moduls:		31,50

Diese selbstgefertigten Wandmodule sind in etwa gleich teuer wie die vorgefertigten Melaminharzschaumplatten, sie weisen aber den entscheidenden Vorteil auf, dass der tieffrequente Bereich durch den zusätzlichen Luftpolster besser bedämpft werden kann, wodurch weniger Absorberfläche erforderlich ist, sodass in Summe weniger Kosten entstehen. Sie sind auch eine mögliche Alternative, wenn eine Anbringung der Absorber mittels Klebstoff nicht gewünscht oder nicht möglich ist.

Das absorbierende Material ist bei diesen Modulen besser geschützt wie beispielsweise eine Melaminharzschaumplatte, die ohne Verkleidung direkt an der Wand angebracht wird. Um etwaige Schäden am Absorber zu vermeiden, wird dennoch empfohlen, auch diese Wandmodule nur oberhalb von 2m Raumhöhe anzubringen. Im Wandbereich unterhalb von 2m Raumhöhe sollten stattdessen Plattenabsorber eingesetzt werden. Diese Absorber bieten vor allem für den tieffrequenten Bereich eine zusätzliche Dämpfung und sind somit eine gute Ergänzung zu den zuvor genannten Wandabsorbern. Am einfachsten sind diese Plattenabsorber zu realisieren, indem an der Wand zwei Leisten montiert werden, auf die wiederum Spannplatten angebracht werden. Abbildung 76 zeigt exemplarisch die Montage eines Plattenabsorbers.



Abbildung 76: Plattenabsorber

Plattenabsorber besitzen ihre maximale Schallabsorption bei der Resonanzfrequenz, welche wiederum von der Masse der Platte sowie dem Abstand zur Wand abhängig ist. Abbildung 77 zeigt die Resonanzfrequenz in Abhängigkeit vom Wandabstand und der flächenbezogenen Masse der Platte.

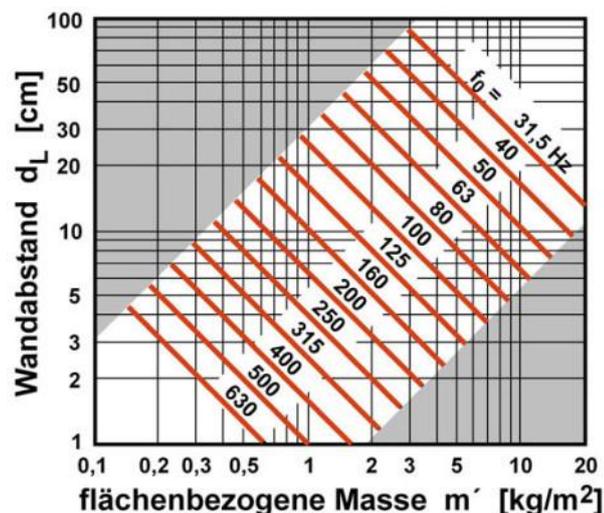


Abbildung 77: Resonanzfrequenz des Plattenabsorbers in Abhängigkeit von Plattenmasse und Wandabstand [BAUNETZ]

Soll der Plattenabsorber beispielsweise 125 Hz bedämpfen, und wird es gewünscht, dass der Wandabstand maximal 5cm beträgt, so muss die Platte 3kg/m^2 aufweisen.

In Tabelle 14 sind die Absorptionswerte ausgewählter Plattenabsorber angeführt. Die Angabe „gefüllt“ bezieht sich auf den Hohlraum hinter den Plattenabsorber, der mit Mineralwolle ausgefüllt ist, ohne aber die Platte zu berühren. Dies ist wesentlich, da die Platte nicht in ihrer Schwingung gedämpft werden darf, da ansonsten die absorbierende Wirkung verringert wird.

Tabelle 14: Absorptionswerte ausgewählter Plattenabsorber

Dicke [mm]	Material	Abstand zur Wand/Decke [mm]	Absorptionswerte						Preis/m ² [€]
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
4	Spanplatte	50	0,30	0,20	0,15	0,10	0,08	0,10	ca. 6,00
4	Spanplatte *gefüllt mit 30mm Steinwolle	50*	0,20	0,40	0,20	0,10	0,08	0,10	ca. 11,00
8	Spanplatte	20	0,46	0,24	0,04	0,01	0,01	0,01	ca. 4,00

Wie Tabelle 14 zu entnehmen ist, kann durch die Füllung des Hohlraums mit Mineralwolle die Absorption für einzelne Frequenzbereiche zusätzlich angehoben werden. Diese Form des Plattenabsorbers kann realisiert werden, indem beim zuvor präsentierten Wandabsorber anstatt der Stoffabdeckung eine Spanplatte auf der Sichtseite aufgesetzt wird. Überzieht man die Spanplatten mit einer PVC Folie, so kann dieser Absorber zusätzlich auch noch für die Raumgestaltung genutzt werden, der Preis für die Platte ist dadurch allerdings beinahe doppelt so hoch. Alternativ können die Platten mit Farbe bemalt werden. Diese ist günstiger als PVC Folien und bietet zusätzlichen Spielraum für die Raumgestaltung. Die Fläche kann auch genutzt werden, um beispielsweise Zeichnungen oder Plakate aufzuhängen.

Ist es gewünscht den Bereich unterhalb von 2m Raumhöhe als Pinnwand zu nutzen, so gibt es die Möglichkeit, die in Abbildung 65 dargestellten Weichfaserplatten aus Holz wie auch die selbst hergestellten Wandmodule direkt an die Wand zu montieren (siehe Abbildung 74 bzw. Abbildung 75). Da diese nicht so robust sind wie die Plattenabsorber aus Abbildung 76, wird empfohlen, diese nur oberhalb von 1m Raumhöhe einzusetzen. Um die Platte zusätzlich vor Abnutzung zu schützen, können diese mit einem Akustikstoff überzogen und somit auch die Raumgestaltung miteinbezogen werden. Bei der Montage des Stoffes ist es wichtig, dass dieser nicht durch vollflächige Verklebung angebracht wird, da ansonsten die Poren des Absorbers verschlossen und seine akustische Wirkung somit stark minimiert wird (siehe Wirkung von Absorbern in Kapitel 3.1.1). Um die akustische Wirkung zu erhalten, sollte der Stoff stattdessen mit einem Klettverschluss befestigt werden, wodurch dieser bei Verschmutzung auch abgenommen und gereinigt oder ausgetauscht werden kann.

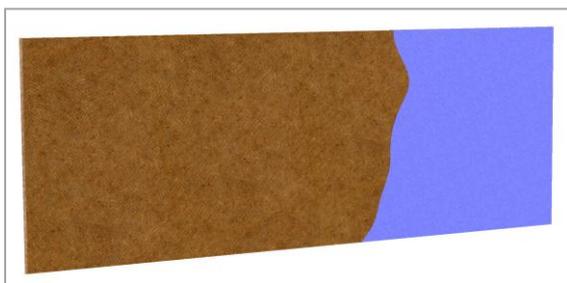


Abbildung 78: Pinnwand aus Weichfaserplatte

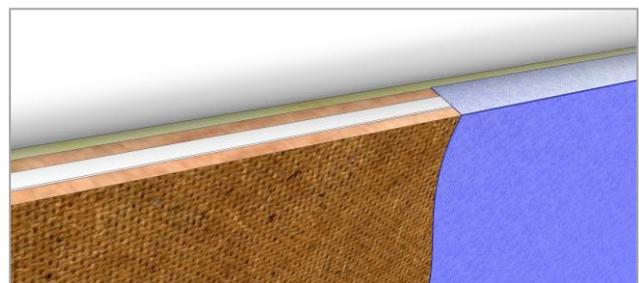


Abbildung 79: Befestigung des Stoffes mit Klettverschluss

Eigenherstellung von Deckenmodulen

Die Herstellung von Deckenmodulen erfolgt größtenteils analog zu jener des zuvor präsentierten Wandmoduls. Auf Grund der Abhängung ist allerdings kein Luftpolster erforderlich und das Dämmmaterial ist nicht zwischen zwei Seilebenen einzubringen, sondern auf dem Drahtnetz aufzulegen. Der Stabilisierungssteg aus Abbildung 69 braucht daher im Gegensatz zum Wandmodul nicht geteilt sein.

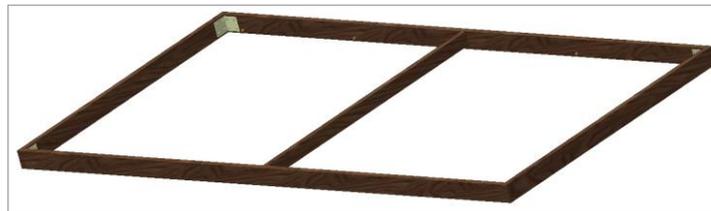


Abbildung 80: Rahmen für das Deckensegel

Das Stabilisierungsnetz wird wie in Abbildung 81 dargestellt eingezogen. Da das Dämmmaterial auf dem Drahtnetz aufgelegt wird, können beide Drahtseile in einer Ebene frontseitig montiert werden. Ein Abstand von der Frontseite (ca. 15mm) ist auch in diesem Fall erforderlich, da das Dämmmaterial auf Grund der relativ instabilen Struktur etwas über das Drahtnetz hinausreicht und das Modul ansonsten optisch ausbeulen würde.

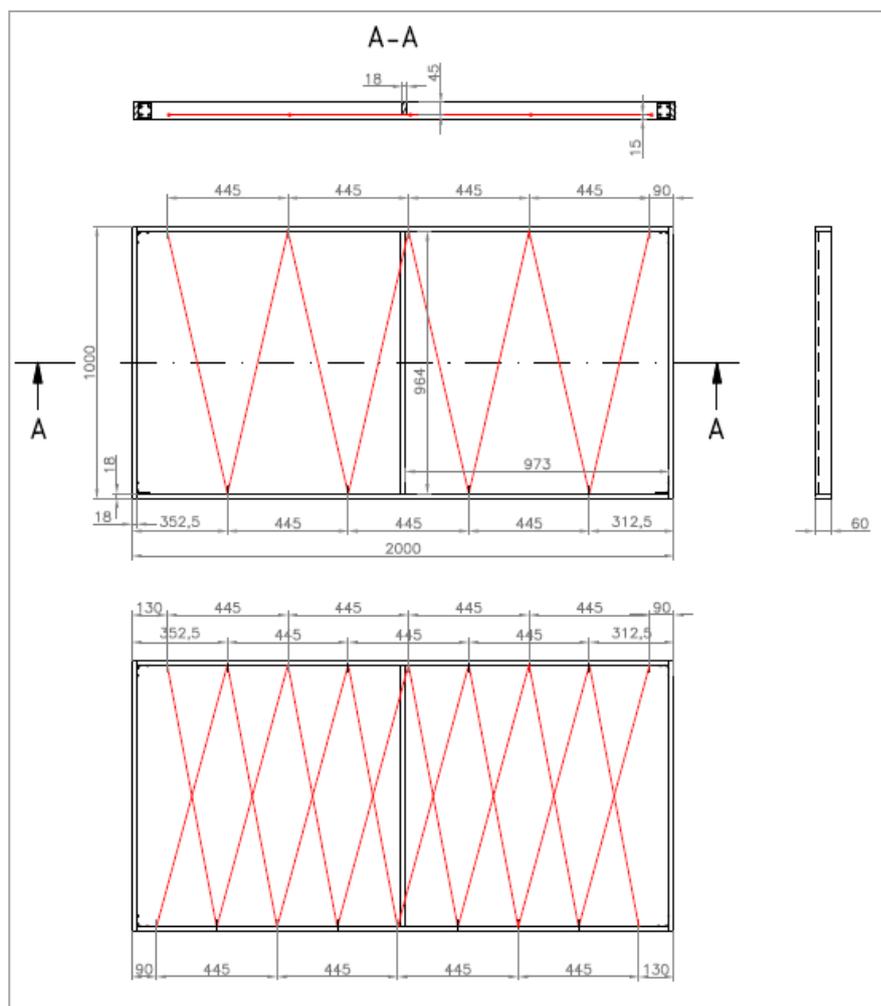


Abbildung 81: Anbringung des Stabilisierungsnetzes beim Deckenmodul

Die Fixierung des Stoffes an der Rückseite des Deckensegels sollte nicht mittels Klammern durchgeführt werden, sondern mit Klettverschluss, damit er zur Reinigung abgenommen werden kann.

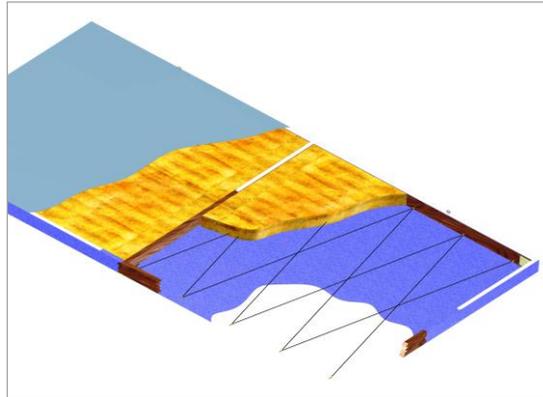


Abbildung 82: Fertiges Deckenmodul

Für die Montage des Deckenmoduls wird die Verwendung von handelsüblichen Schraubhaken empfohlen, die direkt an der Oberseite des Holzrahmens bzw. an der Decke angebracht werden. Die Aufhängung erfolgt mittels eines Drahtseils. Es sei an dieser Stelle ausdrücklich betont, dass die Montage der Deckensegel nicht durch Laien, sondern ausschließlich nur durch Fachpersonal erfolgen darf! Sollte die Montage unsachgemäß erfolgen und sich ein Deckensegel lösen, besteht größte Verletzungsgefahr für sich im Bereich der Segel befindlichen Personen! Die Absorptionswerte des Moduls sowie die daraus resultierende erforderliche Absorberfläche entsprechen jener des Wandmoduls aus Abbildung 67 bzw. Tabelle 12. Tabelle 15 gibt einen Überblick über die für den Bau der Deckenmodule benötigten Materialien und deren Kosten.

Tabelle 15: Benötigtes Material sowie Materialkosten für das Deckensegel

Material	Preis [€]	Kosten je Modul [€]
Glattkantbrett (120mm x 18mm x 3000mm)	ca. 1,00/m	7,00
Alternativ: Brettschichtholz	ca. 2,00/m	14,00
Winkel	ca. 1,00/Stk.	8,00
Ösenschrauben	ca. 0,06/Stk.	1,00
Drahtseil für Stabilisierungsnetz	ca. 0,10/m	2,00
Stoff	ca. 4,00/m ²	20,00
Alternativ: Akustikstoff	ca. 9,00/m ²	45,00
Steinwolle (60mm)	ca. 14,00/m ²	28,00
Schrauben (Aufhängung)	ca. 0,30/Stk.	2,00
Pressklammern (Fixierung Drahtseilschlinge)	ca. 0,20/Stk.	2,00
Drahtseil (Aufhängung)	ca. 1,15/Stk.	5,00
Gesamtkosten für ein Modul:		69,00
Quadratmeterpreis des Moduls:		34,50

Dieses Deckenmodul ist im Vergleich zu den vorgefertigten Deckensegeln vergleichbarer Dicke um mehr als 50% günstiger.

4.2 Sanierungsvarianten

Je nachdem, ob die Kosten und/oder der zeitliche Aufwand limitiert werden müssen, können mit den in Kapitel 4.1 vorgestellten Absorbermodulen unterschiedliche Sanierungsvarianten realisiert werden. Der Fokus dieses Kapitels wird zum einen auf die günstigste und zum anderen auf die komfortabelste Sanierungsvariante mit minimaler Eigenleistung gelegt. Die kostengünstigsten Varianten können mit einer Kombination aus vorgefertigten sowie selbst hergestellten Absorbern realisiert werden. Die komfortabelste, aber auch teuerste Lösung ist der Innenausbau mit Gipskartonplatten, der durch den Fachbetrieb erfolgt.

4.2.1 Sanierung mit Absorbermodulen

Betrachtet man in Abbildung 83 die Nachhallzeit von Raum 005 im nicht sanierten Zustand (rot), so sieht man, dass die Nachhallzeit im gesamten Frequenzbereich stark erhöht ist, vor allem aber im tieffrequenten Bereich. Die Sanierungsvariante mit dem geringstem Montageaufwand und den zugleich niedrigsten Kosten ist der Einsatz der Melaminharzschaumplatten aus Abbildung 58.

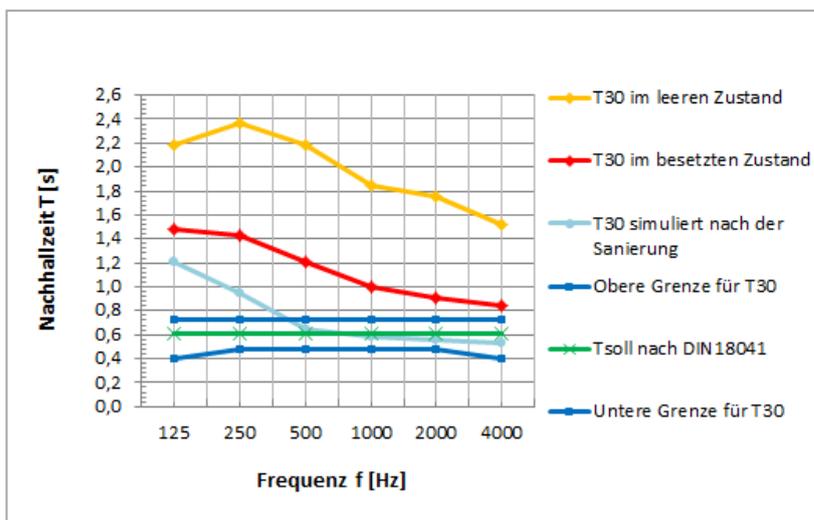


Abbildung 83: Sanierung mit Melaminharzschaumplatten (30m²)

Diese Variante ist sowohl kostengünstig als auch mit geringem Montageaufwand zu realisieren. Die Sollnachhallzeit nach Norm kann im tieffrequenten Bereich allerdings nicht zur Gänze erreicht werden, da die Melaminharzschaumplatten diesen Bereich nicht ausreichend bedämpfen.

Um auch den tieffrequenten Bereich besser zu bedämpfen, bieten sich die selbst erstellten und daher ebenfalls kostengünstigen Plattenabsorber aus Abbildung 76 an. Werden sowohl an der rückwärtigen Wand als auch an der Wand gegenüber der Fensterfront durchgehend Plattenabsorber im Bereich unterhalb von 2m montiert (in Summe 26m²), kann die Nachhallzeit, wie Abbildung 84 auf der nachfolgenden Seite zeigt, weiter reduziert werden.

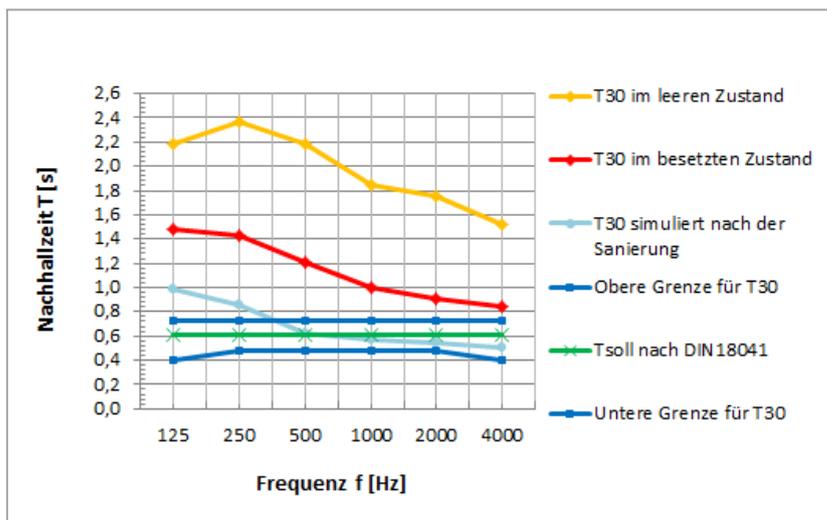


Abbildung 84: Sanierung mit Melaminharzschäumplatten (30m²) und Plattenabsorbern (26m²)

Die Nachhallzeit liegt zwar noch immer nicht zur Gänze im Toleranzband, es konnte aber bereits eine deutliche Verbesserung erzielt werden. Soll der tieffrequente Bereich noch besser bedämpft werden, können anstatt der vorgefertigten Wandabsorber die selbst hergestellten Wandmodule eingesetzt werden. Diese weisen auf Grund der verwendeten Materialien und dem zusätzlichen Luftpolster einen noch besseren Absorptionswert im tieffrequenten Bereich auf, wie Abbildung 85 zeigt.

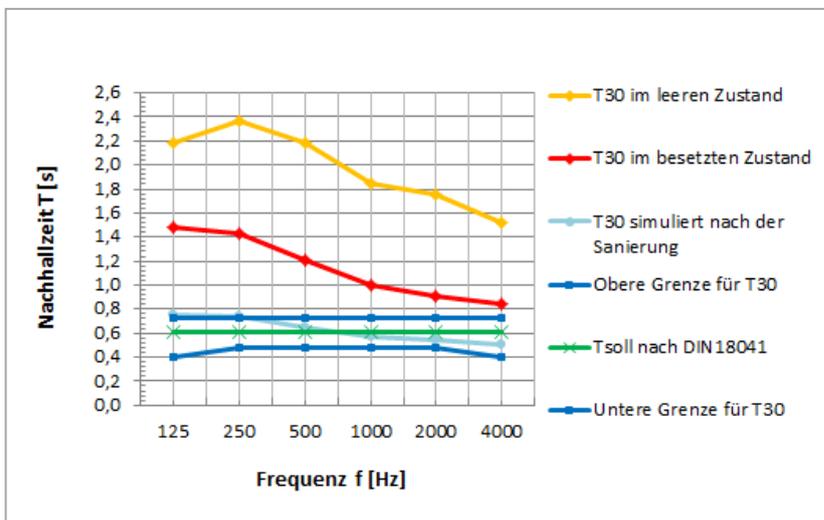


Abbildung 85: Sanierung mit selbst hergestellten Wandmodulen (30m²) und Plattenabsorbern (26m²)

Mit dieser Kombination liegt die Nachhallzeit im gesamten Frequenzbereich innerhalb des Toleranzbandes, allerdings ist die Herstellung der Wandmodule zeitaufwändig.

Ist es nicht gewünscht Module selbst zu erstellen, so können bei der Sanierungsvariante aus Abbildung 84 zusätzlich die Deckensegel aus Abbildung 62 eingesetzt werden. Diese verbessern durch die Abhängung die Absorption im tieffrequenten Bereich und können selbständig montiert werden, da sie keinen Rahmen aufweisen.

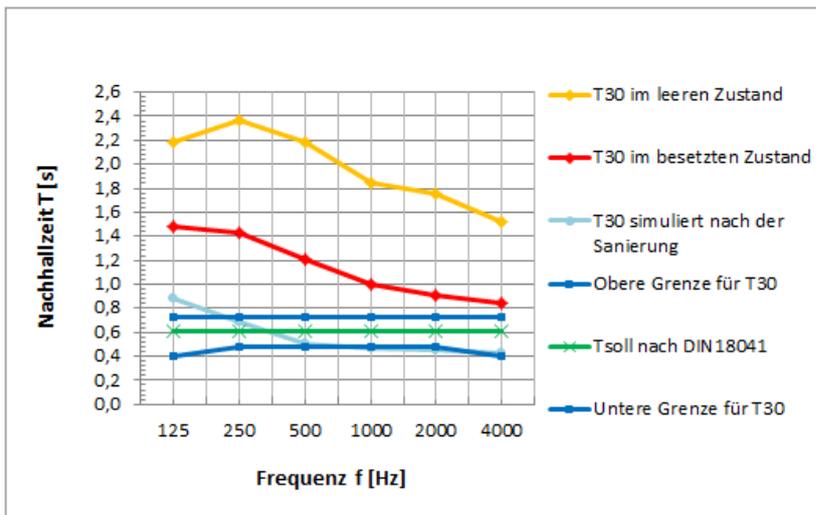


Abbildung 86: Sanierung mit Melaminharzschaumplatten (30m²), Plattenabsorbern (26m²) und vorgefertigten Deckensegeln ohne Rahmen (16 m²)

Würden anstatt der vorgefertigten Deckensegel die selbst hergestellten Deckenmodule verwendet werden, würde die Nachhallzeit auch unterhalb von 250Hz innerhalb des Toleranzbandes liegen (siehe Abbildung 87). Diese Variante wäre auf Grund der erforderlichen Montage durch einen Fachbetrieb jedoch teurer als jene mit den vorgefertigten Deckensegeln.

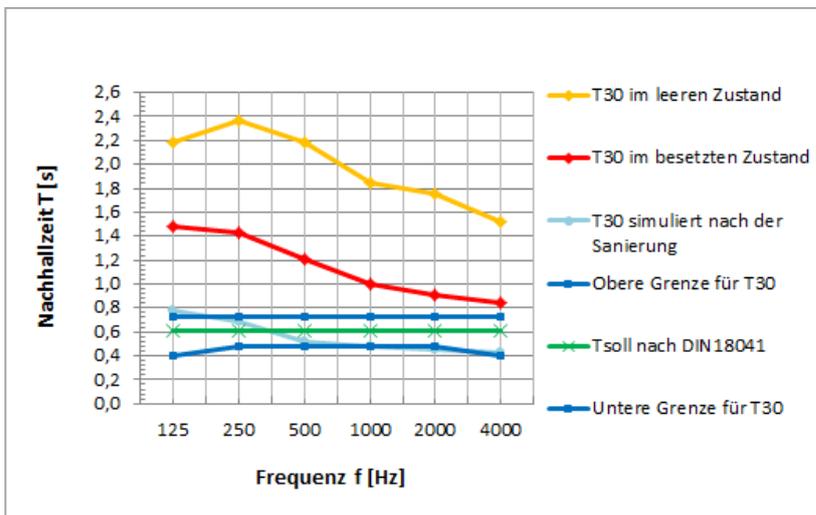


Abbildung 87: Sanierung mit Melaminharzschaumplatten (30m²), Plattenabsorbern (26m²) und selbst hergestellten Deckenmodulen (16 m²)

Tabelle 16 gibt einen Überblick über die Sanierungskosten der Sanierungsvarianten aus Abschnitt 4.2.1.

Tabelle 16: Richtwerte für die Sanierungskosten der Sanierung mit Absorbermodulen

Sanierungsvariante	Absorber/Materialien	m ²	Preis [€]
Variante 1 (Abbildung 83)	Wandabsorber (Basotect,50mm, weiß)	30	834,00
	Klebstoff	-	40,00
			874,00
Variante 2 (Abbildung 84)	Wandabsorber (Basotect,50mm, weiß)	30	834,00
	Plattenabsorber (Spanplatte, 4mm)	26	156,00
	Klebstoff	-	40,00
			1030,00
Variante 3 (Abbildung 85)	Selbst hergest. Wandmodule (Steinwolle)	30	1140,00
	Plattenabsorber (Spanplatte, 4mm)	26	156,00
			1296,00
Variante 4 (Abbildung 86)	Wandabsorber (Basotect,50mm, weiß)	30	834,00
	Plattenabsorber (Spanplatte, 4mm)	26	156,00
	Vorgefertigte Deckensegel (ohne Rahmen)	16	1192,00
			2182,00
Variante 5 (Abbildung 87)	Wandabsorber (Basotect,50mm, weiß)	30	834,00
	Plattenabsorber (Spanplatte, 4mm)	26	156,00
	Selbst hergest. Deckenmodule	16	592,00
	Montagekosten (90.- €/Modul)	-	720,00
			2302,00

4.2.2 Innenausbau mit Gipskartonlochplatten

Basierend auf der akustischen Sanierung des akademischen Gymnasiums in der Bürgergasse in Graz wird in diesem Abschnitt die Alternative einer Komplettsanierung durch den Fachbetrieb präsentiert. Da das akademische Gymnasium, wie auch das im Zuge dieser Diplomarbeit vermessene Keplergymnasium, ein Altbau ist, weisen die Räume eine ähnliche Nachhallzeit auf, sodass eine akustische Sanierung notwendig war.



Abbildung 88: Akustische Sanierung mit Gipskartonlochplatten, Rückseite des Klassenzimmers



Abbildung 89: Akustische Sanierung mit Gipskartonlochplatten, Frontseite des Klassenzimmers

Wie in Abbildung 88 und Abbildung 89 zu sehen ist, wurde die akustische Sanierung des akademischen Gymnasiums mit Gipskartonlochplatten, die wiederum mit Glaswolle hinterlegt sind, durchgeführt. Diese professionelle Sanierungsvariante ist optisch sehr ansprechend, dafür aber mit höheren Kosten verbunden, als die selbständige Sanierung mittels Absorbermodulen.

Wie Tabelle 17 zeigt, ist es ratsam mehrere Angebote einzuholen, da die Firmen abhängig von der aktuellen Auftragslage u.U. enorme Rabatte gewähren.

Tabelle 17: Angebote für die akustische Sanierung mit Gipskartonlochplatten für 65 m²

Kostenstelle	Firma 1	Firma 2	Fa. Trotek
Decke	4.550,00	4.524,00	3.070,00
Fries	405,00	170,00	68,00
Regie (Transport)	63,00	63,00	20,00
Montagekosten (240h)	2.700,00	2640,00	2.400,00
Malerkosten (Firma3)	260,00	260,00	260,00
Gesamt Brutto	7.978,00	7.656,00	5.802,00
Teurer als Trotek	+38%	+32%	Bezugspreis
Euro/m² - gesamt	122,00	117,00	90,00

Es sei darauf hingewiesen, dass dies nur ein grober Richtwert ist, da die Angebote stark von der vorhandenen Raumsituation (Zugänglichkeit, Bausubstanz etc.) abhängen!

Tabelle 18 stellt zusammenfassend die Kosten der in diesem Kapitel präsentierten Sanierungsvarianten gegenüber. Die Angegebenen Richtwerte beinhalten Material- und Montagekosten.

Tabelle 18: Gegenüberstellung der Sanierungskosten für Raum005

Sanierungsvarianten	Gesamtkosten [€]
Variante 1: Wandabsorber (Basotect, 50mm, weiß, 30m ²)	ca. 874,00
Variante 2: Wandabsorber (Basotect, 50mm, weiß, 30m ²) Selbst hergestellte Plattenabsorber (Spanplatte, 8mm, 26m ²)	ca. 1030,00.-
Variante 3: Selbst hergestellte Wandmodule (Steinwolle, 30m ²) Selbst hergestellte Plattenabsorber (Spanplatte, 8mm, 26m ²)	ca. 1296,00.-
Variante 4: Wandabsorber (Basotect, 50mm, weiß, 30m ²) Selbst hergestellte Plattenabsorber (Spanplatte, 8mm, 26m ²) Vorgefertigte Deckensegel (Basotect, ohne Rahmen, 16m ²)	ca. 2182,00.-
Variante 5: Wandabsorber (Basotect, 50mm, weiß, 30m ²) Selbst hergestellte Plattenabsorber (Spanplatte, 8mm, 26m ²) Selbst hergestellte Deckenmodule (Steinwolle, 16m ²)	ca. 2302,00.-
Variante 6: Komplettsanierung der Deckenfläche (52 m ²) mit Gipskartonlochplatten durch den Fachbetrieb	ca. 4680,00.-

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bereits mit geringem Aufwand eine starke Verbesserung der Nachhallzeit erreicht werden kann. Legt man Wert darauf, dass die Nachhallzeit im gesamten Frequenzbereich innerhalb des Toleranzbandes ist, so müssen höhere Sanierungskosten in Kauf genommen werden. Die Komplettsanierung durch den Fachbetrieb ist die komfortabelste, aber auch teuerste Lösung.

Die in diesem Kapitel erstellten Sanierungsvarianten wurden mit dem im Rahmen dieser Diplomarbeit entwickelten Simulationstool erarbeitet. Dieses, im nachfolgenden Kapitel präsentierte Tool, ermöglicht dem Laien eine automatisierte Verarbeitung der Messdaten sowie die Simulation des sanierten Zustandes.

5 Simulationstool für die akustische Sanierung

Das in Excel entwickelte Simulationstool ermöglicht es, die Messdaten zu importieren, den akustischen Zustand des gemessenen Raumes zu verifizieren sowie die akustischen Parameter für den sanierten Zustand zu simulieren. Es wurde darauf geachtet, dass die Bedienung des Tools intuitiv ist und eine korrekte Verarbeitung der Daten durch Sicherheitsfunktionen sichergestellt wird. Das Simulationstool ist in drei grundlegende Bereiche gegliedert. Allem voran werden die Basisdaten des Klassenraumes abgefragt und daraus automatisch die grundlegenden Parameter hinsichtlich akustisch nutzbarer Fläche und Nachhallzeit ermittelt. Im Anschluss werden die Messwerte über ein Dialogfenster ausgewählt sowie importiert. Im dritten Bereich des Simulationstools erfolgen die Verarbeitung und Darstellung der Messdaten sowie die Simulation des sanierten Zustandes.

5.1 Eingabe der Basisdaten

Im ersten Karteireiter sind vom User die grundlegenden Parameter wie Raumabmessung, Anzahl der Schüler sowie die akustisch nicht nutzbare Fläche einzutragen. Basierend darauf werden die einzelnen Raumflächen, die Sollnachhallzeit und das dafür gültige Toleranzband nach DIN18041 ermittelt und grafisch dargestellt. Die Formel für die ermittelte Sollnachhallzeit nach Norm ist wie folgt:⁸⁵

$$T_{soll} [s] = 0,32 \log \left(\frac{V}{m^3} \right) - 0,17$$

Zusätzlich ist es möglich, das Baujahr des zu messenden Raumes auszuwählen, wodurch, basierend auf den Messergebnissen von Müller⁸⁶, die in etwa zu erwartende Nachhallzeit dargestellt wird.

Abbildung 90 auf der nachfolgenden Seite zeigt den ersten Karteireiter des Simulationstools, in dem die Eingabe und die Verarbeitung der Basisdaten erfolgt. Sämtliche rot hinterlegten Felder sind vom User einzugeben, die Werte der grau hinterlegten Felder werden auf Grund hinterlegter Formeln automatisch berechnet und sind für Anwendereingaben gesperrt. Sollten die in den weißen Flächen angeführten Begriffe nicht verständlich sein, bieten die eingefügten Kommentare, die durch Anklicken der jeweiligen Zelle erscheinen, die Möglichkeit nähere Informationen, hinterlegte Formeln und Definition abzurufen.

⁸⁵ siehe [DIN 18041]

⁸⁶ [MUELLER]

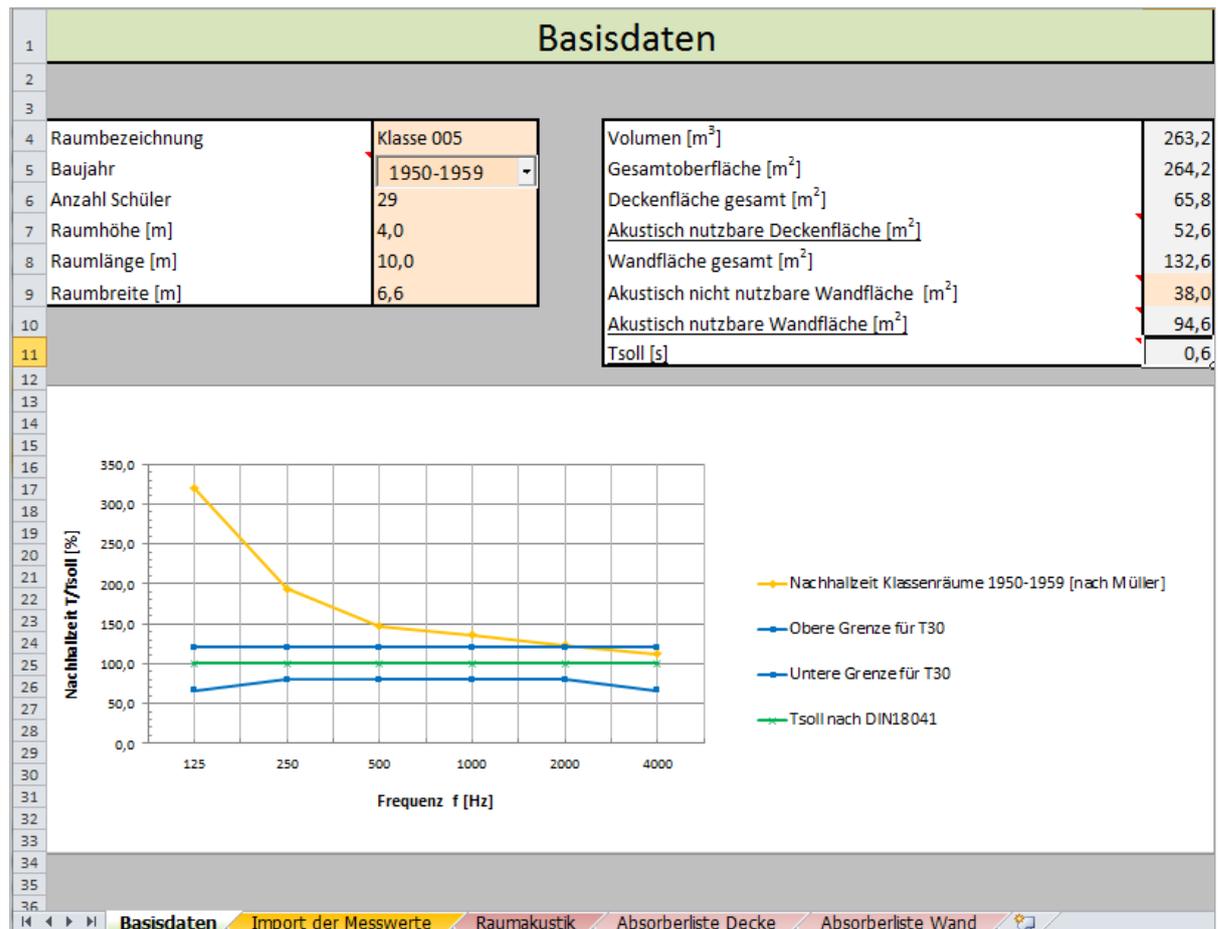


Abbildung 90: Eingabe sowie Ermittlung der Basisdaten

5.2 Import der Messwerte

Im zweiten Karteireiter des Simulationstools erfolgt der Import der Messdateien. Sie werden im CSV-Format von Arta exportiert und müssten vor der weiteren Verarbeitung manuell formatiert werden. Da in Summe je Raum mindestens 10 Messdateien vorliegen, wären der manuelle Import sowie die Formatierung sehr aufwändig und zudem eine potentielle Fehlerquelle. Um diesen Datenimport rasch und vor allem fehlerfrei zu realisieren, bietet das, durch eine Makro-Programmierung implementierte Dialogfeld die Möglichkeit, die Dateien auf Knopfdruck zu importieren.

Die Messdateien können einzeln, aber auch vollständig auf einmal geladen werden. Sowohl der Name der ausgewählten Messdatei, als auch deren Werte, werden automatisch formatiert und in der rechten Tabelle aus Abbildung 91 übernommen. Ebenso wird der Name in der linken Tabelle eingetragen und auf Fehler überprüft.

Sowohl die Spalte mit den Frequenzwerten, als auch jene mit der Nachhallzeit sind als Pflichtfelder definiert und werden hinsichtlich möglicher Fehler (z.B. fehlende oder fehlerhafte Werte) überprüft. Liegt ein Fehler vor, so wird dies im Feld „Status“ durch den Eintrag „Fehler“ angezeigt. Ist die Messdatei korrekt so erscheint ein entsprechendes „OK“.

Import der Messwerte																		
Raum war bei Messung: besetzt		⚠ Achtung! Der Besetzungszustand des Klassenraumes muss eingetragen werden!																
STI und %Alcons müssen für alle Messdateien ausgefüllt werden!																		
Messwerte importieren	STI		%Alcons	Entfernen	Status	Messdatei	F (Hz)	T30 (s)	rT30	T20 (s)	rT20	T10 (s)	rT10	EDT (s)	C80 (dB)	C50 (dB)	D50 (%)	Ts (ms)
Messwerte entfernen	male	female																
Messdatei / Mittelwert	0,6373	0,6447	5,85%															
Raum005_L1_M1	0,6336	0,6416	6,00%		OK	Raum005_L1_M1	63	1,69	-1	1,549	-0,99	1,41	-0,97	0,80	7,09	3,29	68,07	123,29
Raum005_L1_M1	0,6273	0,6363	6,30%		OK	Raum005_L1_M1	125	1,40	-1	1,438	-1	1,38	-1	1,37	0,94	-1,72	40,25	115,18
Raum005_L1_M2	0,6928	0,7028	4,49%		OK	Raum005_L1_M1	250	1,47	-1	1,491	-1	1,60	-1	1,35	-0,05	-3,35	31,6	110,52
Raum005_L1_M3	0,6076	0,6135	6,76%		OK	Raum005_L1_M1	500	1,22	-1	1,186	-1	1,29	-0,99	1,26	1,47	-0,5	47,13	82,54
Raum005_L1_M4	0,6175	0,6208	6,26%		OK	Raum005_L1_M1	1.000	1,02	-1	1,001	-1	0,86	-1	0,86	3,98	0,67	53,86	61,54
Raum005_L1_M5	0,6344	0,6399	5,72%		OK	Raum005_L1_M1	2.000	0,91	-1	0,905	-1	0,92	-1	1,02	4,71	2,15	62,15	56,11
Raum005_L2_M1	0,6429	0,6519	5,68%		OK	Raum005_L1_M1	4.000	0,85	-1	0,853	-1	0,87	-1	0,86	6,66	4,15	72,21	43,00
Raum005_L2_M2	0,6416	0,6519	5,71%		OK	Raum005_L1_M1	8.000	0,70	-1	0,686	-1	0,69	-1	0,69	7,75	4,42	73,47	37,51
Raum005_L2_M3	0,6339	0,6426	6,00%		OK	Raum005_L1_M2	63	1,72	-1	1,65	-0,99	1,50	-0,98	1,62	0,92	0,68	53,9	135,24
Raum005_L2_M4	0,6415	0,6456	5,60%		OK	Raum005_L1_M2	125	1,56	-1	1,517	-1	1,59	-0,99	1,62	-0,04	-5,19	23,23	135,67
Raum005_L2_M5						Raum005_L1_M2	250	1,41	-1	1,459	-0,99	1,66	-1	1,44	-0,76	-4,09	28,08	118,22
Raum005_L3_M1					Fehler	Raum005_L1_M2	500	1,19	-1	1,135	-1	1,18	-0,99	1,24	2,06	-0,92	44,7	84,94
						Raum005_L1_M2	1.000	0,96	-1	0,957	-1	1,01	-1	1,06	4,34	1,46	58,34	62,72
						Raum005_L1_M2	2.000	0,86	-1	0,89	-1	0,91	-1	0,93	5,64	2,43	63,65	48,83
						Raum005_L1_M2	4.000	0,84	-1	0,831	-1	0,80	-1	0,83	6,49	3,63	69,76	42,36
						Raum005_L1_M2	8.000	0,73	-1	0,706	-1	0,70	-1	0,65	8,42	5,06	76,23	33,46
						Raum005_L1_M3	63	1,67	-1	1,759	-1	1,56	-0,98	1,51	-3,4	-3,53	30,74	167,43
						Raum005_L1_M3	125	1,30	-1	1,345	-1	1,44	-0,99	1,57	2,89	-1,8	39,78	102,88
						Raum005_L1_M3	250	1,37	-1	1,254	-1	1,29	-1	1,29	3,79	0,75	54,3	73,74
						Raum005_L1_M3	500	1,24	-1	1,201	-1	1,22	-1	1,13	3,58	1,44	58,21	62,66
						Raum005_L1_M3	1.000	1,01	-1	0,985	-1	0,97	-1	1,07	6,32	4,15	72,23	41,29
						Raum005_L1_M3	2.000	0,94	-1	0,934	-1	0,93	-1	0,97	8,35	6,19	80,63	27,87
						Raum005_L1_M3	4.000	0,85	-1	0,852	-1	0,80	-1	0,86	7,77	5,17	76,68	31,30
						Raum005_L1_M3	8.000	0,70	-1	0,683	-1	0,66	-1	0,68	10,06	7,03	83,48	22,71
						Raum005_L1_M4	63	1,69	-1	1,75	-1	1,73	-0,98	1,63	3,3	-1,96	38,88	150,84

Abbildung 91: Import der Messwerte

Ein Export der Werte für STI sowie %Alcons aus Arta (Definition siehe Kapitel 2.1) ist nicht möglich, sodass diese Daten manuell eingetragen werden müssen. Es wird daher automatisch überprüft, ob für alle importierten Werte sowohl der STI, als auch der %Alcons eingetragen wurden. Ist dies nicht der Fall, wird oberhalb der linken Tabelle eine Warnung angezeigt. Auch das Entfernen einer Messdatei ist möglich. Durch eine entsprechende Markierung der Datei in der Spalte „Entfernen“ sowie anklicken des Feldes „Messwerte entfernen“ werden nach einer Sicherheitsabfrage die Messwerte entfernt. Neben der Nachhallzeit werden in der rechten Tabelle noch zusätzliche Parameter angeführt. Für die weiteren Betrachtungen wird nur die Nachhallzeit herangezogen, die restlichen Werte werden dennoch in der Tabelle belassen, um dem Anwender bei Bedarf zur Verfügung zu stehen. Damit die weitere Verarbeitung der Messdateien richtig erfolgt, ist es zuletzt noch nötig den Besetzungszustand des gemessenen Raumes anzugeben. Darauf basierend erfolgt die weitere Analyse der Messdaten, wie auch die Simulation der akustischen Parameter.

5.3 Verarbeitung & Simulation der akustischen Parameter

Im dritten Karteireiter des Simulationstools werden die importierten Messdaten verarbeitet und die akustischen Parameter sowohl tabellarisch als auch grafisch angezeigt. Ebenso gibt es ein eigenes Eingabefeld in dem die, für die Sanierung gewünschten Absorber, ausgewählt werden können. An Hand dieser Auswahl erfolgt die Simulation der Nachhallzeit. Um eine Auswahl treffen zu können, muss zuerst analysiert werden, wie stark die Nachhallzeit von den Sollwerten der Norm abweicht. Abhängig von der Angabe des Besetzungszustandes in Karteireiter zwei wird im dritten Karteireiter automatisch der Mittelwert der Nachhallzeit für den angegebenen Zustand ermittelt.

Damit die Nachhallzeit sowohl im leeren als auch im besetzten Zustand vorliegt, wird der Wert für den jeweils nicht gemessenen Zustand an Hand folgender Formeln berechnet:

$$T_{besetzt} = \frac{0,163 \cdot T_{leer} \cdot V}{A_{Schüler} \cdot T_{leer} + 0,163 \cdot V}$$

$$T_{leer} = \frac{0,163 \cdot T_{besetzt} \cdot V}{-A_{Schüler} \cdot T_{besetzt} + 0,163 \cdot V}$$

Die Absorptionsfläche der Schüler wird, wie in Kapitel 2.1 angeführt, der Norm DIN18041 entnommen. Abbildung 92 zeigt die tabellarische und grafische Darstellung der Nachhallzeit. Rechts neben der Tabelle hat man die Möglichkeit auszuwählen, welche Kurven dargestellt werden sollen. Da sich die Achse automatisch auf den maximalen Wert der angezeigten Kurven anpasst, kann man durch auswählen nur einer Kurve diese vergrößert darstellen.

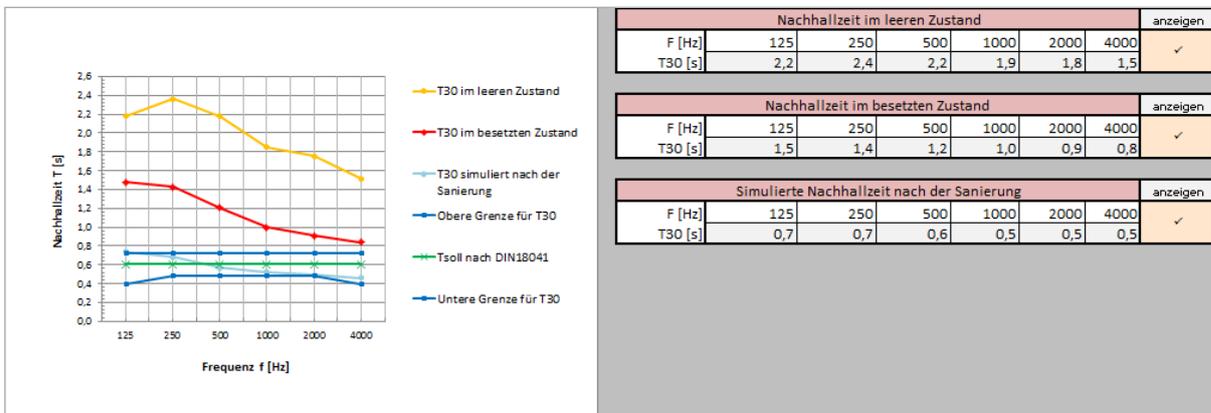


Abbildung 92: Tabellarische sowie grafische Darstellung der Nachhallzeit

Wie in Abbildung 93 dargestellt, werden die zur Erreichung von T_{soll} erforderliche äquivalente Absorptionsfläche sowie die äquivalente Absorptionsfläche der ausgewählten Absorber tabellarisch und grafisch angeführt. Die äquivalente Absorptionsfläche zur Erreichung von T_{soll} wird an Hand folgender Formel berechnet:

$$A_{zus} = 0,163 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{T_{soll}} - \frac{1}{T_{ist}} \right) [m^2]$$

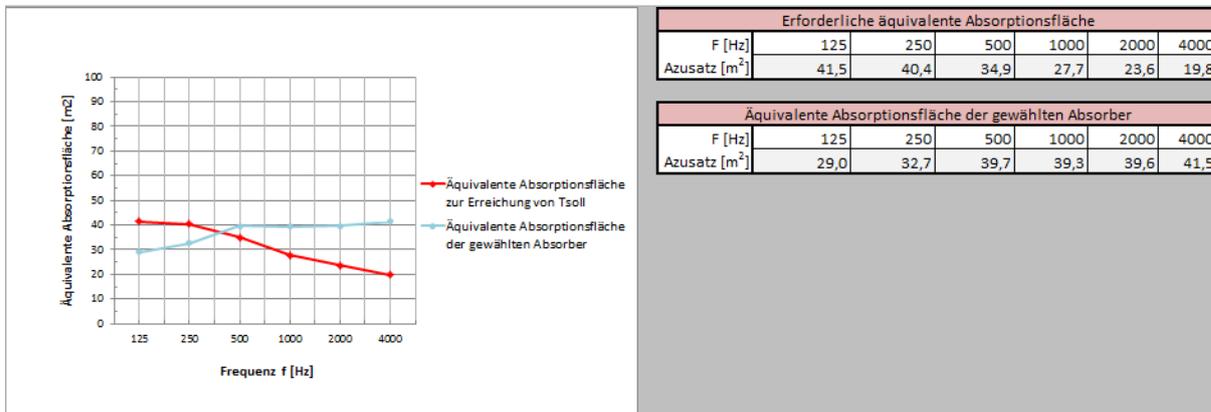


Abbildung 93: Darstellung der äquivalenten Absorptionsfläche

Das Eingabefeld für die Auswahl der Absorber wurde wie folgt umgesetzt:

Element	Absorbertyp	m ²	Preis		
Decke (Teil1)	Deckensegel 50 - 2450x1200 - o.R	22	1639	max. erlaubte m ² : (Gesamte Deckenfläche)	46,06
Decke	Deckensegel 50 - 2450x1200 - o.R Deckensegel 50 - 3000x1250 - m.R				
Wand	Deckensegel 50 - 2500x1250 - m.R	30	150	max. erlaubte m ² : (Gesamte Wandfläche)	46,32
Wand	Deckenmodul (Holzfaser) 80 - 1200x625	18			
Wand	Deckenmodul (Steinwolle) 30 - 1200x625				
Wand (Teil4)					
Materialkosten gesamt			1788,78		

Abbildung 94: Auswahl der Absorber sowie Ermittlung der Materialkosten

Es können sowohl für den Decken-, als auch für den Wandbereich mehrere Absorber ausgewählt werden. Neben der Auswahl des Absorbertyps ist auch die gewünschte Fläche einzutragen. Sollte die maximal zur Verfügung stehende akustische Fläche überschritten werden, so erscheint eine Warnmeldung.

Abhängig von den selektierten Absorbern und der gewählten Quadratmeteranzahl werden sowohl die Materialkosten, als auch die äquivalente Absorptionsfläche, wie auch die für den sanierten Zustand simulierte Nachhallzeit ermittelt und grafisch dargestellt (siehe Abbildung 92 und Abbildung 93). Die simulierte Nachhallzeit nach der Sanierung wird an Hand folgender Formel berechnet:

$$T_{sim} = \frac{0,163 \cdot T_{leer} \cdot V}{(A_{Schüler} + A_{zus}) \cdot T_{leer} + 0,163 \cdot V}$$

Die Produktdetails der Absorber befinden sich in eigenen Karteireitern wie Abbildung 95 und Abbildung 96 zeigen. In dieser Absorberdatenbank sind jeweils die Dimensionen, der Absorptionsgrad sowie der Quadratmeterpreis und der Hersteller angegeben. Ebenso ist angeführt, ob der Absorber mit oder ohne Fase ausgeführt ist und auf welchen Abstand der Absorptionsgrad bezogen ist. Die Datenbank kann nach Bedarf auch individuell erweitert werden.

Absorberdatenbank - Absorberliste Decke														
Absorbername in Liste	Parameter					Absorptionswert je Frequenz					Preis/m ²	Firma	Produkt	
	Dicke [mm]	Länge [mm]	Breite [mm]	Fase	Abstand [mm]	125	250	500	1000	2000				4000
Deckensegel 20 - 2450 x 1250 - m.R	20	2450	1250	x	100	0,18	0,47	0,96	1,00	1,00	1,00	45,00	Ziegler	Deckensegel mit Rahmen
Deckensegel 20 - 2450 x 1250 - m.R	20	2450	1250	x	300	0,38	0,50	0,80	1,00	1,00	1,00	45,00	Ziegler	Deckensegel mit Rahmen
Deckensegel 50 - 2450 x 1200 - o.R	50	2450	1250	x	0	0,22	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	74,49	Schaumstofflager.de	Deckensegel ohne Rahmen
Deckensegel 40 - 3000 x 1250 - m.R	40	3000	1250	x	300	0,30	0,77	1,00	1,00	1,00	1,00	80,00	Ziegler	Deckensegel mit Rahmen
Deckensegel 40 - 2500 x 1250 - m.R	40	2500	1250	x	300	0,30	0,77	1,00	1,00	1,00	1,00	86,00	Ziegler	Deckensegel mit Rahmen
Deckenmodul (Holzfaser) 80 - 1200 x 625	80	1200	625	x	0	0,18	0,43	0,86	0,96	0,88	0,88	46,00	Homatherm	Holzämmmatte flexCL
Deckenmodul (Steinwolle) 30 - 1200 x 625	30	1200	625	x	270	0,72	0,78	0,89	0,93	0,97	1,03	37,00	Knaufinsulation	Steinwollmatte (Feuerschutz)

Abbildung 95: Absorberdatenbank der Deckenabsorber

Absorberdatenbank - Absorberliste Wand														
Absorbername in Liste	Parameter					Absorptionswert je Frequenz					Preis/m ²	Firma	Produkt	
	Dicke [mm]	Länge [mm]	Breite [mm]	Fase	Abstand [mm]	125	250	500	1000	2000				4000
Wandelement (Basotect) 40 - 1250 x 625 - o.F.	40	1250	625	Nein	0	0,33	0,42	0,88	0,98	0,98	0,98	28,00	Ziegler	Plano
Wandelement (Basotect) 40 - 1250 x 625 - m.F.	40	1250	625	Ja	0	0,33	0,42	0,88	0,98	0,98	0,98	30,80	Ziegler	Plano
Wandelement (Basotect) 50 - 1250 x 625 - o.F.	50	1250	625	Nein	0	0,30	0,58	0,90	0,90	0,90	0,90	34,00	Ziegler	Plano
Wandelement (Basotect) 50 - 1250 x 625 - m.F.	50	1250	625	Ja	0	0,30	0,58	0,90	0,90	0,90	0,90	38,00	Ziegler	Plano
Wandelement (Basotect) 50 - 1000 x 500 - o.F.	50	1000	500	Nein	0	0,22	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	27,80	Schaumstofflager.de	Basotect
Wandmodul (Holzfaser) 80 - 1200 x 625	80	1200	625	x	0	0,18	0,43	0,86	0,96	0,88	0,88	42,00	Homatherm	Holzämmmatte flexCL
Wandmodul (Steinwolle) 50 - 1200 x 625	50	1200	625	x	250	0,68	0,76	0,89	0,97	1,00	1,03	38,00	Knaufinsulation	Steinwollmatte (Feuerschutz)
Spanplatte 4 - 2800 x 2070	4	2800	2070	x	50	0,30	0,20	0,15	0,10	0,08	0,10	6,00	Peham	Spanplatte
Spanplatte 4 - 2800 x 2070 (mit Steinwolle)	4	2800	2070	x	50	0,20	0,40	0,20	0,10	0,08	0,10	11,00	Peham	Spanplatte
Spanplatte 8 - 2800 x 2100	8	2800	2100	x	20	0,46	0,24	0,04	0,01	0,01	0,01	4,00	Peham	Spanplatte

Abbildung 96: Absorberdatenbank der Wandabsorber

Neben der Nachhallzeit und der äquivalente Absorptionsfläche werden auch der STI und der %Alcons angeführt. Es werden sowohl die Werte vor, als auch nach der simulierten Sanierung berechnet. Die simulierten Werte nach der Sanierung werden an Hand folgender Formeln berechnet:

$$\text{Artikulationsverlust:}^{87} \quad Al_{cons_{sim}} \approx 200 \cdot \frac{r_{LH}^2 \cdot T_{sim}^2}{\gamma \cdot V}$$

$$\gamma \approx 200 \cdot \frac{r_{LH}^2 \cdot T_{leer}^2}{V \cdot Al_{cons_{leer}}}$$

Da der Bündelungsgrad unabhängig vom Besetzungszustand des Raumes ist, kann γ an Hand der Messwerte des leeren Zustandes berechnet werden. r_{LH} bezeichnet den Abstand von Schallquelle zu Hörer und wird in dieser Formel entsprechend der Klassenraumgröße mit einem Mittelwert von 3 Meter festgelegt.

STI wird für den sanierten Zustand an Hand der Formel von Farrel-Becker berechnet:⁸⁸

$$STI = -0,1845 \cdot \ln(\% Al_{cons_{sim}}) + 0,9842$$

Abbildung 97 zeigt die grafische Darstellung von STI und %Alcons.

STI		Skala			%Alcons		Skala		
vorher	nachher	von	bis	Bewertung	vorher	nachher	von	bis	Bewertung
0,64	0,86				6%	2%			
		0,75	1,00	Sehr gut			20%	100%	Unbrauchbar
		0,60	0,75	Gut					
		0,45	0,60	Angemessen			7%	20%	Befriedigend
		0,30	0,45	Schwach			2%	7%	Gut
		0,00	0,30	Schlecht			0%	2%	Ideal

Abbildung 97: Darstellung von STI und %Alcons

Nachdem mit Hilfe dieses Simulationstools ermittelt wurde, welche Absorber für die Sanierung eingesetzt werden sollen und wie viel Absorbiermaterial jeweils benötigt wird, kann die finale Sanierung umgesetzt werden.

Im Zuge der Sanierung sind neben der Absorbiererauswahl auch Aspekte wie Bau- und Brandschutzvorschriften sowie Sach- und Personenversicherung zu berücksichtigen. Diese Rahmenbedingungen werden im nachfolgenden Kapitel erörtert. Ebenso werden Finanzierungsmöglichkeiten sowie pädagogische Begleitmaßnahmen vorgestellt.

⁸⁷ Siehe [PEUTZ], [KLEIN]

⁸⁸ Siehe [BRUEL&KJAER], [DAVIS], [LAZARUS, S. 277]

6 Rahmenbedingungen der Sanierung

Im Zuge der Sanierung gilt es einige Rahmenbedingungen zu beachten. Neben den baurechtlichen Vorgaben sowie Brandschutzvorschriften sind auch Aspekte der Sach- sowie Personenversicherung zu berücksichtigen. Des Weiteren werden in diesem Kapitel auch pädagogische Begleitmaßnahmen vorgestellt, die zusätzlich zur Sanierung empfohlen werden, um das Bewusstsein für Lärm und dessen Auswirkungen zu schärfen und somit ein ruhigeres Verhalten der SchülerInnen zu fördern. Auch Finanzierungsmöglichkeiten werden erarbeitet, um die, für die Sanierung nötigen finanziellen Mittel lukrieren zu können.

6.1 Baurechtliche Fragen und Brandschutzvorschriften

Je nachdem, welche Sanierungsvariante gewählt wird, ist ggf. die Genehmigung des Eigentümers einzuholen. Für die Montage von Absorbern ist laut BIG (Bundes Immobilien Gesellschaft) keine gesonderte Genehmigung des Eigentümers notwendig, da dies keinen Eingriff in die Bausubstanz darstellt. Wird allerdings eine Deckenabsenkung, wie in Kapitel 0 vorgestellt, vorgenommen, so ist dies ein Eingriff in die Bausubstanz und Bedarf daher der Genehmigung durch den Eigentümer. Bezüglich Brandschutzvorschriften regelt die OENORM B 3806⁸⁹ die Anforderungen an das Brandverhalten von Bauprodukten bzw. Baustoffen. In dieser Norm wird eine Einteilung in sechs Gebäudeklassen (GK) getroffen.

Tabelle 19: Mögliche Gebäudeklassen für Schulgebäude [OENORM B 3806, S.5]

GK	Eigenschaften
GK 1	Umfasst freistehende, an mindestens 3 Seiten auf eigenem Grund bzw. einer Verkehrsfläche für die Brandbekämpfung von außen zugängliche Gebäude mit nicht mehr als 3 oberirdischen Geschoßen und mit einem Aufenthaltsraumniveau von nicht mehr als 7m sowie einer Wohnung oder einer Betriebseinheit von jeweils nicht mehr als 400m ² Grundfläche
GK 2	Umfasst Gebäude mit nicht mehr als 3 oberirdischen Geschoßen und mit einem Aufenthaltsraumniveau von nicht mehr als 7m und höchstens drei Wohnungen bzw. Betriebseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400m ² Grundfläche; desgleichen Reihenhäuser mit nicht mehr als drei oberirdischen Geschoßen und mit einem Aufenthaltsraumniveau von nicht mehr als 7m und Wohnungen bzw. Betriebseinheiten von jeweils nicht mehr als 400 m ² Grundfläche
GK 3	Umfasst Gebäude mit nicht mehr als 3 oberirdischen Geschoßen und mit einem Aufenthaltsraumniveau von nicht mehr als 7m, die nicht in die Gebäudeklasse 1 oder 2 fallen.
GK 4	Umfasst Gebäude mit nicht mehr als vier oberirdischen Geschoßen und mit einem Aufenthaltsraumniveau von nicht mehr als 11 m und nur einer Betriebseinheit ohne Begrenzung der Grundfläche od. mehreren Wohnungen /Betriebseinheiten von jew. nicht mehr als 400 m ² Grundfläche
GK 5	umfasst Gebäude mit einem Aufenthaltsraumniveau von nicht mehr als 22 m, die nicht in die Gebäudeklassen 1, 2, 3 oder 4 fallen, sowie Gebäude, die vorwiegend aus unterirdischen Geschoßen bestehen

⁸⁹ [OENORM B 3806]

Tabelle 19 zeigt die für Schulgebäude möglichen Gebäudeklassen. Das sogenannte Aufenthaltsraumniveau ist in der Norm wie folgt definiert: „Höhendifferenz zwischen der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen oberirdischen Geschoßes und dem tiefsten Punkt auf der Schnittlinie der Gebäudehülle mit der vorhandenen Geländeoberfläche nach Fertigstellung.“⁹⁰

Zusätzlich zu dieser Einteilung gibt es auch Klassen des Brandverhaltens von Bauprodukten:

Tabelle 20: Klassen des Brandverhaltens von Bauprodukten [OENORM B 3806]

Kategorie	Klasse
Brandverhalten	A1, A2 – nicht brennbar B, C – schwer brennbar D, E – normal brennbar F – leicht brennbar
Rauchentwicklung	s1 – schwach qualmend s2 – leicht qualmend s3 – stark qualmend
Abtropfen bzw. Abfallen	d0 – kein brennendes Abtropfen d1 – kein fortdauerndes Abtropfen d2 – kein Abtropfen

Die raumseitige Wandbekleidung muss je nach Gebäudeklasse gewissen Anforderungen entsprechen. Abbildung 98 zeigt die erforderlichen Klassen des Brandverhaltens in Abhängigkeit von der Gebäudeklasse.

6.3 Raumseitige Wandbekleidungen und –beläge							
Die Anforderungen gelten auch für Dachschrägen.							
Tabelle 2							
Bauteil	Gebäudeklassen						
	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5	Hochhäuser	
6.3.1 Raumseitige Wandbekleidungen, ausgenommen im Verlauf von Fluchtwegen							
6.3.1.1 Klassifiziertes System	D	D	D	D	D	B	
oder							
6.3.1.2 Aufbau mit folgenden klassifizierten Komponenten							
– Bekleidung	D	oder B	D	oder B	D	oder B	C ¹⁾
– Dämmschicht	C	oder E	C	oder E	C	oder E	B
						oder D	B
						oder D	A2 ²⁾
6.3.2 Raumseitige Wandbekleidungen im Verlauf von Fluchtwegen³⁾							
6.3.2.1 Klassifiziertes System ⁴⁾	nicht zutreffend	D	C	B	A2	A2	
oder							
6.3.2.2 Aufbau mit folgenden klassifizierten Komponenten							
– Bekleidung ⁴⁾	nicht zutreffend	D	C ⁵⁾	A2	B	A2	B
– Unterkonstruktion	nicht zutreffend	D	A2 ⁵⁾	oder A2 ⁵⁾	A2 ⁵⁾	oder A2 ⁵⁾	A2 ⁵⁾
– Dämmschicht	nicht zutreffend	C	B	D	A2 ²⁾	C	A2 ²⁾
						oder B	A2 ²⁾
6.3.3 Raumseitige Wandbeläge im Verlauf von Fluchtwegen⁶⁾							
– Gänge	nicht zutreffend	D	C-s1,d0 ⁵⁾	C-s1,d0	B-s1,d0	A2-d0	
– Treppenhäuser	nicht zutreffend	D	C-s1,d0 ⁵⁾	A2-s1,d0	A2-s1,d0	A2-s1,d0	

¹⁾ Bei Verwendung von Dämmschichten der Klasse A2 sind auch Holz und Holzwerkstoffe der Klasse D gemäß EN 13986 zulässig.
²⁾ Bei Mantelbeton sind auch Dämmschichten der Klasse B zulässig.
³⁾ Fehlen in Gängen und Treppen im Verlauf von Fluchtwegen Wandbeläge, gelten für die Bekleidung zutreffendenfalls die höheren Anforderungen für Wandbeläge gemäß 6.3.3.
⁴⁾ Die Oberflächen der Wandbekleidungen müssen geschlossen sein.
⁵⁾ Es sind auch Holz und Holzwerkstoffe der Klasse D gemäß EN 13986 zulässig.
⁶⁾ Die Anforderungen gelten unter Berücksichtigung der Befestigung und einer allfälligen Endbehandlung.

Abbildung 98: Brandschutzvorschriften für die raumseitige Wandbekleidung [OENORM 3806]

⁹⁰ Siehe [OENORM B 3806, S.4]

Der in Abbildung 98 verwendete Begriff „Bekleidung“ wird von der Norm wie folgt definiert: „Schichten eines Bauteils, die die Erfüllung einer oder mehrerer der nachstehenden Anforderungen sicherstellen helfen: Brand-, Wärme-, Schall- und Wetterschutz bzw. Tragfähigkeit.“⁹¹

Die in Abbildung 98 genannten Euroklassen entstammen der ÖNORM EN 13501-1.⁹² Dies ist eine europaweite Richtlinie, die als Bewertungsmaßstab für das Brandverhalten von Baustoffen und Baumaterialien dient, und dieses folgendermaßen unterteilt:

Tabelle 21: Brandschutzklassen [EN 13501 Teil 1]

Bauaufsichtliche Anforderungen	Europäische Klasse nach EN 13501-1	Einheit Plattendicken	
		kein Rauch	kein brennendes Abfallen/Abtropfen
Nicht brennbar	A1	x	x
	A2 - s1, d0	x	x
Schwer entflammbar	B - s1, d0 C - s1, d0	x	x
	A2 - s2, d0 A2 - s3, d0 B - s2, d0 B - s3, d0 C - s2, d0 C - s3, d0		x
	A2 - s1, d1 A2 - s1, d2 B - s1, d1 B - s1, d2 C - s1, d1 C - s1, d2	x	
	A2 - s3, d2 B - s3, d2 C - s3, d2		
Normal entflammbar	D - s1, d0 D - s2, d0 D - s3, d0 E		x
	D - s1, d2 D - s2, d2 D - s3, d2		
	E - d2		
Leicht entflammbar	F		

⁹¹ Siehe [ÖNORM B 3806, S.4]

⁹² [EN 13501-1]

Die ÖNORM EN 13501 löste die ÖNORM B 3800-1⁹³ ab, dennoch beziehen sich Hersteller vereinzelt nach wie vor auf diese, sodass sie an dieser Stelle ergänzend angeführt wird:

Tabelle 22: Brandschutzklassen nach ÖNORM B 3800-1

Kategorie	Klasse
Brandverhalten	A – nicht brennbar B ₁ – schwer brennbar B ₂ – normal brennbar B ₃ – leicht brennbar
Rauchentwicklung	Q1 – schwach qualmend Q2 – normal qualmend Q3 – stark qualmend
Abtropfen bzw. Abfallen	Tr ₁ – nicht tropfend Tr ₂ – tropfend Tr ₃ – zündend tropfend

Vereinzelt beziehen sich Hersteller auch auf folgende Baustoffklassen nach DIN 4102, Teil1:

Tabelle 23: Brandschutzklassen [DIN 4102-1]

Bauaufsichtliche Anforderungen	Baustoffklasse nach DIN 4102
Nicht brennbare Baustoffe	A A 1 A 2
brennbare Baustoffe	B
schwer entflammbare Baustoffe	B 1
normal entflammbare Baustoffe	B 2
leicht entflammbare Baustoffe	B 3

Auf Grund der unterschiedlichen Normen gibt es keine einheitliche Bezeichnung der Brandklassen. Zusammenfassend kann aber festgehalten werden, dass die Absorber nicht leicht entflammbar sein dürfen. Sie müssen also mindestens der Kategorie „normal bis schwer entflammbar“ angehören. Tabelle 24 zeigt zusammenfassend die jeweils zulässigen Brandschutzklassen für Absorber.

Tabelle 24: Mind. erforderliche Brandschutzklassen für Absorber in Schulgebäuden

Norm	Klasse
OENORM B 3806	Einzelelement: D Kombinationselement: D+C od. B+E
OENORM EN 13501- 1	B, C, D, E
OENORM B 3800-1	B1, B2
DIN 4102-1	B1, B2

⁹³ [OENORM 3800-1]

6.2 Aspekte der Sach- sowie Personenversicherung

Um sicherstellen zu können, dass im Zuge der Sanierung weder Sach- noch Personenschaden entsteht der ggf. von den ausführenden Privatpersonen getragen werden muss, sollte bereits im Vorfeld der Sanierung durch einen Fachexperten überprüft werden, ob die Bausubstanz für die Anbringung der in Kapitel 4 präsentierten Absorber geeignet ist.

Neben der Prüfung der Bausubstanz gilt es ebenfalls zu beachten, dass bestimmte Sanierungsvarianten (siehe Kapitel 4) ausschließlich von einem Fachbetrieb durchzuführen sind, da eine Fehlmontage durch unsachgemäße Anbringung eine hohe Verletzungsgefahr darstellt. Die Anbringung von Schaumstoffplatten mittels Klebstoff kann beispielsweise auch durch Laien erfolgen, wobei auch hier darauf geachtet werden muss, dass im Zuge der Montage potentielle Gefahren wie z.B. der Sturz von ungesicherten Leitern vermieden werden.

6.3 Finanzierungsmöglichkeiten

Durch die kostengünstigen Sanierungsvarianten in Kapitel 4 ist, im Vergleich zu einer Gesamtsanierung durch den Fachbetrieb, bereits eine deutliche Kostenersparnis möglich. In Summe wird dennoch ein gewisses Budget benötigt, das den Schulen mitunter nicht zur Verfügung steht. Um die Sanierung dennoch zu ermöglichen, werden in diesem Kapitel unterstützende Institutionen und potentielle Sponsoren angeführt. In Anhang C des Leitfadens befindet sich zudem entsprechendes Präsentationsmaterial, das für die Anfragen bei Sponsoren verwendet werden kann.

6.3.1 Schulbezogene Institutionen

In erster Instanz wird die Kontaktierung des Landesschulrates empfohlen, um in Erfahrung zu bringen, ob für Projekte, wie die akustische Sanierung von Klassenräumen, ein Budget zur Verfügung steht. Zusätzlich sollte der Elternverein kontaktiert werden. Eventuell ist durch diesen ebenfalls eine finanzielle Unterstützung möglich.

6.3.2 Externe Institutionen

Stadt Graz

Neben schulbezogenen Institutionen besteht auch die Möglichkeit einer finanziellen Förderung durch externe Institutionen wie beispielsweise die Stadt Graz. Das Amt für Umweltschutz der Stadt Graz überprüft die eingereichten Projekte und fördert innovative und pädagogisch sinnvolle Projekte.

Kontaktdaten:

Amt für Umweltschutz der Stadt Graz

Kaiserfeldgasse 1/IV, 8010 Graz

Tel: 0316/872-4324

Bundesministerium für Unterricht und kulturelle Angelegenheiten

Auch Stiftungen und Fonds, wie der Umwelt- und Gesundheits-Bildungsfond, könnte eine Option für die Finanzierung sein. Der Umwelt- und Gesundheits-Bildungsfonds ist eine Einrichtung des Bundesministeriums für Unterricht und kulturelle Angelegenheiten. Der Fond fördert Initiativen und Projekte zu den Themen "Umwelt" und "Gesundheit" in Schulen. Bewertet werden die Anträge unter Berücksichtigung ökologischer, gesundheitsförderlicher, pädagogischer und ökonomischer Aspekte. Die Anträge sind im Dienstwege einzureichen und werden von einer Kommission bewertet, die über die Vergabe der Förderungsmittel entscheidet.

Kontaktdaten:

Bundesministerium für Unterricht und kulturelle Angelegenheiten; Abteilung V/3
Minoritenplatz 5, 1014 Wien
Ansprechperson: Dr. Beatrix Haller (beatrix.haller@bmuk.gv.at)
Tel.: 01/53120-2533

6.3.3 Diverse Sponsoren

Neben den zuvor genannten Institutionen können auch Firmen, die in Bezug auf deren Produkte SchülerInnen als Zielgruppe haben, kontaktiert werden. Folgende Unternehmen sind für diesen Bereich relevant:

Schulartikel: Libro, Thalia, Pagro, Verlag für Schulbücher
Bekleidung: H&M, Orsay, New Yorker, Pimkie, C&A
Drogerie: BIPA, dm,
Bankwesen: RAIKA, Volksbank, Sparkasse
Medien: Antenne Steiermark, Ö3

Durch Platzierung entsprechender Werbung in den Schulräumen können diese Unternehmen als Sponsoren gewonnen werden. Speziell Libro, Thalia, H&M, BIPA, RAIKA und Antenne Steiermark haben einen starken Fokus auf Werbekampagnen im Sektor der Jugendlichen und sollten daher primär kontaktiert werden.

Auch jene Firmen, von denen die Sanierungsmaterialien bezogen werden, können die Sanierung evtl. als Referenzprojekt oder zu Werbezwecken einsetzen. Dadurch kann zusätzlich zum Mengenrabatt eine Reduzierung des Gesamtpreises erzielt werden.

6.3.4 Spendengenerierung durch Veranstaltungen

Neben der Kontaktierung von Institutionen und Sponsoren besteht auch die Möglichkeit durch Theater- od. Konzertauftritte Spenden zu sammeln. Gegebenenfalls könnte man im Rahmen eines Projektunterrichtes auch direkt Geld sammeln, indem z.B. symbolisch der Thematik entsprechend Gehörschutz gegen einen freiwilligen Spendenbeitrag verkauft wird.

6.4 Pädagogische Begleitmaßnahmen

Zusätzlich zur akustischen Sanierung wird empfohlen, pädagogische Begleitmaßnahmen zu setzen, um sowohl die SchülerInnen als auch den Lehrkörper hinsichtlich Lärm zu sensibilisieren. Neben dem Arbeitsbuch „Lärm in der Schule“ von Erich Hotter und Josef Zollneritsch⁹⁴ wird in diesem Kapitel auch das Projekt „OLGA“ der Steirischen Akademie für Licht und Akustik vorgestellt.

6.4.1 Die Zuhörschule

„Wenn wir über die Frage nachdenken, wie wir in Schulen Lärm vermeiden und Zuhörqualität steigern können, müssen wir über die Organisation v. Schulen nachdenken“⁹⁵

Hotter und Zollneritsch erkannten in ihren Forschungen, dass die Organisation der Schule eine wesentliche Auswirkung auf das Klima unter den LehrerInnen sowie zwischen dem Lehrkörper und den SchülerInnen hat. Davon beeinflusst werden die Leistungsfähigkeit der LehrerInnen sowie die Lernfähigkeit der SchülerInnen.

Eine gelebte Schulhaus- bzw. Vereinbarungskultur, die Beziehungswärme, positive Leistungserwartung, gelebte Vereinbarungen, Regelungen, Klarheit, Transparenz sowie professionelles LehrerInnenverhalten spürbar werden lässt, ist die wesentliche Basis der sogenannten Zuhörschule. Hierzu wird im Schulprogramm festgehalten, was zu den Grundanliegen der jeweiligen Schule gehört, da dieses Ausgangspunkt ist um die Schulhaus- und Vereinbarungskultur innerhalb geklärter Vereinbarungen leben zu können. Die Vereinbarungskultur spielt sich auf der Ebene der Schulleitung und des Lehrkörpers, auf der Lehrer-Schüler Ebene sowie zwischen Eltern/Erziehungsberechtigten und Schule ab.

Auf der Ebene der Leitung bzw. des Lehrkörpers sind klare Verantwortlichkeiten festzumachen. Es sollte ein Klima der Verantwortlichkeit herausgebildet werden und Verantwortungsbereiche personell besetzt werden. (z.B. Leitung des Schulentwicklungsteams, Koordination eines schulischen Förderkonzeptes etc.). LehrerInnen, die sich in ihren spezifischen Interessen erkannt fühlen und diese beruflich umsetzen können, erfahren eine große Steigerung der Motivation und somit der Leistungsfähigkeit und Lehrqualität. Ein professionelles Betriebsklima und ein gelebter Teamgedanke mit Begegnungsmöglichkeiten, auch außerhalb des Schulhauses, fördern die Kommunikations- sowie Teamfähigkeit von LehrerInnen.

Auf der Lehrer-Schülerebene ist es von besonderer Bedeutung, dass SchülerInnen absolute Klarheit darüber haben, was erlaubt und was keinesfalls erlaubt ist. Es soll ein bestmögliches Zusammenleben und – arbeiten möglich sein. Das Aushandeln von Regeln ist ein wesentlicher Teil des Erziehungsauftrages und damit des pädagogischen Programms von Schulen. Je positiver und bestärkender Regelungen sind, desto eher werden sie eingehalten.

⁹⁴ Siehe [HOTTER,ZOLLNERITSCH, S.11]

⁹⁵ [HOTTER,ZOLLNERITSCH]

Auf der dritten Beziehungsebene zwischen Eltern und Schule bedarf es Grundvereinbarungen darüber, wer wofür zuständig ist und was die Erwartungshaltung der jeweiligen Partei ist. Eltern sollten aktiv in den schulischen Prozess einbezogen werden, sodass diese gemeinsam mit den LehrerInnen dieselbe Grundauffassung darüber entwickeln, welche Ziele die Schule insgesamt verfolgen soll. Je besser die Kommunikation in Richtung Elternschaft gelingt, desto leichter gestaltet sich das Unterrichten.

„Nicht das Klagen über den jeweils anderen, sondern das Erzeugen von Verständnis durch regelmäßige Begegnungen können so etwas wie eine Erziehungspartnerschaft begründen“⁹⁶

Neben der Klärung von Zuständigkeiten und der Aufstellung von Regeln ist vor allem eine gelebte Kommunikation entscheidend. Mit Kommunikation ist das bewusste und aktive Zuhören-Können fest verbunden. Nur wenn wir den jeweils anderen wahrnehmen und verstehen, können wir uns verständigen. Wenn LehrerInnen grundlegende Kommunikations-Paradigmen beherrschen und über ein fundiertes Wissen diesbezüglich verfügen, können sie aktives Zuhören und Kommunizieren auch den SchülerInnen entsprechend vermitteln.

Nicht zuletzt spielen der Aufbau und die Pflege einer geordneten Gruppendynamik eine große Rolle. Das sogenannte Klassenmanagement fokussiert das auf soziale Ordnung und Gruppenprozesse gerichtete Handeln von Lehrpersonen. Es wird zwischen erzieherischem und didaktischem Klassenmanagement unterschieden. Wesentlich sind in beiden Fällen aber die ersten Schritte zu Beginn eines Schuljahres, da zu diesem Zeitpunkt sowohl soziale Beziehungen als auch die grundsätzliche Klassendynamik herausgebildet werden. Das Aufrechterhalten einer tragfähigen Klassenkultur bedarf permanenter Investition von Energie und Zeit, doch diese ist wesentliche Basis für eine hohe Zuhörbereitschaft und vermindert somit Konflikte und daraus entstehende psychische Belastung.

Frau Gerad Z., Volksschulleiterin und Direktorin einer sogenannten „Zuhorschule“ engagierte sich für eine stress- und lärmfreie Schule und räumte mit dem Mythos auf, dass Kinder grundsätzlich laut sind. Sie führte eine Kultur der offenen Klassentüren ein, schaffte die Schulglocke ab und bezog die Gänge in das Unterrichtsgeschehen ein. Natürliche bedurfte es parallel zu diesen Maßnahmen der Bewusstseinsbildung von einem Klima der Ruhe, des Respekts und der Aufmerksamkeit, sowohl bei LehrerInnen, SchülerInnen als auch den Eltern. Zusätzlich wurden das Leitbild und die wichtigsten Regeln und Vereinbarungen im Eingangsbereich aufgehängt, sodass die Schulkultur absolut transparent war. Ebenso wurden Rückzugs- und Wohlfühlbereiche geschaffen und auf eine entsprechende Farbgebung in den Klassenräumen geachtet. Wesentliches Anliegen war es Frau Gerda Z. den Kindern einen ruhigen und respektvollen Umgang zu lehren. Des Weiteren wollte sie die Zuhörfähigkeit der Kinder steigern, da diese Voraussetzung für die Aufnahme- und Arbeitsbereitschaft ist.

⁹⁶ [HOTTER, ZOLLNERITSCH]

Zur Förderung der Zuhörfähigkeit ergriff Frau Gerda Z. zwei Maßnahmen mit großer Wirkung. Neben einer Lärmampel, welche in Abschnitt 6.4.2 noch näher erläutert wird, richtete sie einen sogenannten Hörclub ein.

Der Hörclub wurde in die bestehende Bibliothek integriert und dient dazu, das aktive, bewusste Zuhören zu fördern. Neben einer Steigerung der Konzentrationsfähigkeit sowie der Sprachentwicklung wurde durch den Hörclub auch die Fähigkeit seine Umwelt besser wahrzunehmen deutlich verbessert. Grundlage für dieses Projekt ist das Hörclubpaket, welches von der Stiftung „Zuhören“ bezogen werden kann.

Zusammenfassend sind folgende Punkte wesentliche Vorteile einer Zuhörschule:

- Freundliches, respektvolles und vor allem ruhiges Arbeitsklima
- Steigerung der Leistungsfähigkeit sowie Förderung der Sprachentwicklung
- Steigerung der Berufszufriedenheit und Motivation der LehrerInnen
- Erleichterung der Verständigung mit den Eltern
- Bessere Handhabung von Unterrichtsstörungen
- Bessere Erfüllung des Erziehungsauftrages

6.4.2 OLGA – Ohne Lärm geht's auch

Im Zuge der zuvor geschilderten Zuhörschule wurde bereits der Einsatz einer Lärmampel erwähnt. Die steirische Akademie für Licht und Ton hat eine Lärmampel entwickelt, die sich im Vergleich zu anderen Modellen vor allem dadurch auszeichnet, dass der Lärmpegel auf drei Ebenen vermittelt wird. Wichtigstes Element ist die dargestellte Figur namens „OLGA“. Durch die Figur können Emotionen besser transportiert werden, als durch die alleinige Pegelangabe oder Farbdarstellung. Die Lärmampel misst über ein integriertes Messgerät die Lautstärke und zeigt diese in folgenden Formen an:

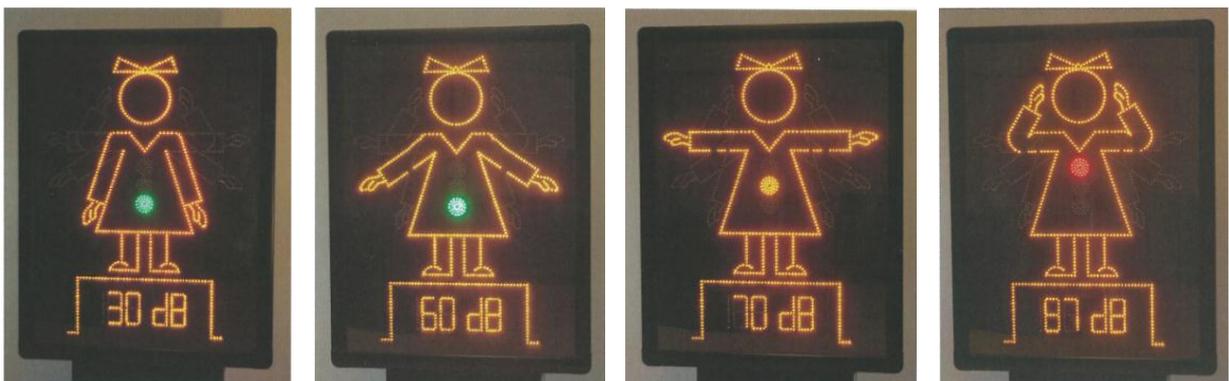


Abbildung 99: Lärmampel zur Darstellung von Lärmpegeln

Die drei Schwellen können vom Anwender individuell eingestellt werden. Lärm wird dadurch sichtbar gemacht, wodurch es dem Lehrkörper leichter möglich ist, die SchülerInnen für diese Thematik zu sensibilisieren. Die SchülerInnen nehmen durch dieses optische Feedback Lärmüberschreitungen bewusst und vor allem unmittelbar wahr, wodurch der Anreiz gegeben ist, den Lärmpegel zu reduzieren.

Wesentlich für den Erfolg dieses Systems sind allerdings begleitende pädagogische Maßnahmen, damit die SchülerInnen nicht entgegen dem eigentlichen Zweck, den Lärmpegel anheben, um die Ampel zu testen. Es ist wichtig die SchülerInnen über die Auswirkungen von Lärm aufzuklären und sie für die Thematik zu sensibilisieren. Zusätzliche Belohnungen wenn die Ampel z.B. nicht öfter als 2 Mal pro Unterrichtsstunde rot aufleuchtet, stellen ggf. einen zusätzlichen Anreiz dar. „OLGA“ wird von der Steirischen Akademie für Licht und Akustik verliehen. Bei Bedarf können Lärmampeln auch online bezogen werden. Abbildung 100 zeigt ein alternatives Modell.



Abbildung 100: Lärmampel [ONLINE2]

Auch diese schafft, durch die angebrachten Smileys, den Transport von Emotionen, die Angabe des Pegels in Dezibel ist allerdings nicht möglich. Die Empfindlichkeit dieser Ampel ist in sieben Stufen einstellbar.

Im folgenden Kapitel 7 werden abschließend eine zusammenfassende Schlussfolgerung sowie der Ausblick auf weiterführende Optionen angeführt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Wie in Kapitel 1 angeführt, empfinden LehrerInnen und SchülerInnen den Lärmpegel in Klassenräumen häufig als zu laut. Der Lärmpegel wird, wie in Abbildung 2 dargestellt, von mehreren Faktoren beeinflusst. Einer dieser Einflussfaktoren ist die Nachhallzeit. Mit einer akustischen Sanierung dieser Klassenräume kann man die Nachhallzeit und somit den Lärmpegel und die damit verbundenen Auswirkungen auf die physische sowie psychische Gesundheit reduzieren.

Die Komplettsanierung durch den Fachbetrieb ist mit hohen Kosten verbunden, sodass diese auf Grund des beschränkten Budgets oftmals nicht umgesetzt werden kann. Eine selbständige Sanierung ist eine mögliche Alternative um die Kosten zu reduzieren. Ziel dieser Diplomarbeit war es daher, sowohl die theoretischen, als auch die praktischen Aspekte einer akustischen Sanierung zu erarbeiten und so aufzubereiten, dass es dem Lehrkörper möglich ist, selbständig eine kostengünstige Sanierung umzusetzen.

Basis für die Erarbeitung einer Sanierungsvariante ist die Ermittlung der akustischen Parameter des zu sanierenden Raumes. Hierfür wurde in Kapitel 2 eruiert, welches Messequipment benötigt wird und wie es zu positionieren ist. Um die Thematik verständlich aufzubereiten, wurden sowohl die Messung als auch die anschließende Analyse der Messergebnisse an Hand eines praktischen Beispiels erläutert.

Für die Analyse der Messergebnisse wurde ein Simulationstool entwickelt, das dem Laien eine normgerechte Verarbeitung der Messdaten ermöglicht (siehe Kapitel 5). Es wurde darauf geachtet, dass dieses Tool intuitiv zu bedienen ist und die erforderlichen Berechnungen so weit als möglich automatisiert erfolgen um Fehler auf Grund der Bedienung zu verhindern. Die akustischen Parameter werden sowohl in grafischer als auch in tabellarischer Form angezeigt. Des Weiteren ist es möglich, die für die Sanierung gewünschten Absorber aus einer Datenbank auszuwählen und somit die Parameter nach der Sanierung zu simulieren sowie die Sanierungskosten abzuschätzen.

Um Absorber auswählen zu können, bedarf es grundlegender Kenntnisse bzgl. der Funktionsweise von Absorbern, deren Anbringung und der zur Erreichung der Sollnachhallzeit erforderlichen Absorberfläche. In Kapitel 3 erfolgte daher die Erarbeitung der diesbezüglich notwendigen Grundkenntnisse. Die in diesem Kapitel angeführte Ermittlung der erforderlichen Absorberfläche sowie der akustisch nutzbaren Fläche ist die Basis zur Erarbeitung der Sanierungsvarianten in Kapitel 4.

Die Recherche bezüglich vorgefertigter Absorbermodule sowie die Entwicklung von Absorbermodulen die selbständig hergestellt werden können zeigten, dass eine selbständige Grobsanierung bereits mit relativ geringem Kostenaufwand möglich ist.

Sollte es gewünscht sein, dass die Nachhallzeit im gesamten Frequenzband innerhalb des Toleranzbereiches nach DIN18041 liegt, ist ein höherer Kosten- oder Zeitaufwand erforderlich.

Neben der Erarbeitung grundsätzlicher Sanierungsvarianten wurden auch die Rahmenbedingungen einer akustischen Sanierung betrachtet. Die in Kapitel 6 angeführten Brandschutzvorschriften sowie die baurechtlichen Vorgaben und Aspekte der Sach- und Personenversicherung sind wesentliche Aspekte, die im Zuge einer Sanierung zwingend berücksichtigt werden müssen um sicherstellen zu können, dass weder Sach- noch Personenschaden entsteht. Zusätzlich zu diesen Themengebieten wurden in diesem Kapitel auch Finanzierungsmöglichkeiten erarbeitet um das Lukrieren des erforderlichen Budgets zu erleichtern.

Basierend auf den Erkenntnissen der Kapitel 1-6 wurde ein Leitfaden entwickelt, der eine selbständige Grobsanierung ermöglichen soll. Durch die Messungen im Kepler Gymnasium sowie das Feedback durch Lehrkräfte konnte für den Leitfaden bereits ein erster praktischer Bezug zu den theoretisch erarbeiteten Komponenten geschaffen werden.

Aufbauend auf dieser Diplomarbeit ist im Folgenden die praktische Umsetzung der Sanierung an Hand des Leitfadens durchzuführen. Durch die Umsetzung in der Praxis ist zu überprüfen, welche Aspekte des Leitfadens sowie des Simulationstools ggf. noch detaillierter auf die Bedürfnisse des Laien angepasst werden müssen, sodass sowohl die Messung und die Analyse der akustischen Parameter, als auch die Erarbeitung einer akustischen Sanierungsvariante sowie die Umsetzung dieser selbständig durchgeführt werden können.

8 Literaturverzeichnis

- [AHNERT] AHNERT S.: *Beschallungstechnik, Grundlagen und Praxis*, Hirzel Verlag, 1993
- [AIÖ1] Arbeitsinspektion Österreich. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit. Arbeitsstätten, Lärm Überblick. [Online] 2006. <http://www.arbeitsinspektion.gv.at/NR/rdonlyres/0AEF13B2-B26F-4598-B8A7-1C9B39E4F0FE/0/Laerm-Wirkungen-und-Gefahren-fuer-Gesundheit.pdf>
- [AIÖ2] Arbeitsinspektion Österreich. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit. Arbeitsstätten, Lärm Überblick. [Online] 2006. http://www.arbeitsinspektion.gv.at/NR/rdonlyres/0EA6A80F-0398-48D9-A578-BBA852E5E769/0/Massnahmen_zur_Laermminierung_und_Schutzziele.pdf
- [ARGE] Die Arbeitsgemeinschaft „Zuhören“. Chibici B., Hotter E., Zollneritsch J, [online] [http://www.zuhoeren.at\(2009\)](http://www.zuhoeren.at(2009))
- [BAUNETZ] http://www.baunetzwissen.de/sonderseiten/sonderseite_66298.html?level=59
- [BISTAFA] BISTAFA S., BRADLEY J.: *Revisiting Algorithms for predicting the Articulation Loss of Consonants (Alcons)* in: JAES Vol.: 48, No. 6, 2000
- [BRUEL&KJAER] *Application Note: Measuring Speech Intelligibility Using DIRAC — Type 7841*. [Online] 2003. <http://www.bksv.com/doc/bo0506.pdf>.
- [CHIBICI] CHIBICI Bernd: *Die Lärmspirale. Vom Umgang mit einer immer lauterem Welt*. Verlagshaus der Ärzte GmbH, Wien 2007.
- [CREMER] CREMER: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik*, Band 1 und 2, Hirzel, 1978
- [DAVIS] DAVIS C.: *Measurement of %ALcons*, in: JAES, 1986, Vol.: 34 No.11
- [DICKREITER1] DICKREITER M.: *Handbuch der Tonstudioteknik*. Bd.1 Raumakustik, Schallquellen, Schallwahrnehmung, Schallwandler, Beschallungstechnik, Aufnahmetechnik, Klanggestaltung.- 6., verb. Aufl.-1997.

- [DICKREITER2] DICKREITER M.: *Handbuch der Tonstudioteknik*. Bd.2 Analoge Schallspeicherung, analoge Tonregieanlagen, Hörfunk-Betriebstechnik, digitale Tontechnik, Tonmeßtechnik, Klanggestaltung.- 6., verb. Aufl.-1997.
- [DICKREITER3] DICKREITER M.: *Handbuch der Tonstudioteknik*. Bd.1 7. völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, ARD.ZDF Medienakademie [Hrsg.], K. G. Saur, München 2008
- [DIN 18041] DIN 18041. 2004: *Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen.*: Deutsches Institut für Normung, 2004.
- [DIN 4102-1] DIN 4102-1. 1998: *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen.*: Deutsches Institut für Normung, 1998.
- [EN 13501-1] EN 13501-1. 2007: *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten.*: Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2005.
- [FASOLD] FASOLD W., VERES E.: *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*. Huss-Medien GmbH Berlin Verlag Bauwesen, Berlin 2003.
- [GRABER] GRABER G., WESELAK W.: *Skriptum zur Vorlesung Raumakustik*. TU Graz, Graz 2007/2008.
- [GROENINGEN] D. CH. v. GROENINGEN: *Digitale Signalverarbeitung mit einer Einführung in konstante Signale und Systeme*. Carl Hanser Verlag München, 2008
- [HECKER] HECKER R.: *Lärmbelastung in der Schule*, in: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 1994, 48 (2), S. 90-98.
- [HOTTER, ZOLLNERITSCH] E. HOTTER, J. ZOLLNERITSCH: *Lärm in der Schule.*: Leykam Buchverlagsgesellschaft m.b.H.Nfg. & Co KG, Graz 2008.
- [HOUTGAST] HOUTGAST T.: *The effect of ambient noise on speech intelligibility*, in: Applied Acoustics. 1981, 14, S. 15-25.
- [KARJALAINEN] M. KARJALAINEN: *Estimation of Modal Decay Parameters from Noisy Response Measurements*. J. Audio Eng. Soc., Vol. 50, No. 11, November 2002
- [KALIVODA] KALIVODA M.T., STEINER J.W. (Hrsg.): *Taschenbuch der angewandten Psychoakustik*. Springer Verlag, Wien 1998.

- [KLATTE1] KLATTE M., JANOTT C.: *Zur Bedeutung der Sprachverständlichkeit in Klassenräumen. Eine Untersuchung mit Grundschulkindern*, in: Huber L., Kahlert J. und Klätte M.: *Die akustisch gestaltete Schule. Auf der Suche nach dem guten Ton*. Verlag Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen 2002.
- [KLATTE2] KLATTE M., SCHICK A., MEIS M.: *Wirkungen von Lärm und Nachhall auf Kinder: Ergebnisse aus Labor- und Feldstudien*, Präsentation vom 29.05.2008 für den Bayrischen LehrerInnenverband (BLLV)
<http://www.bllv.de/cms/fileadmin/Dateien/Land-PDF/Aktion/Laerm/Praesentation1-Klatte.pdf>
- [KLATTE7] KLATTE M., KILCHER H., HELLBRUECK J.: *Wirkungen der zeitlichen Struktur von Hintergrundschall auf das Arbeitsgedächtnis und ihre theoretischen und praktischen Implikationen*, in: *Zeitschrift für Experimentelle Psychologie*. 1995, Bd. XLII, 4, S. 517-544.
- [KLEIN] KLEIN W.: *Articulation loss of consonants as a basic for the design and judgment of sound reinforcement systems*. *J. Audio Eng. Soc.* 19 (1971) 11, S. 920-922.
- [LAZARUS] LAZARUS H., SUST A. Charlotte, STECKEL R. et al.: [Hrsg.]: *Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Springer Verlag, Berlin – Heidelberg 2007.
- [LEISTNER] LEISTNER P., HELLBRUECK J., KLATTE M. et al.: *Lärm in der Schulischen Umwelt und kognitive Leistungen bei Grundschulkindern*. Forschungsbericht. FZKA-BWPLUS. Stuttgart, Eichstätt, Oldenburg 2006.
<http://bwplus.fzk.de/berichte/SBer/ZO3W23004+23005SBer.pdf>
- [MACHNER] MACHNER R., TIESLER G.: *Akustische Ergonomie - Theorie und Wirklichkeit einer optimalen Klassenraumakustik*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2008, S. 719-720.
- [MACKENZIE] MACKENZIE D. J., AIREYS S.: *Classroom Acoustics*. A Research Project. Heriot –Watt University, Edinburgh 1999.
- [MATELJAN] MATELJAN IVO: *User Manual for Arta*. Version 1.7.0, Electroacoustics Laboratory at the Faculty of Split, Croatia, December 2010
- [MÖSER] MÖSER M.: *Messtechnik der Akustik*. Technische Universität Berlin 2009. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.

- [MÜLLER] MÜLLER MAURICE.: *Klassenraumakustik*. Diplomarbeit von Dipl. Ing. Maurice Müller, Institut für Breitbandkommunikation der Technischen Universität Graz, September 2009
- [OBERDOERSTER] OBERDOERSTER M., TIESLER G.: *Akustische Ergonomie der Schule*.(Hrsg.):Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).: Wirtschaftsverlag NW, Dortmund - Berlin – Dresden 2006.
- [OENORM EN ISO 9921] OENORM EN ISO 9921: *Ergonomie – Beurteilung der Sprachkommunikation*.: Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2003.
- [OENORM EN ISO 3382-1] OENORM EN ISO 3382-1. 2009: *Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik. Teil 1: Aufführungsplätze*.: Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2008
- [OENORM EN ISO 3382-2] OENORM EN ISO 3382-2. 2009: *Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik. Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen*.: Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2009
- [OENORM 3800-1] OENORM 3800-1: 2005: *Brandverhalten von Materialien, ausgenommen Bauprodukte - Teil 1: Anforderungen, Prüfungen und Beurteilungen*, Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2005
- [OENORM B 3806-1] OENORM B 3806-1. 2005: *Anforderungen an das Brandverhalten von Bauprodukten und Baustoffen*.: Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2005.
- [OENORM B 8115-3] OENORM B 8115-3. 2006: *Schallschutz und Raumakustik im Hochbau. Teil 2: Anforderungen an den Schallschutz*.: Österreichisches Normungsinstitut Wien, 2006.
- [OEVE] OEVE/OENORM EN 60268-16. 2004: *Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex*.: Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2004.
- [ONLINE1] <http://www.inqa.de/INqa/Navigation/publikationen.html>
- [ONLINE2] www.paedboutique.de
- [OPPENHEIM] OPPENHEIM A.V., SCHAFER R.W., BUCK J.R.: *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*. 2. überarbeitete Auflage, Pearson Studium, 2004
- [PEUTZ] PEUTZ V. M. A.: *Articulation loss of constants as a criterion for speech transmission in a room*, J. Audio Eng. Soc. 19 (1971) 11, S. 915-919.

- [RICKES] RICKES O., SCHMITZ A.: *Beeinträchtigt die Raumakustik der Schulgebäude die Gesundheit der Lehrkräfte?* in: DAGA Fortschritte der Akustik 2005, S. 343-344.
- [SANSOUCI] SAN SOUCI S., GUERRA L., TEICHNER N.: *Classroom acoustics: Current and future criteria for the assessment of acoustics for learning*, in: Convention Paper 6794, AES 2006.
- [SCHAUMSTOFFLAGER] www.schaumstofflager.de
- [SCHICK] SCHICK A., KLATTE M., SCHMITZ A.: *Lärminderung in Schulen, Umwelt und Geologie*. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie [Hrsg.], Wiesbaden 2007. Bd. Heft 4.
http://www.hlug.de/medien/laerm/dokumente/Laermschutz_Heft_4.pdf
- [SCHOENWAELDER1] SCHOENWALDER H. G., BERNDT J., STROEVER F. et al.: *Lärm in Bildungsstätten - Ursachen und Minderung*. [Hrsg.] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA): Wirtschaftsverlag NW, Dortmund - Berlin - Dresden 2005.
- [SCHOENWAELDER2] SCHOENWAELDER H.G., BERNDT J., STROEVER F. et al.: *Belastung und Beanspruchung von Lehrerinnen und Lehrern*. [Hrsg.] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 2003
- [SHIELD] SHIELDS B., DOCKRELL J.E.: *External and internal noise surveys of London primary schools*, in: JASA. 2003, 115 (2)
- [SONATECH] <http://www.sonatech.de/>
- [SORA] SORA, Institute for Social Research and Analysis, Klinische Abt. Arbeitsmedizin AKH Wien.: *LehrerIn 2000. Arbeitszeit, Zufriedenheit, Beanspruchungen und Gesundheit der LehrerInnen in Österreich*. Im Auftrag von Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur, Bundesministerium für öffentliche Leistung und Sport, Gewerkschaft Öffentlicher Dienst. Wien. Oktober 2000.
<http://www.bmukk.gv.at/medienpool/16164/lehrerin2000.pdf>
- [TIESLER1] TIESLER G.: *Die Last mit dem Lärm - Arbeitsalltag von Lehrern und Schülern*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2005
- [TIESLER2] TIESLER G., MACHNER R.: *Lärmstress im Klassenraum – Ergonomie der Schule*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2008, S. 721-722

- [TIESLER3] TIESLER G., OBERSOERSTER M.: *Lärm ein Stressor? – Raumakustische Ergonomie der Schule*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2006, S. 567-568
- [TIESLER4] TIESLER G. OBERDOERSTER M.: *Lärm in Bildungsstätten*, Broschüre. Herausgegeben von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Dortmund 2006.
- [TIESLER7] TIESLER G. OBERDOERSTER M.: *Lärm in Bildungsstätten, Broschüre*. Herausgegeben von Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Dortmund 2006. [Online]: <http://www.inqa.de/Inqa/Navigation/publikationen.html>
- [VDI 2058 Bl.3] VDI 2058 Bl.3. 1999: *Beurteilung von Lärm am Arbeitsplatz unter Berücksichtigung unterschiedlicher Tätigkeiten*. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1999.
- [VOLV] *Verordnung über den Schutz der Arbeitnehmer/innen vor der Gefährdung durch Lärm und Vibrationen* (Verordnung Lärm und Vibrationen - VOLV), 2006.
- [WHO] *Guidelines for community noise*. Gen 1999. [online]
<http://www.who.int/docstore/peh/noise/guidelines2.html>
<http://whqlibdoc.who.int/hq/1999/a68672.pdf>

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lärmkaskade in Anlehnung an [TIESLER7, S.13]	11
Abbildung 2: Variablen, von denen der Lärmpegel in Klassenräumen abhängig ist [MÜLLER, S.38]	12
Abbildung 3: Wirkungen von Lärm und Nachhall auf das Hörverstehen vgl. [SCHICK2, S.19]	14
Abbildung 4: Toleranzbereich der empfohlenen Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Frequenz, normiert auf T_{soll} gemäß DIN 18041	18
Abbildung 5: Toleranzband der Nachhallzeit nach DIN 18041 für einen Unterrichtsraum mit $T_{soll} = 0,56s$	18
Abbildung 6: Nachhallzeitmessungen der Grundschule Wiltz/Luxemburg (Personen eingerechnet)	19
Abbildung 7: Mittelwert und Standardabweichung der normierten Nachhallzeiten für das alte und das neue Gebäude der Grundschule Wiltz/Luxemburg [MÜLLER, S.161]	19
Abbildung 8: Nachhallzeitmessungen der Bundeshandelsakademie Grazbachgasse (Personen eingerechnet) [MÜLLER, S.234]	20
Abbildung 9: Mittelwert und Standardabweichung der normierten Nachhallzeiten für das alte und das neue Gebäude der Bundeshandelsakademie Grazbachgasse. [MÜLLER, S.234]	20
Abbildung 10: Sollwert der Nachhallzeit für unterschiedliche Nutzungsarten [DIN18041] ..	22
Abbildung 11: Artikulationsverlust in Abhängigkeit der Pegeldifferenz des Diffusschalls, des Direktschalls und der Nachhallzeit T. Alcons wird in der rechten Abbildung für den jeweiligen S/N korrigiert. [AHNERT]	23
Abbildung 12: STI in Abhängigkeit von T.....	24
Abbildung 13: Kurven von konstantem STI als Funktion des SNR und der Nachhallzeit im Fernfeld. [HOUTGAST].....	24
Abbildung 14: T30 im besetzten und simulierten Zustand mit $A_{Schüler}=3m^2$	27
Abbildung 15: T30 im besetzten und simulierten Zustand mit $A_{Schüler}=1m^2$	27
Abbildung 16: T30 im besetzten und simulierten Zustand mit der auf den Messungen basierenden äquivalenten Absorptionsfläche der SchülerInnen.....	28
Abbildung 17: Genelec 1030A	29
Abbildung 18: AKG C 480 B.....	30
Abbildung 19: Frontansicht des RME Fireface 400	30
Abbildung 20: Rückseite des RME Fireface 400	30
Abbildung 21: Differenz zwischen 2 und 3 Senderpositionen.....	32
Abbildung 22: Mikrofon- und Lautsprecherposition nach Leistner [LEISTNER].....	33
Abbildung 23: Mikrofon und Lautsprecherpositionen nach Müller [MÜLLER]	34

Abbildung 24: Abklingkurve eines Raumes [FASOLD, S.141].....	36
Abbildung 25: Differenz zwischen den Messergebnissen je Raum	39
Abbildung 26: Ablauf der Messung mit Arta	41
Abbildung 27: Bedienoberfläche von Arta.....	41
Abbildung 28: Angabe der Ein- und Ausgänge.....	42
Abbildung 29: Einstellungen für die Kalibrierung des Mikrofons.....	42
Abbildung 30: Positionierung des Kalibrators über dem Mikrofon.....	43
Abbildung 31: Auswahl des Anregungssignals	43
Abbildung 32: Impulsantwort.....	44
Abbildung 33: Raumakustische Parameter nach ISO3382.....	44
Abbildung 34: Nachhallzeit T30	45
Abbildung 35: Verhältnis von T30/Tsoll im leeren und im besetzten Zustand	47
Abbildung 36: Nachhallzeit im leeren und im besetzten Zustand	47
Abbildung 37: Verhältnis von T30 zu Tsoll im leeren Zustand.....	48
Abbildung 38: Gegenüberstellung der Nachhallzeiten im leeren Zustand.....	48
Abbildung 39: Deutlichkeitsmaß für Raum 005	49
Abbildung 40: Deutlichkeitsmaß für Raum 012	49
Abbildung 41: Deutlichkeitsmaß für Raum 002	50
Abbildung 42: Deutlichkeitsmaß für Raum 003	50
Abbildung 43: Artikulationsverlust AI_{cons}	51
Abbildung 44: Sprachübertragungsindex STI.....	52
Abbildung 45: Erforderliche äquivalenten Absorptionsfläche (Azusatz) bei leerem sowie besetztem Zustand	53
Abbildung 46: Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche im leeren Zustand.....	54
Abbildung 47: Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche im besetzten Zustand.....	54
Abbildung 48: Links: rau und nicht porös, Mitte: rau und porös , Rechts: glatt und porös [Cremer S.105]	55
Abbildung 49: Typischer Absorptionsverlauf eines Höhenabsorbers [DICKREITER, S.20].	56
Abbildung 50: Funktionsprinzip des Helmholtz-Resonators [GRABER]	56
Abbildung 51: Typischer Absorptionsverlauf eines Helmholtz-Resonators [DICKREITER, S.22].....	56
Abbildung 52: Schematische Darstellung eines Plattenabsorbers [GRABER].....	57
Abbildung 53: Typischer Absorptionsverlauf eines Tiefenabsorbers [DICKREITER, S.23].	57
Abbildung 54: Anbringung von Absorbern [DIN18041]	58
Abbildung 55: Vorschaltung eines Luftpolsters [Cremer, S.137]	59
Abbildung 56: Absorptionsgrad von Melaminharzschaum (d= 4cm) mit unterschiedlichen Luftpolstern.....	60
Abbildung 57: Erforderliche Absorberfläche (Melaminharzschaum) für Raum 005 im besetzten Zustand	61
Abbildung 58: Akustikplatte aus Melaminharzschaum ohne Fase, weiß [SONATECH].....	64
Abbildung 59: Akustikplatte aus Melaminharzschaum mit Fase, hellgrau [SONATECH]....	64
Abbildung 60: Erforderliche Absorberfläche bei Verwendung der vorgefertigten Melaminharzschaumplatten (Direktanbringung)	65

Abbildung 61: Farbiges Deckensegel aus Melaminharzschaum mit Alurahmen [SCHAUMSTOFFLAGER.DE].....	66
Abbildung 62: Deckensegel aus Melaminharzschaum mit Aluschiene zur Stabilisierung [SCHAUMSTOFFLAGER.DE].....	66
Abbildung 63: Hacken für das Deckensegel ohne Alurahmen	66
Abbildung 64: Erforderliche Absorberfläche bei Verwendung der vorgefertigten Deckensegel aus Tabelle 11.....	67
Abbildung 66: Dämmmatte aus Steinwolle	68
Abbildung 65: Weichfaserplatte aus Holz.....	68
Abbildung 67: Erforderliche Absorberfläche bei Verwendung von Holzfaser bzw. Steinwolle	69
Abbildung 68: Verbindung der Rahmenelemente mit einem Winkel.....	70
Abbildung 69: Modulrahmen mit Stabilisierungsbalken	70
Abbildung 70: Anbringung des Stabilisierungsnetzes beim Wandabsorber	71
Abbildung 71: Fixierung des Drahtseils	72
Abbildung 72: Detail des Wandabsorbers.....	72
Abbildung 73: Fertiges Wandmodul	72
Abbildung 75: Wandmontage des Absorbermoduls – Variante B	73
Abbildung 74: Wandmontage des Absorbermoduls – Variante A.....	73
Abbildung 76: Plattenabsorber.....	74
Abbildung 77: Resonanzfrequenz des Plattenabsorbers in Abhängigkeit von Plattenmasse..	74
Abbildung 78: Pinnwand aus Weichfaserplatte	75
Abbildung 79: Befestigung des Stoffes mit Klettverschluss	75
Abbildung 80: Rahmen für das Deckensegel	76
Abbildung 81: Anbringung des Stabilisierungsnetzes beim Deckenmodul	76
Abbildung 82: Fertiges Deckenmodul.....	77
Abbildung 83: Sanierung mit Melaminharzschaumplatten (30m ²).....	78
Abbildung 84: Sanierung mit Melaminharzschaumplatten (30m ²) und Plattenabsorbern (26m ²).....	79
Abbildung 85: Sanierung mit selbst hergestellten Wandmodulen (30m ²) und Plattenabsorbern (26m ²).....	79
Abbildung 86: Sanierung mit selbst hergestellten Wandmodulen (30m ²), Plattenabsorbern (26m ²) und vorgefertigten Deckensegeln ohne Rahmen (16 m ²).....	80
Abbildung 87: Sanierung mit selbst hergestellten Wandmodulen (30m ²), Plattenabsorbern (26m ²) und selbst hergestellten Deckenmodulen (16 m ²).....	80
Abbildung 88: Akustische Sanierung mit Gipskartonlochplatten, Rückseite des Klassenzimmers.....	81
Abbildung 89: Akustische Sanierung mit Gipskartonlochplatten, Frontseite des Klassenzimmers.....	82
Abbildung 90: Eingabe sowie Ermittlung der Basisdaten.....	85
Abbildung 91: Import der Messwerte.....	86
Abbildung 92: Tabellarische sowie grafische Darstellung der Nachhallzeit	87
Abbildung 93: Darstellung der äquivalenten Absorptionsfläche	87

Abbildung 94: Auswahl der Absorber sowie Ermittlung der Materialkosten	88
Abbildung 95: Absorberdatenbank der Deckenabsorber	88
Abbildung 96: Absorberdatenbank der Wandabsorber	88
Abbildung 97: Darstellung von STI und %Alcons	89
Abbildung 98: Brandschutzvorschriften für die raumseitige Wandbekleidung [OENORM 3806]	91
Abbildung 99: Lärmampel zur Darstellung von Lärmpegeln.....	98
Abbildung 100: Lärmampel [ONLINE2]	99
Abbildung 102: Grundrissplan und Messanordnung in Raum 002	114
Abbildung 103: Grundrissplan und Messanordnung von Raum 003	115
Abbildung 104: Grundrissplan und Messanordnung von Raum 005	116
Abbildung 105: Grundrissplan und Messanordnung von Raum 012	117
Abbildung 106: Nachhallzeit T30 von Raum 002	118
Abbildung 107: T30/Tsoll für Raum 002	118
Abbildung 108: Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche von Raum002	119
Abbildung 109: Nachhallzeit T30 von Raum 003	120
Abbildung 110: T30/Tsoll für Raum 003	120
Abbildung 111: Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche für Raum 003 im leeren Zustand	120
Abbildung 112: Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche von Raum003	121
Abbildung 113: Nachhallzeit T30 von Raum 005.....	122
Abbildung 114: T30/Tsoll für Raum 005	122
Abbildung 115: Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche für Raum 005	123
Abbildung 116: Nachhallzeit T30 von Raum 012.....	124
Abbildung 117: T30/Tsoll für Raum 012	124
Abbildung 118: Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche für Raum 012	125

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Typische Lärmquellen nach [MACKENZIE].....	11
Tabelle 2: Einstufung des Störschalldruckpegels bauseitiger Geräusche nach Anforderungen an die Raumnutzung [DIN 18041]	15
Tabelle 3: "Guideline values" der WHO für Lärm [WHO, S. 47], Übersetzung nach [BABISCH2].....	16
Tabelle 4: Grenzwerte für Tätigkeiten an Arbeitsplätzen [VDI 2058 Bl.3]	16
Tabelle 5: Frequenzabhängige äquivalente Absorptionsfläche in m ² [DIN 18041]	27
Tabelle 6: Äquivalente Schallabsorptionsfläche in m ² basierend auf DIN18041-Zeile 2 mit Korrektur der Werte unterhalb von 500 Hz. Die Anpassung basiert auf den Messungen im BRG Kepler	28
Tabelle 7: Reduzierung der benötigten äquivalenten Absorptionsfläche durch die anwesenden SchülerInnen.....	53
Tabelle 8: Akustisch nutzbare Fläche von Raum 005	58
Tabelle 9: Absorptionsgrad von Melaminharzschaum (d=4cm) mit unterschiedlichen Luftpolstern.....	60
Tabelle 10: Exemplarische Absorptionswerte für Melaminharzschaumplatten (Direktanbringung)	64
Tabelle 11: Exemplarische Absorptionswerte für Deckensegel.....	67
Tabelle 12: Exemplarische Absorptionswerte für Weichfaserplatten aus Holz sowie Steinwolle	69
Tabelle 13: Benötigtes Material und Materialkosten für ein Wandmodul (1m x 2m)	73
Tabelle 14: Absorptionswerte ausgewählter Plattenabsorber	75
Tabelle 15: Benötigtes Material sowie Materialkosten für das Deckensegel.....	77
Tabelle 16: Richtwerte für die Sanierungskosten der Sanierung mit Absorbermodulen	81
Tabelle 17: Angebote für die akustische Sanierung mit Gipskartonlochplatten für 65 m ²	82
Tabelle 18: Gegenüberstellung der Sanierungskosten für Raum005	83
Tabelle 19: Mögliche Gebäudeklassen für Schulgebäude [OENORM B 3806, S.5]	90
Tabelle 20: Klassen des Brandverhaltens von Bauprodukten [OENORM B 3806]	91
Tabelle 21: Brandschutzklassen [EN 13501 Teil 1]	92
Tabelle 22: Brandschutzklassen nach ÖNORM B 3800-1	93
Tabelle 23: Brandschutzklassen [DIN 4102-1].....	93
Tabelle 24: Mind. erforderliche Brandschutzklassen für Absorber in Schulgebäuden	93
Tabelle 25: Akustische Parameter von Raum 002.....	119
Tabelle 26: Akustische Parameter von Raum 003.....	121
Tabelle 27: Akustische Parameter für Raum005	123
Tabelle 28: Akustische Parameter für Raum012	125

Tabelle 29: Absorptionsgradmessung Melaminharzschaum	126
Tabelle 30: Absorptionsgradmessung von Esternoppenschaumstoff	127
Tabelle 31: Absorptionsgradmessung von PUR Schaum	128
Tabelle 32: Absorberdatenbank.....	129

11 Anhang A: Messanordnung am BRG Kepler

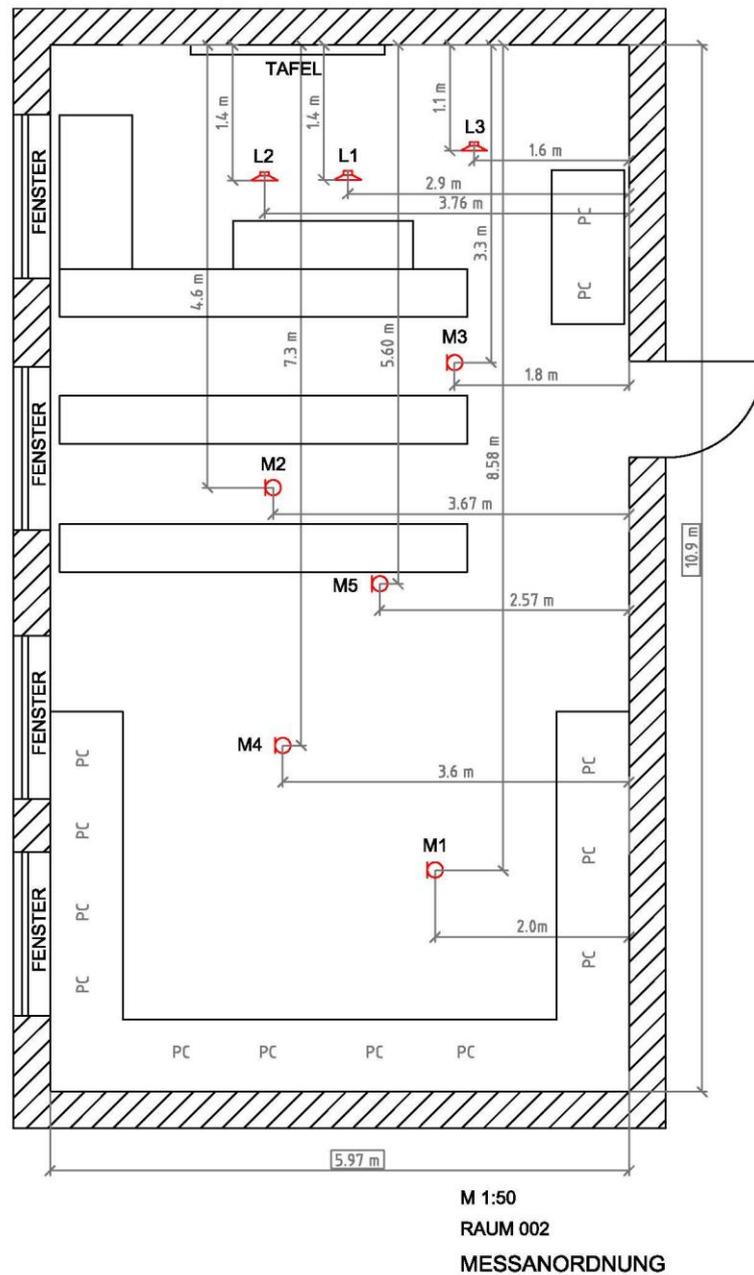
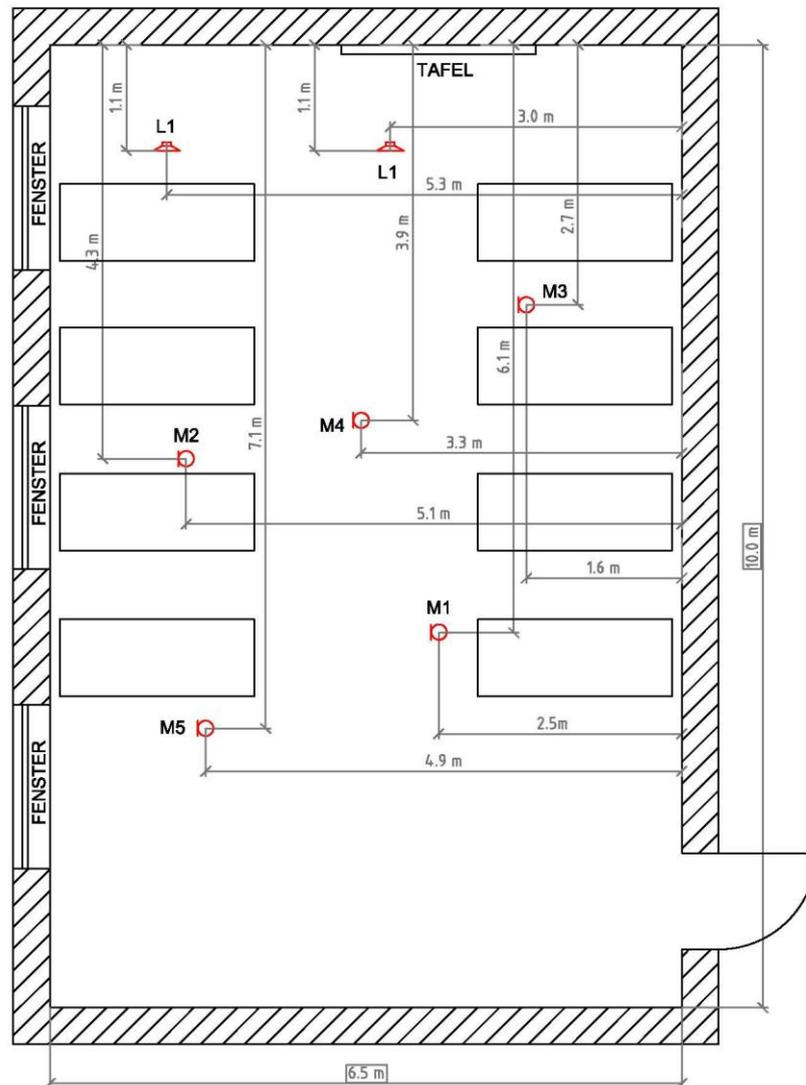
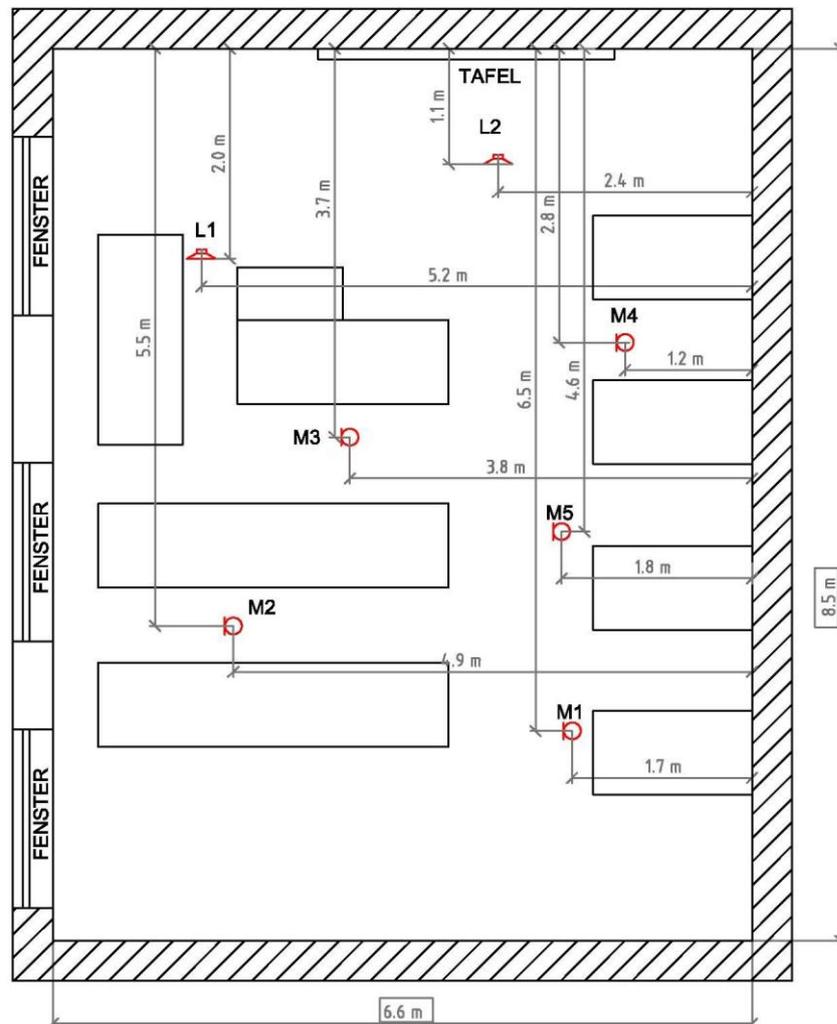


Abbildung 101: Grundrissplan und Messanordnung in Raum 002



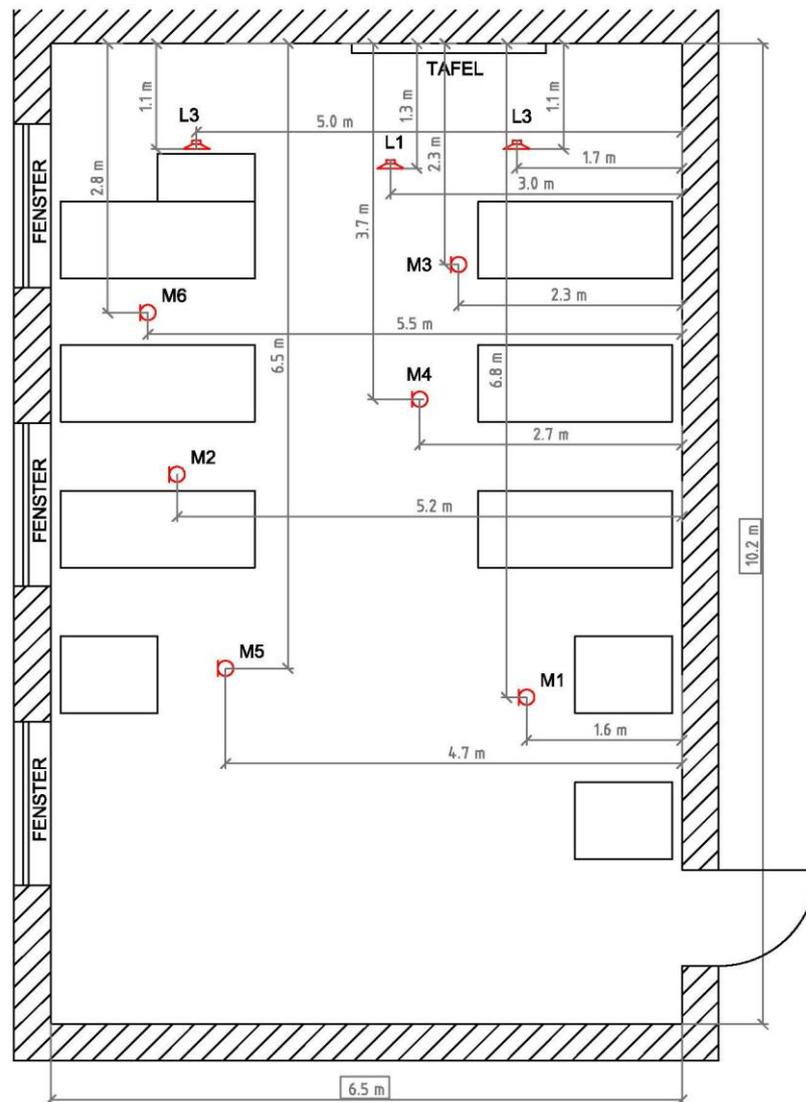
M 1:50
RAUM 003
MESSANORDNUNG

Abbildung 102: Grundrissplan und Messanordnung von Raum 003



M 1:50
RAUM 005
MESSANORDNUNG

Abbildung 103: Grundrissplan und Messanordnung von Raum 005



M 1:50
RAUM 012
MESSANORDNUNG

Abbildung 104: Grundrissplan und Messanordnung von Raum 012

12 Anhang B: Messergebnisse am BRG Kepler

Raum 002



Abmessungen [m] (BxLxH)	5,97 x 10,74 x 4
Volumen [m ³]	256,47
Grundgeräuschpegel [dB]	35
Schüleranzahl	18
T _{soll} [s]	0,6
Messpegel [dB]	85
Besetzungszustand	leer

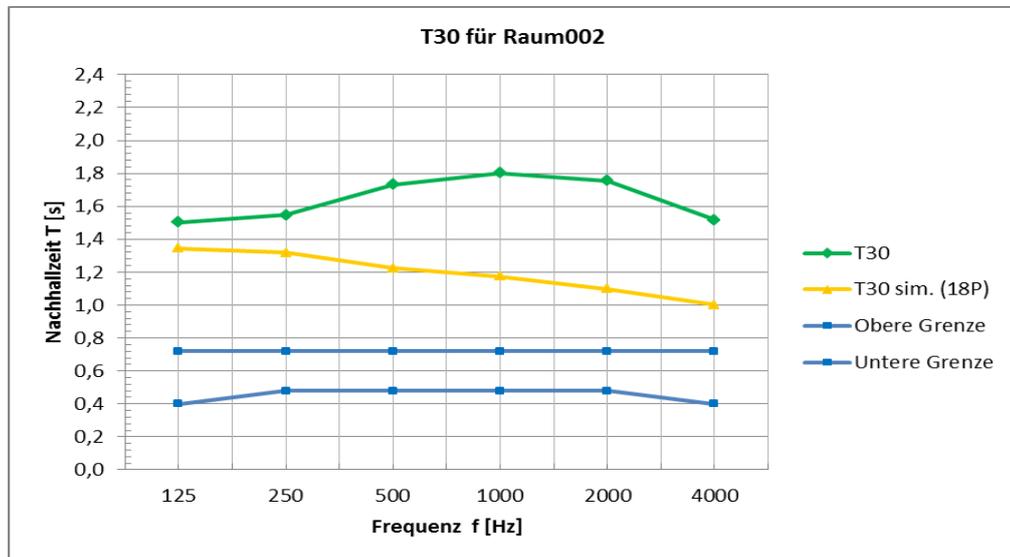


Abbildung 105: Nachhallzeit T30 von Raum 002

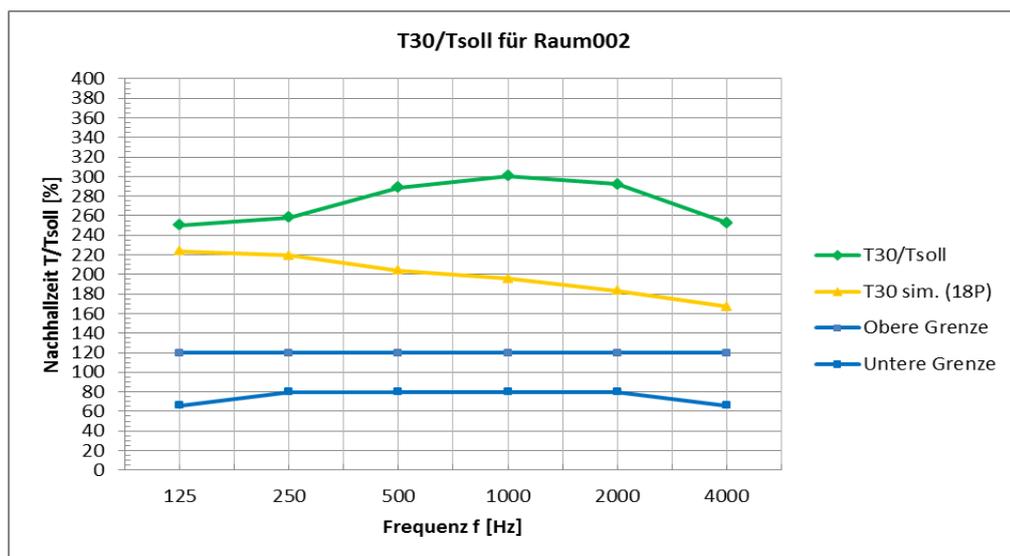


Abbildung 106: T30/Tsoll für Raum 002

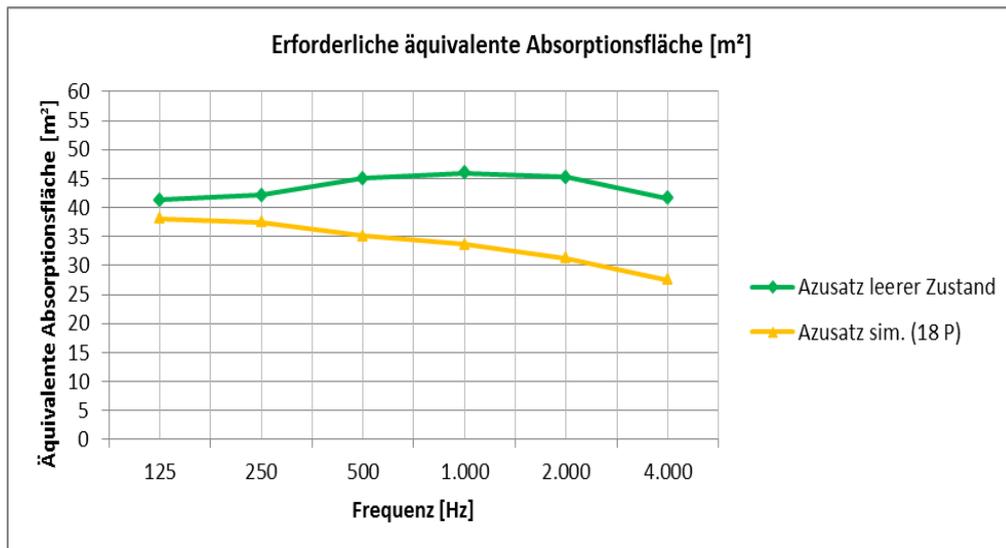


Abbildung 107: Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche von Raum002

Tabelle 25: Akustische Parameter von Raum 002

F [Hz]	T30 [s]	T30 [s]	EDT [s]	C50 [dB]	D50 [%]
	Zustand leer	Simuliert (18P)	Zustand leer	Zustand leer	Zustand leer
125	1,50	1,34	1,35	-3	32
250	1,55	1,32	1,49	-2	41
500	1,73	1,22	1,67	-3	35
1000	1,80	1,18	1,80	-3	36
2000	1,75	1,10	1,82	-1	42
4000	1,52	1,00	1,52	-1	46

STI	STI	%Alcons	%Alcons
Zustand leer	Simuliert (18P)	Zustand leer	Simuliert (18P)
0,51	0,72	10,88	4,26

Raum 003



Abmessungen [m] (BxLxH)	6,58 x10 x 4
Volumen [m ³]	263,2
Grundgeräuschpegel [dB]	40
Schüleranzahl	24
T _{soll} [s]	0,6
Messpegel [dB]	85
Besetzungszustand	leer

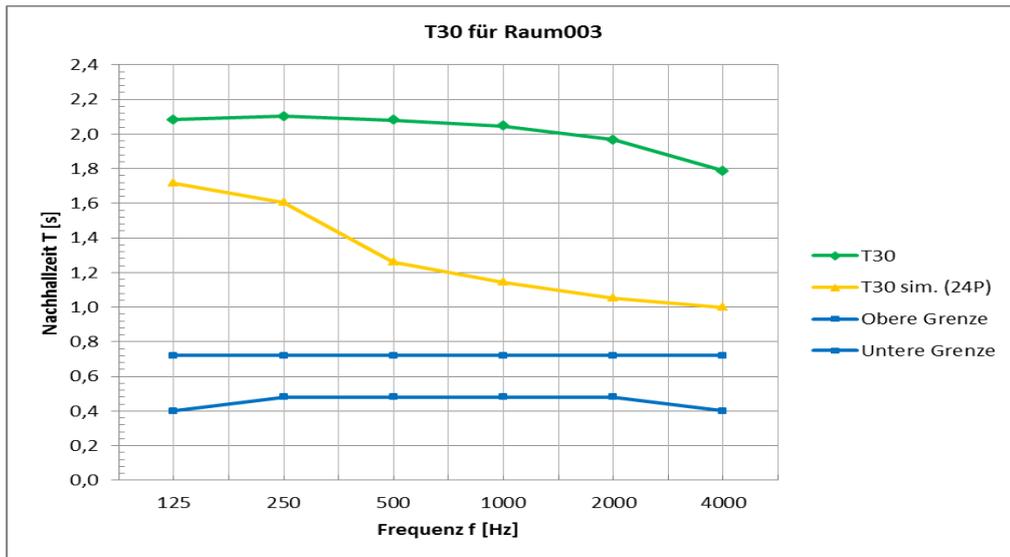


Abbildung 108: Nachhallzeit T30 von Raum 003

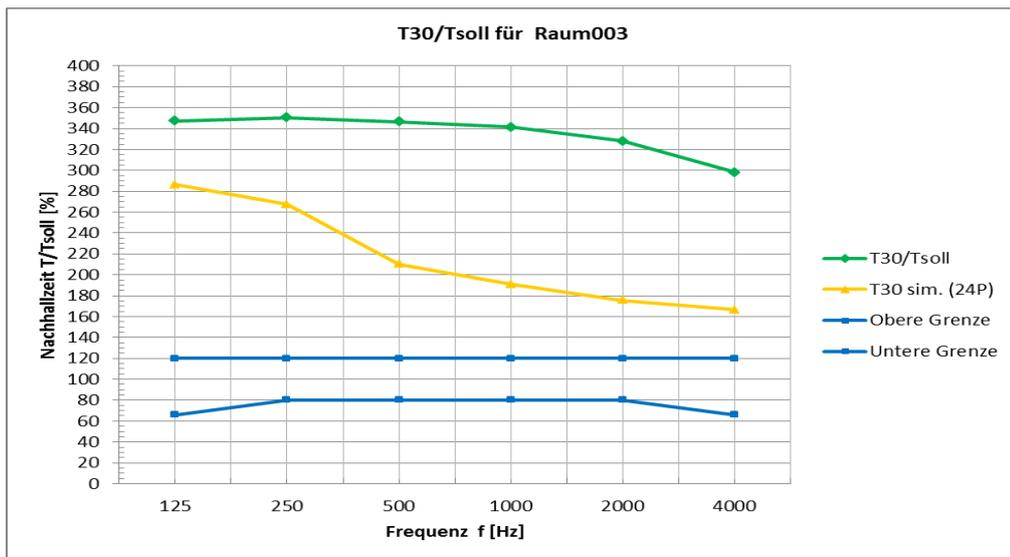


Abbildung 109: T30/Tsoll für Raum 003

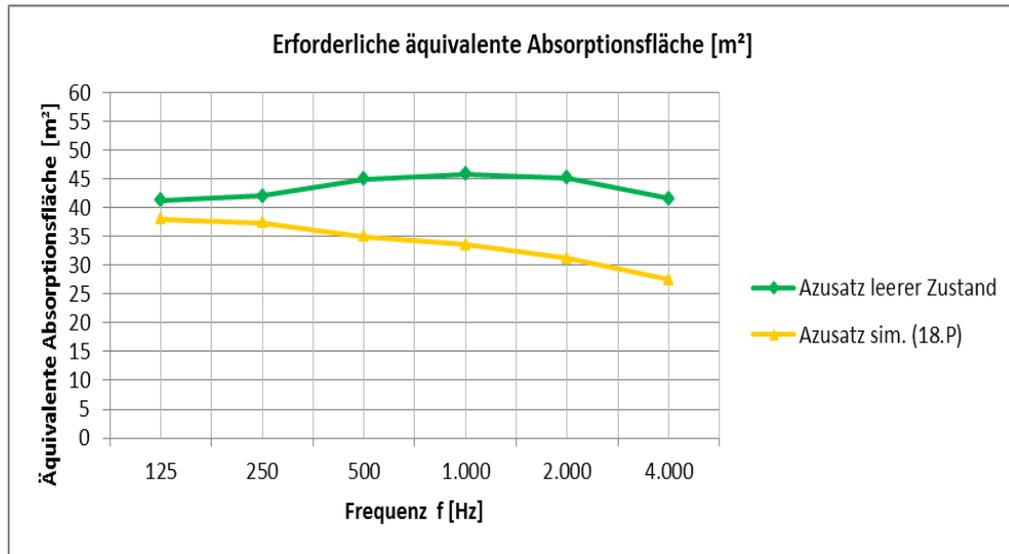


Abbildung 111: Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche von Raum003

Tabelle 26: Akustische Parameter von Raum 003

F [Hz]	T30 [s] Zustand leer	T30 [s] Simuliert (24P)	EDT [s] Zustand leer	C50 [dB] Zustand leer	D50 [%] Zustand leer
125	2,08	1,72	2,10	-1	16
250	2,10	1,60	2,04	-1	16
500	2,08	1,26	2,04	-1	15
1000	2,05	1,14	2,04	-1	17
2000	1,97	1,05	1,92	0	21
4000	1,79	1,00	1,77	1	24

STI Zustand leer	STI Simuliert (24P)	%Alcons Zustand leer	%Alcons Simuliert (24P)
0,50	0,75	11,64	3,50

Raum 005



Abmessungen [m] (BxLxH)	6,58 x10 x 4
Volumen [m ³]	263,2
Grundgeräuschpegel [dB]	40
Schüleranzahl	24
T _{soll} [s]	0,6
Messpegel [dB]	85
Besetzungszustand 1:	leer
Besetzungszustand 2:	29 Personen

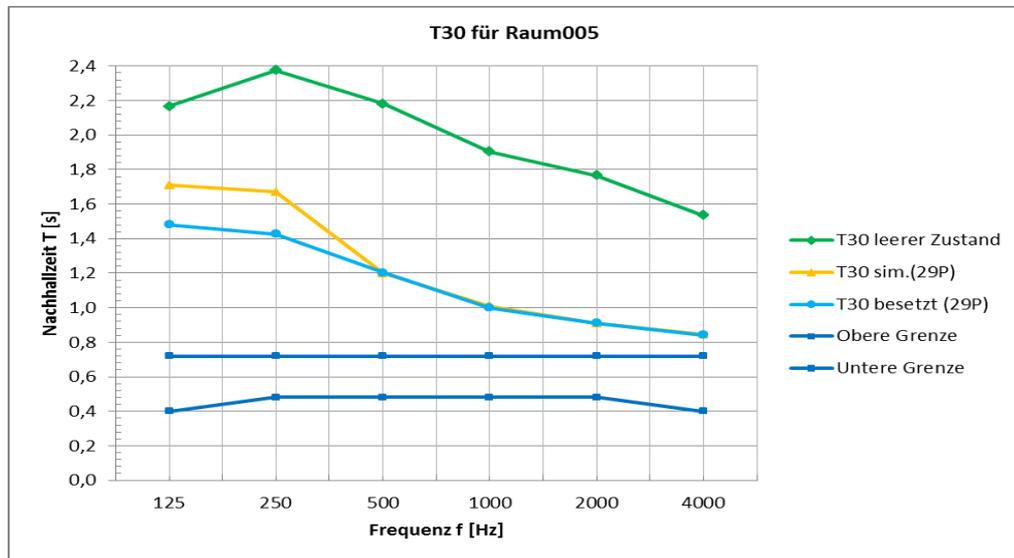


Abbildung 112: Nachhallzeit T30 von Raum 005

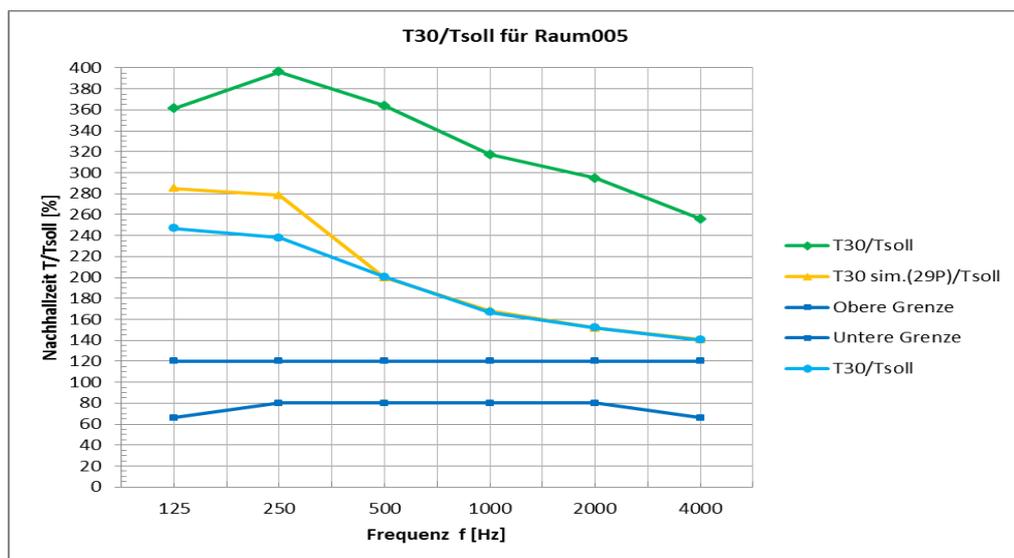


Abbildung 113: T30/Tsoll für Raum 005

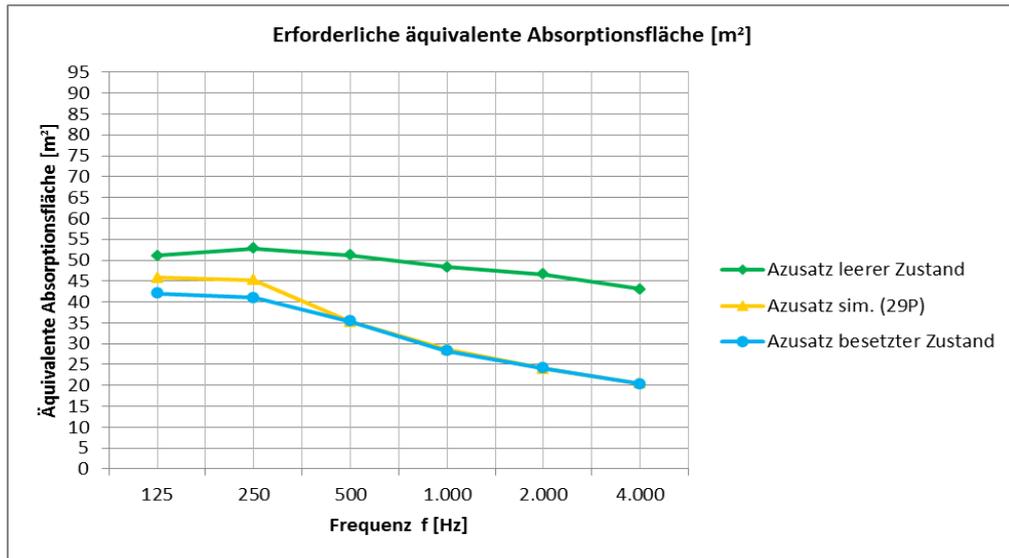


Abbildung 114: Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche für Raum 005

Tabelle 27: Akustische Parameter für Raum005

F [Hz]	T30 [s] Zustand leer	T30 [s] Zustand besetzt (29P)	T30 [s] Simuliert (29P)	EDT [s] Zustand leer	C50 [dB] Zustand leer	D50 [%] Zustand leer
125	2,17	1,48	1,71	1,91	-5	27
250	2,38	1,43	1,67	2,30	-5	26
500	2,18	1,20	1,20	2,23	-3	33
1000	1,90	1,00	1,01	1,87	-2	38
2000	1,77	0,91	0,91	1,78	-1	45
4000	1,54	0,84	0,84	1,52	-1	47

STI Zustand leer	STI Zustand besetzt (29P)	STI Simuliert (29P)	%Alcons Zustand leer	%Alcons Zustand besetzt (29P)	%Alcons Simuliert (29P)
0,51	0,64	0,78	11,40	5,86	3,02

Raum 012



Abmessungen [m] (BxLxH)	6,5 x 10,2 x 4
Volumen [m ³]	265,2
Grundgeräuschpegel [dB]	30
Schüleranzahl	25
T _{soll} [s]	0,6
Messpegel [dB]	85
Besetzungszustand1:	leer
Besetzungszustand2:	9 Personen

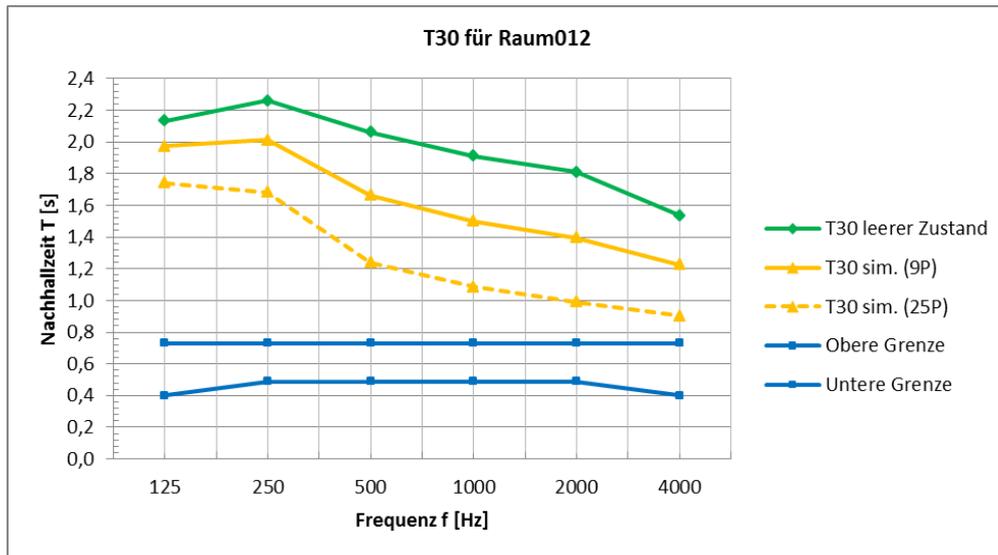


Abbildung 115: Nachhallzeit T30 von Raum 012

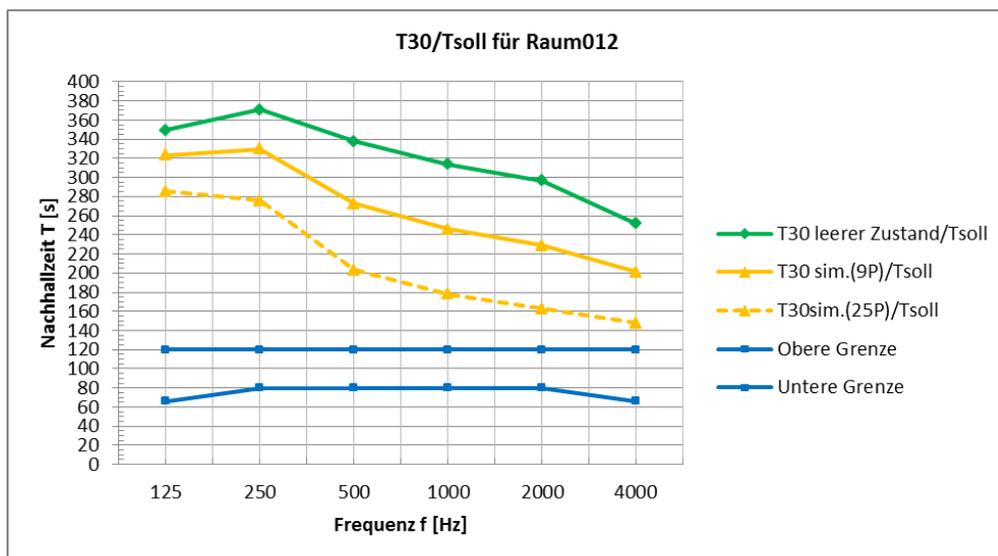


Abbildung 116: T30/Tsoll für Raum 012

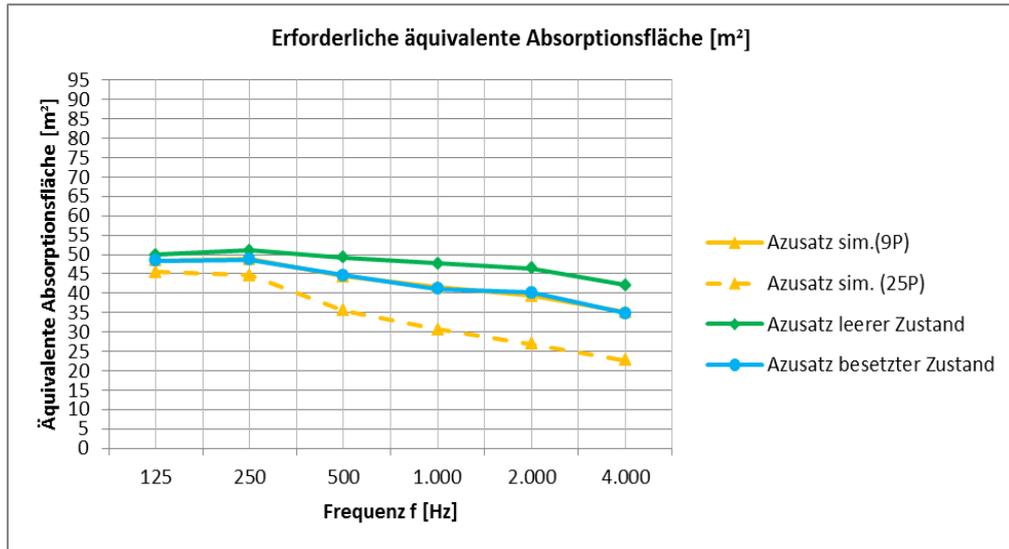


Abbildung 117: Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche für Raum 012

Tabelle 28: Akustische Parameter für Raum012

F [Hz]	T30 [s] Zustand leer	T30 [s] Zustand besetzt (9P)	T30 [s] Simuliert (9P)	EDT [s] Zustand leer	C50 [dB] Zustand leer	D50 [%] Zustand leer
125	2,13	1,98	1,97	2,01	-2	-5
250	2,26	2,00	2,01	2,22	-1	-3
500	2,06	1,68	1,66	2,03	0	-3
1000	1,91	1,48	1,50	1,96	0	-3
2000	1,81	1,43	1,39	1,82	0	-2
4000	1,53	1,21	1,23	1,50	2	-1

STI Zustand leer	STI Zustand besetzt (9P)	STI Simuliert (9P)	%Alcons Zustand leer	%Alcons Zustand Besetzt (9P)	%Alcons Simuliert (9P)
0,61	0,55	0,59	13,80	9,15	8,17

Tabelle 30: Absorptionsgradmessung von Esternoppenschaumstoff

Pyramidenschaumstoff_beige_030mm000L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsgrad	0,03	0,03	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,17	0,21	0,25	0,31	0,39	0,48	0,65
Pyramidenschaumstoff_beige_030mm050L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsgrad	0,03	0,04	0,08	0,11	0,13	0,19	0,25	0,33	0,43	0,54	0,64	0,69	0,65	0,59
Pyramidenschaumstoff_beige_030mm100L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsgrad	0,05	0,08	0,12	0,17	0,20	0,29	0,40	0,51	0,61	0,66	0,63	0,51	0,37	0,47
Pyramidenschaumstoff_beige_030mm150L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsgrad	0,06	0,11	0,17	0,24	0,28	0,42	0,53	0,62	0,64	0,57	0,40	0,29	0,58	0,61
Pyramidenschaumstoff_beige_030mm200L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsgrad	0,09	0,15	0,24	0,33	0,36	0,51	0,61	0,62	0,54	0,35	0,27	0,60	0,59	0,47
Pyramidenschaumstoff_beige_030mm250L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsgrad	0,13	0,21	0,30	0,40	0,43	0,57	0,62	0,55	0,37	0,23	0,53	0,62	0,40	0,67
Pyramidenschaumstoff_beige_030mm300L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsgrad	0,18	0,27	0,37	0,47	0,48	0,59	0,58	0,43	0,23	0,39	0,65	0,40	0,60	0,51
Pyramidenschaumstoff_beige_030mm400L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsgrad	0,27	0,38	0,49	0,58	0,53	0,53	0,39	0,20	0,44	0,63	0,35	0,62	0,49	0,57
Pyramidenschaumstoff_beige_030mm500L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsgrad	0,35	0,46	0,56	0,61	0,49	0,38	0,19	0,38	0,62	0,33	0,59	0,44	0,53	0,59

Tabelle 31: Absorptionsgradmessung von PUR Schaum

Schaumstoff grau_040mm000L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsg. a_0 [1]:	0,03	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,14	0,18	0,23	0,30	0,41	0,56	0,72	0,85
Schaumstoff grau_040mm050L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsg. a_0 [1]:	0,01	0,03	0,08	0,13	0,18	0,22	0,33	0,48	0,65	0,79	0,84	0,78	0,66	0,66
Schaumstoff grau_040mm100L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsg. a_0 [1]:	0,07	0,11	0,17	0,25	0,34	0,40	0,59	0,75	0,84	0,81	0,67	0,50	0,40	0,64
Schaumstoff grau_040mm150L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsg. a_0 [1]:	0,09	0,16	0,26	0,38	0,50	0,57	0,74	0,81	0,77	0,63	0,41	0,36	0,78	0,61
Schaumstoff grau_040mm200L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsg. a_0 [1]:	0,16	0,25	0,36	0,51	0,63	0,67	0,78	0,76	0,62	0,40	0,31	0,79	0,59	0,56
Schaumstoff grau_040mm250L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsg. a_0 [1]:	0,24	0,34	0,48	0,62	0,74	0,73	0,75	0,64	0,41	0,25	0,74	0,63	0,50	0,67
Schaumstoff grau_040mm300L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsg. a_0 [1]:	0,30	0,42	0,57	0,71	0,80	0,73	0,67	0,48	0,25	0,58	0,74	0,41	0,73	0,60
Schaumstoff grau_040mm400L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Absorptionsg. a_0 [1]:	0,43	0,57	0,71	0,81	0,83	0,64	0,42	0,20	0,65	0,72	0,38	0,72	0,59	0,68
Schaumstoff grau_040mm500L														
Frequenz [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600

14 Anhang D: Absorberdatenbank und Hersteller bzw. Montagefirmen

Tabelle 32: Absorberdatenbank

Typ	Absorbername	Farbe	Dicke [mm]	L x B [mm]	Fase	Abstand [mm]	Absorptionswerte je Frequenz					Preis/m ² [€]	Hersteller
							125	250	500	1000	2000		
WE	Plano	weiß	40	1250 x 625	Nein	0	0,33	0,42	0,88	0,98	0,98	28,00	Ziegler
WE	Plano	weiß	40	1250 x 625	Ja	0	0,33	0,42	0,88	0,98	0,98	30,80	Ziegler
WE	Plano	weiß	50	1250 x 625	Nein	0	0,30	0,58	0,90	0,90	0,90	34,00	Ziegler
WE	Plano	weiß	50	1250 x 625	Ja	0	0,30	0,58	0,90	0,90	0,90	38,00	Ziegler
WE	Basotect	grau	50	1000 x 500	Nein	0	0,22	0,50	1,00	1,00	1,00	27,80	Schaumstofflager.de
WE	Holzämmplatte Holzflex040	x	80	1220 x 580	x	0	0,18	0,43	0,86	0,96	0,88	9,00	Homatherm
WE	Holzämmplatte Holzflex040	x	40	1220 x 580	x	0	0,10	0,21	0,42	0,81	0,78	4,50	Homatherm
WE	Spanplatte	x	4	2800 x 2070	x	50	0,30	0,20	0,15	0,10	0,08	6,00	Peham
WE	Spanplatte (mit Steinwolle)	x	4	2800 x 2070	x	50	0,20	0,40	0,20	0,10	0,08	11,00	Peham
WE	Spanplatte	x	8	2800 x 2100	x	50	0,46	0,24	0,04	0,01	0,01	4,00	Peham
WE	Steinwollmatte (Feuerschutz)	x	50	1200 x 625	x	250	0,68	0,76	0,89	0,97	1,00	38,00	Knaufinsulation
DS	Deckensegel ohne Rahmen	weiß	50	2450 x 1200	Nein	300	0,35	0,79	1,00	1,00	1,00	74,49	Schaumstofflager.de
DS	Deckensegel mit Rahmen	weiß	40	3000 x 1250	Nein	300	0,30	0,77	1,10	1,40	1,20	80,00	Ziegler
DS	Deckensegel mit Rahmen	weiß	40	2500 x 1250	Nein	300	0,30	0,77	1,10	1,40	1,20	86,00	Ziegler
DS	Holzämmplatte Holzflex040	x	80	1200 x 625	x	0	0,18	0,43	0,86	0,96	0,88	9,00	Homatherm
DS	Steinwollmatte (Feuerschutz)	x	30	1200 x 625	x	270	0,72	0,78	0,89	0,93	1,03	7,00	Knaufinsulation

Legende: WE Wandelement; DS Deckensegel

Hersteller von Absorbern	Firmen für die Montage von Absorbern
<p><u>Fa. Ziegler Schallschutz GmbH</u> Freyweg 12; 5101 Bergheim bei Salzburg E - Mail: office@ziegler-schallschutz.at Telefon: +43 (662) 454580 Kontaktperson: Hr. Sadin Jahic; jahic@ziegler-schallschutz.at</p>	<p><u>Fa. Allclick Austria GmbH</u> Wiener Straße 100; 2511 Pfaffstätten E- Mail: office@allclick.at Tel.: 02252/49 001-0 Kontaktperson: Hr. Rene Jandl, Rene.Jandl@allclick.at</p>
<p><u>Schaumstofflager (Web)</u> Pestalozzistr.54; 86420 Diedorf E - Mail: ervice@schaumstofflager.de</p>	<p><u>Fa. Ruckenstuhl GmbH</u> Reichsstraße 50; 8430 Leibnitz E-Mail: office@ruckenstuhl-gmbh.at Tel. 03452/74 050; Handy 0664/101 17 44</p>
<p><u>Fa. Homatherm GmbH</u> Ahornweg 1; D-06536 Berga E-Mail: info@homatherm.com Telefon: +49 / 34651 416 – 0</p>	<p><u>Fa. Wolf Hubert Ges.m.b.H.</u> Sulmstraße 5; 8551 Wies E-Mail: maler.wolf@utanet.at Tel. 03465/24 05 Handy 0699/101 11 664</p>
<p><u>Fa. KnaufInsulation</u> Industriestraße 18; A-9586 Fürnitz E-Mail: office@knaufinsulation.at Telefon: +43 4257 3370-0</p>	
<p><u>Fritz Peham GesmbH</u> Pebering Straß 11-13; 5301 Eugendorf E-Mail: office@pehamholz.at Tel +43 (0) 6225 2656</p>	

15 Anhang E: Leitfaden der akustischen Sanierung

Leitfaden für die akustische Sanierung

von

Klassenräumen

erstellt im Zuge der Diplomarbeit

„Akustische Sanierung von Klassenräumen“

von

Claudia Reithner

Begutachter/Betreuer der Diplomarbeit:

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Graber

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation
der Technischen Universität Graz

Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gemot Kubin

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	135
2	Einführung in die Thematik der Klassenraumakustik	136
	2.1 Ursachen und Zusammenhänge der Lärmentwicklung	136
	2.2 Psychische sowie physische Auswirkungen	137
3	Akustische Sanierungsvarianten	141
	3.1 Anbringung von Absorbern	141
	3.2 Absorbermodule	143
	3.2.1 Vorgefertigte Absorbermodule	143
	3.2.2 Eigenherstellung individueller Absorbermodule	147
	3.3 Sanierungsvarianten	158
	3.3.1 Sanierung mit Absorbermodulen	158
	3.3.2 Innenausbau mit Gipskartonlochplatten	162
4	Durchführung der akustischen Sanierung	165
	4.1 Vorbereitungen zur Messung	167
	4.1.1 Auswahl des Messequipments	167
	4.1.2 Verkabelung des Messequipments	170
	4.1.3 Festlegung der Mess- und Senderpositionen	173
	4.2 Durchführung der Messung	175
	4.2.1 Setup Einstellungen - Audio Devices	176
	4.2.2 Setup Einstellungen - Kalibrierung	177
	4.2.3 Messung der Impulsantwort	179
	4.2.4 Checkliste für potentielle Fehlerquellen	182
	4.3 Analyse der Messergebnisse und Absorberauswahl	182
	4.3.1 Eingabe der Basisdaten	183
	4.3.2 Import der Messwerte	184
	4.3.3 Verarbeitung & Simulation der akustischen Parameter	186
	4.4 Lukrieren der finanziellen Mittel	188
	4.4.1 Schulbezogene Institutionen	188
	4.4.2 Externe Institutionen	188
	4.4.3 Diverse Sponsoren	189
	4.4.4 Spendengenerierung durch Veranstaltungen	190

5	Rahmenbedingungen einer akustischen Sanierung	191
5.1	Baurechtliche Fragen und Brandschutzvorschriften.....	191
5.2	Aspekte der Sach- sowie Personenversicherung	195
5.3	Pädagogische Begleitmaßnahmen	195
5.3.1	Die Zuhörschule	195
5.3.2	OLGA – Ohne Lärm geht’s auch	197
6	Anhang A: Ergänzungen zu Kapitel 3	199
7	Anhang B: Ergänzungen zu Kapitel 4	206
8	Anhang C: Sponsorenpräsentation	210
9	Literaturverzeichnis	212

Zusammenfassung

Wissenschaftliche Ermittlungen sowie Befragungen ergaben, dass die Lärmsituation in Klassenräumen einer der wesentlichsten Belastungsfaktoren für LehrerInnen und SchülerInnen ist. Eine der Ursachen für zu hohen Lärmpegel ist eine zu hohe Nachhallzeit, wie dies speziell in Klassenräumen aus dem 19./20.Jdht der Fall ist. Mit einer akustischen Sanierung könnte dem entgegengewirkt werden, jedoch ist die Sanierung durch einen Fachbetrieb mit hohen Kosten verbunden, sodass diese auf Grund eines beschränkten Budgets oftmals nicht umgesetzt werden kann.

Fokus des Leitfadens ist es daher, diese Thematik leicht verständlich aufzubereiten, sodass die akustische Sanierung auch von Laien selbständig durchgeführt werden kann. Hierzu wurde ein Simulationstool entwickelt, das die automatische Verarbeitung der Messdaten sowie die Simulierung des sanierten Zustandes ermöglicht. Neben kostengünstigen Sanierungsvarianten zur Grobsanierung wird alternativ auch die Sanierung durch den Fachbetrieb präsentiert.

Dieser Leitfaden zur akustischen Sanierung von Klassenräumen wurde von C. Reithner im Rahmen der Diplomarbeit an der Technischen Universität Graz erstellt. Basis für diese Diplomarbeit sind umfangreiche Recherchen, sowie die wissenschaftliche Aufbereitung dieser Thematik durch Müller, der ebenfalls eine Diplomarbeit zum Thema Klassenraumakustik an der Technischen Universität Graz verfasste.

1 Einleitung

Dieser Leitfaden beinhaltet eine Einführung in die Thematik der Klassenraumakustik sowie die detaillierten Schritte einer akustischen Sanierung und deren Rahmenbedingungen. Für die übersichtliche Gestaltung und somit leichte Verständlichkeit des Leitfadens wurden in den einzelnen Kapiteln nur die wesentlichsten Informationen, die für die Umsetzung der akustischen Sanierung erforderlich sind, angeführt. Ergänzende Informationen zu den jeweiligen Kapiteln erhalten sie in Anhang A, Seite 198 bzw. Anhang B, Seite 205.

Zu Beginn werden in Kapitel 2 die Ursachen und Zusammenhänge der Lärmentwicklung sowie die psychischen und physischen Auswirkungen von Lärm auf SchülerInnen und LehrerInnen erörtert, um ein grundsätzliches Verständnis für die Thematik zu schaffen.

In Kapitel 3 werden grundlegende Informationen zur akustischen Sanierung angeführt und akustische Sanierungsvarianten erarbeitet. Neben den grundlegenden Absorbermodulen werden auch Gesamtkonzepte präsentiert, die einen Überblick über mögliche Sanierungsvarianten bieten.

Basierend auf diesen Informationen werden in Kapitel 4 die einzelnen Schritte, die für die Erstellung und Durchführung einer individuellen Sanierungsvariante erforderlich sind, erläutert. Zu Beginn werden die Vorbereitungen zur Messung und die Durchführung der Messung behandelt. Sobald die Messergebnisse vorliegen, können diese mit dem eigens dafür entwickelten Simulationstool verarbeitet und eine Auswahl der gewünschten Absorber getroffen werden. Für diese Absorberauswahl werden sowohl eine Abschätzung der Kosten angegeben, als auch die akustischen Parameter nach der Sanierung simuliert. Sobald das individuelle Absorberkonzept für die Sanierung fertig gestellt ist, müssen die finanziellen Mittel lukriert werden. Um die Gewinnung von potentiellen Sponsoren zu erleichtern, wurde eine Präsentationsunterlage zusammengestellt, die für die Anfragen genutzt werden kann.

Abschließend werden in Kapitel 5 die Rahmenbedingungen einer Sanierung angeführt. Neben baurechtlichen Vorgaben und Brandschutzvorschriften sind auch die Aspekte der Sach- sowie Personenversicherung zu beachten. Ebenso werden pädagogische Begleitmaßnahmen präsentiert, die zusätzlich zur akustischen Sanierung empfohlen werden.

2 Einführung in die Thematik der Klassenraumakustik

Neben den Ursachen und Zusammenhängen der Lärmentwicklung in Klassenräumen werden in diesem Kapitel auch die psychischen und physischen Auswirkungen von Lärm auf SchülerInnen und LehrerInnen erörtert.

2.1 Ursachen und Zusammenhänge der Lärmentwicklung

Umfragen der österreichischen Kooperation „ARGE Zuhören“⁹⁷, der Universität in Bremen und die eines Arbeitskreises des staatlichen Schulamtes in Darmstadt ergaben, dass der Lärm in den Klassen signifikant häufiger als zu laut empfunden wird und dass dies ein wesentlicher Belastungsfaktor im Lehrberuf ist. Neben unterschiedlichen Lärmquellen des Innen- und Außenbereiches, der Anzahl und dem Alter der SchülerInnen sowie den pädagogischen Fähigkeiten der LehrerInnen ist vor allem die hohe Nachhallzeit ein wesentlicher Faktor für den hohen Lärmpegel in den Klassenräumen der zu folgender Lärmkaskade führt:

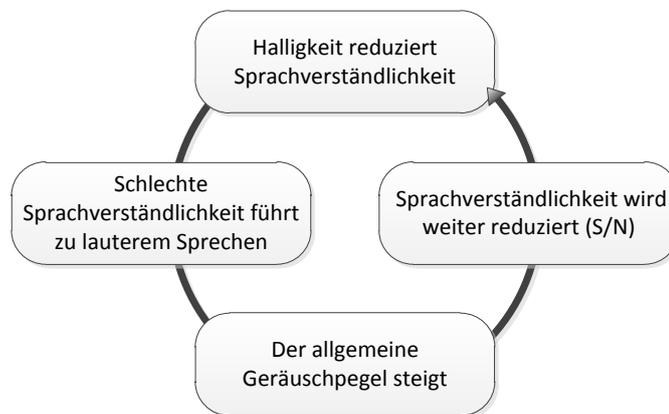


Abbildung 118: Lärmkaskade in Anlehnung an [TIESLER, S.13]

Die Halligkeit reduziert die Sprachverständlichkeit, was zu lauterem Sprechen der LehrerInnen sowie der SchülerInnen führt. Dieses Phänomen wird als Lombard Effekt bezeichnet. Dabei handelt es sich um den Effekt des automatischen Sprechpegelanstiegs von 0,3 - 1dB pro 1 dB Umgebungsgeräuschpegel.

⁹⁷ [ARGE, www.zuhoeren.at(2009)]

Zusätzlich zum Sprechpegelanstieg verhalten sich SchülerInnen in halligen Räumen lauter, wodurch der allgemeine Geräuschpegel angehoben wird. Das wiederum führt zu einer Reduzierung der Sprachverständlichkeit. Dieser Teufelskreis wird unter anderem von Tiesler als „Lärmkaskade“ bezeichnet, die nur durch Reduzierung der Nachhallzeit gebrochen werden kann.⁹⁸

Müller⁹⁹ konnte durch zahlreiche Messungen in Unterrichtsräumen belegen, dass diese Problematik vor allem in Schulgebäuden aus dem 19./20. Jahrhundert vorliegt, wie folgende Abbildung repräsentativ für sein Gesamtresumee zeigt:

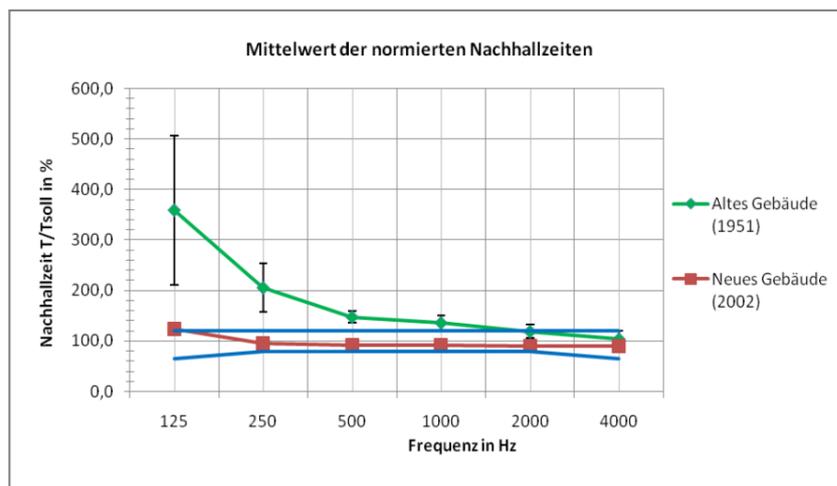


Abbildung 119: Mittelwert und Standardabweichung der normierten Nachhallzeiten für das alte und das neue Gebäude der Grundschule Wiltz/Luxemburg [MUELLER, S.161]

Die Nachhallzeit des neuen Gebäudes (rote Kurve) liegt zur Gänze innerhalb des Toleranzbereiches (blaue Kurven) laut DIN18041. Die Nachhallzeit des alten Gebäudes wiederum liegt deutlich außerhalb des geforderten Bereiches. Im tieffrequenten Bereich übersteigt sie die Sollnachhallzeit nach Norm sogar um über 300%. Eine akustische Sanierung dieser Klassenräume wird somit dringend empfohlen, da die Belastung auf Grund einer derart hohen Nachhallzeit sowohl psychische, als auch physische Auswirkungen haben kann. Diese werden im nachfolgenden Kapitel angeführt.

2.2 Psychische sowie physische Auswirkungen

Bei der Eruierung der psychischen und physischen Auswirkungen durch Lärm stellt sich die Frage, wann ein Geräusch als Lärm empfunden und somit zur Belastung wird. Kalivoda nannte situative (Ort, Zeitpunkt, Situation,...), akustische (physikalische Charakteristik) sowie persönliche Faktoren (emotionale und kognitive Bezüge zum Geräusch) als Basis für die Entscheidung ob ein Geräusch als Lärm empfunden wird oder nicht.¹⁰⁰

⁹⁸ Siehe [TIESLER]

⁹⁹ [MUELLER]

¹⁰⁰ Siehe [KALIVODA, S.103]

Einen Überblick über alle Lärmwirkungen verschaffen die WHO Richtlinien aus dem Jahr 1999.¹⁰¹ Folgende Auswirkungen werden unter anderem angeführt:

- Lärmbedingte Hörschäden
- Interferenz mit der Sprachkommunikation
- Beeinträchtigung der Ruhephase und des Schlafes
- Kardiovaskuläre und physiologische Effekte
- Psychische Gesundheitseffekte
- Leistungsbeeinträchtigungen

Wie diese Aufzählung bereits zeigt, kann Lärm sowohl physische als auch psychische Schäden bewirken. Erstere sind im üblichen Pegelbereich von Unterricht nicht zu erwarten, psychische Auswirkungen können jedoch sehr wohl gegeben sein. Sind LehrerInnen oder SchülerInnen dauerhaft einem zu hohen Lärmpegel ausgesetzt, so ist der Lärm ein Belastungsfaktor bzw. ein sogenannter Stressor, welcher unter anderem zu folgenden psychonervalen und vegetativen Reaktionen führen kann:¹⁰²

- Aufmerksamkeits- sowie Konzentrationsverlust
- Beeinträchtigung der Handlungsregulation
- Herzfrequenz/- sowie Blutdruckanstieg
- Schlafstörungen
- Erhöhung des Muskeltonus (Schreibdruck)

Wie die Studie „LehrerIn 2000“¹⁰³ ergibt, werden Lärmpegel unterschiedlich wahrgenommen. Bei gleichem Lärmpegel empfinden Frauen eine höhere Lärmbelastung als Männer und ältere LehrerInnen eine höhere als jüngere. Auch wenn das subjektive Empfinden unterschiedlich ist, so können doch objektive Auswirkungen festgestellt werden. Tiesler untersuchte den Zusammenhang zwischen Arbeitsgeräuschpegel und Herzfrequenz und stellte fest, dass diese nahezu idente Verläufe aufweisen. Bei einer Steigerung des Schallpegels um 5-8 dB steigt die Herzfrequenz um 5-10 Schläge pro Minute, was zu einer schnelleren Ermüdung führt.¹⁰⁴

Neben den bereits genannten psychischen und physischen Auswirkungen gibt es noch einen weiteren Bereich der durch Lärm mittlerer Intensität, wie dies bei Klassenräumen der Fall ist, beeinträchtigt wird. Die auditive Wahrnehmung ist mit dem Kurzzeitgedächtnis verbunden, was zu einer unmittelbaren Beeinflussung der kognitiven Leistung führt.

¹⁰¹ [WHO]

¹⁰² Vgl. [AIÖ1]

¹⁰³ Vgl. [SORA]

¹⁰⁴ Siehe [TIESLER1, S.341-342]

Vor allem Vor- und GrundschülerInnen sind davon betroffen und haben dadurch Probleme das Gesagte richtig zu verstehen, zu verarbeiten und zu behalten.¹⁰⁵

Abbildung 120 zeigt, dass sich die Klassenraumgeräusche unter dem Einfluss der Nachhallzeit auf die kognitiven Fähigkeiten der SchülerInnen auswirken. Je größer die Anstrengungen für das akustische Verständnis sind, desto weniger Aufmerksamkeit können die SchülerInnen dem Inhalt entgegenbringen:

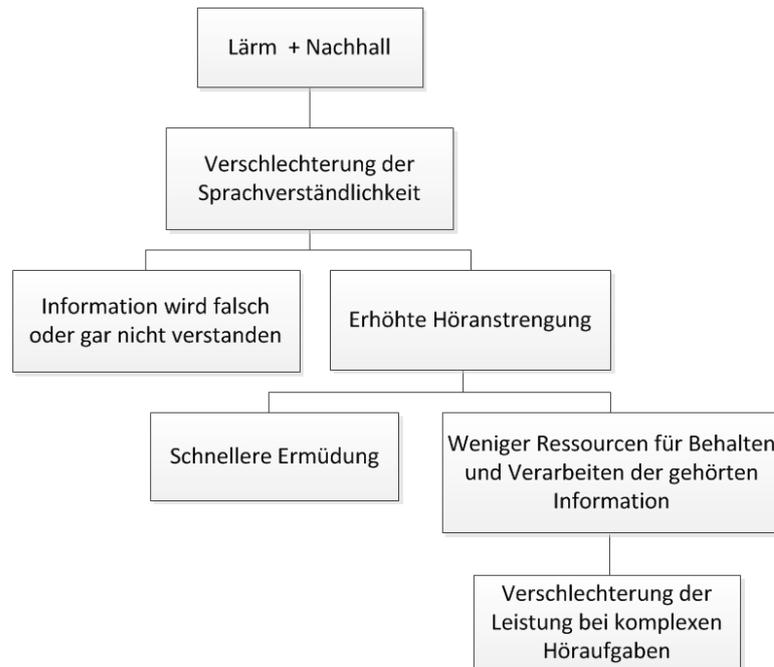


Abbildung 120: Wirkungen von Lärm und Nachhall auf das Hörverstehen vgl. [SCHICK2, S.19]

Leistungsbeeinträchtigung durch Hintergrundschall mittlerer Intensität wird auch als „Irrelevant Sound Effekt“ bezeichnet. Dieser Effekt wurde in einem Experiment untersucht das zeigte, dass sprachlicher Hintergrundschall, ebenso wie Hintergrundmusik, die Fähigkeit visuell dargebotene Informationen zu behalten, erschwert.

Auch Leistner bestätigt in seiner Studie, bei der Kinder Pseudowörter unterscheiden mussten, dass ungünstige Nachhallzeiten das Behalten sprachlicher Informationen im Arbeitsgedächtnis beeinträchtigen.¹⁰⁶ Ergänzend sei noch zu erwähnen, dass Sprache als Hintergrundgeräusch im Vergleich zu einem Klassenraumgeräusch ohne Sprachanteil eine höhere Leistungsbeeinträchtigung zur Folge hat.¹⁰⁷

¹⁰⁵ Siehe [SCHICK2],

¹⁰⁶ Vgl. [LEISTNER]

¹⁰⁷ Vgl. [KLATTE2]

Abbildung 121 zeigt eine Zusammenfassung all jene Parameter, die durch Minimierung der Nachhallzeit verbessert werden können:

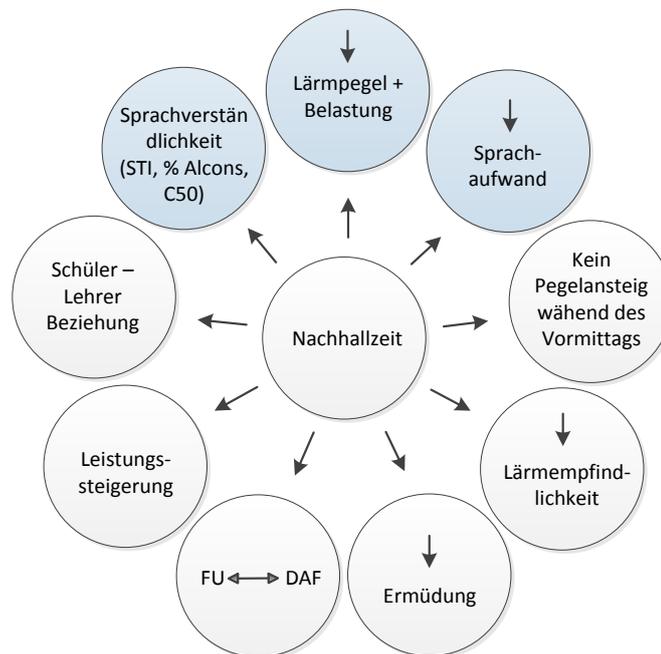


Abbildung 121: Verbesserungspotentiale durch Reduzierung der Nachhallzeit [MÜLLER S.123]

- Reduzierung des Lärmpegels und somit Reduzierung der Lärmbelastung der LehrerInnen und SchülerInnen.
- Reduzierung des Sprachaufwands der LehrerInnen
- Die Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels für nacheinander folgende Unterrichtsstunden über den Vormittag ist deutlich reduziert oder bleibt aus.
- Reduzierung der Lärmempfindlichkeit (Reduzierung der Herzfrequenzreaktion auf den Stressor „Lärm“)
- Ausgleich zwischen Ermüdungs- und Aktivierungsphasen
- Reduzierung oder Ausbleiben der Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels bei Wechsel von Frontalunterricht (FU) zu differenzierten Arbeitsformen (DAF)
- Verbesserung der Leistungsfähigkeit der SchülerInnen
- Verbesserung der LehrerInnen-SchülerInnen-Beziehung
- Zunahme der Sprachverständlichkeit. Akustische Parameter der Sprachverständlichkeit (STI, %Alcons, C50) verbessern sich durch Abnahme der Nachhallzeit.

Nähere Informationen zu den akustischen Parametern und deren Sollwerten nach Norm finden sie in Anhang B, Seite 205.

Diese, in Abbildung 121 dargestellten, Verbesserungspotentiale können durch die nachfolgend präsentierten Absorbermodule und akustischen Sanierungsvarianten realisiert werden.

3 Akustische Sanierungsvarianten

Zu Beginn des Kapitels wird auf die Ermittlung der akustisch nutzbaren Fläche eines Raumes und auf die akustisch sinnvolle Anbringung von Absorbern eingegangen, da dies eine wesentliche Grundlage für die akustische Sanierung ist. Anschließend werden in Kapitel 3.1 vorgefertigte Absorbermodule und die Eigenherstellung individueller Absorbermodule vorgestellt. Auf Basis dieser Absorbermodule werden in Kapitel 3.2 unterschiedliche Sanierungsvarianten gezeigt und deren Kosten gegenübergestellt. Der Einsatz der Absorbermodule und die Sanierungsvarianten werden an Hand eines Raumes präsentiert, der im Zuge der Diplomarbeit am Keplergymnasium Graz vermessen wurde. Durch diesen praktischen Bezug wird die komplexe Thematik einer akustischen Sanierung verständlich aufbereitet und anschaulich dargestellt, sodass man gestützt auf den vorgestellten Modulen eine individuelle Sanierungsvariante erarbeiten kann.

3.1 Anbringung von Absorbern

Bei der Anbringung von Absorbern ist allem Voran zu ermitteln, welcher Anteil der gesamten Raumfläche grundsätzlich akustisch nutzbar ist. Nachdem die Auskleidung des Bodens mit einem absorbierenden Teppich aus Gründen des Brandschutzes bzw. der Reinigung meist nicht möglich ist, können primär nur die Seitenwände und die Deckenfläche berücksichtigt werden. Bei den Wandflächen sind die Flächen von Fenstern, Türen, der Tafel und sonstigem Inventar, das nicht mit Absorbern verkleidet werden kann, abzuziehen. Die Auskleidung der Deckenfläche wird meist durch kein Inventar eingeschränkt, die abgehängte Beleuchtung ist allerdings bei der Montage der Absorber zu berücksichtigen. Zusätzlich ist zu beachten, dass für die Verbesserung der Sprachverständlichkeit ein akustischer Spiegel von ca. 20% der Deckenfläche benötigt wird, das bedeutet, dass ca. 80% mit Absorbern ausgekleidet werden können.

In Tabelle 33 wird für Raum 005 exemplarisch ein Überblick über die Einzel- und Gesamtflächen sowie die davon akustisch nutzbare Fläche gegeben:

Tabelle 33: Akustisch nutzbare Fläche von Raum 005

	Gesamtfläche	Akustisch nutzbare Fläche	Akustisch nutzbare Fläche
Bodenfläche	65 m ²	0 m ²	0%
Deckenfläche	65 m ²	ca. 52 m ²	80%
Wandfläche	135 m ²	ca. 97 m ²	72%
Gesamtfläche	265 m ²	149 m ²	56 %

Bei der Wandfläche wurde neben der Tafel- sowie der Türfläche, die gesamte Fensterwand abgezogen, da die Flächen zwischen den Fenstern von Vorhängen bedeckt waren. Ist dies nicht der Fall, kann auch dieser Zwischenraum für die akustische Sanierung genutzt werden.



Abbildung 122: Raum 005 (Keplergymnasium Graz)

Nachdem die prinzipiell zur Verfügung stehende, akustische Fläche festgelegt wurde, ist die akustisch sinnvolle Anbringung näher zu betrachten, da die Absorber nur in gewissen Bereichen die Akustik des Raumes verbessern. Die Norm DIN18041¹⁰⁸ zeigt folgende günstige sowie ungünstige Varianten auf:

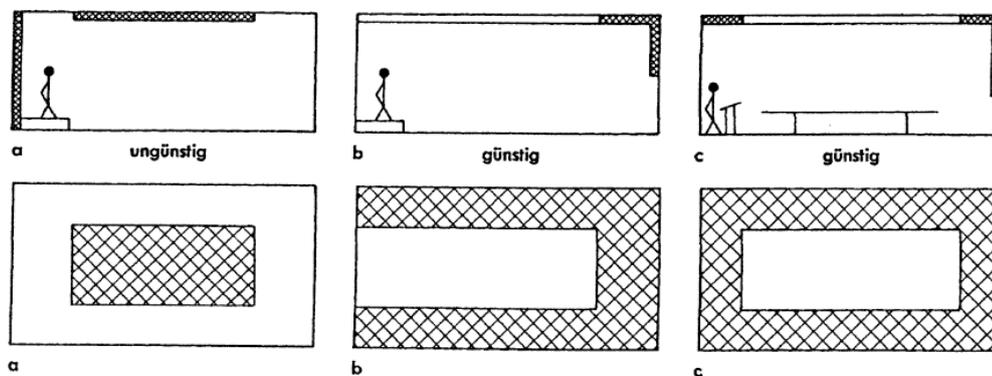


Abbildung 123: Anbringung von Absorbern [DIN18041]

Variante a ist nicht zu empfehlen, da die für die Verständlichkeit wichtigen Reflexionen über die Decke absorbiert werden. Wesentlich bessere Ergebnisse sind mit Variante b und c zu erzielen, da durch diese Anordnung die erforderlichen Deckenreflexionen gegeben sind, gleichzeitig aber unerwünschte Reflexionen von der Rückseite absorbiert werden.

Zusätzlich zur akustisch sinnvollen Positionierung an den Wandflächen ist auch der Abstand des Absorbers zur Wand zu beachten, da dieser einen Einfluss auf das Absorptionsverhalten hat. Nähere Informationen hierzu befinden sich in Anhang A, Seite 198.

¹⁰⁸ [DIN18041]

3.2 Absorbermodule

Neben vorgefertigten Absorbermodulen wird in diesem Kapitel auch die Eigenherstellung individueller Absorbermodule behandelt. Ziel ist es, einen elementaren Überblick über grundlegende Modelle zu geben. Die theoretischen Grundlagen zu Absorbieren und zum Absorptionsgrad finden sie ergänzend in Anhang A, Seite 198.

3.2.1 Vorgefertigte Absorbermodule

Handelsübliche Absorbermodule sind sowohl für die akustische Sanierung der Wandflächen, als auch für die akustische Sanierung der Deckenfläche erhältlich. Da es eine Vielzahl an unterschiedlichen Absorbermodulen gibt, werden an dieser Stelle nur grundlegende Wand- und Deckenabsorber vorgestellt. Eine detaillierte Auflistung aller für die Sanierung von Klassenräumen ausgewählten Module befindet sich in Anhang A, Seite 198.

Vorgefertigte Wandmodule

Für Wandabsorber werden bevorzugt Akustikplatten aus Melaminharzschaum (Handelsname: Basotect) eingesetzt, da sie sich durch hohe Absorptionswerte und eine leichte Verarbeitung auszeichnen. Der Preis ist abhängig von der Dicke des Materials, dessen Farbe und der Verarbeitung des Plattenabschlusses. Viele Hersteller bieten Akustikplatten mit abgeschrägten Kanten, auch Fase genannt, an. Dieser Abschluss ist optisch ansprechender als eine gerade Kante, jedoch auch mit Mehrkosten von ca. 10 - 15% verbunden. Die Farbe des Melaminharzschaumes ist standardmäßig grau oder weiß, es gibt vereinzelt aber auch die Möglichkeit gegen Aufpreis eine farbliche Kaschierung anzubringen ohne die Absorbereigenschaften zu beeinträchtigen. Dies bietet die Option, neben dem akustischen Aspekt auch die optische Raumgestaltung miteinzubinden. Bezüglich Größe gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Plattenabmessungen, wobei kleinere Platten im Durchschnitt etwas teurer sind als größere. Zusätzlicher Vorteil der größeren Platten ist die schnellere Montage. Die Montage der Akustikplatten erfolgt mit Klebstoff, sodass die Anbringung auch von Laien erfolgen kann. Es wird jedoch empfohlen, im Vorfeld durch einen Fachexperten überprüfen zu lassen, ob die Wandoberfläche dafür geeignet ist. Abbildung 124 und Abbildung 125 zeigen exemplarisch Akustikplatten aus Melaminharzschaum.

Da diese dass Schaumstoffabsorber leicht beschädigt werden können, wird empfohlen sie nur oberhalb von 2m Raumhöhe anzubringen. Robustere Absorber die unterhalb von 2m angebracht werden können werden in Abschnitt 3.2.2 vorgestellt.



Abbildung 124: Akustikplatte aus Melaminharzschaum ohne Fase, weiß [SONATECH]

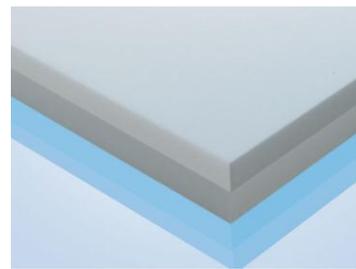


Abbildung 125: Akustikplatte aus Melaminharzschaum mit Fase, grau [SONATECH]

In Tabelle 34 sind exemplarisch die Absorptionswerte sowie der Quadratmeterpreis von ausgewählten Melaminharzschaumplatten angeführt.

Tabelle 34: Exemplarische Absorptionswerte für Melaminharzschaumplatten

Dicke [mm]	Absorptionswerte						Preis/m ² [€]
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
30	0,15	0,25	0,66	0,92	0,92	0,92	ca. 27,00
50	0,30	0,58	1,00	1,00	1,00	1,00	ca. 34,00
70	0,62	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	ca. 64,00

Durch die größere Dicke wird vor allem der tieffrequente Bereich von 125 Hz bis 250 Hz deutlich besser bedämpft, aber auch im Frequenzbereich oberhalb von 250 Hz ist die absorbierende Wirkung größer.

Je nach Absorptionsgrad des Materials kann es sein, dass durch den Einsatz eines Absorbers mit größer Dicke in Summe deutlich weniger Absorbermaterial benötigt wird, sodass diese Variante trotz eines höheren Quadratmeter Preises günstiger ist. Abbildung 126 zeigt die zur Erreichung der Sollnachhallzeit erforderliche Absorberfläche, wenn für den gesamten Raum 005 die in Tabelle 34 angeführten Absorber eingesetzt werden.

In diesem Fall würden bei Verwendung des 70mm dicken Absorbers um 2/3 weniger Absorbermaterial benötigt werden als bei Verwendung des 50mm dicken Absorbers. Die Sanierung mit den 70mm Platten wäre somit um fast 50% günstiger als jene mit den 50mm Platten.

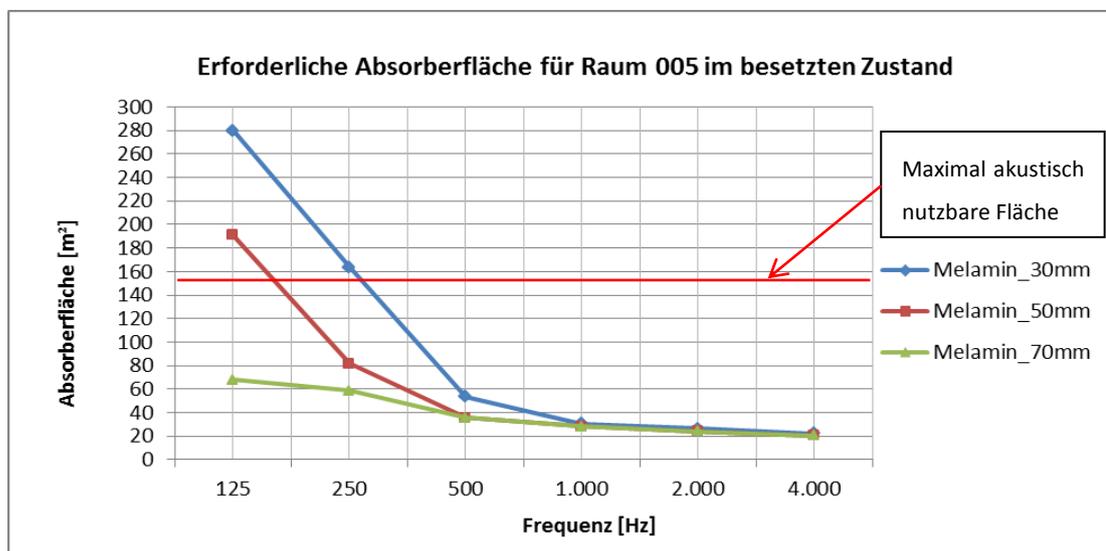


Abbildung 126: Erforderliche Absorberfläche bei Verwendung der vorgefertigten Melaminharzschaumplatten

Betrachtet man die in Abbildung 126 dargestellte Absorberfläche, so stellt sich auf Grund der unterschiedlichen Fläche je Frequenz die Frage, wie viel Quadratmeter Absorbermaterial nun tatsächlich eingesetzt werden sollen.

Da im Zuge der akustischen Sanierung vor allem die Bedämpfung des mittleren bis tieffrequenten Frequenzbereiches wichtig ist, beziehen sich die Angaben der in den Raum einzubringenden Absorberfläche in diesem Leitfaden auf die Flächenangabe bei 125 Hz. Für den hochfrequenten Bereich wäre theoretisch weniger Absorberfläche erforderlich um die Sollnachhallzeit nach Norm zu erreichen, allerdings ist es wichtig sicherzustellen, dass der tieffrequente Bereich ausreichend bedämpft wird. Bringt man im Raum die geforderte Absorberfläche von 125 Hz ein, so werden die tiefen Frequenzen optimal bedämpft und die hohen Frequenzen etwas stärker als erforderlich, sie befinden sich aber dennoch innerhalb des Toleranzbereiches (Definition siehe Anhang B, Seite 205).

Wie in Tabelle 33 angeführt, steht bei Raum 005 eine akustisch nutzbare Fläche von 149 m² zur Verfügung. Würde die Sanierung ausschließlich mit diesen Melaminharzschaumplatten realisiert werden, so müssten die Absorberplatten mindesten eine Dicke von 70mm aufweisen, da ansonsten mehr Absorberfläche benötigt wird, als an akustisch nutzbarer Fläche zur Verfügung steht.

Da Schaumstoffabsorber leicht beschädigt werden können, wird empfohlen sie nur oberhalb von 2m Raumhöhe anzubringen. Robustere Absorber die unterhalb von 2m angebracht werden können werden in Abschnitt 3.2.2 vorgestellt.

Vorgefertigte Deckenmodule

Die zuvor genannten Wandmodule können in gleicher Weise auch als Deckenabsorber genutzt werden. Durch Abhängen der Akustikplatten erzielt man jedoch einen noch besseren Absorptionsgrad, sodass diese sogenannten Deckensegel gegenüber direkt angebrachten Absorbern zu bevorzugen sind. Deckenabsorber sind ebenfalls meist aus Melaminharzschaum gefertigt und bieten durch die Abhängung zusätzlich zum verbesserten Absorptionsgrad den Vorteil einer optischen Verkleinerung des Raumes.

Deckensegel sind in unterschiedlicher Ausführung hinsichtlich Größe, Konstruktion und Farbe erhältlich. Eine kostengünstigste Variante ist, wie in Abbildung 128 dargestellt, eine Schaumstoffplatte ohne Alurahmen die mittels Draht- oder auch Nylonseil von der Decke abgehängt wird. Die rückwertige Aluschiene dient zur zusätzlichen Stabilisierung. Alternativ ist es auch möglich, die Seile an den Hacken aus Abbildung 129 zu befestigen. Diese können direkt in den Absorber eingedreht werden. Abbildung 127 zeigt ein farblich kaschiertes Deckensegel mit Alurahmen. Diese Variante ist optisch ansprechender, die zusätzliche Farbe und der hochwertige Alurahmen erhöhen allerdings den Preis des Moduls.



Abbildung 127: Farbiges Deckensegel aus Melaminharzschaum mit Alurahmen [SCHAUMSTOFFLAGER]



Abbildung 128: Deckensegel aus Melaminharzschaum mit Aluschiene zur Stabilisierung
[SCHAUMSTOFFLAGER]



Abbildung 129: Hacken für das Deckensegel ohne Alurahmen

Das Deckensegel aus Abbildung 127 muss von einer facheinschlägigen Firma montiert werden, da auf Grund des Alurahmens bei Fehlmontage eine hohe Verletzungsgefahr für die im Raum anwesenden Personen besteht. Das Deckensegel aus Abbildung 128 besteht bis auf die Stabilisierungsschiene zur Gänze aus Schaumstoff. Da somit keine Verletzungsgefahr besteht, wäre eine Montage durch den Laien möglich. Es wird aber auch für dieses Absorbermodul dringend empfohlen, die Eignung der Bausubstanz im Vorfeld überprüfen zu lassen um gewährleisten zu können, dass eine Montage an der Decke möglich ist.

Tabelle 35 führt exemplarisch die Absorptionswerte sowie den Quadratmeterpreis ausgewählter Deckensegel an. Man sieht, dass durch vergrößern des Abstandes zur Wand der Absorptionsgrad im tieffrequenten Bereich erhöht werden kann.

Tabelle 35: Exemplarische Absorptionswerte für Deckensegel

Dicke [mm]	Absorber (Abstand zur Decke)	Absorptionswerte						Preis/m ² [€]
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
20	Deckensegel (100mm)	0,18	0,47	0,96	1,00	1,00	1,00	ca. 45,00
20	Deckensegel (300mm)	0,38	0,50	0,80	1,00	1,00	1,00	ca. 45,00
40	Deckensegel (300mm)	0,31	0,79	1,00	1,00	1,00	1,00	ca. 80,00

Abbildung 130 zeigt die erforderliche Absorberfläche, wenn für den gesamten Raum 005 ausschließlich die in Tabelle 35 angeführten Deckenabsorber eingesetzt werden. „D“ bezeichnet die Dicke des Absorbers, „A“ bezeichnet den Abstand zur Wand.

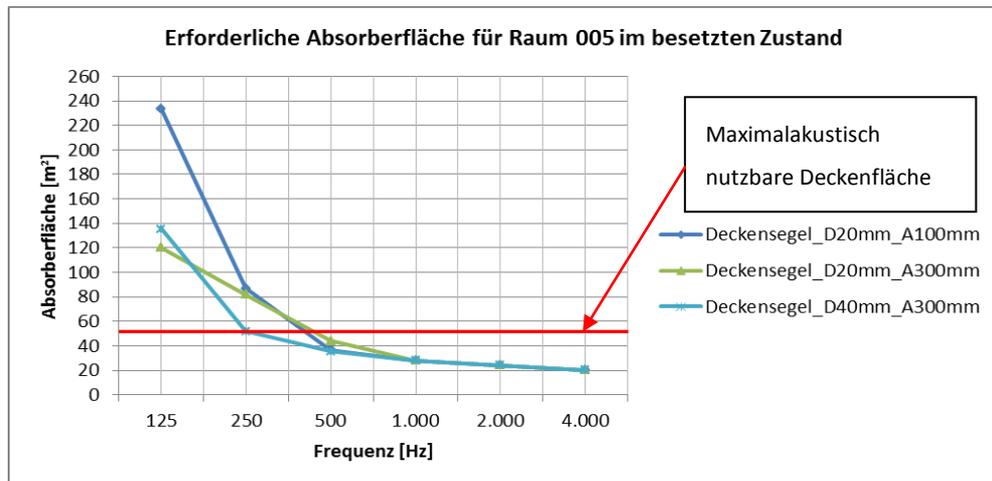


Abbildung 130: Erforderliche Absorberfläche bei Verwendung der vorgefertigten Deckensegel aus Tabelle 11

Werden für die akustische Sanierung ausschließlich die in Tabelle 35 angeführten Deckensegel verwendet, so ist die Erreichung von T_{soll} nicht möglich, da mehr Absorberfläche benötigt wird als an akustisch nutzbarer Deckenfläche zur Verfügung steht. Um die Sollnachhallzeit nach Norm erreichen zu können müssen zusätzliche Absorbermodule eingesetzt werden.

3.2.2 Eigenherstellung individueller Absorbermodule

Fertige Absorbermodule bieten den Vorteil, dass sie direkt vom Fachhandel bezogen werden können, haben aber den Nachteil von relativ hohen Materialkosten. In diesem Abschnitt wird daher die kostengünstige Herstellung individueller Wand- sowie Deckenmodule als Alternative präsentiert. Auch bei diesen Absorbern sollte bereits im Vorfeld ein Fachexperte zur Überprüfung der Bausubstanz herangezogen werden um sicherstellen zu können, dass die Montage der Absorbermodule möglich ist.

Wandmodule

Neben dem klassischen Melaminharzschaum können auch Materialien wie Steinwolle oder Weichfaserplatten aus Holz verwendet werden. (siehe Abbildung 131 und Abbildung 132 auf der nachfolgenden Seite). Diese Materialien weisen ähnliche bzw. zum Teil sogar bessere Absorptionswerte wie Melaminharzschaum auf, sind aber durchschnittlich um mehr als 50% günstiger. Da diese Materialien optisch nicht so ansprechend und vor allem nicht so stabil sind wie Akustikplatten aus Basotect, sollten sie in einen Holzrahmen eingebettet werden.

Im Vergleich zum Schaumstoff ohne Verkleidung bietet dieses Modul die Möglichkeit durch den Abstand zur Wand einen zusätzlichen Luftpolster und somit einen besseren Absorptionsgrad zu realisieren.

Des Weiteren können durch die Verkleidung des Holzrahmens mit Stoff der Raum farblich gestaltet werden. Die Verkleidung mit einem Holzrahmen bietet zusätzlich den Vorteil, dass diese Module im Vergleich zu den Schaumstoffplatten leichter gereinigt werden können.



Abbildung 131: Weichfaserplatten aus Holz



Abbildung 132: Dämmmatte aus Steinwolle

Weichfaserplatten aus Holz sind, wie auch Melaminharzschaumplatten, gesundheitlich nicht bedenklich. Bei der Verwendung von Steinwolle ist es wichtig, dass ausschließlich Produkte mit dem RAL-Gütezeichen verwendet werden, da laut Gefahrstoffverordnung nur diese als unbedenklich gelten. Tabelle 36 zeigt exemplarisch die Absorptionswerte und den Quadratmeterpreis für ausgewählte Weichfaserplatten aus Holz sowie Dämmmatten aus Steinwolle.

Tabelle 36: Exemplarische Absorptionswerte für Weichfaserplatten aus Holz sowie Steinwolle

Dicke [mm]	Material	Abstand zur Wand/Decke [mm]	Absorptionswerte						Preis/m ² [€]
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
80	Holzfasern	0	0,18	0,43	0,86	0,96	0,88	0,88	ca. 9,00
40	Holzfasern	0	0,10	0,21	0,42	0,81	0,78	0,78	ca. 4,50
30	Steinwolle	0	0,04	0,29	0,74	0,92	0,97	1,00	ca. 7,00
30	Steinwolle	270	0,72	0,78	0,89	0,93	0,97	1,00	ca. 7,00
60	Steinwolle	0	0,24	0,83	1,00	1,00	0,99	1,00	ca. 14,00

Abbildung 133 zeigt die für Raum 005 nötige Absorberfläche bei Verwendung der Absorber aus Tabelle 36. „D“ bezeichnet die Dicke des Absorbers, „A“ bezeichnet den Abstand zur Wand.

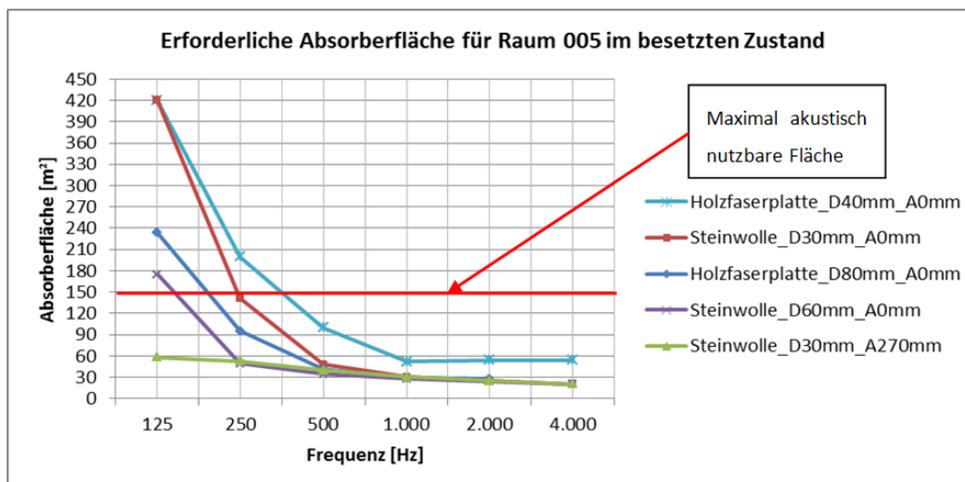


Abbildung 133: Erforderliche Absorberfläche bei Verwendung von Holzfasern bzw. Steinwolle

Auch aus dieser Grafik geht deutlich hervor, wie groß der Vorteil eines zusätzlichen Luftpolsters ist. Bei der Verwendung von Steinwolle der Dicke 30mm ohne Abstand würde man für die ausreichende Bedämpfung des tieffrequenten Bereichs über 400 Quadratmeter Absorberfläche und somit mehr als an akustisch nutzbarer Fläche überhaupt zur Verfügung steht benötigen. Durch einen Luftpolster von 270 mm reduziert sich die nötige Absorberfläche auf nur 58 Quadratmeter. Für die Holzfaserplatte sowie die Steinwolle mit 60mm Dicke liegen die Absorptionswerte für 0mm Abstand vor. Deren Absorptionswert ist daher trotz der größeren Dicke kleiner als jener der 30mm dicken Steinwolle. Mit Abstand zur Wand kann aber auch für diese Materialien der Absorptionsgrad entsprechend verbessert werden. Da die Steinwolle bei vergleichbarer Dicke einen höheren Absorptionsgrad aufweist als die Weichfaserplatte aus Holz, wird für die nachfolgende Konstruktion des individuell gestaltbaren Wandmoduls Steinwolle verwendet.

Konstruktion des Wandmoduls

Zur Stabilisierung der Steinwolle- bzw. Weichfaserplatten aus Holz benötigt man einen Holzrahmen in den die Materialien eingebettet werden. Für diesen Holzrahmen können handelsübliche Glattkantbretter (Vollholz) aus dem Baumarkt verwendet werden. Eine preislich teurere aber auch hochwertigere Alternative ist Brettschichtholz. Brettschichtholz besteht aus mehreren verleimten Holzschichten und zeichnet vor allem dadurch aus, dass im Gegensatz zu Vollholz keine Rissbildung entsteht und es zudem formstabiler ist.

Die Größe des Moduls kann je nach Bedarf komplett variabel gestaltet werden. Da die Herstellung mit einem gewissen Zeitaufwand verbunden ist, sollte die Größe so gewählt werden, dass möglichst wenige Module angefertigt werden müssen. Da die Montage mit zunehmender Größe allerdings aufwendiger wird, wird eine maximale Größe von 1m x 2m empfohlen.

Im ersten Schritt sind, wie in Abbildung 134 dargestellt, die Bretter des Rahmens mit Winkeln zu verbinden. Alternativ können die Bretter auch auf Gehrung geschnitten und verleimt werden. Hierzu ist es nötig den Rahmen nach Verleimung mit einem Spannungsgurt zu fixieren und je nach verwendetem Leim die empfohlene Dauer (siehe Produktbeschreibung) trocknen zu lassen. Für die Stabilisierung des Rahmens sind in der Mitte des Rahmens zwei zusätzliche Bretter anzubringen (siehe Abbildung 135 bzw. Abbildung 136). Zwischen den Brettern muss ein Spalt von 2-3 Millimeter sein, damit anschließend das für die Fixierung des Dämmmaterials nötige Drahtnetz durchgehend gespannt werden kann. Diese Mittelbalken können ebenfalls mit Winkeln oder alternativ auch durch Leimen montiert werden.



Abbildung 134: Verbindung der Rahmenelemente mit einem Winkel



Abbildung 135: Modulrahmen mit Stabilisierungsbalken

Nachdem der Modulrahmen fertiggestellt ist, kann der Akustikstoff aufgezogen werden. Anstatt dem Akustikstoff kann auch „normaler“, kostengünstigerer Stoff eingesetzt werden, er sollte aber möglichst schalldurchlässig sein, damit die absorbierende Wirkung des Moduls nicht verringert wird. Wie beim Tapezieren von Polstermöbel ist der Stoff von der Front ausgehend nach hinten zu ziehen und auf der Innenseite mit einem Druckluft Klammergerät zu fixieren. Für die stabile Einbettung der Dämmmatten sowie die Einschaltung eines Luftpolsters ist anschließend, wie in Abbildung 136 dargestellt, ein Drahtnetz zu spannen.

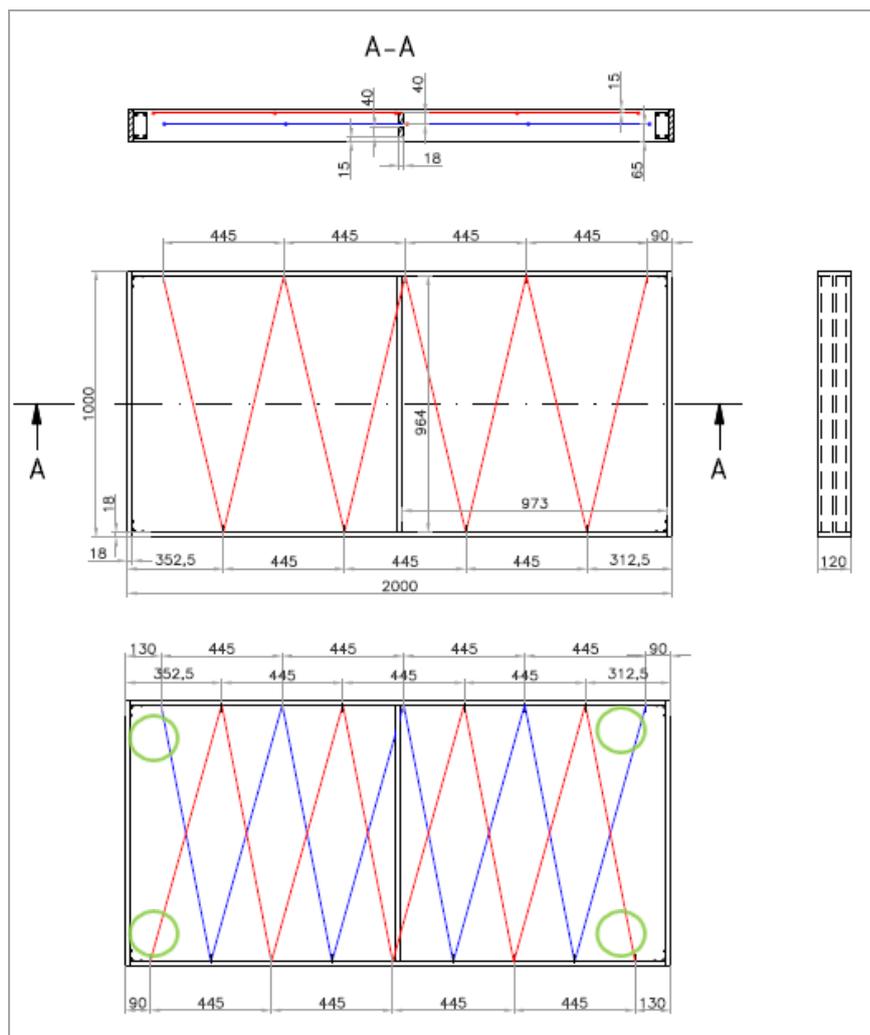


Abbildung 136: Anbringung der Mittelbalken sowie des Drahtnetzes

Um das stabilisierende Drahtnetz spannen zu können, müssen zuerst Ösen in den Holzrahmen eingedreht werden, durch die anschließend der Draht eingezogen wird. Wichtig ist, dass die Ösen ca. 15mm von der Rahmenfrontseite entfernt sind, da das Dämmmaterial auf Grund seiner weichen Struktur über den Draht hinausgeht und ansonsten auf den Akustikstoff drückt wodurch das Modul unförmig wird.

Da das Dämmmaterial von beiden Seiten stabilisiert werden muss, ist es notwendig, zwei Ebenen mit dem Drahtseil einzuziehen. Das mittlere Bild aus Abbildung 136 zeigt die Anbringung der ersten Ebene (rot), das untere Bild zeigt die zweite Ebene (blau) die zur ersten Ebene gegengleich und leicht versetzt angebracht wird. Nachdem die erste Drahtebene eingezogen ist, wird das Dämmmaterial eingelegt. Anschließend kann die zweite Drahtebene montiert werden. Die Fixierung des Drahtes erfolgt in beiden Ebenen durch Verdrillen bei den äußeren Ösen (siehe grüne Markierung Abbildung 136 sowie Abbildung 137). Durch das Eindrehen der Ösen in das Holz kann das Netz zuletzt auch noch gespannt werden.

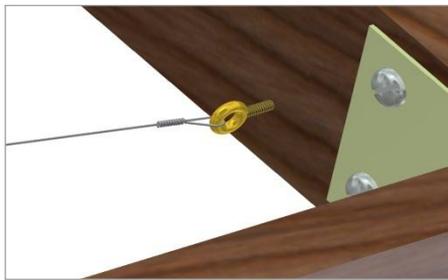


Abbildung 137: Fixierung des Drahtseils

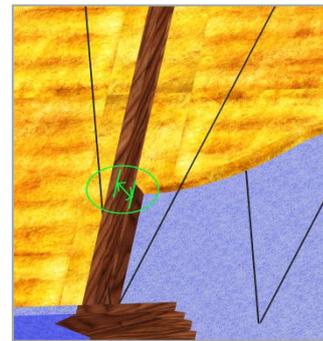


Abbildung 138: Detail des Wandabsorbers

Die Größe des in Abbildung 138 grün markierten Luftpolsters auf der Rückseite des Wandmoduls ergibt sich in Abhängigkeit von der Dimensionierung des Holzbrettes sowie des Dämmmaterials. Im letzten Schritt wird die Rückseite ebenfalls mit Stoff verschlossen, damit die Fasern des Dämmmaterials nicht in den Raum gelangen können. Die Fixierung des Stoffes erfolgt wie auch beim Stoff auf der Frontseite durch Festklammern.

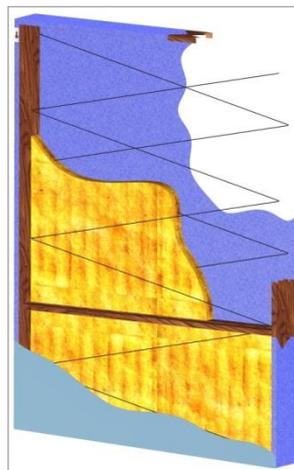


Abbildung 139: Fertiges Wandmodul

Abbildung 139 zeigt die einzelnen Ebenen des fertigen Wandmoduls, wobei die in hellblau angerissene Fläche die Rückseite des Absorbers darstellt.

Die Montage des Wandmoduls erfolgt, wie in den Abbildung 140 und Abbildung 141 dargestellt, über ein direkt an den Rahmen montiertes Lochblech. Je nachdem ob die Montage sichtbar sein soll oder nicht, kann man zwischen Variante A und Variante B wählen. Soll das Modul bündig an der Wand aufliegen, muss im Holzrahmen der für das Lochblech nötige Platz ausgeschnitten werden.

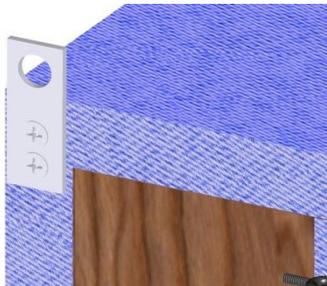


Abbildung 140: Wandmontage des Absorbermoduls – Variante A



Abbildung 141: Wandmontage des Absorbermoduls – Variante B

Tabelle 37 gibt einen Überblick über die für den Modulbau benötigten Materialien sowie deren Kosten.

Tabelle 37: Benötigte Materialien sowie Materialkosten für ein Wandmodul (1m x 2m)

Material	Preis [€]	Materialkosten je Modul [€]
Glattkantbrett (120mm x 18mm x 3000mm)	ca. 1,00/m	7,00
Alternativ: Brettschichtholz	ca. 2,00/m	14,00
Winkel	ca. 1,00/Stk.	8,00
Ösen	ca. 0,06/Stk.	1,00
Drahtseil (Netz)	ca. 0,10/m	2,00
Stoff	ca. 4,00/m ²	20,00
Alternativ: Akustikstoff	ca. 9,00/m ²	45,00
Steinwolle (60mm)	ca. 14,00/m ²	28,00
Gesamtkosten für die günstigste Variante des Modul:		63,00
Quadratmeterpreis des Moduls:		31,50

Diese selbstgefertigten Wandmodule sind in etwa gleich teuer wie die vorgefertigten Melaminharzschaumplatten, sie weisen aber den entscheidenden Vorteil auf, dass der tieffrequente Bereich durch den zusätzlichen Luftpolster besser bedämpft werden kann, wodurch weniger Absorberfläche erforderlich ist, sodass in Summe weniger Kosten entstehen. Sie sind auch eine mögliche Alternative, wenn eine Anbringung der Absorber mittels Klebstoff nicht gewünscht oder nicht möglich ist.

Das absorbierende Material ist bei diesen Modulen besser geschützt wie beispielsweise eine Melaminharzschaumplatte, die ohne Verkleidung direkt an der Wand angebracht wird. Um etwaige Schäden am Absorber zu vermeiden, wird dennoch empfohlen, auch diese Wandmodule nur oberhalb von 2m Raumhöhe anzubringen.

Im Wandbereich unterhalb von 2m Raumhöhe sollten stattdessen Plattenabsorber eingesetzt werden. Diese Absorber bieten vor allem für den tieffrequenten Bereich eine zusätzliche Dämpfung und sind somit eine gute Ergänzung zu den zuvor genannten Wandabsorbern. Am einfachsten sind diese Plattenabsorber zu realisieren, indem an der Wand zwei Leisten montiert werden, auf die wiederum Spannplatten angebracht werden. Abbildung 142 zeigt exemplarisch die Montage eines Plattenabsorbers.



Abbildung 142: Plattenabsorber

Plattenabsorber besitzen ihre max. Schallabsorption bei der Resonanzfrequenz, welche wiederum von der Masse der Platte sowie dem Abstand zur Wand abhängig ist. Das bedeutet, dass es eine bestimmte Frequenz gibt, bei der die Platte maximal zu schwingen beginnt und somit bei dieser Frequenz die meiste Schallenergie absorbiert. Abbildung 143 zeigt die Resonanzfrequenz in Abhängigkeit vom Wandabstand und der flächenbezogenen Masse der Platte.

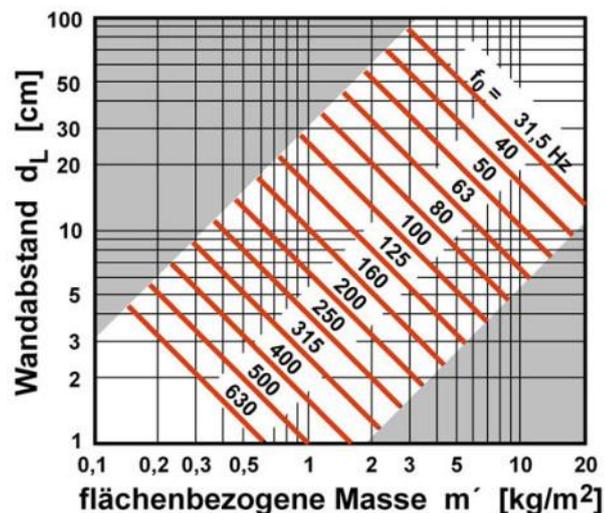


Abbildung 143: Resonanzfrequenz des Plattenabsorbers in Abhängigkeit von Plattenmasse
und Wandabstand [BAUNETZ]

Soll der Plattenabsorber beispielsweise 125 Hz bedämpfen, und es ist gewünscht, dass der Wandabstand maximal 5cm beträgt, so muss die Platte 3kg/m^2 aufweisen.

In Tabelle 38 sind die Absorptionswerte ausgewählter Plattenabsorber angeführt. Die Angabe „gefüllt“ bezieht sich auf den Hohlraum hinter den Plattenabsorber der mit Mineralwolle ausgefüllt ist ohne aber die Platte zu berühren. Dies ist wesentlich, da die Platte nicht in ihrer Schwingung gedämpft werden darf, da ansonsten die absorbierende Wirkung verringert wird.

Tabelle 38: Absorptionswerte ausgewählter Plattenabsorber

Dicke [mm]	Material	Abstand zur Wand/Decke e [mm]	Absorptionswerte						Preis/m ² [€]
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
4	Spanplatte	50	0,30	0,20	0,15	0,10	0,08	0,10	ca. 6,00
4	Spanplatte *gefüllt mit Steinwolle	50* 30mm	0,20	0,40	0,20	0,10	0,08	0,10	ca. 11,00
8	Spanplatte	20	0,46	0,24	0,04	0,01	0,01	0,01	ca. 4,00

Wie Tabelle 38 zu entnehmen ist, kann durch die Füllung des Hohlraums mit Mineralwolle die Absorption für einzelne Frequenzbereiche zusätzlich angehoben werden. Diese Form des Plattenabsorbers kann realisiert werden, indem beim zuvor präsentierten Wandabsorber anstatt der Stoffabdeckung eine Spanplatte auf der Sichtseite aufgesetzt wird.

Überzieht man die Spanplatten mit einer PVC Folie, so kann dieser Absorber zusätzlich auch noch für die Raumgestaltung genutzt werden, der Preis für die Platte ist dadurch allerdings beinahe doppelt so hoch. Alternativ können die Platten mit Farbe bemalt werden. Diese ist günstiger als PVC Folien und bietet zusätzlichen Spielraum für die Raumgestaltung. Die Fläche kann auch genutzt werden, um beispielsweise Zeichnungen oder Plakate aufzuhängen.

Ist es gewünscht den Bereich unterhalb von 2m Raumhöhe als Pinnwand zu nutzen, so gibt es die Möglichkeit, die in Abbildung 131 dargestellten Weichfaserplatten aus Holz wie auch die selbst hergestellten Wandmodule direkt an die Wand zu montieren (siehe Abbildung 140 bzw. Abbildung 141). Da diese nicht so robust sind wie die Plattenabsorber aus Abbildung 142 wird empfohlen, diese nur oberhalb von 1m Raumhöhe einzusetzen.

Um die Platte zusätzlich vor Abnutzung zu schützen, können diese mit einem Akustikstoff überzogen und somit auch die Raumgestaltung miteinbezogen werden. Bei der Montage des Stoffes ist es wichtig, dass dieser nicht durch vollflächige Verklebung angebracht wird, da ansonsten die Poren des Absorbers verschlossen und seine akustische Wirkung somit stark minimiert wird (siehe Wirkung von Absorbern in Anhang A, Seite 198). Um die akustische Wirkung zu erhalten, sollte der Stoff stattdessen mit einem Klettverschluss befestigt werden, wodurch dieser bei Verschmutzung auch abgenommen und gereinigt oder ausgetauscht werden kann. Abbildung 144 sowie Abbildung 145 auf der nachfolgenden Seite zeigen die Weichfaserplatte als Pinnwand sowie die Montage des Stoffes auf der Vorderseite.

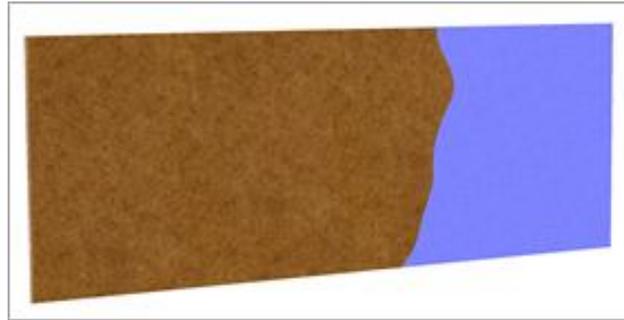


Abbildung 144: Pinnwand aus Weichfaserplatte

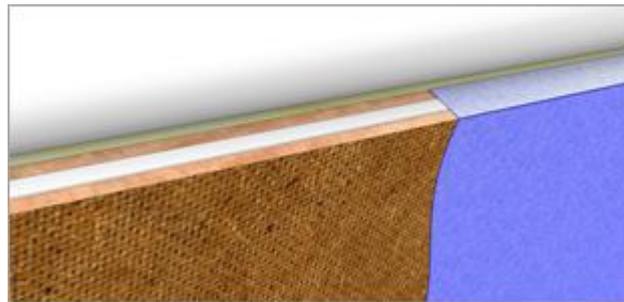


Abbildung 145: Befestigung des Stoffes mit Klettverschluss

Deckenmodul

Die Herstellung von Deckenmodulen erfolgt größtenteils analog zu jener des Wandmoduls aus Abschnitt 3.2.1. Auf Grund der Abhängung muss allerdings kein zusätzlicher Luftpolster integriert werden und das Dämmmaterial ist nicht zwischen den Drahtseilen einzubringen sondern auf dem Drahtnetz aufzulegen. Der Stabilisierungsbalken aus Abbildung 146 kann daher, im Gegensatz zum Wandmodul, durchgängig sein.

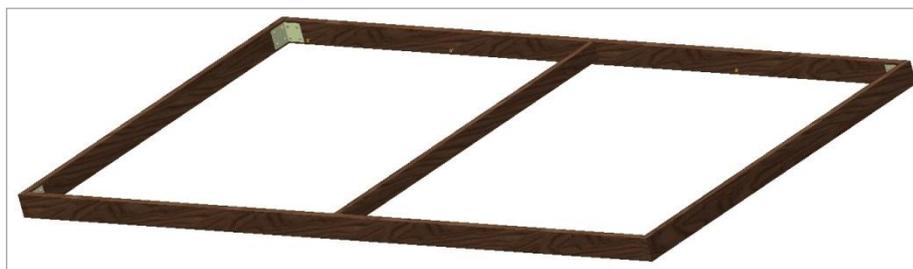


Abbildung 146: Rahmen für das Deckensegel

Das Stabilisierungsnetz wird, wie in Abbildung 147 auf der nachfolgenden Seite dargestellt, eingezogen. Da das Dämmmaterial auf dem Drahtnetz aufgelegt wird, können die Drahtseile ohne Abstand zueinander an der Frontseite montiert werden. Ein Abstand von der Frontseite von ca. 15mm ist auch bei diesem Modul notwendig, da das Dämmmaterial auf Grund der relativ instabilen Struktur und des Eigengewichtes auf das Drahtnetz drückt und dadurch etwas vorsteht.

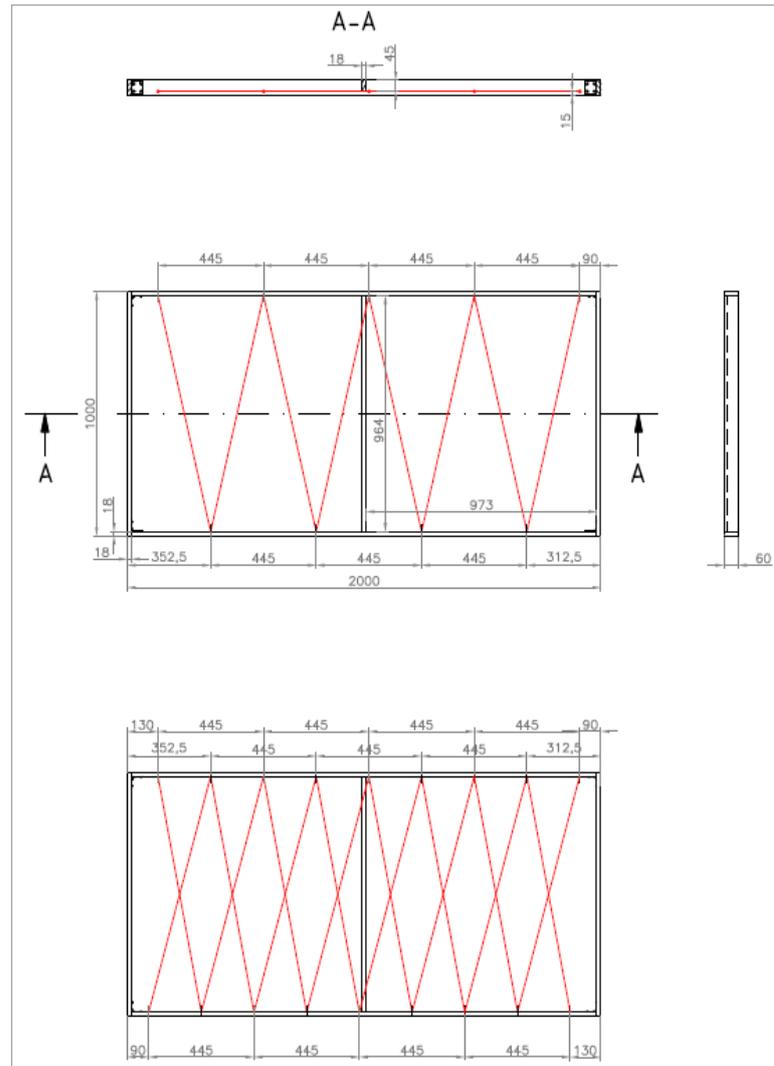


Abbildung 147: Anbringung des Stabilisierungsnetzes beim Deckenmodul

Die Fixierung des Stoffes an der Oberseite sollte für das Deckenmodul mittels Klettverschluss und nicht durch Festklammern erfolgen, da der Stoff dadurch für die Reinigung abgenommen werden kann.

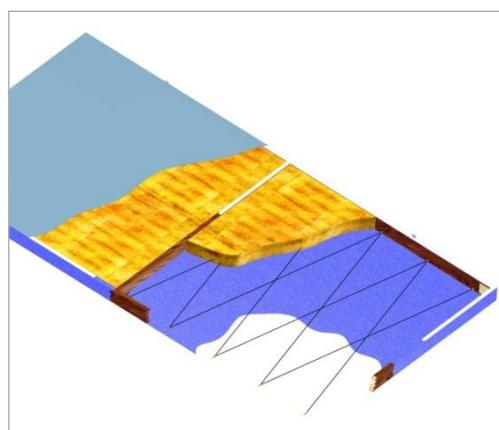


Abbildung 148: Fertiges Deckenmodul

Für die Montage des Deckenmoduls wird die Verwendung von geeigneten Schraubhaken empfohlen, die direkt an der Oberseite des Holzrahmens bzw. an der Decke angebracht werden. Die Aufhängung erfolgt mittels eines Drahtseils.

Es sei an dieser Stelle ausdrücklich betont, dass die Montage der Deckensegel nicht durch Laien sondern ausschließlich durch Fachpersonal erfolgen darf! Sollte die Montage unsachgemäß erfolgen und sich ein Deckensegel lösen, besteht größte Verletzungsgefahr für die im Raum anwesenden Personen!

Tabelle 39 gibt einen Überblick über die für den Bau der Deckensegel benötigten Materialien sowie deren Kosten.

Tabelle 39: Benötigte Materialien sowie Materialkosten für das Deckensegel

Material	Preis [€]	Kosten je Modul [€]
Glattkantbrett (120mm x 18mm x 3000mm)	ca. 1,00/m	7,00
Alternativ: Brettschichtholz	ca. 2,00/m	14,00
Winkel	ca. 1,00/Stk.	8,00
Ösen	ca. 0,06/Stk.	1,00
Drahtseil (Netz)	ca. 0,10/m	2,00
Stoff	ca. 4,00/m ²	20,00
Alternativ: Akustikstoff	ca. 9,00/m ²	45,00
Steinwolle (60mm)	ca. 14,00/m ²	28,00
Schrauben (Aufhängung)	ca. 0,30/Stk.	2,00
Pressklemmen (Fixierung Drahtseilschlinge)	ca. 0,20/Stk.	2,00
Drahtseil (Aufhängung)	ca. 1,15/Stk.	5,00
Gesamtkosten für ein Modul:		69,00
Quadratmeterpreis des Moduls:		34,50

Dieses Deckenmodul ist im Vergleich zu den vorgefertigten Deckensegeln vergleichbarer Dicke um mehr als 50% günstiger.

3.3 Sanierungsvarianten

Je nachdem, ob die Kosten und/oder der zeitliche Aufwand limitiert werden müssen, können mit den in Kapitel 3.1 vorgestellten Absorbermodulen unterschiedliche Sanierungsvarianten realisiert werden. Der Fokus dieses Kapitels wird zum einen auf die günstigste und zum anderen auf die komfortabelste Sanierungsvariante mit minimaler Eigenleistung gelegt. Die kostengünstigsten Varianten können mit einer Kombination aus vorgefertigten sowie selbst hergestellten Absorbern realisiert werden. Die komfortabelste, aber auch teuerste Lösung ist der Innenausbau mit Gipskartonplatten, der durch den Fachbetrieb erfolgt.

3.3.1 Sanierung mit Absorbermodulen

Betrachtet man in Abbildung 149 die Nachhallzeit von Raum 005 im nicht sanierten Zustand (rot), so sieht man, dass die Nachhallzeit im gesamten Frequenzbereich stark erhöht ist, vor allem aber im tieffrequenten Bereich. Die Sanierungsvariante mit dem geringstem Montageaufwand und den zugleich niedrigsten Kosten ist der Einsatz der Melaminharzschaumplatten aus Abbildung 124 und Abbildung 125.

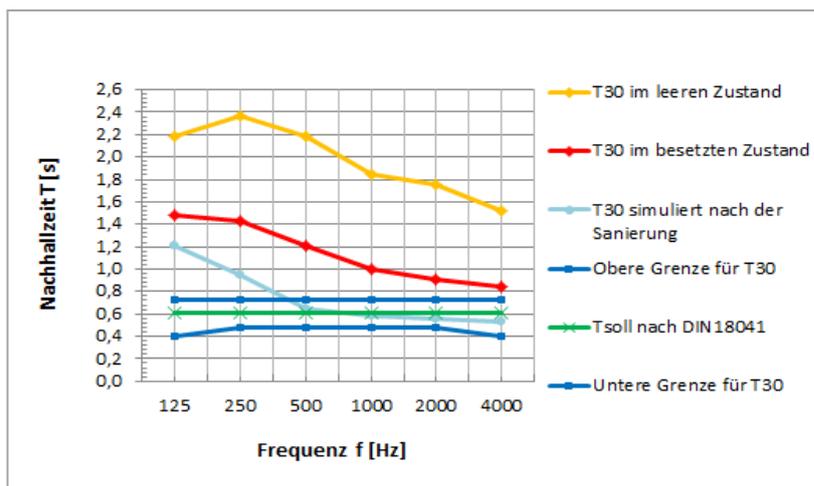


Abbildung 149: Sanierung mit Melaminharzschaumplatten (30m²)

Diese Variante ist sowohl kostengünstig als auch mit geringem Montageaufwand zu realisieren. Die Sollnachhallzeit nach Norm kann im tieffrequenten Bereich allerdings nicht zur Gänze erreicht werden, da die Melaminharzschaumplatten diesen Bereich nicht ausreichend bedämpfen.

Um auch den tieffrequenten Bereich besser zu bedämpfen, bieten sich die selbst erstellten und daher ebenfalls kostengünstigen Plattenabsorber aus Abbildung 142 an. Werden sowohl an der rückwärtigen Wand als auch an der Wand gegenüber der Fensterfront durchgehend Plattenabsorber im Bereich unterhalb von 2m montiert (in Summe 26m²), kann die Nachhallzeit, wie Abbildung 150 auf der nachfolgenden Seite zeigt, weiter reduziert werden.

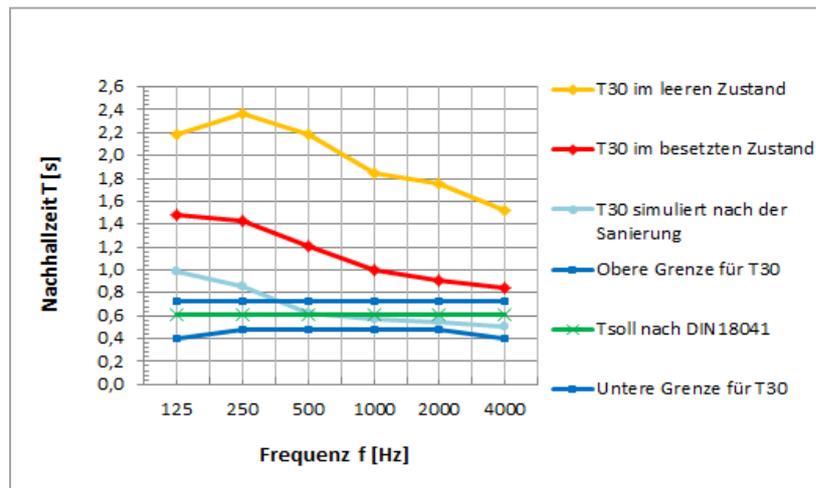


Abbildung 150: Sanierung mit Melaminharzschäumplatten (30m²) und Plattenabsorbern (26m²)

Die Nachhallzeit liegt zwar noch immer nicht zur Gänze im Toleranzband, es konnte aber bereits eine deutliche Verbesserung erzielt werden. Soll der tieffrequente Bereich noch besser bedämpft werden, können anstatt der vorgefertigten Wandabsorber die selbst hergestellten Wandmodule eingesetzt werden. Diese weisen auf Grund der verwendeten Materialien und dem zusätzlichen Luftpolster einen noch besseren Absorptionswert im tieffrequenten Bereich auf, wie Abbildung 151 zeigt.

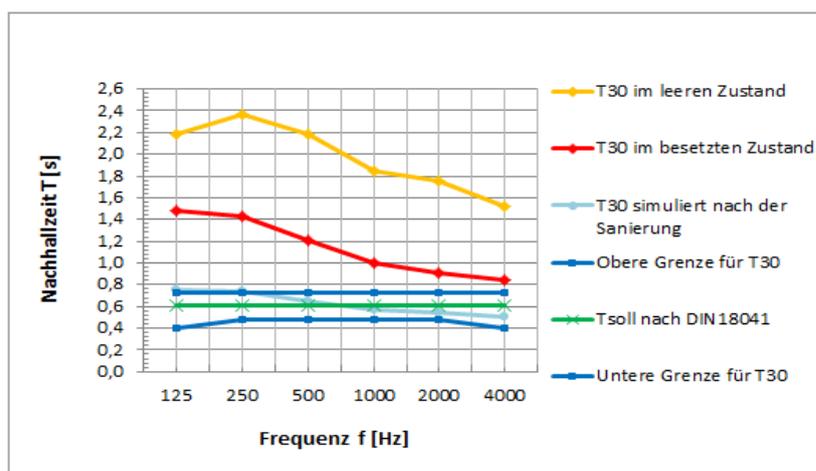


Abbildung 151: Sanierung mit selbst hergestellten Wandmodulen (30m²) und Plattenabsorbern (26m²)

Mit dieser Kombination liegt die Nachhallzeit im gesamten Frequenzbereich innerhalb des Toleranzbandes, allerdings ist die Herstellung der Wandmodule zeitaufwändig. Ist es nicht gewünscht Module selbst zu erstellen, so können bei der Sanierungsvariante aus Abbildung 150 zusätzlich die Deckensegel aus Abbildung 128 eingesetzt werden. Diese verbessern durch die Abhängung die Absorption im tieffrequenten Bereich und können selbständig montiert werden, da sie keinen Rahmen aufweisen.

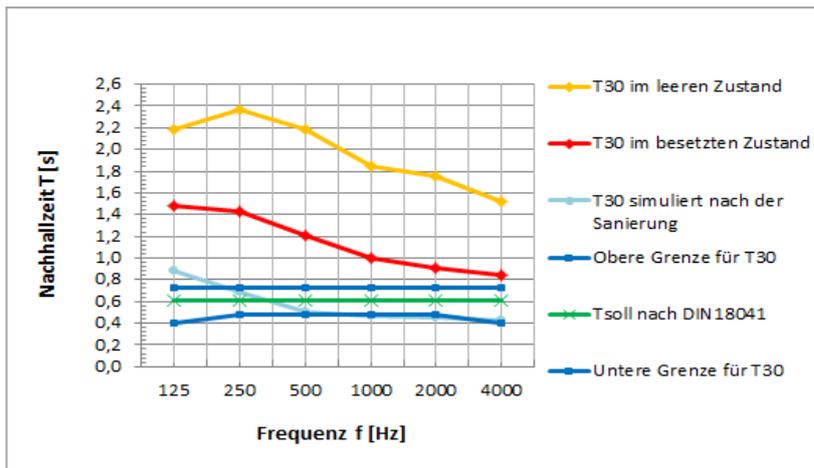


Abbildung 152: Sanierung mit Melaminharzschaumplatten (30m²), Plattenabsorbern (26m²) und vorgefertigten Deckensegeln ohne Rahmen (16 m²)

Würden anstatt der vorgefertigten Deckensegel die selbst hergestellten Deckenmodule verwendet werden, würde die Nachhallzeit auch unterhalb von 250Hz innerhalb des Toleranzbandes liegen (siehe Abbildung 153). Diese Variante wäre auf Grund der erforderlichen Montage durch einen Fachbetrieb teurer als jene mit den vorgefertigten Segeln.

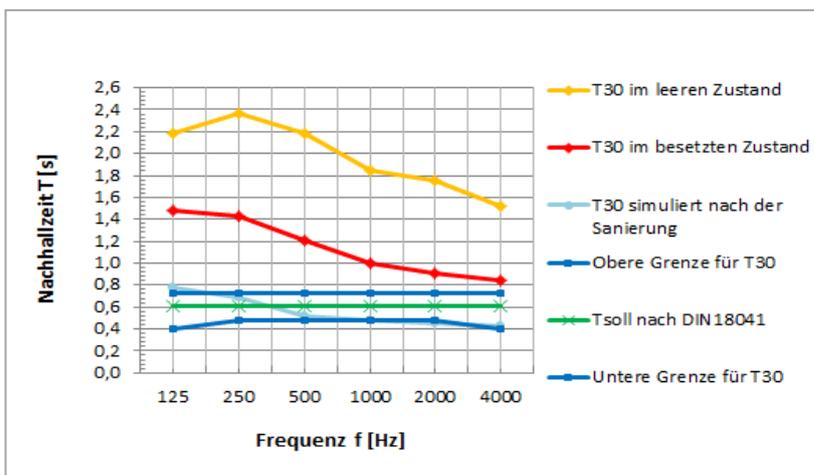


Abbildung 153: Sanierung mit Melaminharzschaumplatten (30m²), Plattenabsorbern (26m²) und selbst hergestellten Deckenmodulen (16 m²)

Tabelle 40 gibt einen Überblick über die Kosten der Sanierungsvarianten aus Kapitel 3.3.1.

Tabelle 40: Richtwerte für die Sanierungskosten der Sanierung mit Absorbermodulen

Sanierungsvariante	Absorber/Materialien	m²	Preis [€]
Variante 1 (Abbildung 83)	Wandabsorber (Basotect,50mm, weiß)	30	834,00
	Klebstoff	-	40,00
			874,00
Variante 2 (Abbildung 84)	Wandabsorber (Basotect,50mm, weiß)	30	834,00
	Plattenabsorber (Spanplatte, 4mm)	26	156,00
	Klebstoff	-	40,00
			1030,00
Variante 3 (Abbildung 85)	Selbst hergest. Wandmodule (Steinwolle)	30	1140,00
	Plattenabsorber (Spanplatte, 4mm)	26	156,00
			1296,00
Variante 4 (Abbildung 86)	Wandabsorber (Basotect,50mm, weiß)	30	834,00
	Plattenabsorber (Spanplatte, 4mm)	26	156,00
	Vorgefertigte Deckensegel (ohne Rahmen)	16	1192,00
			2182,00
Variante 5 (Abbildung 87)	Wandabsorber (Basotect,50mm, weiß)	30	834,00
	Plattenabsorber (Spanplatte, 4mm)	26	156,00
	Selbst hergest. Deckenmodule	16	592,00
	Montagekosten (90.- €/Modul)	-	720,00
			2302,00

3.3.2 Innenausbau mit Gipskartonlochplatten

Basierend auf der akustischen Sanierung des akademischen Gymnasiums in der Bürgergasse in Graz wird in diesem Abschnitt die Alternative einer Komplettsanierung durch den Fachbetrieb präsentiert. Wie in Abbildung 154 und Abbildung 155 zu sehen ist, wurde die akustische Sanierung des akademischen Gymnasiums mit Gipskartonlochplatten, die wiederum mit Glaswolle hinterlegt sind, durchgeführt.



Abbildung 154: Akustische Sanierung mit Gipskartonlochplatten, Rückseite des Klassenzimmers



Abbildung 155: Akustische Sanierung mit Gipskartonlochplatten, Frontseite des Klassenzimmers

Diese professionelle Sanierungsvariante ist optisch sehr ansprechend, dafür aber mit höheren Kosten verbunden, als die selbständige Sanierung mittels Absorbermodulen.

Wie Tabelle 41 auf der nachfolgenden Seite zeigt, ist es ratsam mehrere Angebote einzuholen, da die Firmen abhängig von der aktuellen Auftragslage u.U. großzügige Rabatte gewähren.

Tabelle 41: Angebote für die akustische Sanierung mit Gipskartonplatten für 260 m²

Kostenstelle	Firma 1	Firma 2	Fa. Trotek
Decke	4.550,00	4.524,00	3.070,00
Fries	405,00	170,00	68,00
Regie (Transport)	63,00	63,00	20,00
Montagekosten (240h)	2.700,00	2640,00	2.400,00
Malerkosten (Firma3)	260,00	260,00	260,00
Gesamt Brutto	7.978,00	7.656,00	5.802,00
Teurer als Trotek	+38%	+32%	Bezugspreis
Euro/m² - gesamt	122,00	117,00	90,00

Es sei darauf hingewiesen, dass dies nur ein grober Richtwert ist, da die Angebote stark von der vorhandenen Raumsituation (Zugänglichkeit, Bausubstanz etc.) abhängen!

Tabelle 42 stellt zusammenfassend die Sanierungskosten der in diesem Kapitel präsentierten Sanierungsvarianten gegenüber.

Tabelle 42: Gegenüberstellung der Sanierungskosten für Raum005

Sanierungsvarianten	Gesamtkosten [€]
Variante 1: Wandabsorber (Basotect, 50mm, weiß, 30m ²)	ca. 874,00
Variante 2: Wandabsorber (Basotect, 50mm, weiß, 30m ²) Selbst hergestellte Plattenabsorber (Spanplatte, 8mm, 26m ²)	ca. 1030,00.-
Variante 3: Selbst hergestellte Wandmodule (Steinwolle, 30m ²) Selbst hergestellte Plattenabsorber (Spanplatte, 8mm, 26m ²)	ca. 1296,00.-
Variante 4: Wandabsorber (Basotect, 50mm, weiß, 30m ²) Selbst hergestellte Plattenabsorber (Spanplatte, 8mm, 26m ²) Vorgefertigte Deckensegel (Basotect, ohne Rahmen, 16m ²)	ca. 2182,00.-
Variante 5: Wandabsorber (Basotect, 50mm, weiß, 30m ²) Selbst hergestellte Plattenabsorber (Spanplatte, 8mm, 26m ²) Selbst hergestellte Deckenmodule (Steinwolle, 16m ²)	ca. 2302,00.-
Variante 6: Komplettsanierung der Deckenfläche (52 m ²) mit Gipskartonlochplatten durch den Fachbetrieb	ca. 4680,00.-

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bereits mit geringem Aufwand eine starke Verbesserung der Nachhallzeit erreicht werden kann. Legt man Wert darauf, dass die Nachhallzeit im gesamten Frequenzbereich innerhalb des Toleranzbandes ist, so müssen höhere Sanierungskosten in Kauf genommen werden. Die Komplettsanierung durch den Fachbetrieb ist die komfortabelste, aber auch teuerste Lösung.

Die in diesem Kapitel erstellten Sanierungsvarianten wurden mit dem, im Rahmen dieser Diplomarbeit, entwickelten Simulationstools erarbeitet. Dieses, in Kapitel 4.3 präsentierte Simulationstool, ermöglicht dem Laien eine automatisierte Verarbeitung der Messdaten sowie die Simulierung des sanierten Zustandes.

Nachdem in diesem Kapitel nun Absorbermodule sowie mögliche Sanierungsvarianten erarbeitet wurde, werden im nachfolgenden Kapitel nun die einzelnen Schritte zur Durchführung der akustischen Sanierung behandelt.

4 Durchführung der akustischen Sanierung

Die in Kapitel 3 präsentierten Sanierungsvarianten bieten einen Überblick über die Möglichkeiten einer akustischen Sanierung und deren finanziellen Aufwand. Mit diesem Grundwissen kann nun eine individuelle, akustische Sanierung erarbeitet werden. Zu Beginn des Kapitels werden alle erforderlichen Schritte kompakt zusammengefasst, sodass man einen Überblick über den Ablauf erhält. Der detaillierte Ablauf wird in den nachfolgenden Kapiteln 4.1 bis 4.4 geschildert.

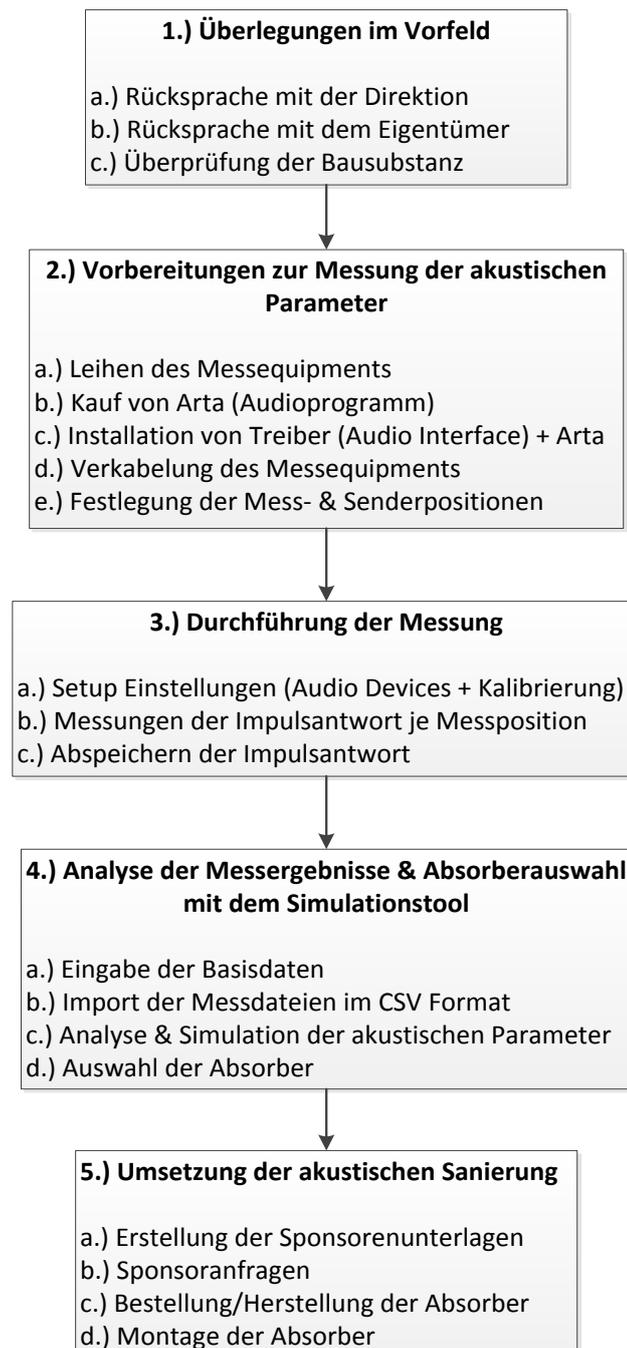


Abbildung 156: Durchführung der akustischen Sanierung

1.) Überlegungen im Vorfeld

Im Vorfeld sollte sowohl mit der Direktion, als auch mit dem Eigentümer Rücksprache gehalten werden, um die Genehmigung für die Sanierung einzuholen. Ebenso sollte im Vorfeld bereits ein Experte zur Überprüfung der Bausubstanz herangezogen werden. Die Bausubstanz muss für die Kapitel 3 beschriebenen Montagearten geeignet sein, ansonsten sind die in diesem Leitfaden präsentierten Sanierungsvarianten nicht möglich.

2.) Vorbereitungen zur Messung der akustischen Parameter (Kapitel 4.1)

Nachdem die Genehmigung eingeholt und die Bausubstanz überprüft wurde, können nun die Vorbereitungen zur Messung der Raumimpulsantwort erfolgen. Diese Messung ist erforderlich, da aus der Raumimpulsantwort die akustischen Parameter ermittelt werden und somit überprüft werden kann, wie weit diese von den Sollwerten nach Norm abweichen. Auf Grund der Messwerte kann schließlich ermittelt werden, wie viel Absorberfläche für die Sanierung erforderlich ist.

Für die Messung der akustischen Parameter ist das in Kapitel 4.1.1 beschriebene Messequipment auszuleihen. Ebenso ist der Kauf von ARTA (Audioprogramm) erforderlich. Sobald das Equipment verfügbar ist, können die Softwareinstallationen erfolgen. Es muss sowohl der Treiber für das Audio Interface, als auch ARTA installiert werden. Nach erfolgter Installation kann die Verkabelung des Equipments erfolgen (siehe Kapitel 4.1.2). Letzter Schritt ist die Festlegung der Positionen des Lautsprechers sowie des Mikrofons. Hierzu folgen sie bitte der Anleitung in Kapitel 4.1.3. Theoretische Grundlagen zur Messung der Raumimpulsantwort befinden sich in Anhang B, Seite 205.

3.) Durchführung der Messung (Kapitel 4.2)

Nachdem sämtliche Vorbereitungen bzgl. des Messequipments getroffen wurden, kann die Messung durchgeführt werden. Zuerst sind in ARTA die Setup Einstellungen hinsichtlich Audio Devices und Kalibrierung zu treffen (siehe Kapitel 4.2.1 und Kapitel 4.2.2). Anschließend kann die Messung der Impulsantwort erfolgen (siehe Kapitel 4.2.3). Diese ist für jede Messposition zu ermitteln und jeweils direkt nach der Messung abzuspeichern. Es wird empfohlen, auch gleich die akustischen Parameter abzurufen und im Format „CSV“ abzuspeichern damit diese für die nachfolgende Analyse zur Verfügung zu stehen.

4.) Analyse d. Messergebnisse & Absorberauswahl mit d. Simulationstool (Kapitel 4.3)

Für die Analyse der Messergebnisse, bzw. der Auswahl der Absorber steht ein Simulationstool zur Verfügung. Nach Eingabe der Basisdaten (siehe Kapitel 4.3.1) können die aus ARTA exportierten Excel Dateien für die weitere Verarbeitung automatisch in das Tool geladen werden. Nach dem Laden der akustischen Parameter werden diese automatisch in Form von Tabellen und Diagrammen angezeigt, sodass man sich einen Überblick über die akustischen Gegebenheiten des Raumes verschaffen kann. Ebenso steht in diesem Simulationstool ein Auswahlmenü mit den in Kapitel 3 präsentierten Absorbern zur Verfügung, aus dem man eine individuelle Sanierungsvariante erstellen kann. Auch die Simulation der akustischen Parameter nach der Sanierung ist möglich.

5.) Umsetzung der akustischen Sanierung (Kapitel 4.4)

Nachdem mit Hilfe des Simulationstool die Messdaten analysiert und die Sanierung simuliert wurde, gilt es nun die für die Sanierung nötigen finanziellen Mittel zu lukrieren. Um die Auswahl, wie auch die Ansprache von potentiellen Sponsoren zu erleichtern, wurden Präsentationsunterlagen für Sponsoren erstellt (siehe Anhang C, Seite 209). Nachdem die Unterlagen auf die individuell erstellte Sanierungsvariante angepasst wurde, können diese an die Sponsoren übermittelt werden. Sobald das nötige Budget vorhanden ist, kann die Bestellung bzw. die Herstellung der Absorber erfolgen. Zuletzt müssen die Absorber montiert werden. Hierbei sei nochmal ausdrücklich darauf hingewiesen dass, wie in Kapitel 3 angeführt, bestimmte Absorbertypen zwingend durch einen Fachbetrieb montiert werden müssen, da ansonsten höchste Verletzungsgefahr besteht!

4.1 Vorbereitungen zur Messung

In diesem Kapitel sind das erforderliche Messequipment, die Verkabelung sowie die Festlegung der Mess- und Senderpositionen angeführt. Um das Budget für die Sanierung nicht zusätzlich zu belasten wird empfohlen, das Equipment nicht zu kaufen sondern zu leihen. Anfragen diesbezüglich können Sie an das Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation an der Technischen Universität Graz richten.

4.1.1 Auswahl des Messequipments

Für die Messung benötigt man sowohl einen Lautsprecher, über den das Signal zur Anregung des Raumes abgespielt wird, als auch ein Mikrofon, das die Raumimpulsantwort aufzeichnet. Damit dem Lautsprecher ein Signal zugeführt, das vom Mikrofon empfangene Signal weitergeleitet und verarbeitet werden kann, benötigt man des Weiteren ein Audio Interface. Ein Audio-Interface ist eine extern an den PC angeschlossene Soundkarte in einem eigenen Gehäuse, die analoge und digitale Audiosignale verarbeitet.

Nachfolgend werden nun die Auswahlkriterien wie auch Beispiele für das benötigte Messequipment angeführt.

Lautsprecher

Laut Norm¹⁰⁹ muss die Schallquelle möglichst ungerichtet sein. Ungerichtet bedeutet, dass der Schall nach allen Richtungen gleichmäßig abgestrahlt wird. Ein Dodekaeder, wie in Abbildung 157 dargestellt, erfüllt dieses Kriterium. Es handelt sich hierbei um den Typ „Nor276“ der Firma Norsonic der sich zusätzlich zur ungebündelten Abstrahlung vor allem durch das niedrige Gewicht von nur knapp 9 kg auszeichnet. Ältere Modelle sind meist um ein vielfaches schwerer und somit auch unhandlicher.

¹⁰⁹ [OENORM EN ISO 3382-2]



Abbildung 157: Dodekaeder



Abbildung 158: Verstärker des Dodekaeders

Um den Lautsprecher nicht zu beschädigen, ist es wichtig ihn nur in Betrieb zu nehmen, wenn er auf einem entsprechenden Stativ positioniert ist. Da dieser Lautsprecher eine sogenannte Passivbox ist, also ein Lautsprecher ohne integrierten Verstärker, benötigt dieser einen externen Verstärker, wie in Abbildung 158 dargestellt. Sollte kein Dodekaeder verfügbar sein, kann alternativ auch ein zwei Wege System, wie in Abbildung 159, gewählt werden.



Abbildung 159: Genelec 1030A

Zwei Weg-Systeme strahlen, im Gegensatz zum Dodekaeder, gebündelt, also nicht in alle Richtungen gleichmäßig ab. Da der Fokus dieses Leitfadens aber auf der Sanierung von Klassenräumen und somit auf Sprache, welche ebenfalls gebündelt abgestrahlt wird, liegt, ist ein Zwei-Weg-System eine zulässige Alternative zum Dodekaeder. Der Genelec 1030A ist beispielsweise ein Nahfeldmonitor mit zwei Wege Bassreflex System, welcher durch eine hohe Wiedergabequalität, ein kompaktes Design und durch eine leichte Handhabung überzeugt.

Mikrofon

Laut Norm müssen ungerichtete Mikrofone mit einem maximalen Membrandurchmesser von 14 mm verwendet werden. Ungerichtet bedeutet, dass das Mikrofon Schallwellen aus allen Richtungen mit gleicher Intensität aufnimmt.

Diese Mikrofone weisen eine sogenannte Kugelcharakteristik auf, weshalb symbolisch ein Kreis auf der Kapsel abgebildet ist.



Abbildung 160: AKG C 480 B



Abbildung 161: Mikrofonstativ

Die Type C 480 B erfüllt beispielsweise diese Kriterien und zeichnet sich des Weiteren durch eine hohe Übertragungsqualität sowie Robustheit aus.

Audio Interface

Das in Abbildung 162 dargestellte Fireface 400 von RME ist auf Grund seiner hohen Qualität und Kompaktheit zu empfehlen. Auf der Frontseite des Fireface 400 befinden sich Instrumenten-, Mikrofon- und Line-Eingänge, ein Stereo Line-/Kopfhörerausgang, ein Drehencoder mit 7-Segment Anzeige, sowie mehrere STATUS und MIDI LEDs. Auf der Rückseite des Fireface 400 befinden sich vier analoge Eingänge, sechs analoge Ausgänge, ein Netzteilanschluss, sowie sämtliche digitale Ein- und Ausgänge.



Abbildung 162: Frontansicht des RME Fireface 400



Abbildung 163: Rückseite des RME Fireface 400

4.1.2 Verkabelung des Messequipments

In den folgenden Schritten wird die Verkabelung des Messequipments beschrieben.

ACHTUNG: Die Verkabelung ist vor dem Einschalten des Equipments durchzuführen. Sobald das Equipment in Betrieb genommen wurde, sollten keine Kabel mehr entfernt werden, da es ansonsten zu Störungen der Software bzw. zu Schäden an der Elektronik oder zu lauten Signalen über den Lautsprecher (Gehörschäden) kommen kann! Sollten sie während der Messung ein Kabel tauschen wollen, muss das Equipment zuvor abgeschaltet werden!

1. Anschluss des Audio Interface an den PC



Abbildung 164: Anschluss des PC an das Audio Interface

Das Audio Interface wird mit einem sogenannten Fire Wire Kabel an das Audio Interface angeschlossen. Der Fire Wire Anschluss des Audio Interface befindet sich, wie in Abbildung 164 grün markiert, auf der Rückseite. Sollte der Laptop keinen Fire Wire Anschluss besitzen, benötigt man eine PCMCIA Card Bus Adapter wie in Abbildung 165 dargestellt.



Abbildung 165: PCMCIA Adapter



Abbildung 166: Fire Wire Steckverbindung

2. Anschluss des Mikrofons an das Audio Interface

Das Mikrophon ist mit dem weiblichen Ende des XLR Kabels (siehe Abbildung 168, linker Anschluss) zu verbinden. Der Mikrofoneingang auf der Frontseite des Audio Interface ist mit dem männlichen Ende (siehe Abbildung 168, rechter Anschluss) zu verbinden. Abhängig von der Größe des Klassenraumes wird eine Kabellänge von bis zu sechs Meter benötigt. Um diese Länge zu erreichen kann man ggf. mehrere Kabel zusammenstecken.



Abbildung 167: Anschluss des Mikrofons an das Audio Interface



Abbildung 168: XLR Steckverbindung

3. Anschluss des Lautsprechers an das Audio Interface

Der Dodekaeder wird, wie in Abbildung 169 dargestellt, mit einem Speakon Stecker (siehe Abbildung 170) mit dem Verstärker verbunden.



Abbildung 169: Anschluss des Dodekaederlautsprechers an den Verstärker



Abbildung 170: Speakon Steckverbindung



Abbildung 171: Kabel mit XLR und Klinke

Der Verstärker selbst wird wiederum mit einem Kabel, das von XLR auf Klinke geht (siehe Abbildung 171), mit einem der sechs analogen Ausgänge des Audio Interface verbunden (siehe grüne Markierung Abbildung 172). Die blaue Markierung aus Abbildung 172 zeigt den jeweiligen Anschluss an die Stromversorgung.



Abbildung 172: Anschluss des Verstärkers an das Audio Interface

Die Verkabelung des Genelec 1030A mit dem Audio Interface erfolgt wie die Verbindung des Verstärkers mit dem Audio Interface. Auch hier kann man, falls erforderlich, durch Zusammenstecken mehrerer XLR Kabel eine Verlängerung erzielen.



Abbildung 173: Verkabelung des Genelec 1030A mit dem Audio Interface

Zuletzt sind der Lautsprecher und das Audio Interface, wie in Abbildung 173 blau markiert, an die Stromversorgung anzuschließen, dann ist die Verkabelung des Equipments abgeschlossen. Nun können das Audio Interface, der Lautsprecher und anschließend der Laptop eingeschaltet werden.

ACHTUNG: Das Audio Interface benötigt die Installation des entsprechenden Treibers. Stellen sie sicher, dass beim Verleih die entsprechende Software mitgeliefert wird. Für die Installation folgen Sie den Anweisungen des Handbuchs.

Checkliste für das benötigte Messequipment:

- Laptop
- Audiointerface
- 1 Dodekaeder oder zwei Weg-System Lautsprecher
- 1 Lautsprecherstativ
- 1 ungerichtetes Mikrofon mit max. 14mm Membrandurchmesser
- 1 Mikrofonstativ
- 1 Fire Wire Kabel bzw. PCMCIA Adapter
- 1 XLR Kabel (ein Ende männlich, das andere Ende weiblich, Länge mind. 6m od. mehrere Kabel)
- 1 Kabel von XLR auf Klinke (ein Ende XLR, das andere Ende Klinke, Länge mind. 4m od. mehrere Kabel)
- Speakon Kabel für den Dodekaeder
- Kabel für die Stromanschlüsse
- Kalibrator (siehe Kapitel 4.2)

Für die Aufzeichnung und die Verarbeitung der Messdaten wird zusätzlich noch ein spezielles Audioprogramm benötigt. Auf die Auswahl der geeigneten Software sowie deren Bedienung wird in Kapitel 4.2 noch näher eingegangen. Vorerst wird im nächsten Abschnitt noch die Festlegung der Mess-sowie Senderpositionen behandelt.

4.1.3 Festlegung der Mess- und Senderpositionen

Die nötige Mindestanzahl der Mess- und Senderpositionen ist abhängig von der gewünschten Messgenauigkeit. Laut OENORM ISO 3382-2¹¹⁰ ist für die Messung der akustischen Parameter in Klassenräumen das Standardverfahren einzusetzen, welches die Messung an mindestens zwei Senderpositionen und sechs unabhängigen Sender – Mikrofonkombinationen fordert. Das bedeutet, dass mindestens 3 Mikrofon- und 2 Lautsprecherpositionen erforderlich sind. Es werden an dieser Stelle alle Richtlinien der Norm für die Positionierung des Messequipments angeführt.

Um die Situation des Unterrichts möglichst real abzubilden, sollte die Position des Lautsprechers, jener des Lehrkörpers im Unterricht entsprechen. Es empfiehlt sich die Positionierung links und rechts der Tafel auf einer Höhe von ca. 1,60m, jeweils schräg in Richtung Raummitte. Auch das Mikrofon sollte entsprechend der Raumnutzung dort positioniert werden, wo sich die SchülerInnen befinden.

Ebenfalls zu berücksichtigen ist, dass die Mikrofonposition nicht zu nahe an einer Senderposition liegt, da sich ansonsten ein zu starker Direktschall-Einfluss ergibt. Das bedeutet, dass zu viel vom direkt abgestrahlten Signal und nicht die Reflexionen des Raumes aufgezeichnet werden. Bei einer typischen Klassenraumgröße von 200 m³ sollte der Mindestabstand 1m betragen.

¹¹⁰ [OENORM EN ISO 3382-2]

Die Mikrofone sollten auch nicht zu nahe an reflektierenden Oberflächen wie Tische od. Wand positioniert werden. Es wird ein Mindestabstand von 1m empfohlen. Auch der Abstand zwischen den Mikrofonen sollte mindestens 1m betragen. Hintergrund dieser Abstandsangaben sind Raummoden. Sie werden auch Raumresonanz oder Stehwelle genannt und entstehen durch Reflexion. Im Gegensatz zu sich frei ausbreitenden Schallwellen, bei der der Schallpegel gleichmäßig abnimmt, bilden sich bei stehenden Wellen über den Raum verteilt Schalldruckminima und –Maxima. Durch das Einhalten der zuvor genannten Abstände wird vermieden, dass das Mikrofon in diesen Schalldruckminima oder–Maxima positioniert wird. Für nähere Informationen diesbezüglich wird auf das Werk „Schallabsorber und Schalldämpfer“ von Fuchs¹¹¹ verwiesen.

Zusammenfassend sind bei d. Positionierung des Equipments folgende Abstände einzuhalten:

Positionierung des Equipments laut OENORM ISO 3382-2:

- Lautsprecherpositionen entsprechend der Position des Lehrers im Unterricht
- Mikrofonpositionierung entsprechend der Position der SchülerInnen
- Abstand zwischen Lautsprecher und Mikrofon: mind. 1 m
- Abstand von Mikrofon bzw. Lautsprecher zu reflektierenden Flächen: mind. 0,7 m
- Abstand zwischen den Mikrofonen: mind. 1,4 m

Abbildung 174 zeigt noch einen exemplarischen Messaufbau in einem Klassenzimmer.

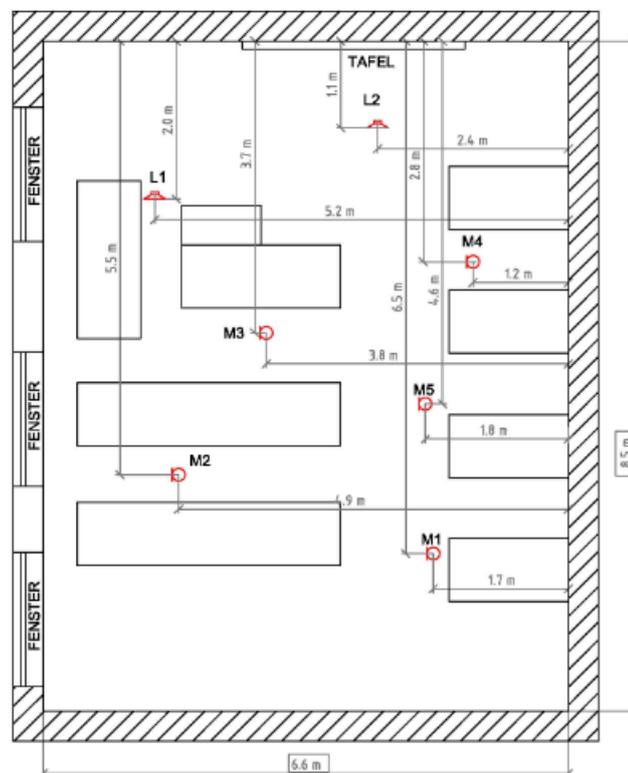


Abbildung 174: Exemplarische Messanordnung

¹¹¹ [FUCHS]

Laut Norm sind mindestens drei Mikrofon- und zwei Senderpositionen erforderlich. Es wird, wie in Abbildung 174 dargestellt, aber empfohlen, fünf Mikrofonpositionen zu wählen um den Raum besser abdecken zu können. Prinzipiell wird je Position eine Messung durchgeführt. Das bedeutet, dass beispielsweise bei 2 Lautsprecher- und 5 Mikrofonpositionen 10 Messungen durchzuführen sind. Zuerst positioniert man den Lautsprecher auf L1 und das Mikrofon nacheinander auf die Positionen M1-M5. Anschließend wird der Lautsprecher auf L2 gegeben und erneut alle 5 Mikrofonpositionen gemessen.

ACHTUNG: Für einen exakten und raschen Ablauf der Messung wird empfohlen, die festgelegten Mess- und Sendepositionen mit einem Klebeband zu markieren und zu beschriften (L1, L2, M1, M2, M3, etc.)! Dadurch kann das Equipment für jede Messung rasch auf die gewünschte Position umgestellt werden.

4.2 Durchführung der Messung

Nachdem die Verkabelung und die Platzierung des Messequipments erfolgt ist, kann nun die Messung durchgeführt werden. Für die Durchführung der Messung ist ein spezielles Audioprogramm erforderlich, mit dem die Raumimpulsantwort gemessen und ausgewertet werden kann. Ein kostengünstiges und intuitiv zu bedienendes Programm ist beispielsweise Arta von ARTALABS¹¹² das online zum Preis von 79.- Euro erhältlich ist.

Die Bedienung dieses Programmes sowie der gesamte Ablauf der Messung werden nachfolgend erklärt. Abbildung 175 zeigt die einzelnen Schritte der Messung.

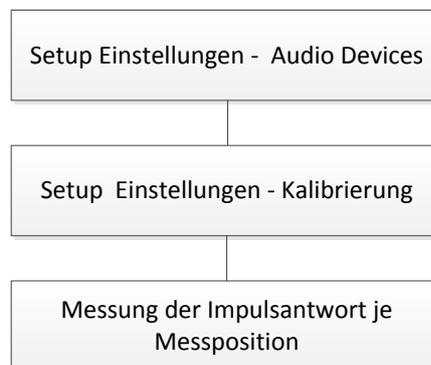


Abbildung 175: Ablauf der Messung

ACHTUNG: Aus Sicherheitsgründen wird für den gesamten Ablauf der Messung das Tragen von Gehörschutz empfohlen, damit es zu keinen Folgeschäden auf Grund zu hoher Pegel kommen kann!

¹¹² Siehe [ARTALABS]

4.2.1 Setup Einstellungen - Audio Devices

Als erstes sind die Setup Einstellungen für die verwendeten Audio Geräte durchzuführen. Abbildung 176 zeigt die Bedienoberfläche. Unter dem Menüpunkt „Setup“ finden sie sowohl den Bereich „Audio Devices“ als auch den später für die Kalibrierung benötigten Bereich „Calibrate Devices“.

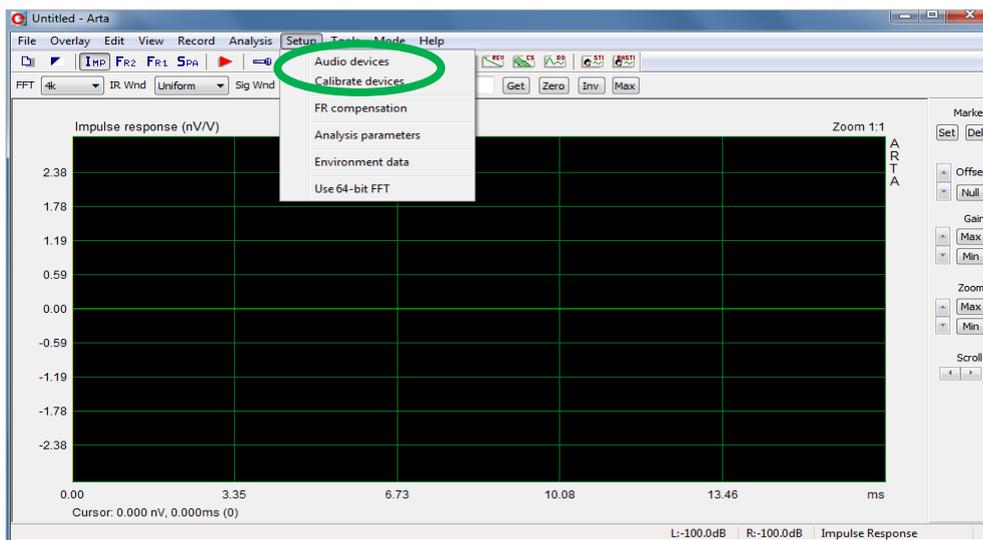


Abbildung 176: Bedienoberfläche von Arta, Setupeinstellungen

In den Einstellungen der Audio Devices sind die Ein- & Ausgänge entsprechend der Belegung am Audio Interface anzugeben. Bei Input Device ist der Eingang auszuwählen, bei dem das Mikrofon angeschlossen ist, bei Output Device jener Ausgang, der mit dem Lautsprecher verbunden ist.

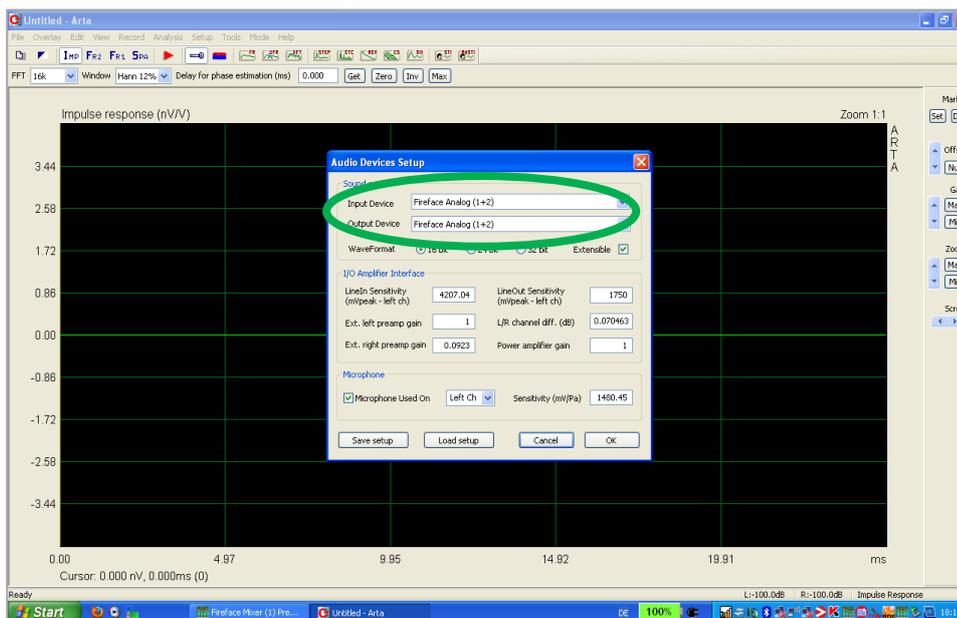


Abbildung 177: Angabe der Ein- und Ausgänge

4.2.2 Setup Einstellungen - Kalibrierung

Um eine reproduzierbare Messung zu ermöglichen, ist es erforderlich eine Kalibrierung des Mikrofons durchzuführen. Dazu wählen sie beim Menüpunkt „Setup“ den Bereich „Calibrate Devices“ aus.

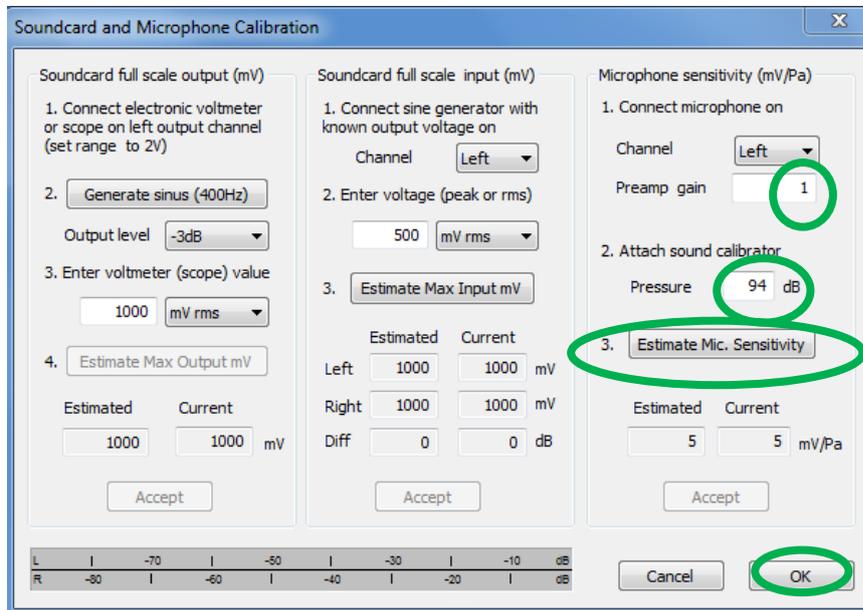


Abbildung 178: Einstellung zur Kalibrierung des Messmikrofons

Für die Kalibrierung verwendet man einen geeichten Kalibrator dessen Frequenz (Preamp gain; meist 1 kHz) sowie Schalldruckpegel (Pressure; meist 94 dB) wie in Abbildung 178 grün markiert, einzutragen sind. Anschließend wird er über dem Mikrophon positioniert und eingeschalten.



Abbildung 179: Aufsetzen des Kalibrator (links) bzw. Adapter (rechts)

Abhängig vom Durchmesser des Mikrofons kann, wie in Abbildung 179 dargestellt, ein Adapter erforderlich sein. Sobald der Button „Estimate Mic. Sensitivity“ (siehe Abbildung 178) gedrückt wird, beginnt die Ermittlung des Input Levels. Während der Messung, die einige Sekunden in Anspruch nimmt, wird „Wait“ angezeigt (siehe Abbildung 180 auf der nachfolgenden Seite).

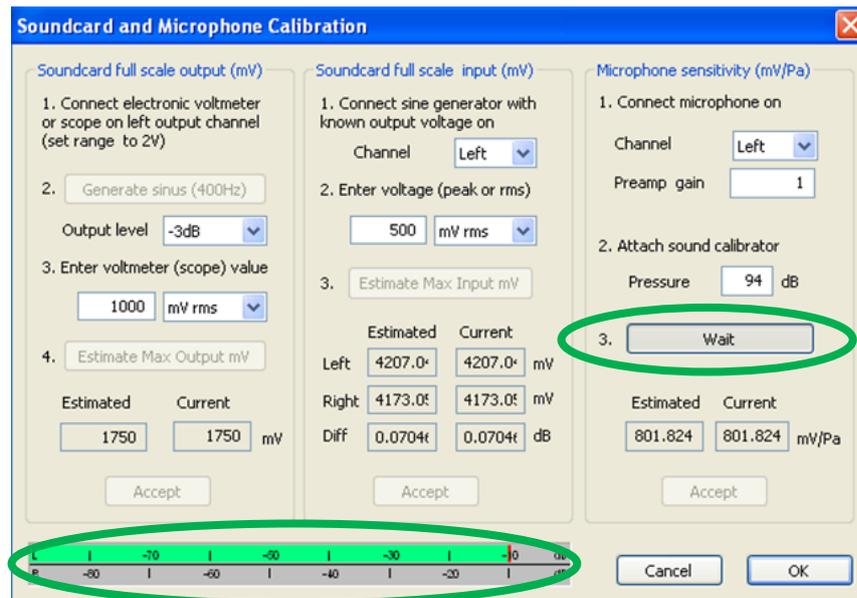


Abbildung 180: Messung und Anzeige des Input Levels

Die Steuerung des Input Levels erfolgt über den Regler an der Front des Audio Interfaces (siehe Abbildung 181). Durch Drehen des Reglers kann zwischen den Kanälen umgeschaltet werden. Sobald der entsprechend belegte Eingang (in diesem Fall Input 1, also i.1) aufscheint, kann man diesen durch Drücken des Knopfes auswählen und anschließend durch Drehen den Level festlegen. Sobald dieser gut ausgesteuert ist (ca. -10 dB, siehe Abbildung 180), kann die Kalibrierung abgeschlossen werden, indem man die Schaltfläche „Accept“ betätigt und den Kalibrator wieder abnimmt.



Abbildung 181: Auswahl des Kanals und Einstellung des Input Levels

ACHTUNG: Wenn der Level zu hoch gewählt wird, ist der in Abbildung 180 dargestellte Balken rot was bedeutet, dass es zum Clipping (Übersteuerung) kommt. In diesem Fall muss der Input Level reduziert werden, da die Signalverarbeitung ansonsten fehlerhaft ist!

4.2.3 Messung der Impulsantwort

Sobald die Setup Einstellungen abgeschlossen sind, kann das Anregungssignal ausgewählt und die Messung der Impulsantwort durchgeführt werden.

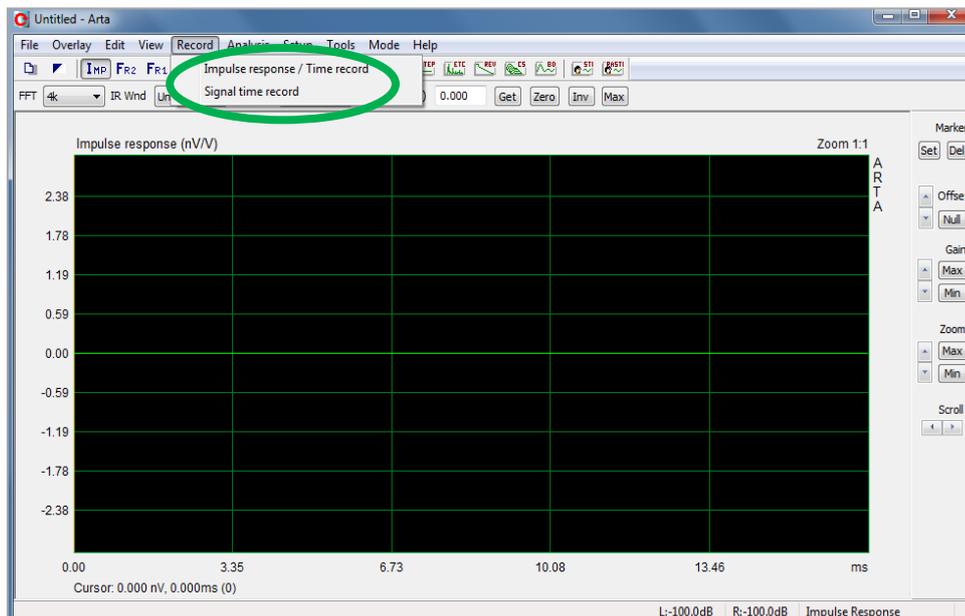


Abbildung 182: Bedienoberfläche von Arta, Messung der Impulsantwort

Wie in Abbildung 182 und Abbildung 183 dargestellt, wird unter dem Menüpunkt „Record“ im Bereich „Impulse Response/Time record“ das Anregungssignal ausgewählt und die Einstellungen der Signalparameter getroffen.

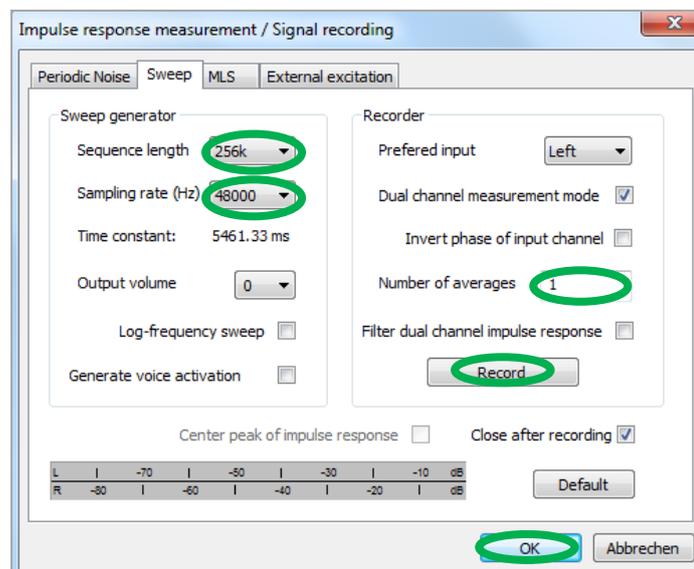


Abbildung 183: Auswahl des Anregungssignals und Parametereinstellungen

Nähere Informationen zum Anregungssignal befinden sich in Anhang B, Seite 205. Nach Selektion des Anregungssignals kann nun die Raumimpulsantwort des Raumes gemessen werden.

Durch drücken von „Record“ ermittelt ARTA die Impulsantwort und zeigt diese automatisch nach Abschluss der Messung, wie in Abbildung 184 dargestellt, an:

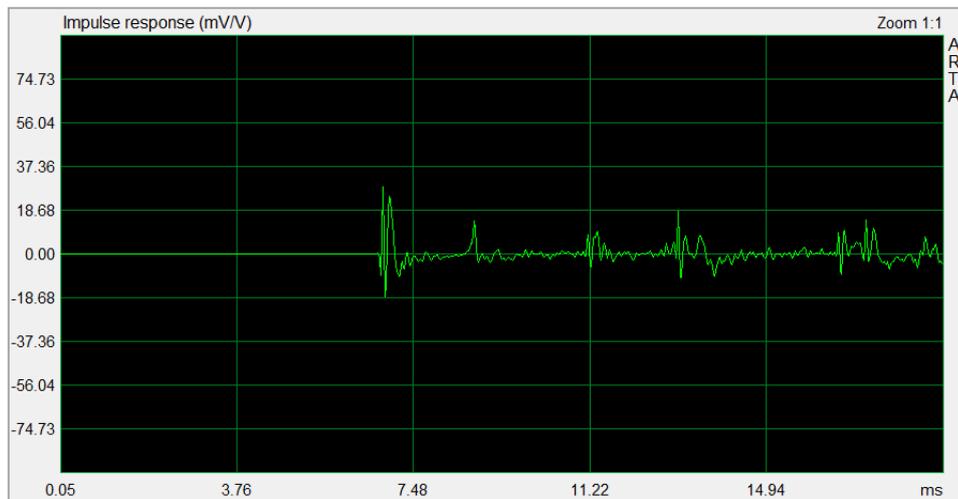


Abbildung 184: Impulsantwort

ACHTUNG: Die Messung der Raumimpulsantwort kann sowohl im besetzten Zustand als auch im leeren Zustand erfolgen. Während der Messung ist es allerdings wichtig, dass anwesende Personen keine Geräusche verursachen. Da mit einem Exponential Sweep gemessen wird, beinhaltet dieser Frequenzen unter- bzw. oberhalb des hörbaren Bereiches. D.h. auch einige Sekunden vor bzw. nach dem hörbaren Ton läuft die Messung noch!

Nachdem die Impulsantwort in diesem Fenster angezeigt wird, ist die Messung abgeschlossen und das Messergebnis kann direkt abgespeichert werden. Damit nach Abschluss aller Messungen nachvollzogen werden kann, welche Messung bei welcher Messposition erfolgt ist, empfiehlt sich eine eindeutige Benennung, wie beispielsweise „Raum005_L1_M3“. Dadurch beinhaltet der Name der Messdatei sowohl den Raum, als auch die Lautsprecher- und Mikrofonposition.

Basierend auf der gemessenen Impulsantwort können unter dem Menüpunkt „Analysis“ im Bereich „ISO3382 – accoustical parameters“ nun die akustischen Parameter der OENORM EN ISO 3382 in tabellarischer sowie grafischer Form ausgegeben und gespeichert werden (siehe Abbildung 185 und Abbildung 186). Es wird empfohlen, die Speicherung der „CSV“-Datei stets unmittelbar nach jeder Messung vorzunehmen, da die Dateien für die spätere Analyse benötigt werden und ansonsten jede Messung erneut für die Parameterabfrage geöffnet werden muss.

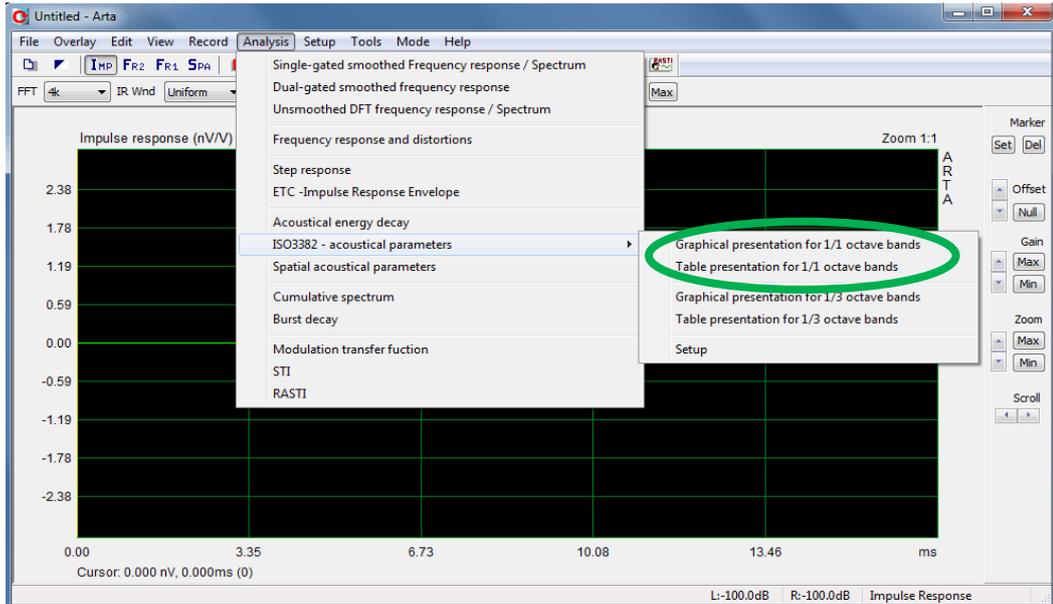
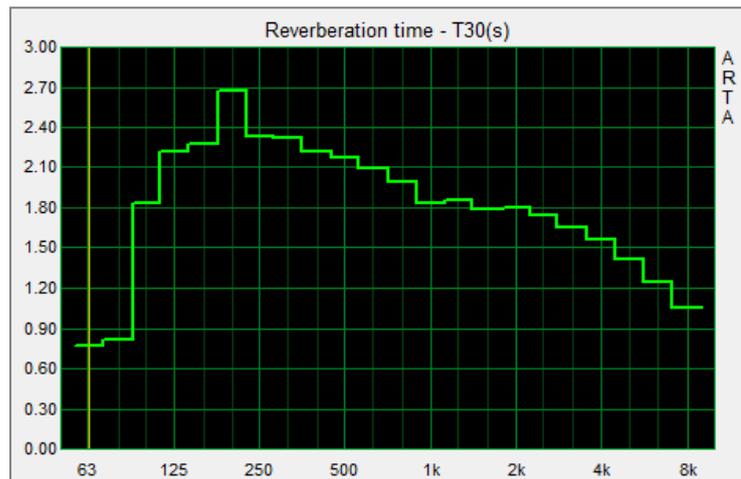


Abbildung 185: Analyse der Messergebnisse – Anzeige der akustischen Parameter



Room Acoustical Parameters (Raum005_L2_M1_Sweep.pir)

F (Hz)	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
T30 (s)	2.327	2.325	2.218	2.173	2.096	1.987	1.836	1.852	1.789	1.798	1.743
rT30	-0.995	-0.999	-0.998	-0.999	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999	-1.000	-0.999	-1.000
T20 (s)	2.037	2.354	2.133	2.209	2.263	2.065	1.898	1.844	1.776	1.738	1.754
rT20	-0.998	-0.997	-0.998	-0.997	-0.998	-0.999	-0.999	-0.997	-0.999	-1.000	-0.999
T10 (s)	1.972	2.625	2.014	1.953	2.297	2.169	1.805	1.605	1.713	1.686	1.804
rT10	-0.995	-0.993	-0.994	-0.986	-0.994	-0.998	-0.998	-0.995	-0.999	-0.998	-0.998
EDT (s)	2.247	2.542	2.423	2.363	2.525	2.261	1.840	1.701	1.670	1.875	1.801
C80 (dB)	-4.40	0.87	-3.63	-1.59	-0.70	-1.20	-0.68	-1.49	0.33	0.60	1.15
C50 (dB)	-9.39	-5.44	-5.18	-3.01	-2.51	-4.86	-4.28	-3.44	-2.03	-1.02	-1.39
D50 (%)	10.33	22.21	23.28	33.31	35.96	24.64	27.17	31.18	38.54	44.15	42.09
Ts (ms)	217.947	155.349	199.025	156.809	148.523	162.524	139.980	133.976	112.505	117.044	112.466

Buttons: Save (ASCII), Save (.csv), Copy, OK

Abbildung 186: Raumakustische Parameter nach OENORM EN ISO3382

4.2.4 Checkliste für potentielle Fehlerquellen

Sollte im Laufe der Messung das Problem auftreten, dass kein Input Level angezeigt wird und somit kein Signal über den Lautsprecher zu hören ist, müssen folgende Punkte überprüft werden:

- Sind alle Kabel korrekt angeschlossen?
- Sind alle Geräte eingeschalten?
- Wurde der Treiber für das Audio Interface installiert?
- Erhält das Audio Interface ein Signal vom Laptop?
(Wenn beim Audio Interface bei Host das Licht rot aufleuchtet ist das Fire Wire Kabel nicht korrekt angeschlossen oder defekt)

Wenn diese Punkte erfolgreich überprüft wurden, sollte das Problem behoben und eine korrekte Messung möglich sein.

4.3 Analyse der Messergebnisse und Absorberauswahl

Das in Excel entwickelte Simulationstool ermöglicht es, die Messdaten zu importieren und die akustischen Parameter des gemessenen Raumes hinsichtlich der Sollwerte nach DIN18041 zu verifizieren sowie den sanierten Zustand zu simulieren. Dafür können die gewünschten Absorber sowie die Absorbermenge aus einer Datenbank ausgewählt und somit auch eine erste Abschätzung der Materialkosten durchgeführt werden. Nähere Informationen zu den im Tool verwendeten Formeln befinden sich in Anhang B, Seite 205.

Das Simulationstool ist in drei grundlegende Bereiche gegliedert. Allem voran werden die Basisdaten des Klassenraumes abgefragt und daraus automatisch die grundlegenden Parameter hinsichtlich akustisch nutzbarer Fläche sowie die Sollnachhallzeit ermittelt. Im Anschluss daran werden die Messwerte über ein Dialogfenster ausgewählt und importiert. Im dritten Bereich des Simulationstools erfolgen sowohl die Verarbeitung und Darstellung der Messdaten, als auch die Simulation des sanierten Zustandes.

Sämtliche rot hinterlegten Felder sind vom User einzugeben, die Werte der grau hinterlegten Felder werden auf Grund hinterlegter Formeln automatisch berechnet und sind für Anwendereingaben gesperrt. Sollte es erwünscht sein, diese zu bearbeiten oder ausgeblendete Karteireiter, in denen die Hilfsberechnung diverser Werte erfolgt, einzublenden, kann der Blattschutz mit dem Passwort „passwort“ aufgehoben werden. Da dadurch das gesamte Simulationstool konfigurierbar ist, wird empfohlen, dies nur vorzunehmen, wenn Sie über einschlägige Vorkenntnisse bzgl. Excel verfügen.

4.3.1 Eingabe der Basisdaten

Im ersten Karteireiter namens „Basisdaten“ (siehe Abbildung 187) sind die grundlegenden Parameter wie Raumbezeichnung, Anzahl der SchülerInnen, Raumabmessung, sowie die akustisch nicht nutzbare Fläche einzutragen. Die akustisch nicht nutzbare Fläche umfasst alle Flächen wie Tafel oder Türen die nicht mit Absorbern verkleidet werden können. Auf Basis dieser Angaben werden die einzelnen Raumflächen sowie die Sollnachhallzeit und das dafür gültige Toleranzband nach DIN18041 ermittelt und grafisch dargestellt.

Zusätzlich ist es möglich, das Baujahr des zu messenden Raumes auszuwählen, wodurch basierend auf den Messergebnissen von Müller, die in etwa zu erwartende Nachhallzeit dargestellt wird.

Abbildung 187 zeigt den ersten Karteireiter des Simulationstools in dem die Eingabe und die Verarbeitung der Basisdaten erfolgt. Sämtliche rot hinterlegten Felder sind einzugeben, die Werte der grau hinterlegten Felder werden auf Grund hinterlegter Formeln automatisch berechnet. Sollten die in den weißen Flächen angeführten Begriffe nicht verständlich sein, bieten die eingefügten Kommentare, die durch Anklicken der jeweiligen Zelle erscheinen, die Möglichkeit nähere Informationen, hinterlegte Formeln und Definitionen abzurufen.

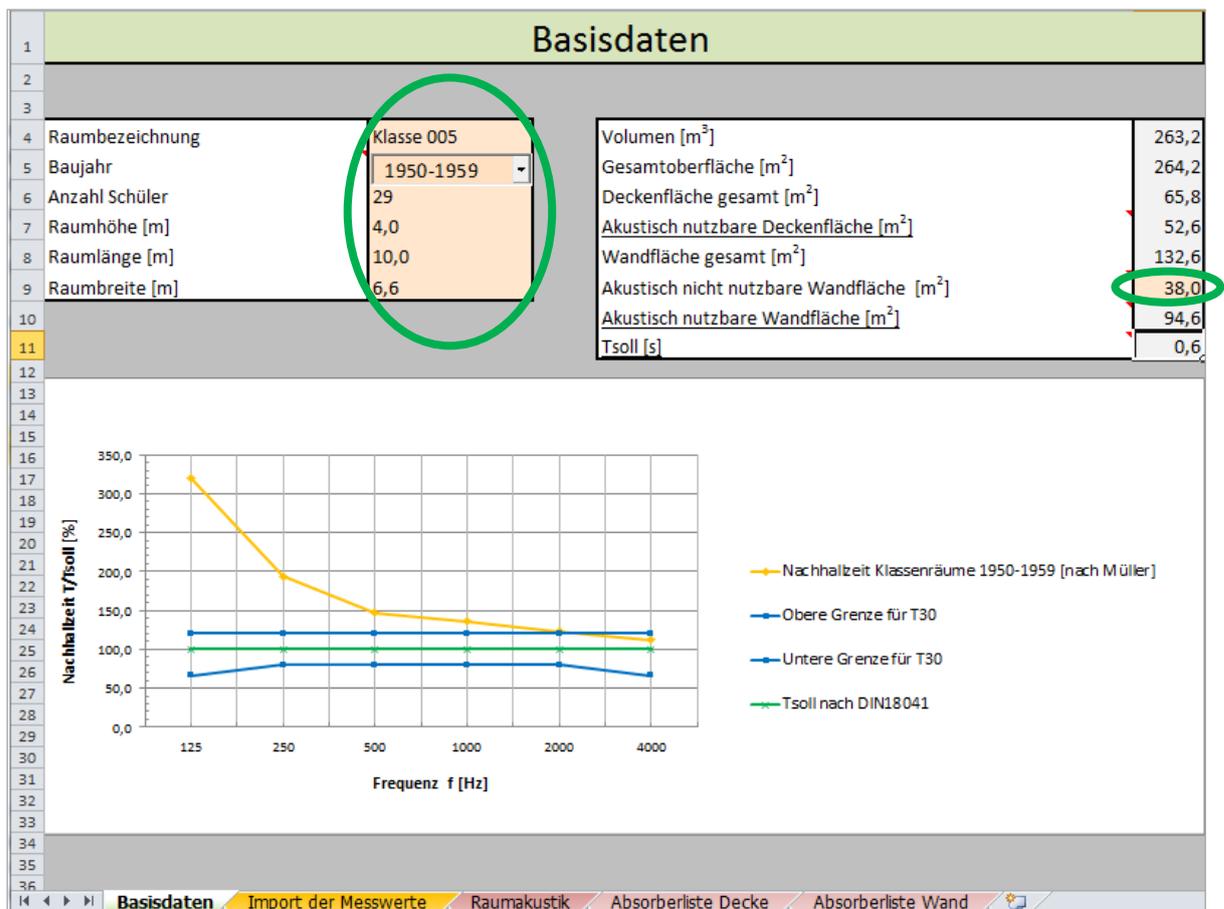


Abbildung 187: Eingabe sowie Ermittlung der Basisdaten

4.3.2 Import der Messwerte

Im zweiten Karteireiter namens „Import der Messwerte“ (siehe Abbildung 188) erfolgt der Import der Messdateien. Die aus ARAT exportierten Messdateien können einzeln oder auf einmal in das Simulationstool importiert werden. Durch Anklicken der Schaltfläche „Messwerte importieren“ wird ein Dialogfenster geöffnet, in dem die gewünschten Messdateien ausgewählt werden können. Sowohl der Name der ausgewählten Messdatei, als auch deren Werte werden automatisch in der rechten Tabelle eingetragen. Ebenso wird der Name der Messdatei in die linke Tabelle übernommen und auf Fehler überprüft. Sowohl die Spalte mit den Frequenzwerten (F) als auch jene mit der Nachhallzeit (T30) sind als Pflichtfelder definiert und werden hinsichtlich möglicher Fehler (Fehlende oder fehlerhafte Werte) überprüft. Liegt ein Fehler vor, so wird dies im Feld „Status“ durch den Eintrag „Fehler“ angezeigt. Ist die Messdatei korrekt so erscheint ein entsprechendes „OK“.

Import der Messwerte																									
Raum war bei Messung: besetzt ← Achtung! Der Besetzungszustand des Klassenraumes muss eingetragen werden!																									
STI und %Alcons müssen für alle Messdateien ausgefüllt werden!																									
Messwerte importieren		STI		%Alcons	Entfernen	Status	Messdatei							F (Hz)	T30 (s)	rT30	T20 (s)	rT20	T10 (s)	rT10	EDT (s)	C80 (dB)	C50 (dB)	D50 (%)	Ts (ms)
Messdatei / Mittelwert	male	female	%Alcons	Entfernen	Status	Messdatei	F (Hz)	T30 (s)	rT30	T20 (s)	rT20	T10 (s)	rT10	EDT (s)	C80 (dB)	C50 (dB)	D50 (%)	Ts (ms)							
Messdatei / Mittelwert	0,6373	0,6447	5,85%			Raum005_L1_M1	63	1,69	-1	1,549	-0,99	1,41	-0,97	0,80	7,09	3,29	68,07	123,29							
Raum005_L1_M1	0,6336	0,6416	6,00%		OK	Raum005_L1_M1	125	1,40	-1	1,438	-1	1,38	-1	1,37	0,94	-1,72	40,25	115,18							
Raum005_L1_M2	0,6273	0,6363	6,30%		OK	Raum005_L1_M1	250	1,47	-1	1,491	-1	1,60	-1	1,35	-0,05	-3,35	31,6	110,52							
Raum005_L1_M3	0,6928	0,7028	4,49%		OK	Raum005_L1_M1	500	1,22	-1	1,186	-1	1,29	-0,99	1,26	1,47	-0,5	47,13	82,54							
Raum005_L1_M4	0,6076	0,6135	6,76%		OK	Raum005_L1_M1	1.000	1,02	-1	1,001	-1	0,86	-1	0,86	3,98	0,67	53,86	61,54							
Raum005_L1_M5	0,6175	0,6208	6,26%		OK	Raum005_L1_M1	2.000	0,91	-1	0,905	-1	0,92	-1	1,02	4,71	2,15	62,15	56,11							
Raum005_L2_M1	0,6344	0,6399	5,72%		OK	Raum005_L1_M1	4.000	0,85	-1	0,853	-1	0,87	-1	0,86	6,66	4,15	72,21	43,00							
Raum005_L2_M2	0,6429	0,6519	5,68%		OK	Raum005_L1_M1	8.000	0,70	-1	0,686	-1	0,69	-1	0,69	7,75	4,42	73,47	37,51							
Raum005_L2_M3	0,6416	0,6519	5,71%		OK	Raum005_L1_M2	63	1,72	-1	1,65	-0,99	1,50	-0,98	1,62	0,92	0,68	53,9	135,24							
Raum005_L2_M4	0,6339	0,6426	6,00%		OK	Raum005_L1_M2	125	1,56	-1	1,517	-1	1,59	-0,99	1,62	-0,04	-5,19	23,23	135,67							
Raum005_L2_M5	0,6415	0,6456	5,60%		OK	Raum005_L1_M2	250	1,41	-1	1,459	-0,99	1,66	-1	1,44	-0,76	-4,09	28,08	118,22							
Raum005_L3_M1					Fehler	Raum005_L1_M2	500	1,19	-1	1,135	-1	1,18	-0,99	1,24	2,06	-0,92	44,7	84,94							
						Raum005_L1_M2	1.000	0,96	-1	0,957	-1	1,01	-1	1,06	4,34	1,46	58,34	62,72							
						Raum005_L1_M2	2.000	0,86	-1	0,89	-1	0,91	-1	0,93	5,64	2,43	63,65	48,83							
						Raum005_L1_M2	4.000	0,84	-1	0,831	-1	0,80	-1	0,83	6,49	3,63	69,76	42,36							
						Raum005_L1_M2	8.000	0,73	-1	0,706	-1	0,70	-1	0,65	8,42	5,06	76,23	33,46							
						Raum005_L1_M3	63	1,67	-1	1,759	-1	1,56	-0,98	1,51	-3,4	-3,53	30,74	167,43							
						Raum005_L1_M3	125	1,30	-1	1,345	-1	1,44	-0,99	1,57	2,89	-1,8	39,78	102,88							
						Raum005_L1_M3	250	1,37	-1	1,254	-1	1,29	-1	1,29	3,79	0,75	54,3	73,74							
						Raum005_L1_M3	500	1,24	-1	1,201	-1	1,22	-1	1,13	3,58	1,44	58,21	62,66							
						Raum005_L1_M3	1.000	1,01	-1	0,985	-1	0,97	-1	1,07	6,32	4,15	72,23	41,29							
						Raum005_L1_M3	2.000	0,94	-1	0,934	-1	0,93	-1	0,97	8,35	6,19	80,63	27,87							
						Raum005_L1_M3	4.000	0,85	-1	0,852	-1	0,80	-1	0,86	7,77	5,17	76,68	31,30							
						Raum005_L1_M3	8.000	0,70	-1	0,683	-1	0,66	-1	0,68	10,06	7,03	83,48	22,71							
						Raum005_L1_M4	63	1,69	-1	1,75	-1	1,73	-0,98	1,63	3,3	-1,96	38,88	150,84							

Abbildung 188: Import der Messwerte

Auch das Entfernen einer Messdatei ist möglich. Durch eine entsprechende Markierung der Datei in der Spalte „Entfernen“ sowie anklicken des Feldes „Messwerte entfernen“ werden nach einer Sicherheitsabfrage die Messwerte in beiden Tabellen entfernt.

Für die akustischen Parameter STI sowie %Alcons gibt es in ARTA keine Möglichkeit des Exports. Diese Daten müssen daher je Messdatei manuell in der entsprechenden Zeile eingetragen werden. Um die Werte für STI und %Alcons zu erhalten, müssen Sie in ARTA die einzelnen Messdateien mit der Endung „_pir“ öffnen. Unter „Analysis/STI“ finden sie sowohl die Werte für „STI male“ als auch für „STI female“ sowie für „%Alcons“. Abbildung 189 und Abbildung 190 zeigen die entsprechenden Dialogfenster. Nähere Informationen zu den akustischen Parametern befinden sich in Anhang B, Seite 205.

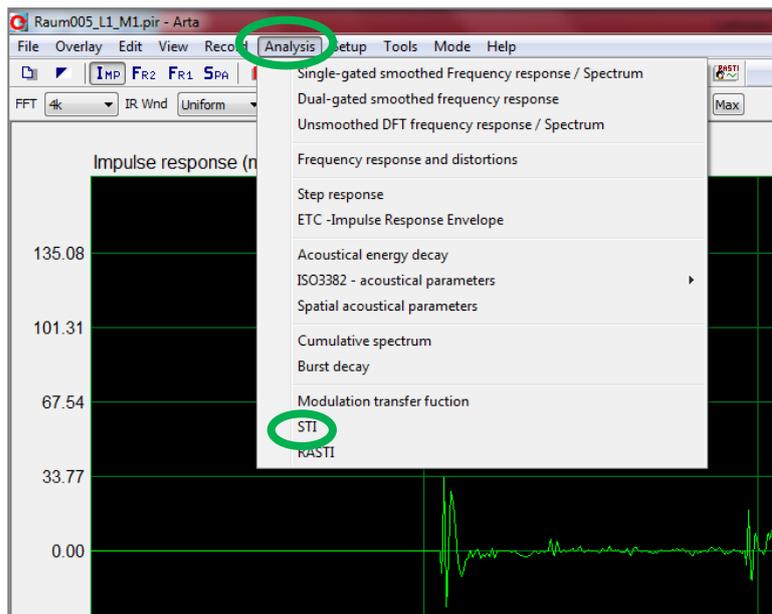


Abbildung 189: Abfrage von STI und %Alcons in Arta

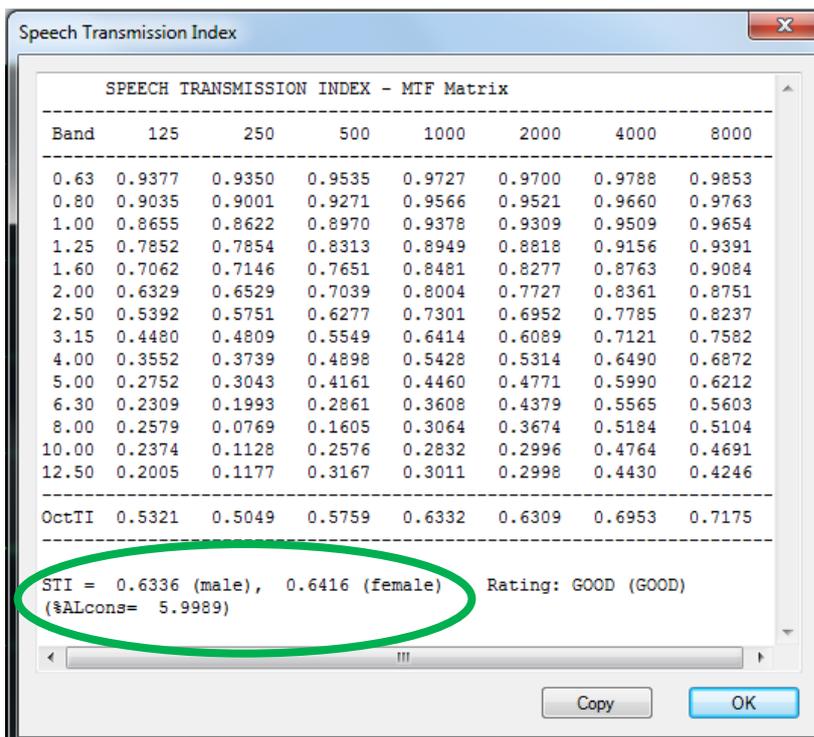


Abbildung 190: Anzeige von STI und %Alcons in Arta

Neben der Nachhallzeit werden in der rechten Tabelle noch zusätzliche Parameter angeführt. Für die weiteren Betrachtungen wird nur die Nachhallzeit herangezogen, die restlichen Werte werden dennoch in der Tabelle belassen, um dem Anwender bei Bedarf zur Verfügung zu stehen. *ACHTUNG: Damit die weitere Verarbeitung der Messdateien richtig erfolgt, muss zuletzt noch der Besetzungszustand des gemessenen Raumes angegeben werden! (Siehe Warnhinweis aus Abbildung 188). Basierend darauf erfolgt die weitere Verarbeitung der Messdaten.*

4.3.3 Verarbeitung & Simulation der akustischen Parameter

Im dritten Karteireiter des Simulationstools werden die importierten Messdaten verarbeitet und die akustischen Parameter tabellarisch und grafisch angezeigt. Ebenso gibt es ein eigenes Eingabefeld, in dem die für die Sanierung gewünschten Absorber ausgewählt werden können. An Hand dieser Auswahl erfolgt die Simulierung der Nachhallzeit.

Um eine Auswahl treffen zu können, muss zuerst analysiert werden, wie stark die Nachhallzeit von den Sollwerten der Norm abweicht. Abhängig von der Angabe des Besetzungszustandes in Karteireiter zwei wird im dritten Karteireiter automatisch der Mittelwert der Nachhallzeit für den angegebenen Zustand ermittelt. Damit die Nachhallzeit sowohl im leeren als auch im besetzten Zustand vorliegt wird der Wert für den jeweils nicht gemessenen Zustand simuliert.

Abbildung 191 zeigt die tabellarische und grafische Darstellung der Nachhallzeit. Rechts neben der Tabelle hat man die Möglichkeit auszuwählen, welche Kurven dargestellt werden sollen. Da der maximale Kurvenwert automatisch das Maximum der Achse ist, wird durch das Auswählen der einzelnen Kurve diese automatisch vergrößert angezeigt.

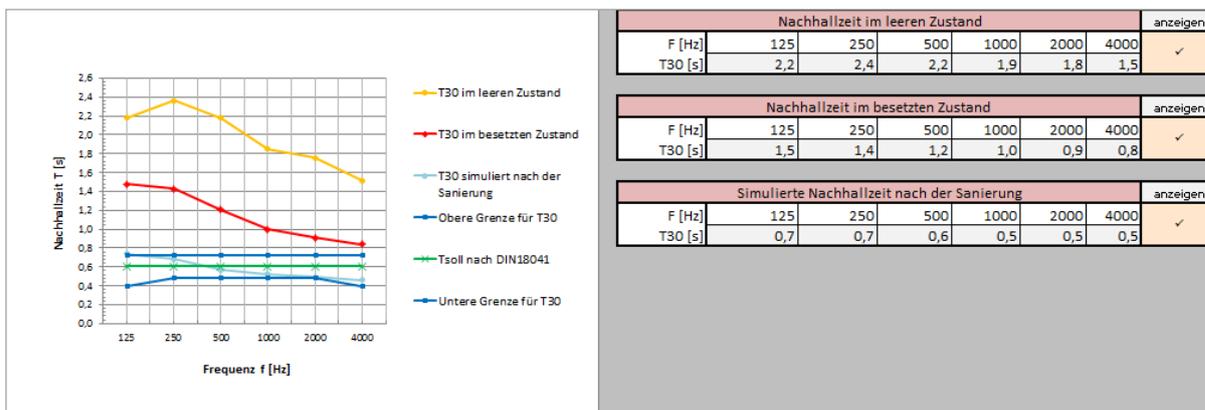


Abbildung 191: Tabellarische und grafische Darstellung der Nachhallzeit

Wie in Abbildung 192 dargestellt, werden die zur Erreichung der Sollnachhallzeit erforderliche äquivalente Absorptionsfläche und die äquivalente Absorptionsfläche der ausgewählten Absorber tabellarisch und grafisch angeführt. Nähere Informationen zur äquivalenten Absorptionsfläche befinden sich in Anhang A, Seite 198.

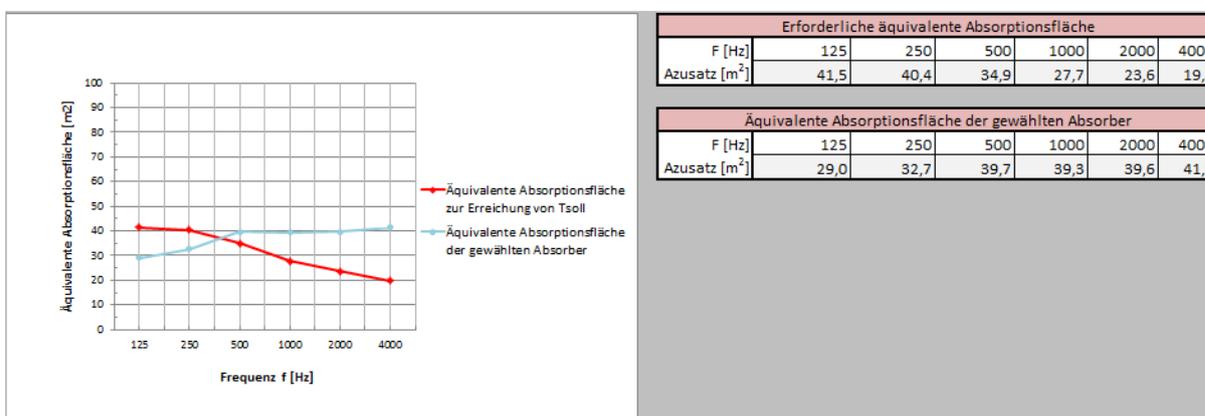


Abbildung 192: Tabellarische sowie grafische Darstellung der äquivalenten Absorptionsfläche

Das Eingabefeld für die Auswahl der Absorber sieht wie folgt aus:

Element	Absorbertyp	m ²	Preis		
Decke (Teil1)	Deckensegel 50 - 2450x1200 - o.R	22	1639	max. erlaubte m ² :	46,06
Decke	Deckensegel 50 - 2450x1200 - o.R			(Gesamte Deckenfläche)	
	Deckensegel 50 - 3000x1250 - m.R				
Wand	Deckensegel 50 - 2500x1250 - m.R	30	150	max. erlaubte m ² :	46,32
Wand	Deckenmodul (Holzfaser) 80 - 1200x625	18		(Gesamte Wandfläche)	
Wand	Deckenmodul (Steinwolle) 30 - 1200x625				
Wand (Teil4)					
Materialkosten gesamt			1788,78		

Abbildung 193: Auswahl der Absorber sowie Ermittlung der Materialkosten

Es können sowohl für den Decken-, als auch für den Wandbereich mehrere Absorber ausgewählt werden. Neben der Auswahl des Absorbertyps ist auch die gewünschte Fläche einzutragen. Abhängig von den selektierten Absorbern und der eingetragenen Quadratmeteranzahl werden sowohl die Materialkosten, als auch die äquivalente Absorptionsfläche sowie die für den sanierten Zustand simulierte Nachhallzeit ermittelt und grafisch dargestellt. Sollte die maximal zur Verfügung stehende akustische Fläche überschritten werden, so erscheint eine Warnmeldung. Die Eingabe ist in diesem Fall zu korrigieren.

Die Produktdetails der Absorber befinden sich in eigenen Karteireitern, wie Abbildung 194 und Abbildung 195 zeigen. In dieser Absorberdatenbank sind jeweils die Dimensionen, der Absorptionsgrad sowie der Quadratmeterpreis und der Hersteller angegeben. Ebenso ist angeführt, ob der Absorber mit oder ohne Fase ausgeführt ist und auf welchen Abstand der Absorptionsgrad bezogen ist. Die Datenbank kann nach Bedarf auch individuell erweitert werden. Die jeweiligen Hersteller sind in Anhang A, Seite 198 angeführt.

Absorberdatenbank - Absorberliste Decke														
Absorbername in Liste	Parameter					Absorptionswert je Frequenz						Preis/m ²	Firma	Produkt
	Dicke [mm]	Länge [mm]	Breite [mm]	Fase	Abstand [mm]	125	250	500	1000	2000	4000			
Deckensegel 20 - 2450 x 1250 - m.R	20	2450	1250	x	100	0,18	0,47	0,96	1,00	1,00	1,00	45,00	Ziegler	Deckensegel mit Rahmen
Deckensegel 20 - 2450 x 1250 - m.R	20	2450	1250	x	300	0,38	0,50	0,80	1,00	1,00	1,00	45,00	Ziegler	Deckensegel mit Rahmen
Deckensegel 50 - 2450 x 1200 - o.R	50	2450	1250	x	0	0,22	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	74,49	Schaumstofflager.de	Deckensegel ohne Rahmen
Deckensegel 40 - 3000 x 1250 - m.R	40	3000	1250	x	300	0,30	0,77	1,00	1,00	1,00	1,00	80,00	Ziegler	Deckensegel mit Rahmen
Deckensegel 40 - 2500 x 1250 - m.R	40	2500	1250	x	300	0,30	0,77	1,00	1,00	1,00	1,00	86,00	Ziegler	Deckensegel mit Rahmen
Deckenmodul (Holzfaser) 80 - 1200 x 625	80	1200	625	x	0	0,18	0,43	0,86	0,96	0,88	0,88	46,00	Homatherm	Holzämmmatte flexCL
Deckenmodul (Steinwolle) 30 - 1200 x 625	30	1200	625	x	270	0,72	0,78	0,89	0,93	0,97	1,03	37,00	Knaufinsulation	Steinwollmatte (Feuerschutz)

Abbildung 194: Absorberdatenbank der Deckenabsorber

Absorberdatenbank - Absorberliste Wand														
Absorbername in Liste	Parameter					Absorptionswert je Frequenz						Preis/m ²	Firma	Produkt
	Dicke [mm]	Länge [mm]	Breite [mm]	Fase	Abstand [mm]	125	250	500	1000	2000	4000			
Wandelement (Basotect) 40 - 1250 x 625 - o.F.	40	1250	625	Nein	0	0,33	0,42	0,88	0,98	0,98	0,98	28,00	Ziegler	Piano
Wandelement (Basotect) 40 - 1250 x 625 - m.F.	40	1250	625	Ja	0	0,33	0,42	0,88	0,98	0,98	0,98	30,80	Ziegler	Piano
Wandelement (Basotect) 50 - 1250 x 625 - o.F.	50	1250	625	Nein	0	0,30	0,58	0,90	0,90	0,90	0,90	34,00	Ziegler	Piano
Wandelement (Basotect) 50 - 1250 x 625 - m.F.	50	1250	625	Ja	0	0,30	0,58	0,90	0,90	0,90	0,90	38,00	Ziegler	Piano
Wandelement (Basotect) 50 - 1000 x 500 - o.F.	50	1000	500	Nein	0	0,22	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	27,80	Schaumstofflager.de	Basotect
Wandmodul (Holzfaser) 80 - 1200 x 625	80	1200	625	x	0	0,18	0,43	0,86	0,96	0,88	0,88	42,00	Homatherm	Holzämmmatte flexCL
Wandmodul (Steinwolle) 50 - 1200 x 625	50	1200	625	x	250	0,68	0,76	0,89	0,97	1,00	1,03	38,00	Knaufinsulation	Steinwollmatte (Feuerschutz)
Spanplatte 4 - 2800 x 2070	4	2800	2070	x	50	0,30	0,20	0,15	0,10	0,08	0,10	6,00	Peham	Spanplatte
Spanplatte 4 - 2800 x 2070 (mit Steinwolle)	4	2800	2070	x	50	0,20	0,40	0,20	0,10	0,08	0,10	11,00	Peham	Spanplatte
Spanplatte 8 - 2800 x 2100	8	2800	2100	x	20	0,46	0,24	0,04	0,01	0,01	0,01	4,00	Peham	Spanplatte

Abbildung 195: Absorberdatenbank der Wandabsorber

Neben der Nachhallzeit und der äquivalenten Absorptionsfläche werden auch die akustischen Parameter STI und der %Alcons angeführt. Es werden sowohl die Werte vor, als auch nach der simulierten Sanierung ermittelt.

STI		Skala				%Alcons		Skala		
vorher	nachher	von	bis	Bewertung		vorher	nachher	von	bis	Bewertung
0,64	0,86				6%	2%				
		0,75	1,00	Sehr gut			20%	100%	Unbrauchbar	
		0,60	0,75	Gut						
		0,45	0,60	Angemessen			7%	20%	Befriedigend	
		0,30	0,45	Schwach						
		0,00	0,30	Schlecht			2%	7%	Gut	
							0%	2%	Ideal	

Abbildung 196: Darstellung von STI und %Alcons

Nachdem mit Hilfe dieses Simulationstools eine individuelle Sanierungsvariante erstellt wurde, können nun, basierend auf dem Beispiel aus Kapitel 3.3, die Kosten der Sanierung abgeschätzt werden. Das Lukrieren der für die Sanierung notwendigen finanziellen Mittel wird im nächsten Kapitel behandelt.

4.4 Lukrieren der finanziellen Mittel

Durch die kostengünstigen Sanierungsvarianten in Kapitel 4 ist im Vergleich zu einer Gesamtsanierung durch den Fachbetrieb bereits eine deutliche Kostenersparnis möglich. In Summe wird dennoch ein gewisses Budget benötigt, das den Schulen mitunter nicht zur Verfügung steht. Um die Sanierung dennoch zu ermöglichen, werden in diesem Kapitel unterstützende Institutionen und potentielle Sponsoren angeführt. In Anhang C, Seite 209 befinden sich zudem eine entsprechende Präsentationunterlage, die für die Sponsorenanfragen verwendet werden kann.

4.4.1 Schulbezogene Institutionen

In erster Instanz wird die Kontaktierung des Landesschulrates empfohlen, um in Erfahrung zu bringen, ob für Projekte wie die akustische Sanierung von Klassenräumen ein Budget zur Verfügung steht. Zusätzlich sollte der Elternverein kontaktiert werden. Eventuell ist durch diesen ebenfalls eine finanzielle Unterstützung möglich.

4.4.2 Externe Institutionen

Stadt Graz

Neben schulbezogenen Institutionen besteht auch die Möglichkeit einer finanziellen Förderung durch externe Institutionen wie beispielsweise die Stadt Graz. Das Amt für Umweltschutz der Stadt Graz überprüft die eingereichten Projekte und fördert innovative und pädagogisch sinnvolle Projekte.

Kontaktdaten:

Amt für Umweltschutz der Stadt Graz
Kaiserfeldgasse 1/IV, 8010 Graz
Tel: 0316/872-4324

Bundesministerium für Unterricht und kulturelle Angelegenheiten

Auch Stiftungen und Fonds, wie der Umwelt- und Gesundheits-Bildungsfond, könnte eine Option für die Finanzierung sein. Der Umwelt- und Gesundheits-Bildungsfonds ist eine Einrichtung des Bundesministeriums für Unterricht und kulturelle Angelegenheiten. Der Fond fördert Initiativen und Projekte zu den Themen "Umwelt" und "Gesundheit" in Schulen. Bewertet werden die Anträge unter Berücksichtigung ökologischer, gesundheitsförderlicher, pädagogischer und ökonomischer Aspekte. Die Anträge sind im Dienstwege einzureichen und werden von einer Kommission bewertet, die über die Vergabe der Förderungsmittel entscheidet.

Kontaktdaten:

Bundesministerium für Unterricht und kulturelle Angelegenheiten; Abteilung V/3
Minoritenplatz 5, 1014 Wien
Ansprechperson: Dr. Beatrix Haller (beatrix.haller@bmuk.gv.at)
Tel.: 01/53120-2533

4.4.3 Diverse Sponsoren

Neben den zuvor genannten Institutionen können auch Firmen, die in Bezug auf deren Produkte SchülerInnen als Zielgruppe haben, kontaktiert werden. Folgende Unternehmen sind für diesen Bereich relevant:

Schulartikel: Libro, Thalia, Pagro, Verlag für Schulbücher
Bekleidung: H&M, Orsay, New Yorker, Pimkie, C&A
Drogerie: BIPA, dm,
Bankwesen: RAIKA, Volksbank, Sparkasse
Medien: Antenne Steiermark, Ö3

Durch Platzierung entsprechender Werbung in den Schulräumen können diese Unternehmen als Sponsoren gewonnen werden. Evtl. können diese Sponsoren die Unterstützung der akustischen Sanierung auch für eine PR Kampagne nutzen und somit weitere finanzielle Mittel zur Verfügung stellen. Speziell Libro, Thalia, H&M, BIPA, RAIKA und Antenne Steiermark haben einen starken Fokus auf Werbekampagnen im Sektor der Jugendlichen und sollten daher primär kontaktiert werden. Auch jene Firmen, von denen die Sanierungsmaterialien bezogen werden, können die Sanierung evtl. als Referenzprojekt, oder zu Werbezwecken einsetzen. Dadurch kann zusätzlich zum Mengenrabatt eine Reduzierung des Gesamtpreises erzielt werden.

4.4.4 Spendengenerierung durch Veranstaltungen

Neben der Kontaktierung von Institutionen und Sponsoren besteht auch die Möglichkeit, durch Theater- od. Konzertauftritte Spenden zu sammeln. Gegebenenfalls könnte man im Rahmen eines Projektunterrichtes auch direkt Geld sammeln indem z.B. symbolisch der Thematik entsprechend Gehörschutz gegen einen freiwilligen Spendenbeitrag verkauft werden.

Es wird empfohlen, für das Lukrieren von finanziellen Mitteln über Sponsoren ausreichend Zeit einzuplanen, da von der ersten Kontaktaufnahme bis zur finalen Zusage mehrere Wochen vergehen können. Für die Anfrage bei den Sponsoren wird des Weiteren empfohlen auf die Notwendigkeit einer akustischen Sanierung hinzuweisen und diese mit konkreten Fakten zu belegen. Die Präsentationsunterlage in Anhang C, Seite 209 greift die wichtigsten Argumente für eine akustische Sanierung auf und dient somit als Grundlage für die Anfragen bei Sponsoren.

Nachdem in diesem Kapitel nun der gesamte Ablauf einer akustischen Sanierung dargestellt wurde, werden im nachfolgenden Kapitel Aspekte wie Bau- und Brandschutzvorschriften sowie Sach- und Personenversicherung behandelt. Neben diesen Rahmenbedingungen werden auch pädagogische Begleitmaßnahmen vorgestellt, die zusätzlich zur akustischen Sanierung empfohlen werden.

5 Rahmenbedingungen einer akustischen Sanierung

Im Zuge der Sanierung gilt es einige Rahmenbedingungen zu beachten. Neben den baurechtlichen Vorgaben und der Brandschutzvorschriften sind auch Aspekte der Sach- sowie Personenversicherung zu berücksichtigen. Neben diesen Rahmenbedingungen werden in diesem Kapitel auch noch pädagogische Begleitmaßnahmen vorgestellt. Diese werden zusätzlich zur Sanierung empfohlen, um das Bewusstsein für Lärm und dessen Auswirkung zu schärfen und somit ein „ruhigeres Verhalten“ der SchülerInnen zu fördern. Auch Finanzierungsmöglichkeiten werden erarbeitet, um die für die Sanierung nötigen finanziellen Mittel lukrieren zu können.

5.1 Baurechtliche Fragen und Brandschutzvorschriften

Je nachdem, welche Sanierungsvariante gewählt wird, ist ggf. die Genehmigung des Eigentümers einzuholen. Für die Montage von Absorbern ist laut BIG (Bundes Immobilien Gesellschaft) keine gesonderte Genehmigung des Eigentümers notwendig, da dies keinen Eingriff in die Bausubstanz darstellt. Wird allerdings eine Deckenabsenkung vorgenommen (Siehe Kapitel 3.3.2), so ist dies ein Eingriff in die Bausubstanz und bedarf daher der Genehmigung durch den Eigentümer. Die OENORM B 3806¹¹³ regelt die Anforderungen an das Brandverhalten von Bauprodukten bzw. Baustoffen. In dieser Norm wird eine Einteilung in sechs Gebäudeklassen (GK) getroffen. Tabelle 43 zeigt die für Schulgebäude möglichen Gebäudeklassen.

Tabelle 43: Mögliche Gebäudeklassen für Schulgebäude [OENORM B 3806, S.5]

GK	Eigenschaften
GK 1	Umfasst freistehende, an mindestens 3 Seiten auf eigenem Grund bzw. einer Verkehrsfläche für die Brandbekämpfung von außen zugängliche Gebäude mit nicht mehr als 3 oberirdischen Geschoßen und mit einem Aufenthaltsraumniveau von nicht mehr als 7m sowie einer Wohnung oder 1 Betriebseinheit von jeweils nicht mehr als 400m ² Grundfläche
GK 2	Umfasst Gebäude mit nicht mehr als 3 oberirdischen Geschoßen und mit 1 Aufenthaltsraumniveau von nicht mehr als 7m und höchstens 3 Wohnungen bzw. Betriebseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400m ² Grundfläche; desgleichen Reihenhäuser mit nicht mehr als 3 oberirdischen Geschoßen und mit einem Aufenthaltsraumniveau von nicht mehr als 7m und Wohnungen bzw. Betriebseinheiten von jeweils nicht mehr als 400 m ² Grundfläche
GK 3	Umfasst Gebäude mit nicht mehr als 3 oberirdischen Geschoßen und mit 1 Aufenthaltsraumniveau von nicht mehr als 7m, die nicht in die Gebäudeklasse 1 oder 2 fallen.
GK 4	Umfasst Gebäude mit nicht mehr als 4 oberirdischen Geschoßen und mit einem Aufenthaltsraumniveau von nicht mehr als 11 m und nur 1 Betriebseinheit ohne Begrenzung der Grundfl. od. mehreren Wohnungen /Betriebseinheiten von jew. nicht mehr als 400 m ² Grundfläche
GK 5	umfasst Gebäude mit einem Aufenthaltsraumniveau von nicht mehr als 22 m, die nicht in die Gebäudeklassen 1, 2, 3 oder 4 fallen, sowie Gebäude, die vorwiegend aus unterirdischen Geschoßen bestehen

¹¹³ [OENORM B 3806]

Das sogenannte Aufenthaltsraumniveau ist wie folgt definiert: „Höhendifferenz zwischen der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen oberirdischen Geschoßes und dem tiefsten Punkt auf der Schnittlinie der Gebäudehülle mit der vorhandenen Geländeoberfläche nach Fertigstellung.“¹¹⁴

Zusätzlich zu dieser Einteilung gibt es, wie in Tabelle 44 angeführt, auch Klassen des Brandverhaltens von Bauprodukten.

Tabelle 44: Klassen des Brandverhaltens von Bauprodukten [OENORM B 3806]

Kategorie	Klasse
Brandverhalten	A1, A2 – nicht brennbar B, C – schwer brennbar D, E – normal brennbar F – leicht brennbar
Rauchentwicklung	s1 – schwach qualmend s2 – leicht qualmend s3 – stark qualmend
Abtropfen bzw. Abfallen	d0 – kein brennendes Abtropfen d1 – kein fortdauerndes Abtropfen d2 – kein Abtropfen

Die raumseitige Wandbekleidung muss, je nach Gebäudeklasse, gewissen Anforderungen entsprechen. Abbildung 197 zeigt die erforderlichen Klassen des Brandverhaltens in Abhängigkeit von der Gebäudeklasse.

6.3 Raumseitige Wandbekleidungen und -beläge							
Die Anforderungen gelten auch für Dachschrägen.							
Bauteil	Gebäudeklassen						
	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5	Hochhäuser	
6.3.1 Raumseitige Wandbekleidungen, ausgenommen im Verlauf von Fluchtwegen							
6.3.1.1 Klassifiziertes System	D	D	D	D	D	B	
oder							
6.3.1.2 Aufbau mit folgenden klassifizierten Komponenten							
- Bekleidung	D	oder B	D	oder B	D	oder B	C ¹⁾
- Dämmschicht	C	oder E	E	oder C	E	oder B	oder D
							A2
							A2 ²⁾
6.3.2 Raumseitige Wandbekleidungen im Verlauf von Fluchtwegen³⁾							
6.3.2.1 Klassifiziertes System ⁴⁾	nicht zutreffend	D	C	B	A2	A2	
oder							
6.3.2.2 Aufbau mit folgenden klassifizierten Komponenten							
- Bekleidung ⁴⁾	nicht zutreffend	D	C ⁵⁾	A2	B	A2	B
- Unterkonstruktion	nicht zutreffend	D	A2 ⁵⁾	oder A2 ⁵⁾	A2 ⁵⁾	oder A2 ⁵⁾	A2 ⁵⁾
- Dämmschicht	nicht zutreffend	C	B	D	A2 ²⁾	C	A2 ²⁾
							A2
							A2 ²⁾
6.3.3 Raumseitige Wandbeläge im Verlauf von Fluchtwegen⁶⁾							
- Gänge	nicht zutreffend	D	C-s1,d0 ⁵⁾	C-s1,d0	B-s1,d0	A2-d0	
- Treppenhäuser	nicht zutreffend	D	C-s1,d0 ⁵⁾	A2-s1,d0	A2-s1,d0	A2-s1,d0	

¹⁾ Bei Verwendung von Dämmschichten der Klasse A2 sind auch Holz und Holzwerkstoffe der Klasse D gemäß EN 13986 zulässig.
²⁾ Bei Mantelbeton sind auch Dämmschichten der Klasse B zulässig.
³⁾ Fehlen in Gängen und Treppen im Verlauf von Fluchtwegen Wandbeläge, gelten für die Bekleidung zutreffendenfalls die höheren Anforderungen für Wandbeläge gemäß 6.3.3.
⁴⁾ Die Oberflächen der Wandbekleidungen müssen geschlossen sein.
⁵⁾ Es sind auch Holz und Holzwerkstoffe der Klasse D gemäß EN 13986 zulässig.
⁶⁾ Die Anforderungen gelten unter Berücksichtigung der Befestigung und einer allfälligen Endbehandlung.

Abbildung 197: Brandschutzvorschriften für die raumseitige Wandbekleidung [OENORM 3806]

¹¹⁴ Siehe [OENORM B 3806, S.4]

Der in Abbildung 197 verwendete Begriff „Bekleidung“ wird wie folgt definiert: „Schichten eines Bauteils, die die Erfüllung einer oder mehrerer der nachstehenden Anforderungen sicherstellen helfen: Brand-, Wärme-, Schall- und Wetterschutz bzw. Tragfähigkeit.“¹¹⁵

Die in Abbildung 197 genannten Euroklassen entstammen der ÖNORM EN 13501-1.¹¹⁶ Dies ist eine europaweite Richtlinie die als Bewertungsmaßstab für das Brandverhalten von Baustoffen und Baumaterialien dient und dieses folgendermaßen unterteilt:

Tabelle 45: Brandschutzklassen [EN 13501 Teil 1]

Bauaufsichtliche Anforderungen	Europäische Klasse nach EN 13501-1	Einheit Plattendicken		
		kein Rauch	kein brennendes Abfallen/Abtropfen	
Nicht brennbar	A1	x	x	
	A2 - s1, d0	x	x	
Schwer entflammbar	B - s1, d0 C - s1, d0	x	x	
	A2 - s2, d0 A2 - s3, d0 B - s2, d0 B - s3, d0 C - s2, d0 C - s3, d0		x	
	A2 - s1, d1 A2 - s1, d2 B - s1, d1 B - s1, d2 C - s1, d1 C - s1, d2	x		
	A2 - s3, d2 B - s3, d2 C - s3, d2			
	Normal entflammbar	D - s1, d0 D - s2, d0 D - s3, d0 E		x
		D - s1, d2 D - s2, d2 D - s3, d2		
E - d2				
Leicht entflammbar		F		

¹¹⁵ Siehe [ÖENORM B 3806, S.4]

¹¹⁶ [EN 13501-1]

Die ÖNORM EN 13501 löste die ÖNORM B 3800-1¹¹⁷ ab, dennoch beziehen sich Hersteller vereinzelt nach wie vor auf diese, sodass sie an dieser Stelle ergänzend angeführt wird:

Tabelle 46: Brandschutzklassen nach ÖNORM B 3800-1

Kategorie	Klasse
Brandverhalten	A – nicht brennbar B ₁ – schwer brennbar B ₂ – normal brennbar B ₃ – leicht brennbar
Rauchentwicklung	Q1 – schwach qualmend Q2 – normal qualmend Q3 – stark qualmend
Abtropfen bzw. Abfallen	Tr ₁ – nicht tropfend Tr ₂ – tropfend Tr ₃ – zündend tropfend

Vereinzelt beziehen sich Hersteller auch auf folgende Baustoffklassen nach DIN 4102, Teil1:

Tabelle 47: Brandschutzklassen [DIN 4102-1]

Bauaufsichtliche Anforderungen	Baustoffklasse nach DIN 4102
Nicht brennbare Baustoffe	A A 1 A 2
brennbare Baustoffe	B
schwer entflammable Baustoffe	B 1
normal entflammable Baustoffe	B 2
leicht entflammable Baustoffe	B 3

Auf Grund der unterschiedlichen Normen gibt es keine einheitliche Bezeichnung der Brandklassen. Zusammenfassend kann aber festgehalten werden, dass die Absorber nicht leicht entflammbar sein dürfen. Sie müssen also mindestens der Kategorie „normal bis schwer entflammbar“ angehören. Tabelle 48 zeigt zusammenfassend die jeweils zulässigen Brandschutzklassen für Absorber.

Tabelle 48: Mind. erforderliche Brandschutzklassen für Absorber in Schulgebäuden

Kategorie	Klasse
OENORM B 3806	Einzelelement: D Kombinationselement: D+C od. B+E
OENORM EN 13501- 1	B, C, D, E
OENORM B 3800-1	B1, B2
DIN 4102-1	B1, B2

¹¹⁷ [OENORM 3800-1]

5.2 Aspekte der Sach- sowie Personenversicherung

Um sicherstellen zu können, dass im Zuge der Sanierung weder Sach- noch Personenschaden entsteht der ggf. von den ausführenden Privatpersonen getragen werden muss, sollte bereits im Vorfeld der Sanierung durch einen Fachexperten überprüft werden, ob die Bausubstanz für die Anbringung der Absorber geeignet ist.

Neben der Prüfung der Bausubstanz sind auch bestimmte Sanierungsvarianten ausschließlich von einem Fachbetrieb durchzuführen, da eine Fehlmontage durch unsachgemäße Anbringung eine hohe Verletzungsgefahr darstellt. Die Anbringung von Schaumstoffplatten mittels Klebstoff kann beispielsweise auch durch Laien erfolgen, wobei auch hier darauf geachtet werden muss, dass im Zuge der Montage potentielle Gefahren wie z.B. der Sturz von ungesicherten Leitern vermieden werden.

5.3 Pädagogische Begleitmaßnahmen

Zusätzlich zur akustischen Sanierung wird empfohlen, pädagogische Begleitmaßnahmen zu setzen, um sowohl die SchülerInnen, als auch den Lehrkörper hinsichtlich Lärm zu sensibilisieren. Neben dem Arbeitsbuch „Lärm in der Schule“ von Erich Hotter und Josef Zollneritsch¹¹⁸ wird in diesem Kapitel auch das Projekt „OLGA“ der Steirischen Akademie für Licht und Akustik vorgestellt.

5.3.1 Die Zuhörschule

„Wenn wir über die Frage nachdenken, wie wir in Schulen Lärm vermeiden und Zuhörqualität steigern können, müssen wir über die Organisation v. Schulen nachdenken“¹¹⁹

Hotter und Zollneritsch erkannten in ihren Forschungen, dass die Organisation der Schule eine wesentliche Auswirkung auf das Klima unter den LehrerInnen sowie zwischen dem Lehrkörper und den SchülerInnen hat. Davon beeinflusst werden die Leistungsfähigkeit der LehrerInnen sowie die Lernfähigkeit der SchülerInnen.

Eine gelebte Schulhaus- bzw. Vereinbarungskultur, die Beziehungswärme, positive Leistungserwartung, gelebte Vereinbarungen, Regelungen, Klarheit, Transparenz sowie professionelles LehrerInnenverhalten spürbar werden lässt, ist die wesentliche Basis der sogenannten Zuhörschule. Hierzu wird im Schulprogramm festgehalten, was zu den Grundanliegen der jeweiligen Schule gehört, da dieses Ausgangspunkt ist um die Schulhaus- und Vereinbarungskultur innerhalb geklärter Vereinbarungen leben zu können. Die Vereinbarungskultur spielt sich auf der Ebene der Schulleitung und des Lehrkörpers, auf der Lehrer-Schüler Ebene sowie zwischen Eltern/Erziehungsberechtigten und Schule ab.

¹¹⁸ Siehe [HOTTER,ZOLLNERITSCH, S.11]

¹¹⁹ [HOTTER,ZOLLNERITSCH]

Auf der Ebene der Leitung bzw. des Lehrkörpers sind klare Verantwortlichkeiten festzumachen. Es sollte ein Klima der Verantwortlichkeit herausgebildet werden und bestimmte Verantwortungsbereiche personell besetzt werden. (z.B. Leitung des Schulentwicklungsteams, Koordination eines schulischen Förderkonzeptes etc.). LehrerInnen, die sich in ihren spezifischen Interessen erkannt fühlen und diese beruflich umsetzen können, erfahren eine große Steigerung der Motivation und somit der Leistungsfähigkeit und Lehrqualität. Ein professionelles Betriebsklima und ein gelebter Teamgedanke mit Begegnungsmöglichkeiten, auch außerhalb des Schulhauses, fördern die Kommunikations- sowie Teamfähigkeit von LehrerInnen.

Auf der Lehrer-Schülerebene ist es von besonderer Bedeutung, dass SchülerInnen absolute Klarheit darüber haben, was erlaubt und was keinesfalls erlaubt ist. Es soll ein bestmögliches Zusammenleben und – arbeiten möglich sein. Das Aushandeln von Regeln ist ein wesentlicher Teil des Erziehungsauftrages und damit des pädagogischen Programms von Schulen. Je positiver und bestärkender Regelungen sind, desto eher werden sie eingehalten.

Auf der dritten Beziehungsebene zwischen Eltern und Schule bedarf es Grundvereinbarungen darüber, wer wofür zuständig ist und was die Erwartungshaltung der jeweiligen Partei ist. Eltern sollten aktiv in den schulischen Prozess einbezogen werden, sodass diese gemeinsam mit den LehrerInnen dieselbe Grundauffassung darüber entwickeln, welche Ziele die Schule insgesamt verfolgen soll. Je besser die Kommunikation in Richtung Elternschaft gelingt, desto leichter gestaltet sich das Unterrichten.

„Nicht das Klagen über den jeweils anderen sondern das Erzeugen von Verständnis durch regelmäßige Begegnungen können so etwas wie eine Erziehungspartnerschaft begründen“¹²⁰

Neben der Klärung von Zuständigkeiten und der Aufstellung von Regeln ist vor allem eine gelebte Kommunikation entscheidend. Mit Kommunikation ist das bewusste und aktive Zuhören-Können fest verbunden. Nur wenn wir den jeweils anderen wahrnehmen und verstehen, können wir uns verständigen. Wenn LehrerInnen grundlegende Kommunikations-Paradigmen beherrschen und über ein fundiertes Wissen diesbezüglich verfügen, können sie aktives Zuhören und Kommunizieren auch den SchülerInnen entsprechend vermitteln.

Nicht zuletzt spielen der Aufbau und die Pflege einer geordneten Gruppendynamik eine große Rolle. Das sogenannte Klassenmanagement fokussiert das, auf soziale Ordnung und Gruppenprozesse gerichtete Handeln von Lehrpersonen. Es wird zwischen erzieherischem und didaktischem Klassenmanagement unterschieden. Wesentlich sind in beiden Fällen aber die ersten Schritte zu Beginn eines Schuljahres, da zu diesem Zeitpunkt sowohl soziale Beziehungen als auch die grundsätzliche Klassendynamik herausgebildet werden.

¹²⁰ [HOTTER, ZOLLNERITSCH]

Das Aufrechterhalten einer tragfähigen Klassenkultur bedarf permanenter Investition von Energie und Zeit, doch diese ist wesentliche Basis für eine hohe Zuhörbereitschaft und vermindert somit Konflikte und daraus entstehende psychische Belastung.

Frau Gerad Z., Volksschulleiterin und Direktorin einer sogenannten „Zuhorschule“ engagierte sich für eine stress- und lärmfreie Schule und räumte mit dem Mythos auf, dass Kinder grundsätzlich laut sind. Sie führte eine Kultur der offenen Klassentüren ein, schaffte die Schulglocke ab und bezog die Gänge in das Unterrichtsgeschehen ein. Natürliche bedurfte es parallel zu diesen Maßnahmen der Bewusstseinsbildung von einem Klima der Ruhe, des Respekts und der Aufmerksamkeit, sowohl bei LehrerInnen, SchülerInnen als auch den Eltern. Zusätzlich wurden das Leitbild und die wichtigsten Regeln und Vereinbarungen im Eingangsbereich aufgehängt, sodass die Schulkultur absolut transparent war. Ebenso wurden Rückzugs- und Wohlfühlbereiche geschaffen und auf eine entsprechende Farbgebung in den Klassenräumen geachtet. Wesentliches Anliegen war es Frau Gerda Z. den Kindern einen ruhigen und respektvollen Umgang zu lehren. Des Weiteren wollte sie die Zuhörfähigkeit der Kinder steigern, da diese Voraussetzung für die Aufnahme- und Arbeitsbereitschaft ist.

Zur Förderung der Zuhörfähigkeit ergriff Frau Gerda Z. zwei Maßnahmen mit großer Wirkung. Neben einer Lärmampel, welche in Abschnitt 5.3.2 noch näher erläutert wird, richtete sie einen sogenannten Hörclub ein.

Der Hörclub wurde in die bestehende Bibliothek integriert und dient dazu, Kinder durch Spiele, das Anhören und das Gestalten von Hörspielen zu sensibilisieren. Neben einer Steigerung der Konzentrationsfähigkeit sowie der Sprachentwicklung wurde auch die Fähigkeit seine Umwelt besser wahrzunehmen deutlich verbessert. Grundlage für dieses Projekt ist das Hörclubpaket, welches von der Stiftung „Zuhören“ bezogen werden kann.

Zusammenfassend sind folgende Punkte wesentliche Vorteile einer Zuhorschule:

- Freundliches, respektvolles und vor allem ruhiges Arbeitsklima
- Steigerung der Leistungsfähigkeit sowie Förderung der Sprachentwicklung
- Steigerung der Berufszufriedenheit und Motivation der LehrerInnen
- Erleichterung der Verständigung mit den Eltern
- Bessere Handhabung von Unterrichtsstörungen
- Bessere Erfüllung des Erziehungsauftrages

5.3.2 OLGA – Ohne Lärm geht's auch

Im Zuge der zuvor geschilderten Zuhorschule wurde bereits der Einsatz einer Lärmampel erwähnt. Die steirische Akademie für Licht und Ton hat eine Lärmampel entwickelt, die sich im Vergleich zu anderen Modellen vor allem dadurch auszeichnet, dass der Lärmpegel auf drei Ebenen vermittelt wird. Wichtigstes Element ist die dargestellte Figur namens „OLGA“. Durch die Figur können Emotionen besser transportiert werden, als durch die alleinige Pegelangabe oder Farbdarstellung.

Die Lärmampel misst über ein integriertes Messgerät die Lautstärke und zeigt diese in folgenden Formen an:

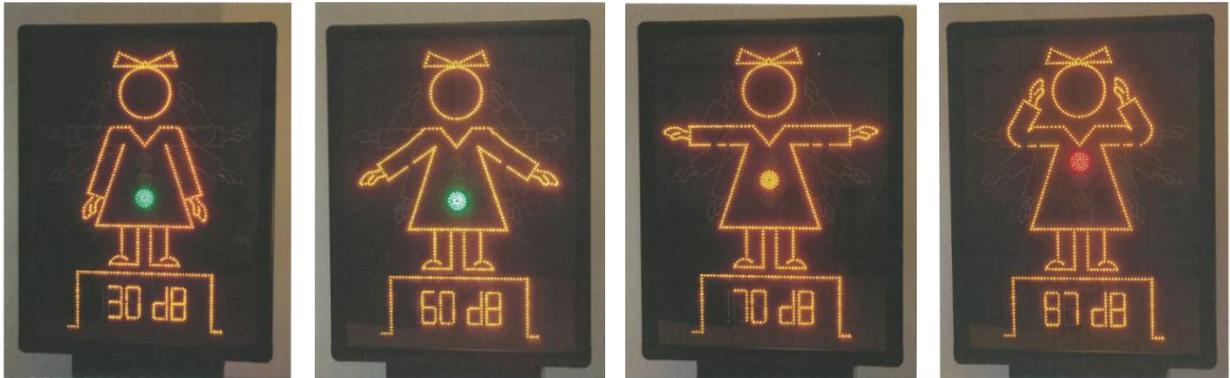


Abbildung 198: Lärmampel zur Darstellung von Lärmpegeln

Die drei Schaltschwellen können vom Anwender individuell eingestellt werden. Lärm wird dadurch sichtbar gemacht, wodurch es dem Lehrkörper leichter möglich ist, die SchülerInnen für diese Thematik zu sensibilisieren. Die SchülerInnen nehmen durch dieses optische Feedback Lärmüberschreitungen bewusst und vor allem unmittelbar wahr, wodurch der Anreiz gegeben ist, den Lärmpegel zu reduzieren. Wesentlich für den Erfolg dieses Systems sind allerdings begleitende pädagogische Maßnahmen, damit die SchülerInnen nicht entgegen dem eigentlichen Zweck den Lärmpegel anheben um die Ampel zu testen. Es ist wichtig die SchülerInnen über die Auswirkungen von Lärm aufzuklären und sie für die Thematik zu sensibilisieren. Zusätzliche Belohnungen wenn die Ampel z.B. nicht öfter wie 2 Mal pro Unterrichtsstunde rot aufleuchtet stellen ggf. einen zusätzlichen Anreiz dar. „OLGA“ wird von der Steirischen Akademie für Licht und Akustik verliehen.

Bei Bedarf können Lärmampeln auch online bezogen werden. Abbildung 199 zeigt ein alternatives Modell.



Abbildung 199: Lärmampel [ONLINE2]

Auch diese schafft durch die angebrachten Smileys den Transport von Emotionen, die Angabe des Pegels in Dezibel ist allerdings nicht möglich. Die Empfindlichkeit dieser Ampel ist in sieben Stufen einstellbar.

6 Anhang A: Ergänzungen zu Kapitel 3

In Anhang A werden ergänzend zum Kapitel 3 nähere Informationen zu den Bereichen Absorptionsgrad, Absorbertypen und Anbringung von Absorbern angeführt. Ebenso befinden sich in diesem Kapitel die Absorberdatenbank des Simulationstools sowie die Kontaktdaten der Hersteller.

A1 Absorptionsgrad

Zur Beschreibung der akustischen Absorptionsfähigkeit eines Materials gibt es den sogenannten Schallabsorptionsgrad α . Wenn eine Fläche den Absorptionsgrad $\alpha = 1$ aufweist, so hat diese die absorbierende Wirkung eines offenen Fensters. Das bedeutet, dass auf Grund der vollständigen Absorption kein Schall reflektiert wird. Wird der Schall vollständig reflektiert wie z.B. durch eine Betonwand, so ist der Absorptionsgrad $\alpha = 0$.

A2 Äquivalente Absorptionsfläche (A)

Die äquivalente Schallabsorptionsfläche A ist in der DIN 18041 wie folgt definiert:

„Gedachte Fläche mit vollständiger Schallabsorption ($\alpha = 1$), die den gleichen Teil der Schallenergie absorbieren würde, wie die gesamte Oberfläche eines Materials, eines Raumes oder wie Gegenstände und Personen.“¹²¹

Das bedeutet, dass beispielsweise ein Quadratmeter Fläche mit dem Absorptionsgrad $\alpha = 0,5$ einer äquivalenten Absorptionsfläche von einem halben Quadratmeter entspricht. Die zur Sanierung erforderliche Absorberfläche ergibt sich somit aus der äquivalenten Absorptionsfläche die zur Erreichung von T_{soll} nötig ist und dem Absorptionsgrad des verwendeten Materials. Die äquivalente Absorptionsfläche eines Raumes kann mit folgender Formel ermittelt werden:

$$A_{zus} = 0,163 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{T_{soll}} - \frac{1}{T_{ist}} \right) [m^2]$$

V ... Raumvolumen [m^3]

T_{soll} ... Nachhallzeit laut DIN18041 [s]

T_{ist} ... Nachhallzeit laut DIN18041 [s]

A_{zus} ... Äquivalente Schallabsorptionsfläche des Raumes [m^2]

¹²¹ Siehe [DIN 18041, S.8]

A3 Absorbertypen

Im Hinblick auf die spektrale Wirksamkeit unterscheidet man Höhenabsorber, Mittenabsorber sowie Tiefenabsorber. Nachfolgend werden die Funktionsprinzipien und der Absorptionsgrad dieser Absorbertypen angeführt.

Höhenabsorber

Höhenabsorber absorbieren vorwiegend im hochfrequenten Bereich ab ca. 500 Hz. Sie sind meist als poröse Absorber ausgeführt, die vorwiegend aus Faser- oder Schaumstoffen gefertigt sind. Die Luft strömt durch die offenen Poren in den Absorber. Diese Reibung erzeugt Wärmeenergie und reduziert somit die Schallenergie, sodass eine Dämpfung erfolgt. Wesentlich bei diesem Absorbertyp ist die Porosität, da diese die Ursache für die Dämpfung ist und nicht die Rauigkeit.

Abbildung 200 zeigt den Unterschied zwischen Rauigkeit und Porosität. Der linke sowie der mittlere Absorber weisen eine raue Oberfläche auf, der linke Absorber ist jedoch nicht porös, sodass dort keine Luft eindringen kann. Der rechte Absorber weist im Gegensatz zum mittleren Absorber eine glatte Oberfläche auf, es sind aber beide porös und somit beide absorbierend.

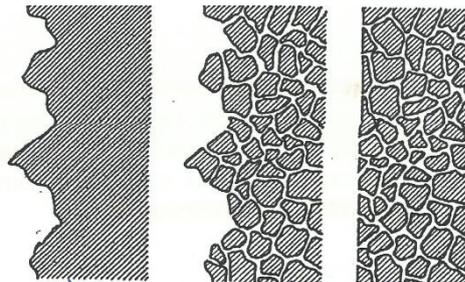


Abbildung 200: Links: Raue Oberfläche, Mitte und Rechts: Poröse Oberfläche [Cremer S.105]

Abbildung 201 zeigt den typischen Verlauf des Absorptionsgrades eines Höhenabsorbers mit unterschiedlicher Anbringung (a: direkt auf die Wand gesetzt, b: auf Lattenrost, 2,2 cm vor der Wand befestigt).

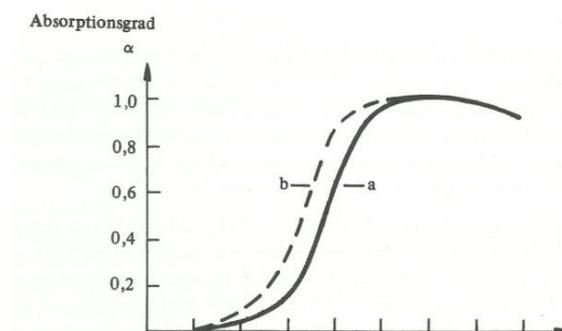


Abbildung 201: Absorptionsgrad einer handelsüblichen Akustikplatte [DICKREITER, S.20]

Mittenabsorber

Durch konstruktive Maßnahmen an Höhenabsorbern wie vergrößerter Wandabstand, größere Schichtdicke oder perforierte Abdeckung des Absorbers wird der wirksame Bereich des Absorbers auf den mittleren Frequenzbereich erweitert. Neben den porösen Absorbern kommen in diesem Bereich auch Lochabsorber, sogenannte Helmholtz-Resonatoren, zum Einsatz. Diese Resonatoren sind ein schwingungsfähiges, luftgefülltes Hohlraumsystem, dessen Funktionsprinzip auf einem akustischen Masse- Feder Prinzip beruht, dass bei der Resonanzfrequenz die stärkste Absorption aufweist.

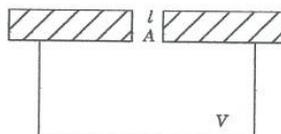


Abbildung 202: Funktionsprinzip des Helmholtz-Resonators [GRABER]

Die Resonanzfrequenz eines Helmholtz-Resonators ist sowohl vom Querschnitt des Halsloches (A), dessen Länge (l) sowie dem dahinterliegenden Volumen abhängig:

$$f_{\text{Res}} = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{A}{V \cdot (l + 2\Delta l)}}$$

Abbildung 203 zeigt den typischen Absorptionsverlauf eines Helmholtz-Resonators.¹²²

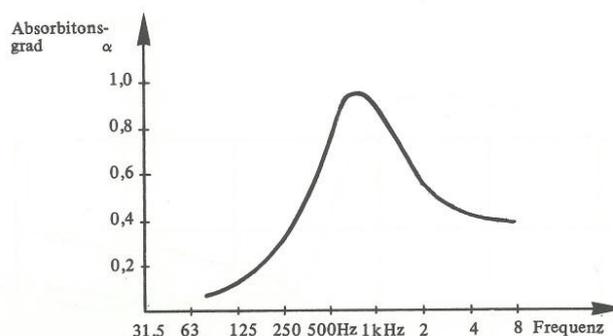


Abbildung 203: Typischer Absorptionsverlauf eines Helmholtz-Resonators [DICKREITER, S.22]

Tiefenabsorber

Tiefenabsorber sind meist als Plattenabsorber ausgebildet und können somit die großen Schallenergien im tieffrequenten Bereich absorbieren. Die Platten des Absorbers werden vor einer Wand montiert und der Zwischenraum mit schalldämpfenden Faserstoffen ausgefüllt. Durch die Schwingung der Platte entsteht eine innere Reibung, die so wie die Dämpfung der bewegten Luft im Fasermaterial, zu einer absorbierenden Wirkung führt. Bei entsprechender Dimensionierung können auch Helmholtz – Resonatoren als Tiefenabsorber eingesetzt werden. Der Vorteil des Plattenabsorbers ist die, im Vergleich zu porösen Absorbern relativ geringe Einbautiefe.

¹²² Vgl. [DICKREITER1, S.17-24]

Abbildung 204 zeigt exemplarisch den Aufbau eines Plattenabsorbers.



Abbildung 204: Schematische Darstellung eines Plattenabsorbers [GRABER]

Plattenabsorber sind vorwiegend dünne Platten, die durch den Schall angeregt werden und auf Grund der inneren Steifigkeit dem Schallfeld Energie entziehen. Das eingeschlossene Luftvolumen hinter der Platte wirkt wie ein Masse-Feder-System und sorgt somit zusätzlich für Dämpfung sofern der Abstand der Platte vom Bauwerk wesentlich kleiner ist als die Wellenlänge des zu absorbierenden Schalls:

$$d < \left(\frac{\lambda_0}{12} = \frac{28}{f_0} \right)$$

Abbildung 205 zeigt den typischen Absorptionsverlauf eines Tiefenabsorbers (a: Plattenabsorber, b: nicht hinterpolsterte Platte).

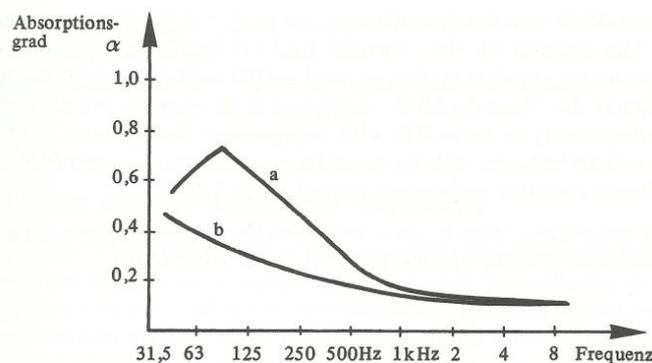


Abbildung 205: Typischer Absorptionsverlauf eines Tiefenabsorbers [DICKREITER, S.23]

Die Nachhallzeit von Klassenräumen aus dem 19. Jhdt. ist meist in allen Frequenzbereichen stark erhöht, besonders aber im tieffrequenten Bereich von 250 Hz bis 1000 Hz.¹²³ Am besten eignet sich für die akustische Sanierung daher eine Kombination aus Mittenabsorber und Tiefenabsorber.

¹²³ Siehe [MÜLLER]

A4 Anbringung von Absorbern

Zusätzlich zur akustisch sinnvollen Positionierung an den Wandflächen nach DIN18041 ist auch der Abstand zur Wand zu betrachten, da dieser einen Einfluss auf das Absorptionsverhalten hat. Auf Grund der Reflexion an der Wand entstehen Stehwellen. An einer schallharten Wand, die komplett reflektiert, ist die Schallschnelle, also die Geschwindigkeit mit der sich die Luftmoleküle um ihre Ruhelage bewegen, null und nimmt mit der Entfernung zur Wand zu.

Bei einer Entfernung von $\lambda/4$ ist die Schallschnelle maximal. Die Effektivität des Absorbers ist in wandnaher Aufstellung also geringer als im Bereich von $\lambda/4$. Um beispielsweise die Absorbierung bei 125 Hz zu optimieren, müsste der Absorber im Abstand von 68 cm montiert werden.

Wie Abbildung 206 zeigt, kann durch den Abstand des Absorbers immer nur ein bestimmter Frequenzbereich optimiert werden, da es für jede Konstellation Wellenlängen gibt, die im Absorberbereich nicht ein Schnellemaximum, sondern ein Schnelleminimum haben, wodurch die Dämpfung minimal ist.

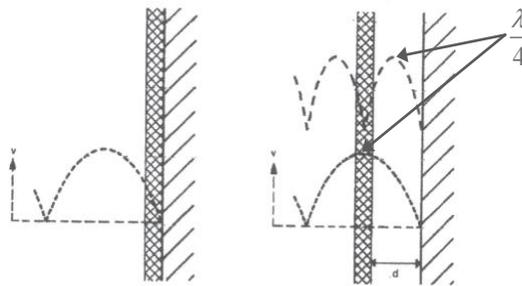


Abbildung 206: Vorschaltung eines Luftpolsters [Cremer, S.137]

A5 Absorberdatenbank und Hersteller bzw. Montagefirmen

Tabelle 49: Absorberdatenbank

Typ	Absorbername	Farbe	Dicke [mm]	L x B [mm]	Fase	Abstand [mm]	Absorptionswerte je Frequenz					Preis/m ² [€]	Hersteller	
							125	250	500	1000	2000			4000
WE	Plano	weiß	40	1250 x 625	Nein	0	0,33	0,42	0,88	0,98	0,98	0,98	28,00	Ziegler
WE	Plano	weiß	40	1250 x 625	Ja	0	0,33	0,42	0,88	0,98	0,98	0,98	30,80	Ziegler
WE	Plano	weiß	50	1250 x 625	Nein	0	0,30	0,58	0,90	0,90	0,90	0,90	34,00	Ziegler
WE	Plano	weiß	50	1250 x 625	Ja	0	0,30	0,58	0,90	0,90	0,90	0,90	38,00	Ziegler
WE	Basotect	grau	50	1000 x 500	Nein	0	0,22	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	27,80	Schaumstofflager.de
WE	Holzämmplatte Holzflex040	x	80	1220 x 580	x	0	0,18	0,43	0,86	0,96	0,88	0,88	9,00	Homatherm
WE	Holzämmplatte Holzflex040	x	40	1220 x 580	x	0	0,10	0,21	0,42	0,81	0,78	0,78	4,50	Homatherm
WE	Spanplatte	x	4	2800 x 2070	x	50	0,30	0,20	0,15	0,10	0,08	0,10	6,00	Peham
WE	Spanplatte (mit Steinwolle)	x	4	2800 x 2070	x	50	0,20	0,40	0,20	0,10	0,08	0,10	11,00	Peham
WE	Spanplatte	x	8	2800 x 2100	x	50	0,46	0,24	0,04	0,01	0,01	0,01	4,00	Peham
WE	Steinwollmatte (Feuerschutz)	x	50	1200 x 625	x	250	0,68	0,76	0,89	0,97	1,00	1,03	38,00	Knaufinsulation
DS	Deckensegel ohne Rahmen	weiß	50	2450 x 1200	Nein	300	0,35	0,79	1,00	1,00	1,00	1,00	74,49	Schaumstofflager.de
DS	Deckensegel mit Rahmen	weiß	40	3000 x 1250	Nein	300	0,30	0,77	1,10	1,40	1,40	1,20	80,00	Ziegler
DS	Deckensegel mit Rahmen	weiß	40	2500 x 1250	Nein	300	0,30	0,77	1,10	1,40	1,40	1,20	86,00	Ziegler
DS	Holzämmplatte Holzflex040	x	80	1200 x 625	x	0	0,18	0,43	0,86	0,96	0,88	0,88	9,00	Homatherm
DS	Steinwollmatte (Feuerschutz)	x	30	1200 x 625	x	270	0,72	0,78	0,89	0,93	0,97	1,03	7,00	Knaufinsulation

Legende: WE Wandelement; DS Deckensegel

Hersteller von Absorbern	Firmen für die Montage von Absorbern
<p><u>Fa. Ziegler Schallschutz GmbH</u> Freyweg 12; 5101 Bergheim bei Salzburg E - Mail: office@ziegler-schallschutz.at Telefon: +43 (662) 454580 Kontaktperson: Hr. Sadin Jahic; jahic@ziegler-schallschutz.at</p>	<p><u>Fa. Allclick Austria GmbH</u> Wiener Straße 100; 2511 Pfaffstätten E- Mail: office@allclick.at Tel.: 02252/49 001-0 Kontaktperson: Hr. Rene Jandl, Rene.Jandl@allclick.at</p>
<p><u>Schaumstofflager (Web)</u> Pestalozzistr.54; 86420 Diedorf E - Mail: ervice@schaumstofflager.de</p>	<p><u>Fa. Ruckenstuhl GmbH</u> Reichsstraße 50; 8430 Leibnitz E-Mail: office@ruckenstuhl-gmbh.at Tel. 03452/74 050; Handy 0664/101 17 44</p>
<p><u>Fa. Homatherm GmbH</u> Ahornweg 1; D-06536 Berga E-Mail: info@homatherm.com Telefon: +49 / 34651 416 – 0</p>	<p><u>Fa. Wolf Hubert Ges.m.b.H.</u> Sulmstraße 5; 8551 Wies E-Mail: maler.wolf@utanet.at Tel. 03465/24 05</p>
<p><u>Fa. KnaufInsulation</u> Industriestraße 18; A-9586 Fürnitz E-Mail: office@knaufinsulation.at Telefon: +43 4257 3370-0</p>	<p>Handy 0699/101 11 664</p>
<p><u>Fritz Peham GesmbH</u> Pebering Straß 11-13; 5301 Eugendorf E-Mail: office@pehamholz.at Tel +43 (0) 6225 2656</p>	

7 Anhang B: Ergänzungen zu Kapitel 4

In Anhang B werden ergänzend zum Kapitel 4 die Definitionen der akustischen Parameter sowie theoretische Hintergründe zur Messung dieser Parameter angeführt.

B1 Definition der akustischen Parameter

Nachhallzeit (T)

Einer der Indikatoren für die akustische Güte eines Raumes ist die Nachhallzeit. Die Nachhallzeit ist jene Dauer, die zwischen dem Abschalten der Quelle (Lautsprecher z.B.) und dem Zeitpunkt, an dem die räumliche Schallenergiedichte um 60 dB abgenommen hat, vergeht. Sie wird in Sekunden angegeben und mit T bezeichnet.¹²⁴

Der Sollwert für die Nachhallzeit eines Raumes wird laut DIN18041 nach folgender Formel berechnet:

$$T_{soll} = (0,32 \lg \frac{V}{m^3} - 0,17) s$$

Für einen typischen Klassenraum mit ca. 200 m³ beträgt T_{soll} also 0,57 s. Neben dem Sollwert sieht die DIN 18041 für Unterricht und Sprache auch ein Toleranzband vor, in dem sich die Nachhallzeit befinden soll. Wie in und Abbildung 91 dargestellt, beträgt dieser anzustrebende Bereich +/- 20% vom Sollwert in den Oktavbändern von 250Hz bis 2000Hz. Für einen typischen Klassenraum von 200 m³ sieht das Toleranzband wie folgt aus:

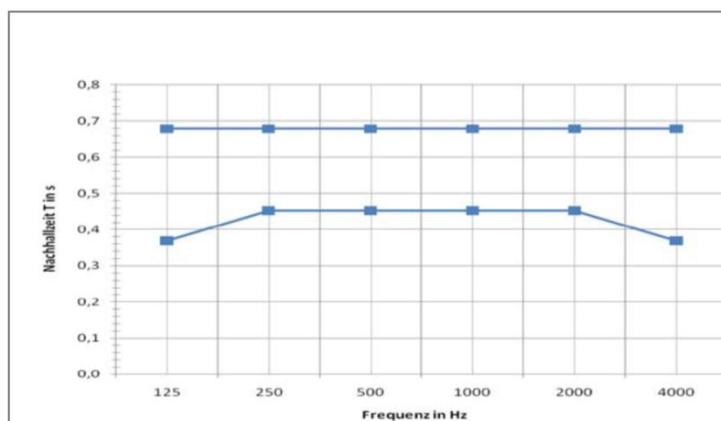


Abbildung 207: Exemplarisches Toleranzband der Nachhallzeit nach DIN 18041

¹²⁴ Siehe [OENORM EN ISO 9921]

Artikulationsverlust (Al_{cons})

Der Artikulationsverlust gesprochener Konsonanten, nach Peutz¹²⁵ und Klein¹²⁶, ist ein Kriterium für die Verständlichkeit von Sprache. Wie man der nachfolgenden Formel entnehmen kann, steigt der Artikulationsverlust mit steigender Nachhallzeit und steigender Entfernung zwischen Schallquelle und Hörer.

$$Al_{cons} \approx 0,652 \cdot \left(\frac{r_{LH}}{r_R} \right)^2 \cdot T \quad \text{bzw.} \quad Al_{cons} = 200 \cdot \frac{r_{LH}^2 \cdot T^2}{\gamma \cdot V}$$

T Nachhallzeit in s

r_{LH} Abstand Schallquelle –Hörer in m

$r_R \approx \sqrt{\gamma \cdot r_H}$ Richtentfernung in m

$r_H = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{V}{T}}$ Hallradius in m

γ Bündelungsgrad der Schallquelle

Folgende Wertebereiche gelten für die Verständlichkeit:

- $Al_{cons} < 2\%$ ideale Verständlichkeit
- $2\% < Al_{cons} < 7\%$ gute Verständlichkeit
- $7\% < Al_{cons} < 20\%$... befriedigende Verständlichkeit
- $20\% < Al_{cons}$ unbrauchbare Verständlichkeit

Sprachübertragungsindex (STI)

Sprachverständlichkeit wird nicht nur vom Nachhall und den Störgeräuschen, sondern auch von unterschiedlichsten Signalveränderungen am Weg vom Sender zum Empfänger beeinflusst. Diesem Phänomen wird beim sogenannten Speech Transmission Index (STI) Rechnung getragen. Der STI wird laut ÖNORM EN ISO 9921¹²⁷ in folgende Bereiche eingeteilt:

- 0 bis 0,3..... schlecht, bad
- 0,3 bis 0,45... schwach, poor
- 0,45 bis 0,6.... angemessen, fair
- 0,6 bis 0,75.... gut, good
- 0,75 bis 1..... ausgezeichnet, excellent

Der STI sinkt mit steigender Nachhallzeit.

¹²⁵ [PEUTZ]

¹²⁶ [KLEIN]

¹²⁷ [ÖNORM EN ISO 9921]

B2 Messung der akustischen Parameter

Um die akustischen Parameter eines Raumes ermitteln zu können, bedarf es der Messung der sogenannten Raumimpulsantwort.

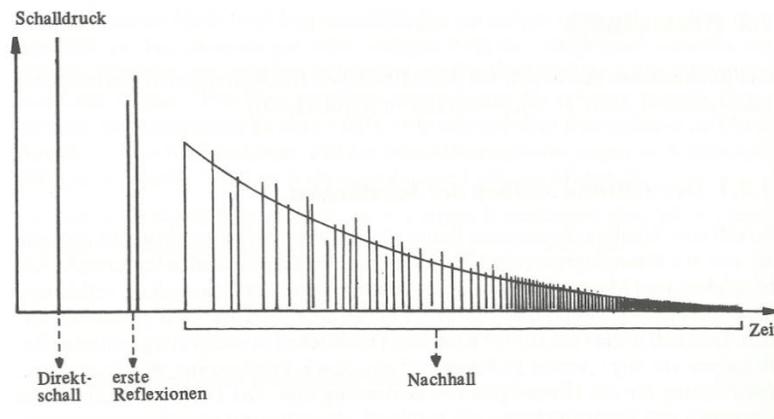


Abbildung 208: Raumimpulsantwort [DICKREITER]

Die Raumimpulsantwort, wie in Abbildung 208 dargestellt, ergibt sich auf Grund der Anregung des Raumes mit einem Signal. Zuerst trifft der Direktschall beim Hörer ein, anschließend die frühen Reflexionen und danach die späten Reflexionen. Dieser, für jeden Raum individuelle Verlauf des Schalldruckes nach Abschalten der Signalquelle, wird als Raumimpulsantwort bezeichnet und ist sozusagen der akustische Fingerabdruck jedes Raumes, der als Basis für weitere Berechnungen dient.

Für die Messung der Raumimpulsantwort ist die Auswahl des passenden Anregungssignals wesentlich. Wichtig ist, dass das Signal alle Frequenzen beinhaltet und eine hohe Energie hat, um den Raum ausreichend anzuregen. Man erreicht dies z.B. durch einfache Mittel, wie einem Pistolenschuss oder dem Zerplatzen eines Luftballons. Um die Messgenauigkeit zu erhöhen, wird allerdings empfohlen, die Anregung des Raumes durch Abspielen eines Signals über einen Lautsprecher zu realisieren.

Mögliche Signale für die Anregung des Raumes sind der sogenannten Exponential Sweep oder MLS. Der Exponential Sweep oder auch Gleitsinus genannt, ist ein fortlaufendes Sinussignal, das über die Zeit exponentiell frequenzmoduliert wird. Das bedeutet, dass in einer bestimmten Zeit alle Frequenzen durchlaufen werden weshalb man einen aufsteigenden Ton hört. MLS ist ein periodisches pseudo-statistisches Rauschen. Pseudostatistisch heißt, dass die Frequenzen des Signals nicht zufällig, sondern reproduzierbar sind. Da der Exponential Sweep praktische Vorteile gegenüber MLS aufweist, wird empfohlen, diese Signalart für die Messung zu verwenden. Für nähere Informationen zu diesen Signalarten wird auf die Diplomarbeit von Reithner verwiesen.

B3 Berechnungsformeln im Simulationstool

Formel für die ermittelte Sollnachhallzeit: $T_{soll} = (0,32 \log\left(\frac{V}{m^3}\right) - 0,17)s$

Die Simulation der Nachhallzeit des leeren Zustandes (T_{leer}), des besetzten Zustandes ($T_{besetzt}$) sowie des sanierten Zustandes erfolgt an Hand folgender Formeln:

$$T_{leer} = \frac{0,163 \cdot T_{besetzt} \cdot V}{-A_{Schüler} \cdot T_{besetzt} + 0,163 \cdot V}$$

$$T_{besetzt} = \frac{0,163 \cdot T_{leer} \cdot V}{A_{Schüler} \cdot T_{leer} + 0,163 \cdot V}$$

$$T_{sim} = \frac{0,163 \cdot T_{leer} \cdot V}{(A_{Schüler} + A_{zus}) \cdot T_{leer} + 0,163 \cdot V}$$

$A_{Schüler}$ bezeichnet die äquivalente Absorptionsfläche der SchülerInnen. Diese Werte wurden im Zuge der Diplomarbeit wie folgt ermittelt:

Tabelle 50: Äquivalente Absorptionsfläche eines Schülers

Äquivalente Schallabsorptionsfläche A [m ²] je Frequenzband					
125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
0,32	0,41	0,55	0,68	0,78	0,78

Die zur Erreichung der Sollnachhallzeit erforderliche äquivalente Absorptionsfläche wird an Hand folgender Formel berechnet:

$$A_{zus} = 0,163 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{T_{soll}} - \frac{1}{T_{ist}} \right) [m^2]$$

Die simulierten Werte von %Alcons nach der Sanierung werden an Hand folgender Formeln berechnet:

$$Al_{cons} \approx 200 \cdot \frac{r_{LH}^2 \cdot T_{sim}^2}{\gamma \cdot V}$$

$$\gamma \approx 200 \cdot \frac{r_{LH}^2 \cdot T_{leer}^2}{V \cdot Al_{cons_{leer}}}$$

Da der Bündelungsgrad unabhängig vom Besetzungszustand des Raumes ist, kann γ an Hand der Messwerte des leeren Zustandes berechnet werden. r_{LH} bezeichnet den Abstand von Schallquelle zu Hörer und wird in dieser Formel entsprechend der Klassenraumgröße mit einem Mittelwert von 3 Meter festgelegt.

STI wird für den sanierten Zustand an Hand folgender Formel berechnet:

$$STI = -0,1845 \cdot \ln(\% Al_{cons_{sim}}) + 0,9842$$

8 Anhang C: Sponsorenpräsentation

Umfragen der österreichischen Kooperation „ARGE Zuhören“, als auch der Universität in Bremen und eines Arbeitskreises des staatlichen Schulamtes in Darmstadt ergaben, dass der Lärm in den Klassenräumen signifikant häufig als zu laut empfunden wird und dass dies ein wesentlicher Belastungsfaktor im Lehrberuf ist. Neben dem Grundgeräuschpegel des Innen- und Außenbereiches, der Anzahl und dem Alter der SchüleInnen sowie den pädagogischen Fähigkeiten des Lehrkörpers ist vor allem die hohe Nachhallzeit ein wesentlicher Faktor für den belastenden Lärmpegel in den Klassenräumen.

Ein zu hoher Lärmpegel hat laut WHO zahlreiche psychische und sogar physische Auswirkungen:

- Lärmbedingte Hörschäden
- Interferenz mit der Sprachkommunikation
- Kardiovaskuläre und physiologische Effekte
- Psychische Gesundheitseffekte
- Leistungsbeeinträchtigungen

Sind LehrerInnen oder SchülerInnen dauerhaft einem zu hohen Lärmpegel ausgesetzt, so ist der Lärm ein Belastungsfaktor bzw. ein sogenannter Stressor, welcher unter anderem zu folgenden psychonervalen und vegetativen Reaktionen führen kann:

- Aufmerksamkeits-, Konzentrationsverlust
- Beeinträchtigung der Handlungsregulation
- Herzfrequenz/- sowie Blutdruckanstieg
- Schlafstörungen
- Erhöhung des Muskeltonus

Neben diesen psychischen und physischen Auswirkungen gibt es noch einen weiteren Bereich, der durch Lärm mittlerer Intensität, wie dies in Klassenräumen der Fall ist, beeinträchtigt wird. Die auditive Wahrnehmung ist mit dem Kurzzeitgedächtnis verbunden, was zu einer unmittelbaren Beeinflussung der kognitiven Leistung führt. Vor allem Vor- und Grundschüler sind davon betroffen und haben dadurch Probleme das Gesagte richtig zu verstehen, zu verarbeiten sowie zu behalten. Je größer die Anstrengungen für das akustische Verständnis sind, desto weniger Aufmerksamkeit können die SchülerInnen dem Inhalt entgegenbringen.

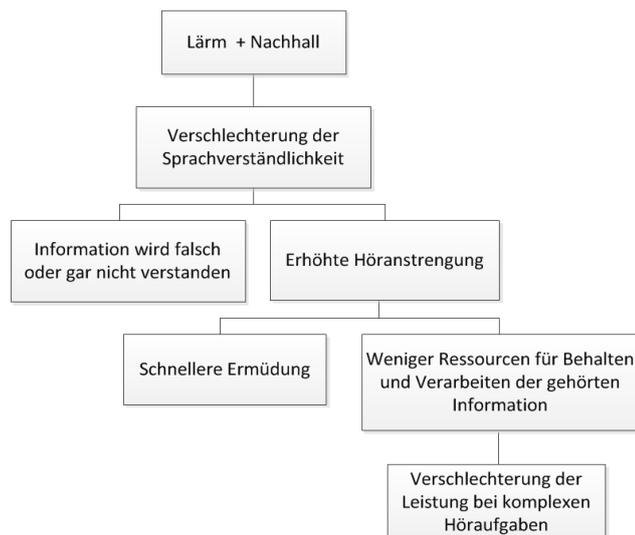


Abbildung 1: Wirkungen von Lärm und Nachhall auf das Hörverstehen

Die Messungen in unserem Schulgebäude ergaben, dass die Nachhallzeit in sämtlichen Räumen deutlich außerhalb der Sollwerte nach DIN18041 liegt. Abbildung 2 zeigt exemplarisch an Hand eines Raumes, dass die Sollnachhallzeit im gesamten Frequenzbereich außerhalb des Toleranzbereiches liegt und im tieffrequenten Bereich sogar um mehr als das Doppelte überschritten wird.

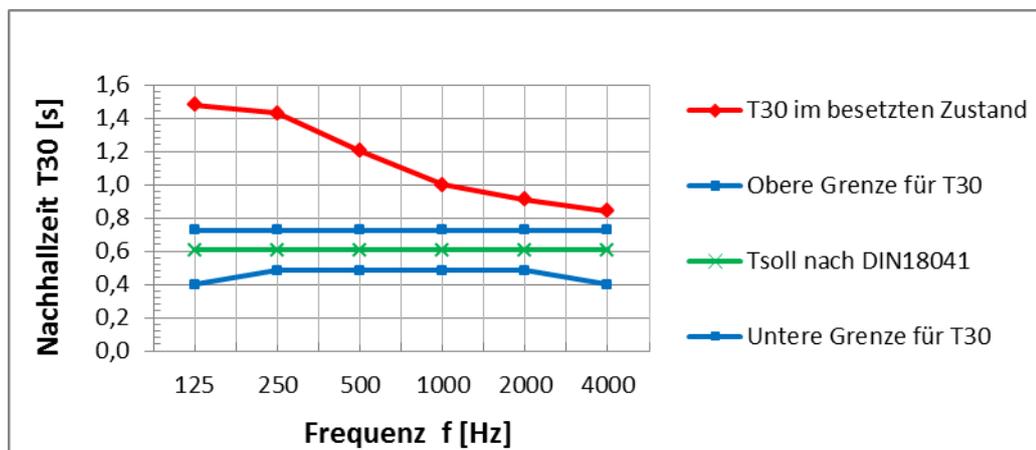


Abbildung 2: Messung der Nachhallzeit in Raum005

Nur durch eine akustische Sanierung können die psychischen und physischen Auswirkungen auf Grund von zu hohem Lärm vermindert und dadurch eine schulische Ausbildung auf dem von der Wirtschaft geforderten, hohem Niveau sicherstellen.

Durch einen an der TUG erstellten Leitfaden zur akustischen Sanierung von Klassenräumen ist es möglich, selbständig eine Grobsanierung durchzuführen und dadurch im Vergleich zur Komplettsanierung durch den Fachbetrieb bereits Kosten einzusparen. Dennoch werden pro Klassenraum ca. 2000.- für die Materialkosten und die Montage der Absorber benötigt.

Ihre finanzielle Unterstützung würde einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung des Arbeitsumfeldes von SchülerInnen und LehrerInnen beitragen.

9 Literaturverzeichnis

- [AIÖ1] Arbeitsinspektion Österreich. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit. Arbeitsstätten, Lärm Überblick. [Online] 2006.
- [ARTALABS] Artalabs, [Online].: <http://www.artalabs.hr/>
- [ARGE] Arbeitsgemeinschaft: Chibici B., Hotter E., Zollneritsch J.
[http://www.zuhoeren.at\(2009\)](http://www.zuhoeren.at(2009))
- [CREMER] CREMER: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik*, Band 1 und 2, Hirzel, 1978
- [CHIBICI] CHIBICI BERND: *Die Lärmspirale*. Vom Umgang mit einer immer lauterem Welt. Verlagshaus der Ärzte GmbH, Wien 2007.
- [DIN 18041] DIN 18041. 2004: *Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen*.: Deutsches Institut für Normung, 2004.
- [DICKREITER] DICKREITER M.: *Handbuch der Tonstudioteknik*. Bd.1 Raumakustik, Schallquellen, Schallwahrnehmung, Schallwandler, Beschallungstechnik, Aufnahmetechnik, Klanggestaltung.- 6., verb. Aufl.-1997.
- [EN 13501-1] EN 13501-1. 2007: *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten*.: Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2005.
- [FUCHS] FUCHS H.V.: *Schallabsorber und Schalldämpfer. Innovative akustische Konzepte und Bauteile mi praktischen Anwendungen in konkreten Beispielen*.3.,wesentlich erweiterte und aktualisierte Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [HOTTER, ZOLLNERITSCH] HOTTER E., ZOLLNERITSCH J.: *Lärm in der Schule*.: Leykam Buchverlagsgesellschaft m.b.H.Nfg. & Co KG, Graz 2008.
- [KLATTE] KLATTE M., JANOTT C.: *Zur Bedeutung der Sprachverständlichkeit in Klassenräumen. Eine Untersuchung mit Grundschulkindern*, in: Huber L., Kahlert J. und Klätte M.: *Die akustisch gestaltete Schule. Auf der Suche nach dem guten Ton*. Verlag Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen 2002.

- [KLEIN] KLEIN W.: *Articulation loss of consonants as a basic for the design and judgment of sound reinforcement systems*. J. Audio Eng. Soc. 19 (1971) 11, S. 920-922.
- [MATELJAN] MATELJAN IVO: *User Manual for Arta*. Version 1.7.0, Electroacustics Laboratory at the Faculty of Split, Croatia, December 2010
- [MUELLER] MUELLER MAURICE.: *Klassenraumakustik*.: Diplomarbeit von Dipl. Ing. Maurice Müller, Institut für Breitbandkommunikation der Technischen Universität Graz, September 2009
- [OBERDOERSTER] OBERDOERSTER M., TIESLER G.: *Akustische Ergonomie der Schule*.(Hrsg.):Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA):. Wirtschaftsverlag NW, Dortmund - Berlin - Dresden 2006.
- [OENORM EN ISO 9921] OENORM EN ISO 9921: *Ergonomie – Beurteilung der Sprachkommunikation*.: Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2003.
- [OENORM EN ISO 3382-2] OENORM EN ISO 3382-2. 2008: *Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik. Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen*.: Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2008
- [OENORM B 3806-1] OENORM B 3806-1. 2005: *Anforderungen an das Brandverhalten von Bauprodukten und Baustoffen*.: Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2005.
- [PEUTZ] PEUTZ V. M. A.: *Articulation loss of constants as a criterion for speech transmission in a room*, J. Audio Eng. Soc. 19 (1971) 11, S. 915-919.
- [SCHAUMSTOFFLAGER] www.schaumstofflager.de
- [SCHICK] SCHICK A., KLATTE M., SCHMITZ A.: *Lärminderung in Schulen, Umwelt und Geologie*. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie [Hrsg.], Wiesbaden 2007. Bd. Heft 4.
http://www.hlug.de/medien/laerm/dokumente/Laermschutz_Heft_4.pdf
- [SONATECH] <http://www.sonatech.de/>
- [TIESLER] TIESLER G.: *Die Last mit dem Lärm - Arbeitsalltag von Lehrern und Schülern*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2005
- [WHO] *Guidelines for community noise*. Gen 1999. [online]
<http://www.who.int/docstore/peh/noise/guidelines2.html>
<http://whqlibdoc.who.int/hq/1999/a68672.pdf>