Raumakustische Optimierung eines Verkostungsraumes

Bachelorarbeit

durchgeführt von

Pham Nghia Thanh

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation der Technischen Universität Graz

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

Betreuerin: Dipl.-Ing. Jamilla Balint

Graz, Dezember 2016

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 wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht
habe.

Graz, am	
	(Unterschrift)

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Bachelorseminararbeit befasst sich mit der raumakustischen Optimierung eines Verkostungsraums von einem Weingut in der Südsteiermark. Zur Erfassung der Akustik des Raumes wird zuerst eine Zusammenfassung über die relevanten akustischen Gütemaße angegeben. Des Weiteren wird eine Messung der Nachhallzeit vor Ort durchgeführt und anschließend mit Hilfe der Software Catt-Acoustic simuliert. Anhand der Simulationsergebnisse werden verschiedene Setup für raumakustische Optimierung erstellt und vorgeschlagen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Weselak W. und Graber G., Raumakustik Skript, v5.3, Tu Graz, 2010
- [2] Weinzierl S., Handbuch der Audiotechnik, Springer Verlag, 2008
- [3] ÖNORM B 8115-3, Schallschutz und Raumakustik im Hochbau, Teil 3 Raumakustik, ÖNORM, 2005
- [4] ÖNORM EN ISO 3382-1, Akustik-Messung von raumakustischen Parameter, ÖNORM, 2009
- [5] GörneT.,Tontechnik, Hanser, 2011
- [6] Fuchs H.V, Schallabsorber und Schalldämpfer, Berlin Springer, 2007
- [7] Weselak W., Technische Akustik Skript, v.10.0, TU Graz, 2014
- [8] ÖNORM EN ISO 3382-2, Messung von Parameter der Raumakustik, Teil 2 Messung der Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen, ÖNORM, 2009
- [9] Mörser M., Messtechnik der Akustik, Springer, 2009
- [10] Nocke C.,Raumakustik im Alltag Hören-Planen-Verstehen", Fraunhofer IRB Verlag,2014

INHALTSVERZEICHNIS

1	Ein	leitung und Motivation	1
2	The	eorie	3
2.	.1 R	aumakustische Gütemaße	3
	2.1.1	Nachhallzeit T60	3
	2.1.2	T20 und T30	4
	2.1.3	Anfangsnachhallzeit Early Decay Time (EDT)	4
	2.1.4	Deutlichkeitsgrad und Deutlichkeitsmaß	5
	2.1.5	Klarheitsmaß C80	6
	2.1.6	Speech Transmission Index STI	6
	2.1.7	Schallabsorptionsgrad α	7
	2.1.8	Äquivalente Absorptionsfläche A	7
	2.1.9	Seitenschallgrad, Seitenschallmaß LF	7
	2.1.10	Stärkemaß G (strength factor)	7
3	Me	ssung	9
3.	.1 R	aumbeschreibung	9
3.	.2 M	essung der Nachhallzeit	10
	3.2.1	Messpositionen	11
	3.2.2	Messumgebung	13
	3.2.3	Verwendetes Equipment:	13
	3.2.4	Messvorgang	13
	3.2.5	Messergebnisse	13
4	Sin	nulation des Raumes in Catt-Acoustic	17
4.		ufbau der Simulation im leeren Raum	
4.		ahl der Materialparameter	
4.		imulationsauswertung des leeren Raums	
	4.3.1	Nachhallzeit	
	4.3.2	Deutlichkeitsmaß C ₅₀	22
		Klarheitsmaß C ₈₀	
	4.3.4	Early Decay Time (EDT)	24
		Early Decay Time (EDT)	

4	.3.7	Stärkemaß G	26
5	Akus	tische Optimierungsmaßnahmen	29
5.1	Wah	ıl einer idealen Nachhallzeit	29
5.2	Wah	Il von geeigneten Absorberkonfigurationen	32
5		Setup 1: Deckensegel	
	5.2.1.1		
	5.2.1.2		
	5.2.1.3		
	5.2.1.4		
	5.2.1.5	Speech Tranmission Index STI	40
	5.2.1.6	Seitenschallgrad LF	41
	5.2.1.7	Stärkemaß G	42
5	.2.2	Setup 2: Kantenabsorber und Mineralwolle	42
	5.2.2.1	Betrachtung der Nachhallzeit	44
	5.2.2.2	EDT Early Deday Time	46
	5.2.2.3	C50 Deutlichkeitsmaß	47
	5.2.2.4	C80 Klarheitsmaß	48
	5.2.2.5	STI Speech Transmission Index	49
	5.2.2.6	LF Seitenschallgrad	50
	5.2.2.7	Stärkemaß G	51
5	.2.3 Se	etup 3: Mineralwollplatte	52
	5.2.3.1	Betrachtung der Nachhallzeit	53
	5.2.3.2	Early Decay Time EDT	55
	5.2.3.3	Deutlichkeitsmaß C50	56
	5.2.3.4	Klarheitsmaß C80	58
	5.2.3.5	Speech transmission index STI	59
	5.2.3.6	Seitenschallgrad Lf	60
	5.2.3.7	Stärkemaß G	61
6	Vergl	eichung der Ergebnisse	63
6.1	Nac	hhallzeit T ₂₀	63
6.2	Nac	hhhallzeit RT ₆₀	63
6.3	Earl	y Decay Time EDT	64
6.4	Deu	tlichkeitsmaß C50tlichkeitsmaß C50	65
6.5	Klar	heitsmaß C ₈₀	66
6.6		enschallgrad	

6.7	Stärkemaß G	68
7	Fazit	70

1 Einleitung und Motivation

Heutzutage spielt die Akustik in Arbeitsbereichen, Lehrinstituten, als auch im privaten Bereich eine sehr wichtige Rolle. Eine optimale Akustik hat eine positive Wirkung auf die Stimmung und Psyche einer Person. Ist der Geräuschpegel oder die Nachhallzeit zu hoch, sinkt sowohl die Konzentrationsfähigkeit als auch die Leistungsfähigkeit. Dies gab einem Weinbauer, Felberjörgl aus der Südsteiermark, einen Grund, seinen Verkostungsraum akustisch zu optimieren. Dieser Raum wird vorwiegend als Präsentationsraum verwendet. Oft werden beim Bau von Wohnräumen akustisch "harte" Materialien wie Beton, Glas, glatte Kunststoffe und Gipskarton verwendet. Dieser Raum ist auch keine Ausnahme. Der Boden besteht aus glatten Fliesen, die Wände sind glatt verputzt. Im unmöblierten Zustand ist es fast wie in einem Hallraum. Auch die Sprachverständlichkeit war durch den hohen Nachhall sehr schlecht und dröhnend. Durch ein einfaches, lautes Klatschen habe ich die Nachhallzeit auf circa 4 Sekunden geschätzt.



Abbildung 1: Verkostungsraum

Da es zahlreiche Wege gibt einen Raum akustisch zu optimieren, stellt es eine technische Herausforderung dar. Man kann zum Einen einfache Mineralwollplatten verwenden zum anderen aber auch kunstvolle Akustikbilder, die einem Raum einen gemütlichen Flair anbieten können. Einen Raum sowohl optisch, als auch ökonomisch zu gestalten, ist Ziel dieser Arbeit. Die Messung wird vor Ort im leeren Zustand durchgeführt. Danach werden die Optimierungsmaßnahmen mit der Software Catt-Acoustic simuliert. Nach der Absprache mit dem Weinbauer haben wir uns für folgende Absorber entschieden: Mineralwollplatten, Deckensegel, Kantenabsorber eventuell noch Teppich und Vorhänge.

2 Theorie

2.1 Raumakustische Gütemaße

Raumakustische Gütemaße sind technische, objektive Größen, welche zur Beurteilung eines Raumes dienen. Die Herleitung der Gütemaße erfolgt über Energiebetrachtungen. Das Verhältnis der Energie von Direktschall W_D , Anfangsreflexionen W_I (I: Initial) und Nachhall W_R (R: Reverberation) zur Gesamtenergie ist ein wesentliches Merkmal der akustischen Qualität. Man nennt deshalb diese Parameter Energiekriterien. Die meisten raumakustischen Gütemaße lassen sich durch Betrachten der Schallenergie herleiten [1].

$$W = \int_{t_2}^{t_1} p^2(\tau) d\tau$$
 (2.1)

p...... Schalldruck in Pascal

 t_1 , t_2 Die zu integrierenden Zeitintervalle

Durch das Einsetzen verschiedener Integrationsgrenzen zur Betrachtung der akustisch relevanten Energieteile und dem Vergleich mit der Gesamtenergie können die akustische Maße hergeleitet werden.

2.1.1 Nachhallzeit T60

Die Nachhallzeit T60 oder in Englisch RT60 (Reverberation Time) ist definiert als der Abfall der mittleren Schallenergie im Raum um einen bestimmten Pegel. Das Zeitintervall, in dem der Pegelabfall 60dB beträgt, wird Nachhallzeit RT60 genannt. Sie wird im Allgemeinen in Oktav- oder Terzbändern über den gesamten Hörbereich (20Hz bis 20kHz) angegeben. Es ist

Berechnung der Nachhallzeit nach Sabine[1]:

$$T_{60} = 0.161 \left[\frac{s}{m} \right] \cdot \frac{V}{A_{aes}} \tag{2.2}$$

Berechnung der Nachhallzeit nach Eyring [1]:

$$T_{60} = 0,161 \left[\frac{s}{m} \right] \cdot \frac{V}{S_{ges} \cdot ln(1 - \overline{\alpha_m})}$$
 (2.3)
$$V......Volumen \ des \ Raumes$$

$$A_{ges}...... \ die \ gesamte \ \ddot{a}quivalente \ Absorptionsfläche$$

 $S_{ges.....}$ die gesamte Absorptionsfläche

 $\overline{\alpha_m}$ gemittelte Absorptionsgrad

2.1.2 T20 und T30

Das Problem bei der Messung der RT₆₀ ist der für die Messung erforderliche Signal-Rauschabstand (SNR). Da ein 60dB Abfall festgestellt werden soll, muss die SNR mindestens diese 60 dB betragen.

Das heißt, bei einem Ruhepegel von 60dB(A) müsste der Anregungsimpuls eine Lautstärke von mindestens 120dB(A) haben, was mit einem Lautsprecher im Nahfeld noch möglich ist, wegen des 6dB Abfalls pro Entfernungsverdopplung jedoch als Diffusschall im Raum kaum verzerrungsfrei zu erreichen ist.

Abgesehen von dem Verfahren "Impulsantwortmessung mit Schreckschusspistole", das keinen Lautsprecher zur Raumanregung benötigt, sind 60dB SNR unter realen Bedingungen nicht zu erreichen.

Diese benötigen wesentlich weniger SNR, führen aber dennoch gut an die Realität angenäherte Ergebnisse.

T₂₀ und T₃₀ basieren darauf, dass der Pegelabfall einer Raumimpulsantwort in der Regel exponentiell verläuft, d.h. wenn man ein Teilstück des Abklingvorganges kennt, kann man diesen extrapolieren, bis -60dB erreicht werden.

2.1.3 Anfangsnachhallzeit Early Decay Time (EDT)

Anders als RT60 beschreibt EDT die wahrgenommene Halligkeit eines Raumes. Die frühen Reflexionen im Raum werden exakter wahrgenommen und bestimmen deshalb das subjektive Empfinden eines Raumklangs.

Gemessen wird der Pegelabfall zwischen 0 und-10 dB, der dann auf -60 dB extrapoliert wird.

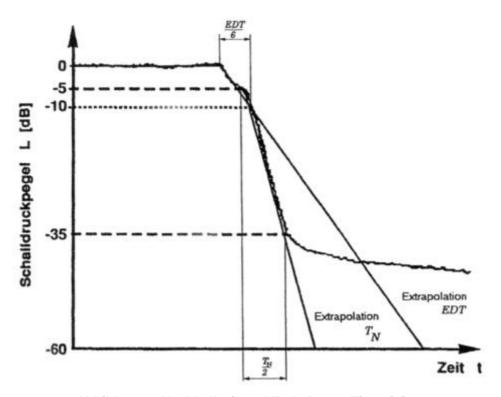


Abbildung 2: Nachhallzeit und Early Decay Time [1]

2.1.4 Deutlichkeitsgrad und Deutlichkeitsmaß

Wie die frühen Reflexionen, so bezieht sich auch der Deutlichkeitsgrad D50 auf den Energieanteil, der unmittelbar nach dem Direktschall beim Hörer ankommt. Die Definition beschreibt damit die Hörsamkeit von Räumen. Für die Sprache gilt ein Zeitbereich bis etwa 50 ms. In diesem Zeitintervall führen alle Reflexionen zu einer Verlust Erhöhung der Lautstärke. ohne ein **Echo** oder einen der Schallquellenlokalisation herbeizuführen. Diese Lautstärkezunahme führt in Räumen zu einer besseren Durchsichtigkeit und damit beispielsweise auch zu einer besseren Silbenverständlichkeit.

$$D_{50} = \frac{W_{0...50}}{W_{ges}} = \frac{\int_{50ms}^{50ms} p^2(t)dt}{\int_0^{+\infty} p^2(t)dt}$$
(2.4)

Für D50 > 50% wird eine gute Verständlichkeit angenommen.

Anstelle des Deutlichkeitsgrades kann auch das Deutlichkeitsmaß C50 angegeben werden:

$$C_{50} = 10.\log \frac{W_{0...50}}{W_{aes}} = 10.\log \frac{D_{50}}{1 - D_{50}}[dB]$$
(2.5)

Hier wird die Pegeldifferenz zwischen der Schallenergie vor und nach 50ms angegeben. Als Richtlinie für gute Sprachverständlichkeit gilt:

$$C_{50} > -3dB$$

2.1.5 Klarheitsmaß C80

Das Klarheitsmaß C80 beschreibt die Durchsichtigkeit und Transparenz von Musik. Der Unterschied zum Deutlichkeitsmaß ist in den Integrationsgrenzen zu sehen. Hier wird nun eine etwas längere Anfangsnachhallzeit angenommen. Die Energie in den ersten 80ms nach dem Direktschall trägt zur Durchsichtigkeit der Musik bei.

$$C_{80} = 10.\log \frac{W_{0...80}}{W_{80...\infty}}[dB]$$
 (2.6)

Für Werte von C80 > 0 dB wird eine hohe Durchsichtigkeit von Musik im Raum wahrgenommen und für Werte kleiner als Null (C80 < 0dB) hat der Zuhörer den Eindruck, dass er von der Musik umhüllt ist [1].

2.1.6 Speech Transmission Index STI

Der "Speech Transmission Index" ist ein objektives Gütemaß zur Bewertung der Sprachverständlichkeit. Anders als Deutlichkeitsmaß, welches aus dem Zeit-Energie-Verlauf abgeleitet wurde, erfasst der STI die Übertragung zwischen einer Schallquelle und einem Empfangspunkt und berücksichtigt die verschiedenen Faktoren wie Nachhall, Echos, Hintergrundpegel und weitere Schallquellen.

STI	Bewertung
0 - 0,3	Unverständlich
0,3 - 0,43	Schlecht
0,43 - 0,6	angemessen
0,6 - 0,75	gut
0,75 - 1	ausgezeichnet

Abbildung 3: Bewertung des STI

2.1.7 Schallabsorptionsgrad α

Unter Schallabsorption versteht man die physikalische Umwandlung von Schallenergie in Wärmeenergie beim Auftreffen der Schallwelle auf eine Begrenzungsfläche. Das Absorptionsvermögen eines Materials wird mit dem Absorptionsgrad beschrieben. Es ist eine frequenzabhängige Größe und spielt bei der akustischen Optimierung eine wesentliche Rolle. Ist die Absorption des Raumes zu niedrig, steigt die Nachhallzeit und somit leidet die Sprachverständlichkeit auch darunter. Der Absorptionsgrad von Flächen wird durch den Absorptionskoeffizienten α (0< α <1) beschrieben. α =0 entspricht Totalreflexion, α =1 bedeutet vollständige Absorption

2.1.8 Äquivalente Absorptionsfläche A

Die Äquivalente Absorptionsfläche A ist ebenso eine frequenzabhängige Größe und beschreibt die absorbierende Wirkung eines einzelnen Objekts bzw. eines Absorbers (Stühle, Personen usw.). Die Summe aller absorbierenden Flächen "S" multipliziert mit ihren jeweiligen Koeffizienten α wird als äquivalente Absorptionsfläche bezeichnet.

2.1.9 Seitenschallgrad, Seitenschallmaß LF

Ein wichtiges Gütemaß zur Beurteilung von der Durchsichtigkeit bei Musik ist der Seitenschallgrad (LF, lateral energy). Es wird aus dem Verhältnis der seitlich einfallenden Reflexionen von 5ms bis 80ms zur Gesamtenergie aus allen Richtungen von 0ms bis 80ms berechnet. Die seitlichen Reflexionen werden messtechnisch mittels eines Mikrofons mit Achterrichtcharakteristik erfasst. Ein LF Wert zwischen 12% und 22% gilt als gut.

Das Seitenschallmaß wird mit Logarithmieren des LF berechnet. Werte zwischen - 6dB und -4dB gelten als optimal.

$$LF = \frac{(W_{5...80})seitlich}{W_{0...80}}$$
 (2.7)

2.1.10 Stärkemaß G (strength factor)

In allen Studien zur subjektiven Bewertung raumakustischer Verhältnisse spielt die Lautheit bzw. die Stärke der akustischen Darbietung eine wesentliche Rolle, die auch hoch mit dem Gesamturteil über die akustische Güte korreliert. Das Stärkemaß G

setzt den an einem Hörerplatz gemessenen Schallpegel einer kugelförmig abstrahlenden Schallquelle in Bezug zu dem Schallpegel, den die gleiche Quelle im Freifeld in 10m Entfernung erzeugt [1].

$$G = 10 \times \log \frac{\int_0^\infty p^2(x, t) dt}{\int_0^{\infty 7ms} \gamma \cdot p^2(s, t) dt \cdot 4\pi s^2}.$$
 (2.8)

s...... Bezugsentfernung (10m)

x..... Entfernung des Messplatzes von der Schallquelle in m

γ..... die gesamte Absorptionsfläche

3 Messung

3.1 Raumbeschreibung

Der Verkostungsraum wurde neu saniert und befand sich während der Messung im leeren Zustand. Der Raum besitzt zwei große Doppelglasfenster mit einer Breite von 3m und einer Höhe von 2,35m, die dreifach isoliert sind. 2 Oberlichter mit einer Länge von 3,2m, einer Breite von 2,7m und einer Höhe von 0,52m. Direkt unter dem Oberlicht befindet sich eine Holztür, die 2m hoch und 0,9m breit ist. Direkt neben der Holztür befindet sich eine große, teilweise verglaste Durchgangstür mit einer Breite von 1,8m und einer Höhe von 2,86m. Die Wände und Decke sind glatt verputzt. Der Boden wurde mit glatten, dunklen Fliesen verfliest. Aus diesem Grund war der Raum sehr hallend und die Sprachverständlichkeit ziemlich schlecht.

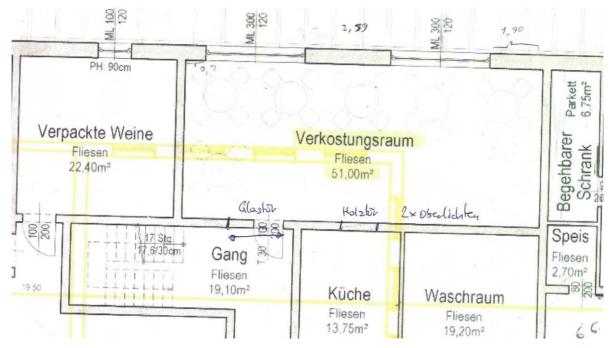


Abbildung 4: Grundriss des Verkostungsraums

Raumgröße: (LxBxH)	10,9m x 4,7m x 2,86m
Raumvolumen:	150m³
Akustisch nutzbare Wandfläche:	2 x 13m²
Grundfläche:	51m²

Abbildung 5: Daten des Verkostungsraums

3.2 Messung der Nachhallzeit

Als Messverfahren wurde die Impulsschallmessung gewählt. Das Erregersignal wurde mit einer Schreckschusspistole erzeugt, deren Impuls einen Schalldruckpegel von ca. 110dB erzeugt. Die Impulsschallquelle muss einen solchen Spitzen-Schalldruckpegel erzeugen können, damit der Beginn der Abklingkurve mindestens 45 dB über dem Störpegel im jeweiligen Frequenzband liegt. Der Vorteil des Impulses ist, dass keine anregungsbedingten Schwankungen vorhanden sind, da er eine genau definierte Amplituden- und Phasenlage besitzt. Die Nachhallzeit als Funktion der Frequenz ergibt sich durch Auswertungen in Oktav- bzw. Terzbändern. Ein weiterer Vorteil ist der geringe Messaufwand durch die einfache Impulserzeugung.

Als Messgerät und Mikrofonset wurde der NTi Audio XI2 verwendet. Das ist ein mobiler Schallpegelmesser mit FFT Analysator und Audio-Analysator. Es misst das RT60-Nachhallspektrum zwischen 63Hz und 8 kHz in Oktavbändern und triggert automatisch auf einen Impuls.

Dabei wurde mit der Methode T20 gemessen. Der XI2 Acoustic-Analyzer misst die Zeit, welche der Schallpegeldruck um 20dB gesunken ist und extrapoliert diesen Wert auf die Nachhallzeit.



Abbildung 6: Schreckschusspistole mit Platzpatronen



Abbildung 7: NTi-XI2 Schallpegelmesser

3.2.1 Messpositionen

Die Messpositionen wurden nach [8] gewählt. Der Mindestabstand zwischen den Mikrofon-Positionen sollte mindestens der halben Wellenlänge entsprechen, im interessierendem Frequenzbereich ca. 2m. Der Abstand zur nächsten reflektierenden Oberfläche sollte mindestens ein Viertel der Wellenlänge betragen, im üblichen Frequenzbereich ca. 1m [8]

$$d_{\min} = 2 \times \sqrt{\frac{V}{c * T}} \tag{3.1}$$

T steht hier für die geschätzte Nachhallzeit des Raumes. Beim Einsetzen von 3s für unseren Fall bekommt man einen Wert von ca 0,76m.

Es wurden 2 Quellpositionen Q1, Q2, 6 Mikrofonpositionen M1-M6 festgelegt. Für diese Messpunkte sollten für die Nutzung des Raumes typische Positionen verwendet werden, was zur Wahl der folgenden Messpositionen führte. Die erste Schallquellposition wurde circa in der Mitte des Raumes und die andere in der linken Raumecke gewählt.

Als Mikrofonhöhe wurde eine Höhe von 1,20 m gewählt, was der typischen Ohrhöhe von sitzenden Personen entspricht.

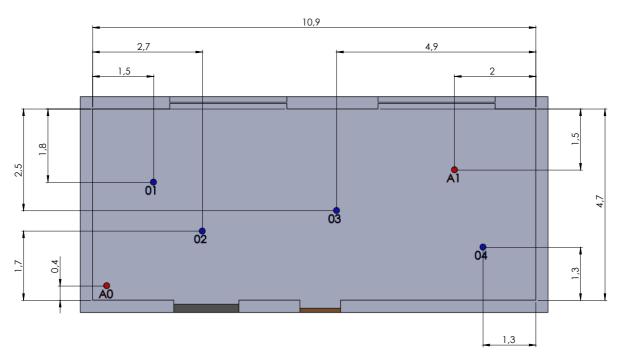


Abbildung 8: Wahl der Quellpositionen (A) und Mikrofonpositionen (Grundriss)

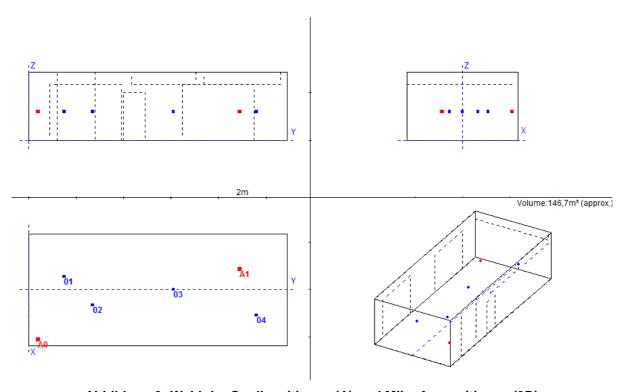


Abbildung 9: Wahl der Quellpositionen (A) und Mikrofonpositionen (3D)

3.2.2 Messumgebung

• Lokalität: Verkostungsraum Weingut Felberjörgl Kitzeck im Sausal

• **Datum**: 13.4.2015

• **Durchführende Personen**: Dipl.Ing Ballint Jamilla und Thanh Pham

3.2.3 Verwendetes Equipment:

Schreckschusspistole

• NTi Audio XL2 mit Messmikrofon, Stativ und XLR-Kabel

• Entfernungsmessgerät

Klebeband

• Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessgerät

• Kalibrator der Fa. Brül&Kjaer, Typ 4231

Gehörschutz

3.2.4 Messvorgang

Zuerst wurden die Messpositionen ausgemessen und anschließend markiert. Nach der Messung der Raumtemperatur und der Luftfeuchtigkeit wurde das Messmikrofon bei 1kHz kalibriert. Die anschließende Nachhallzeitmessung erfolgte an jedem der sechs Mikrofonpunkte für beide Quellpositionen, wobei die Quelle die Schreckschusspistole darstellte.

3.2.5 Messergebnisse

Die Messung erfolgte im leeren Raum bei einer Raumtemperatur von 23°C und 32% relativer Luftfeuchtigkeit. In einer Excel-Tabelle wurden anschließend die Messergebnisse aufgelistet und gemittelt. Zur Bestimmung der Mittelwerte wurden die für den Bereich der Sender- und Mikrofonpositionen gemessenen Ergebnisse für den gesamten Raum gemittelt und wird in der folgenden Abbildung dargestellt.

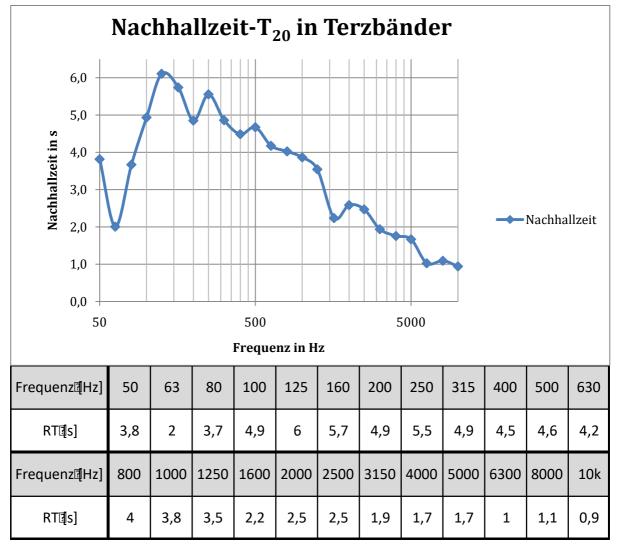


Abbildung 10: gemitteltes Messergebnis T₂₀ in Terzbänder

In der Raumakustik wird der Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 5000 Hz betrachtet. Dieser Bereich lässt sich in sechs Oktavabschnitte (125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz) oder in 18 Terzabschnitte (100 Hz, 125 Hz, 160 Hz, ..., 4000 Hz, 5000 Hz) untergliedern, je nachdem, wie genau das Abbild der betreffenden Größe sein soll.

Für weitere Berechnungen und Simulationen ist die Auswertung in Oktavbändern ausreichend, die in der folgenden Abbildung dargestellt wird.

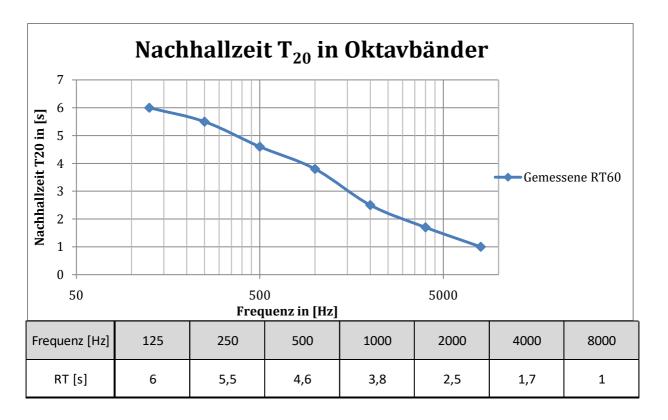


Abbildung 11: gemitteltes Messergebnis T₂₀ in Oktavbänder

Wie erwartet besitzt der Raum aufgrund der Raumbeschaffenheit in den tiefen Frequenzen eine sehr hohe Nachhallzeit.

Die allgemeine Nachhallzeit des Raumes wurde durch Bildung des Mittelwerts aus allen Bändern ermittelt werden und beträgt 3,58s.

4 Simulation des Raumes in Catt-Acoustic

4.1 Aufbau der Simulation im leeren Raum

Mit Hilfe des Programms "Catt-Acoustic" wurde ein 3D-Modell des Raums erstellt. Die aus Tabellen ermittelten Absorptionkoeffizienten aller akustisch relevanten Teilflächen wurden den entsprechenden Flächen des Modells zugeteilt und anschließend eine Simulation durchgeführt. Dazu wurden die Mikrofonpositionen (01, 02) verwendet und eine kugelförmige Schallquelle (A1) definiert, welche ein weißes Rauschsignal mit 94 dB erzeugt und der Schreckschusspistole entsprechen soll. Die zweite Quelle in der Ecke wurde nicht berücksichtigt, da in dem vorliegenden kleinen Raum die Position wenig Einfluss auf das Ergebnis hat. Für die reale Messung war jedoch die Wahl einer zweiten Quellposition in der Raumecke jedoch von Vorteil, da dadurch mehr Energie im tiefen Frequenzbereich gemessen werden konnte.

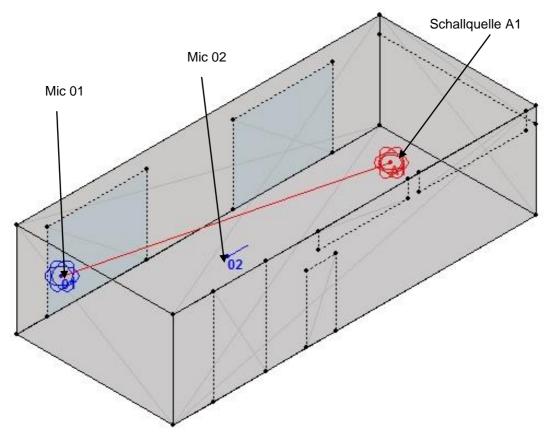


Abbildung 12: 3D-Modell des leeren Raumes in Catt-Acoustic

4.2 Wahl der Materialparameter

Die entsprechenden Absorptionswerte der verschiedenen Materialien wurden aus diversen Unterlagen entnommen und werden in der folgenden Abbildung dargestellt.

Wird der entsprechende Parameter mit der Fläche multipliziert, erhält man die äquivalente Absorptionsfläche des jeweiligen Frequenzbands.

		Ab	sorpti [%	_	rad		Fläche [m²]	äqui	valen	te Abs	sorpti 1²]	onsfl	äche
Frequenz [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k		125	250	500	1k	2k	4k
Wände (Glattputz)	1	1	2	2	2	4	46,5	0,5	0,5	0,9	0,9	0,9	1,9
Decke (Glattputz)	1	1	2	2	2	4	51	0,5	0,5	1	1	1	2
2x Fenster (Doppelglas)	10	4	3	2	2	2	14	1,4	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3
2x Oberlichter (Glas)	4	4	3	3	2	2	3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Türe (Holz)	10	8	6	5	5	5	2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Türe (Glas)	20	15	10	5	3	2	4,5	0,9	0,7	0,5	0,2	0,1	0,1
Boden (glatte Fliesen)	1	1	2	2	3	3	51	0,5	0,5	1	1	1,5	1,5

Abbildung 13: Auflistung der Materialparameter

4.3 Simulationsauswertung des leeren Raums

4.3.1 Nachhallzeit

CATT-Acoustic berechnet für alle definierten Positionen verschiedene raumakustische Gütemaße. Auch die Nachhallzeit kann als T15, T20, T30 und T60 (RT) ausgegeben werden. Die folgende Abbildung zeigt einen Vergleich dieser Parameter mit zwei verschiedenen Algorithmen. Die blaue Kurve basiert auf einem Algorithmus, welcher auf eine binauralen Impulsantwort zurückzuführen ist. Die rote Kurve hingegen auf Energie.

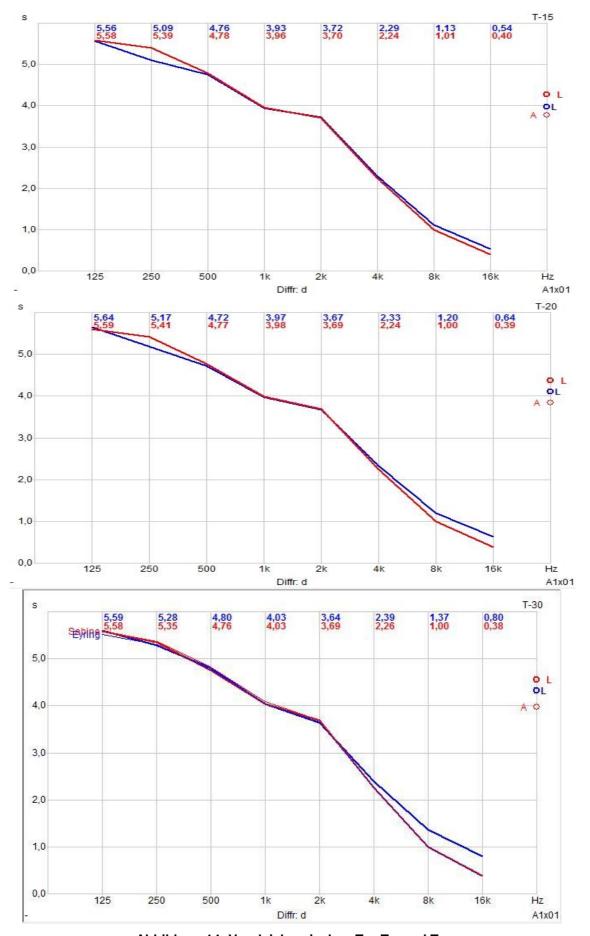


Abbildung 14: Vergleich zwischen T_{15} , T_{20} und T_{30}

Die reale Messung von T20 liegt sehr nahe an der Simulation. Allerdings liefert die genaue Berechnung der Nachhallzeit mit 60dB SNR (RT) bei den tiefen Frequenzen einen anderen Wert, da die Energie nur bei der roten Kurve (Quellpunkt) ausreichend ist, jedoch nicht mehr bei den Mikrofonpositionen.

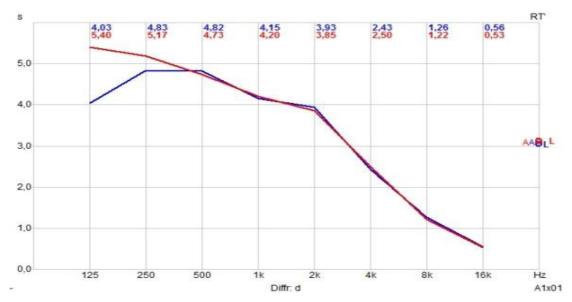


Abbildung 15: Auswertung von T₆₀ (RT) mit 94dB Anregungssignal

Wird der Schalldruckpegel der Quelle von 94dB auf 120dB erhöht, gibt auch RT einen genaueren Wert aus:

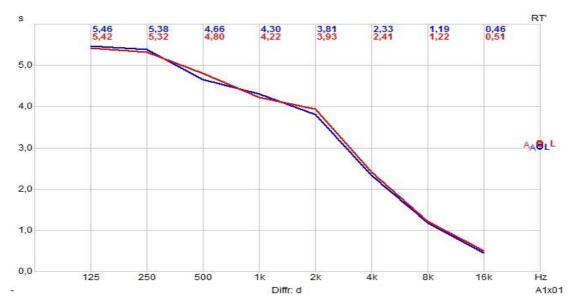


Abbildung 16: Auswertung von T₆₀ (RT) mit 120dB Anregungssignal

Dieses Ergebnis kommt der realen Messung sehr nahe (siehe Abbildung 14)
Für weitere Simulationen wird nur noch der Wert RT60 mit dem Anregungssignal
120db verwendet.

Der Vergleich der Nachhallzeiten an den zwei verschiedenen Mikrofonpositionen weist durch die kleine Größe des Raums nur minimale Unterschiede auf.

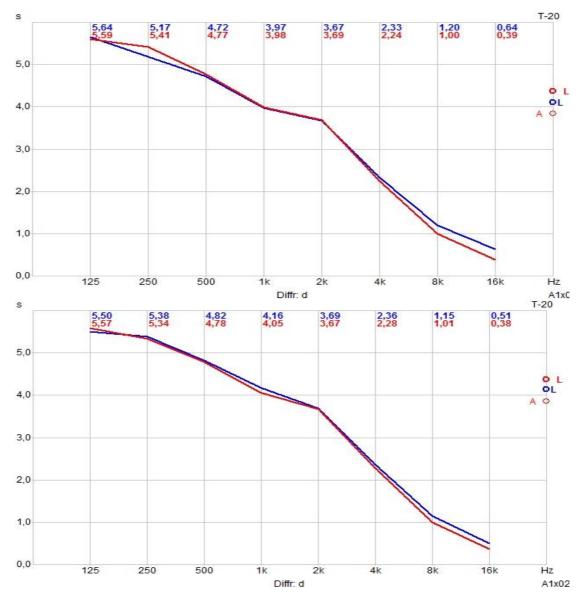


Abbildung 17: Vergleich von T_{20} an den zwei Messpunkten

4.3.2 Deutlichkeitsmaß C₅₀

Für eine gute Sprachverständlichkeit sollte das Deutlichkeitsmaß C_{50} für alle Frequenzbänder mindestens über -3dB liegen, optimal wäre ein Wert größer als 2dB. Im leeren Raum wird diese Anforderung vor allem bei tiefen Frequenzen nicht erfüllt.

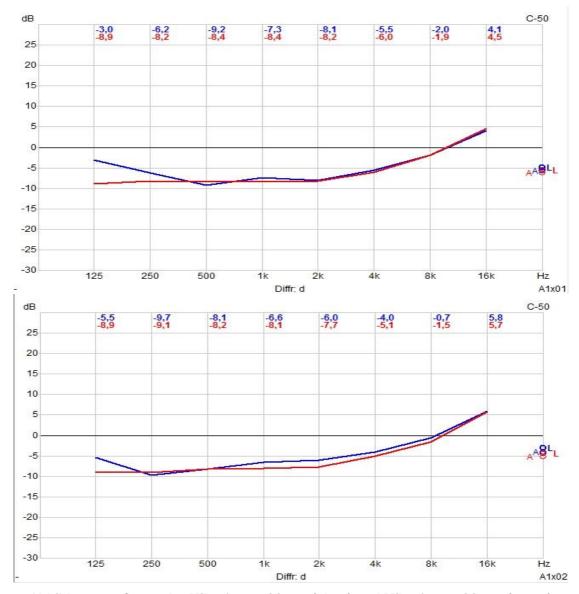


Abbildung 18: C₅₀ an der Mikrofonposition 1 (oben) und Mikrofonposition 2 (unten)

4.3.3 Klarheitsmaß C₈₀

Da der Raum auch für Musikdarbietungen verwendet werden soll, spielt auch das Klarheitsmaß C_{80} eine Rolle. Dieser Wert sollte ebenfalls über -3dB liegen, für hohe Durchsichtigkeit sogar höher als 0dB sein. Auch diese Anforderung wird nicht erfüllt.

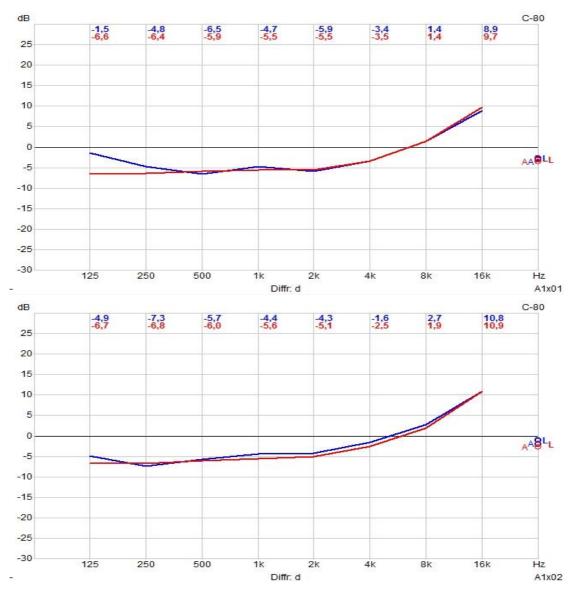


Abbildung 19: C₈₀ an der Mikrofonposition 1 (oben) und Mikrofonposition 2 (unten)

4.3.4 Early Decay Time (EDT)

Die EDT beschreibt die subjektive Nachhallzeitempfindung. Das folgende Diagramm bestätigt den Raumeindruck, der als sehr hallend wahrgenommen wurde. Der Verlauf des EDT ist dem Verlauf des RT60 ziemlich ähnlich.

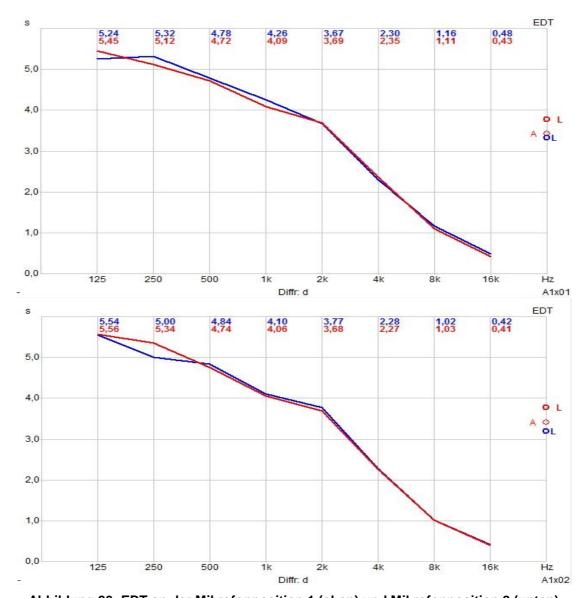


Abbildung 20: EDT an der Mikrofonposition 1 (oben) und Mikrofonposition 2 (unten)

4.3.5 Speech Transmission Index (STI)

Da es sich bei der Messung um einen leeren Raum ohne besondere Bedingungen handelt, wurde bei der Simulation in Catt-Acoustic mit der Standard Mask gearbeitet. Für weitere Simulationen werden nur noch die STI Overall Betrachtung Map measure in Catt-Acoustic betrachtet, welche nicht mehr von der Frequenz abhängig ist, sondern allgemein über den ganzen Raum bezüglich dem Sprachübertragungsindex Auskunft gibt.

Die Simulation bestätigt die schlechte Sprachübertragung des leeren Raumes. Der Durchschnittswert liegt bei 0,3, wobei erst Werte ab 0.6 einer guten Sprachverständlichkeit entsprechen.

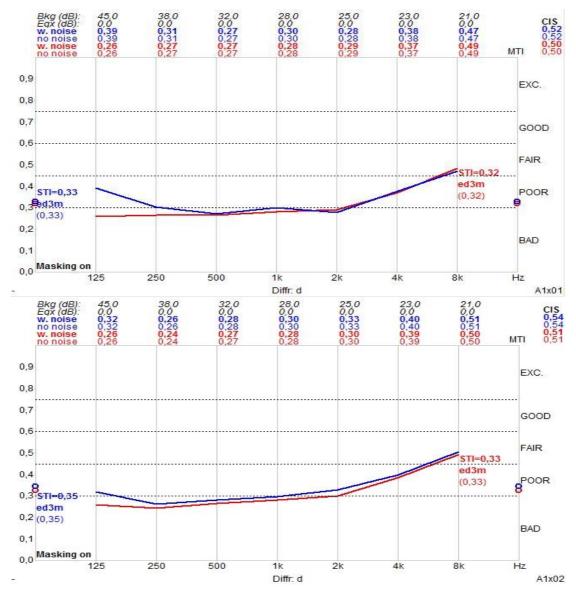


Abbildung 21: STI an der Mikrofonposition 1 (oben) und Mikrofonposition 2 (unten)

4.3.6 Seitenschallgrad LF

Der Seitenschallgrad ist für die musikalische Darbietung wichtig und beschreibt den Eindruck der Räumlichkeit. Er sollte zwischen 12 und 22% liegen. Durch die Positionierung des Mikrofon 1 in der Nähe einer Wand weichen die Werte von der Raummitte (Mikrofon 2) stark ab. Aber auch in der Raummitte ist der Wert für LF bei tiefen Frequenzen eher hoch (circa 22%-30%).

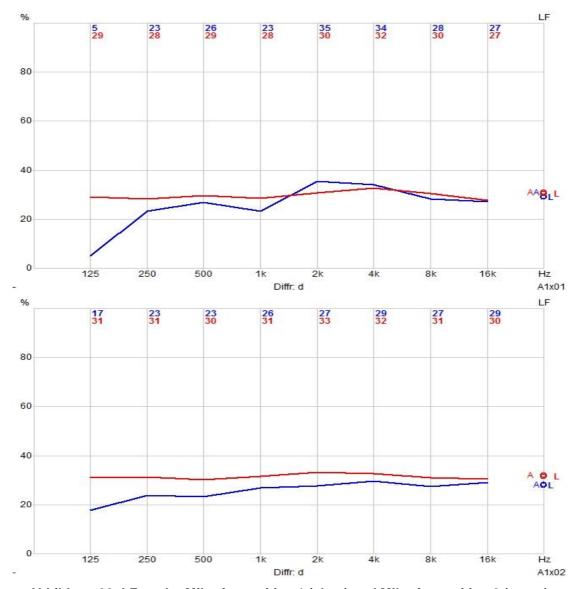


Abbildung 22: LF an der Mikrofonposition 1 (oben) und Mikrofonposition 2 (unten)

4.3.7 Stärkemaß G

Das Stärkemaß vergleicht den am Hörerplatz gemessene Schallpegel mit einer gleichwertigen Quelle im Freifeld mit einer Entfernung von 10m. Daraus lässt sich auf eine subjektive Beurteilung für die Lautheit schließen. Optimal liegt der Wert zwischen 0 und 10dB. Wobei ca. 6dB bedeutet, dass man die Lautheit doppelt so

laut wahrnimmt als im Freien. In unserem Fall liegt der Wert durch den starken Diffusanteil weit darüber.

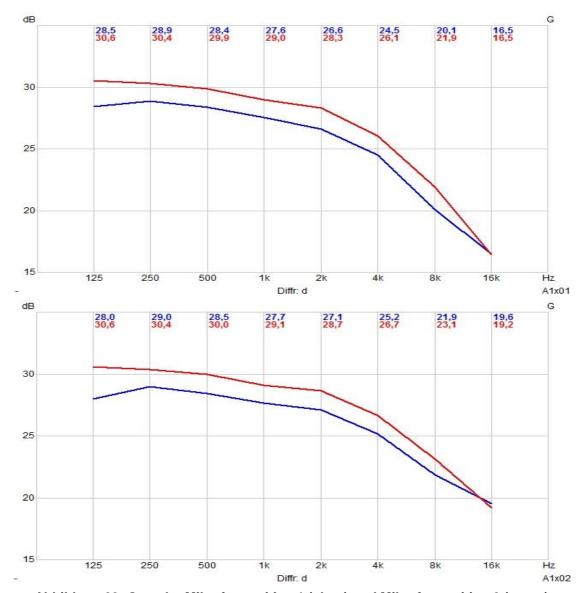


Abbildung 23: G an der Mikrofonposition 1 (oben) und Mikrofonposition 2 (unten)

5 Akustische Optimierungsmaßnahmen

5.1 Wahl einer idealen Nachhallzeit

In der Önorm B 8115-3 werden auf Seite 5 für verschiedene Verwendungszwecke Berechnungsformeln für ideale Nachhallzeiten angegeben:

Bei einer Raumnutzung für Sprache:

Bei einer Raumnutzung für Musikaufführungen:

$$T_{opt} = 0.45 \times lgV + 0.07 \tag{5.2}$$

Bei Räumen mit Mehrzwecknutzung wird ein Kompromiss zwischen den jeweiligen Anforderungen für Musik und Sprachdarbietung gewählt. Eine Anpassung an die für die jeweilige Nutzung optimale Nachhallzeit kann mit variablen oder mobilen Elementen mit entsprechendem Absorptionsvermögen erreicht werden [3]. Mit der Berechnung nach (5.1) und (5.2) erhält man eine optimale Nachhallzeit für die Sprache von 0,7s und für die Musik einen Wert von 1,05s. Da der Raum für eine Mehrzwecknutzung zwischen Präsentation und Musik ausgelegt ist, wurde der Wert Topt auf 0,9 s gewählt.

Dieser berechnete Wert soll in einem gewissen Toleranzfeld liegen. Die entsprechenden Diagramme folgen in den nächsten Abbildungen und wurden aus der Norm [3] entnommen und für unseren Anwendungsfall angepasst.

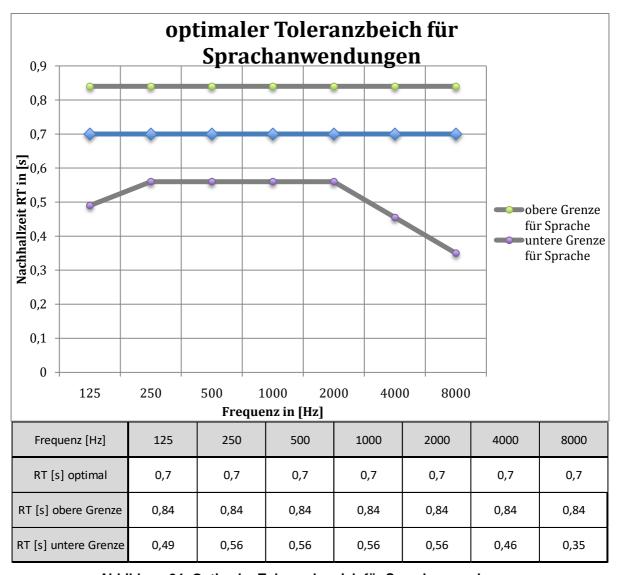


Abbildung 24: Optimaler Toleranzbereich für Sprachanwendungen

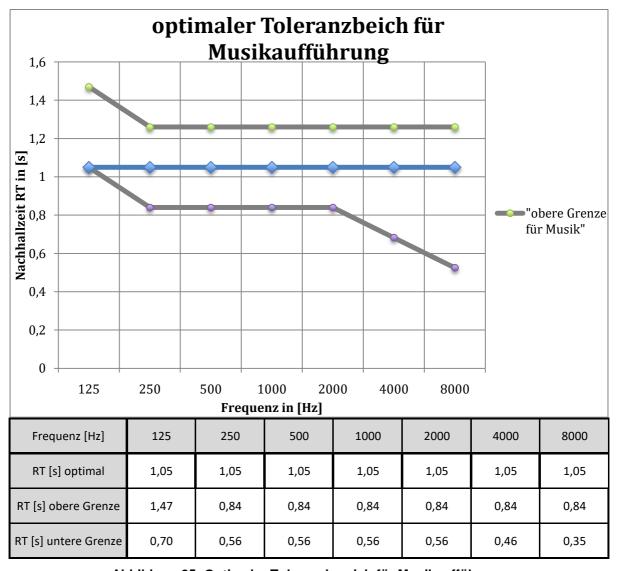


Abbildung 25: Optimaler Toleranzbereich für Musikaufführung

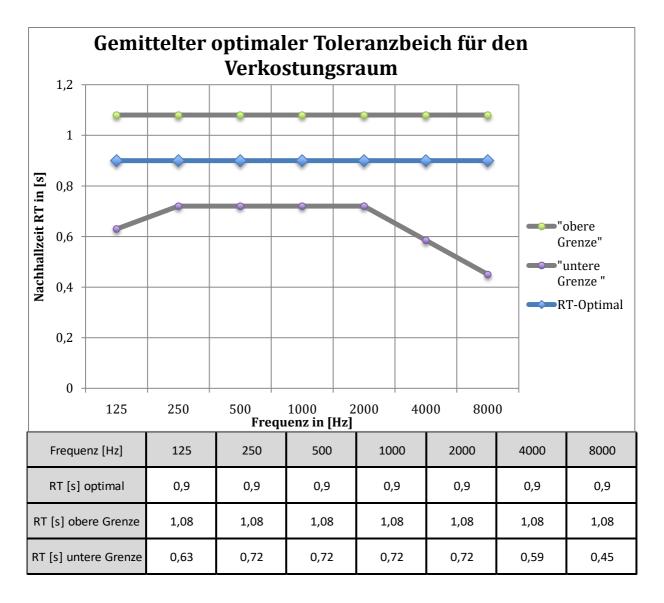


Abbildung 26: Gemittelter Optimaler Toleranzbereich für den Verkostungsraum

Der Toleranzbereich für die Sprachanwendung und Musikaufführung wurde nach [3] berechnet und in einem Excel-Diagramm dargestellt. Die optimale Nachhallzeit für den Verkostungsraum wurde durch die Mittelwertbildung der beiden gebildet.

5.2 Wahl von geeigneten Absorberkonfigurationen

Für die raumakustische Optimierung wurden vier Modelle erstellt, die in den folgenden Kapiteln behandelt werden.

5.2.1 Setup 1: Deckensegel

Um die Sprachverständlichkeit des Raumes zu verbessern, sollte man die Nachhallzeit des Raumes auf 0,8 bis 1 Sekunde reduzieren. Mit Hilfe einer

abgehängten Decke könnte man die Schallenergie reduzieren und auf die gewünschte Nachhallzeit kommen. Auf der Suche nach dem passenden Material, habe ich ein akustisches Deckensegel von der Firma Rigips entdeckt, welches die benötigte Absorption im Tiefenbereich verspricht. Jenes Deckensegel heisst Rigips Rigiton big Quadro 46 und wird vom Hersteller mit detaillierten Informationen bezüglich Installationsplan, Materialeigenschaften und Absorptionskoeffizienten angeboten.

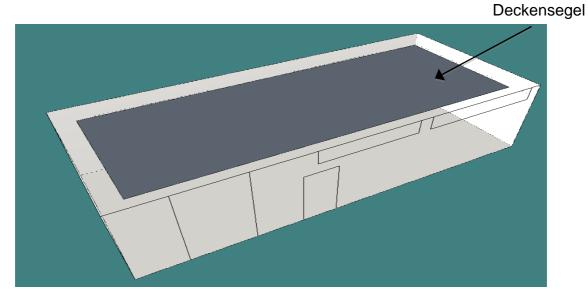


Abbildung 27: 3D-Modell mit einer Deckensegel (Schema)

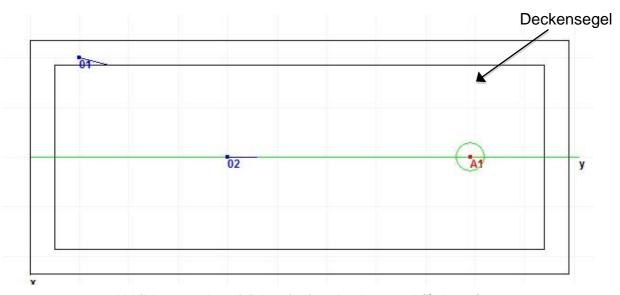


Abbildung 28: Draufsicht mit einer Deckensegel (Schema)

Der Abstand zu den Rändern der Decke beträgt 0,5 m. Für den Absorber wird eine Fläche von 37 m² benötigt.

Eine detaillierte Materialbeschreibung und die Absorptionskoeffizienten können aus dem Herstellerdokument der Firma Rigips entnommen werden.

• Material: Rigips Rigiton big Quadro 46

• **Abhängehöhe**: 150mm

• **Oberfläche**: Quadratlochung 12mm

Lochabstand: 25mmLochanteil: 10%

Plattendicke: 12,5mm
 Gewicht: 8,3 kg/m²

Frequenz[[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α₫%]	45	60	55	45	40	40	1,2
A[[m²]	16,65	22,2	20,35	16,65	14,8	14,8	0,444

Abbildung 29: Absorptionsgrad und die resultierende Äquivalente Absorptionsfläche

5.2.1.1 Betrachtung der Nachhallzeit:

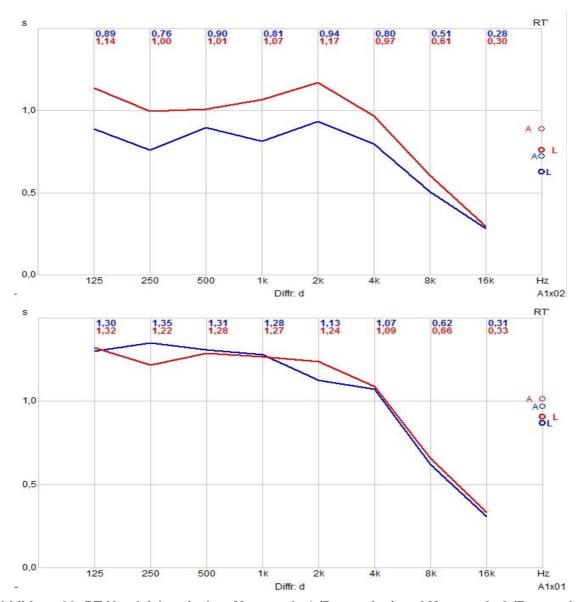


Abbildung 30: RT-Vergleich zwischen Messpunkt 1 (Raummitte) und Messpunkt 2 (Raumecke)

Der Einsatz dieses Deckensegels führt dazu, dass die Nachhallzeit in der Mitte des Raumes über alle Frequenzbänder in einen optimalen Bereich gebracht wird (Abbildung 1). In der Raumecke ist die Nachhallzeit leider ein wenig höher wie erwünscht, dennoch ist die Sprachverständlichkeit noch gut, welches man bei der Betrachtung der C_{50} -Werte im Kapitel 5.2.1.3 sehen kann.

5.2.1.2 Early Decay Time (EDT)

Analog zum RT wurde die Early Decay Time auch stark reduziert. In der unteren Abbildung kann man erkennen, dass in den Raumecken eine viel stärkere Nachhhallzeitempfindung vorhanden ist als in der Raummitte, welche von Catt-Acoustic berücksichtigt wurde.

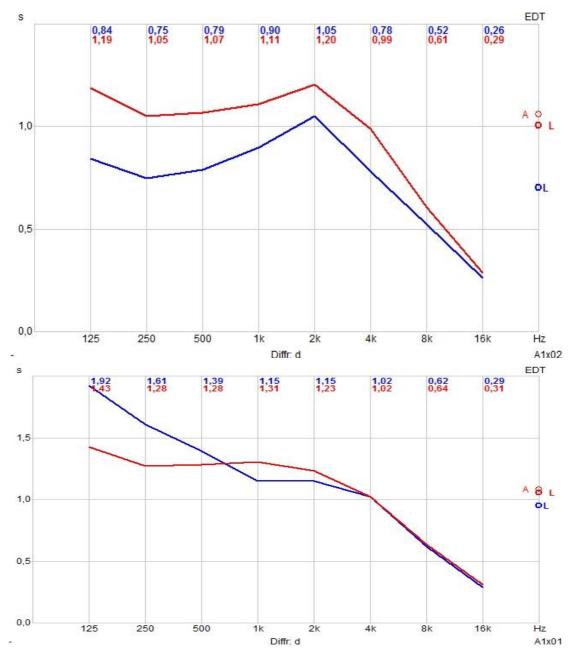


Abbildung 31: EDT für 2 Messpunkte

5.2.1.3 Deutlichkeitsmaß C50

Durch die Reduktion der Nachhallzeit wurde das C50 verbessert. Da C50 das Verhältnis von dem Energieanteil der ersten 50ms zum Gesamtenergie beschreibt.

C-50 [5000 rays, Diffr: d, 1000 ms]

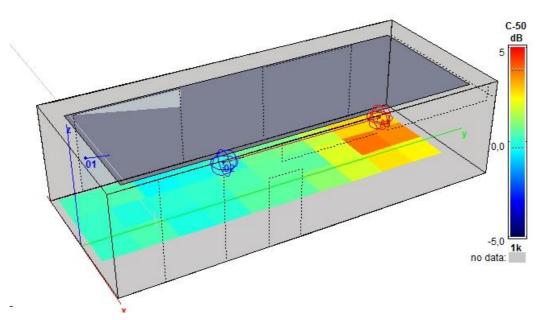


Abbildung 32: C50 Map measure bei 1kHz in Catt

Die obige Abbildung zeigt, dass das Deutlichkeitsmaß und das Klarheitsmaß für 1kHz Werte zwischen 0 und 4 dB aufweist. Das deutet auf eine gute bis sehr gute Verständlichkeit hin.

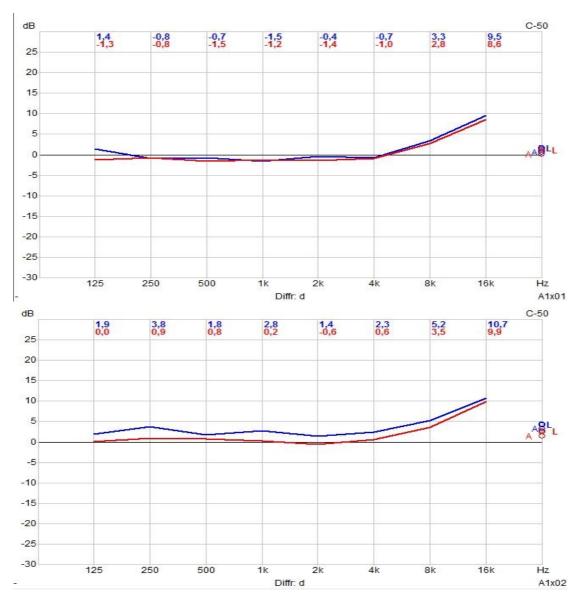


Abbildung 33: C-50 für 2 Messpunkte

Der Vergleich zwischen den zwei Messpositionen bestätigt, dass die gute Sprachverständlichkeit im ganzen Raum gegeben ist. Der Messpunkt 1 (in der Ecke) hat zwar einen wenig schlechteren Wert gegenüber Messpunkt 2, aber dennoch ist eine gute Verständlichkeit gegeben.

5.2.1.4 Klarheitmaß C80

Analog zu C50 befindet sich der Wert für C80 im optimalen Bereich. Auch hier ist ersichtlich, dass in der Raumecke (01) der Wert ein wenig schlechter ist als in der Mitte des Raumes.

Clarity [5000 rays, Diffr: d, 1000 ms]

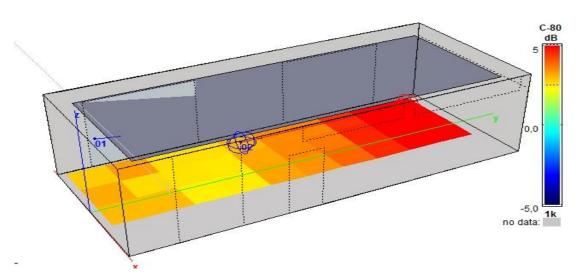


Abbildung 34: C-80 Map measures bei 1kHz in Catt-Acoustic

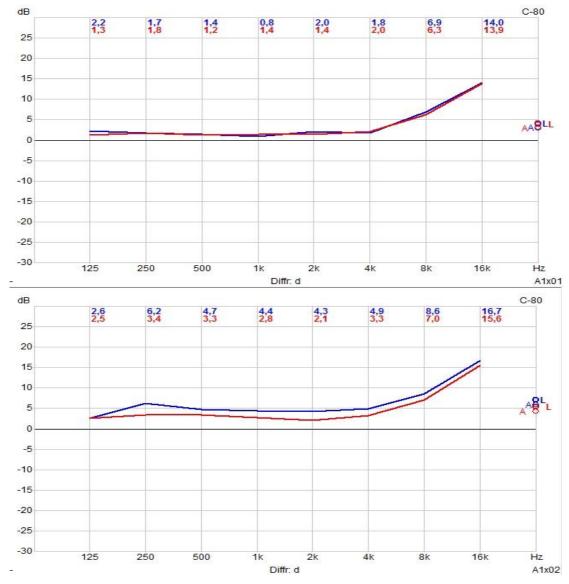


Abbildung 35: Klarheitsmaß C80 für 2 Messpunkte.

5.2.1.5 Speech Tranmission Index STI

Wie zu erwarten, liegt der STI Wert im ganzen Raum zwischen 0,6 und 0,7. Das entspricht einer guten Verständlichkeit.

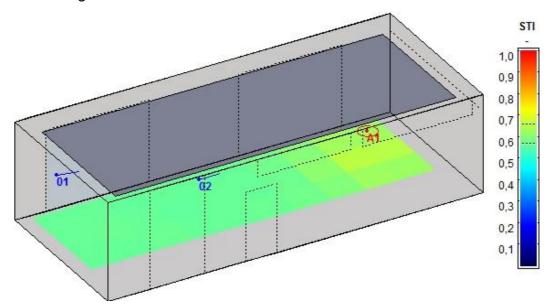


Abbildung 36: STI Map Measure

5.2.1.6 Seitenschallgrad LF

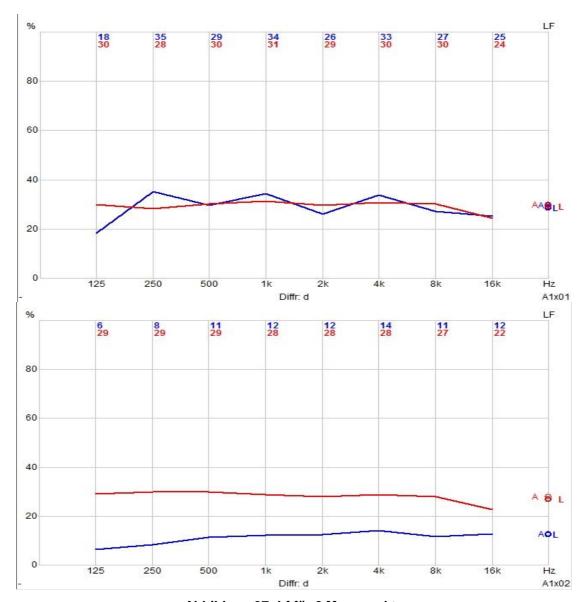


Abbildung 37: Lf für 2 Messpunkte

Der Seitenschallgrad beschreibt die Stärke der seitlichen Reflexionen während den ersten 80ms. Nach Leo Beranek können Werte zwischen 12% und 22% als gut empfunden werden. Dieses Gütemaß ist aber eher wichtig für Konzerträume, da dieses Maß eng mit der subjektiven Wahrnehmung von Musik zusammenspielt und kann als Wert für die räumliche Breite und "akustische Umhüllung" beschrieben werden. Ein niedriger LF-Wert bedeutet bei der Musikaufnahme oder Aufführung, dass die Instrumente isoliert klingen. Bei einem hohen LF-Wert leidet sowohl die Ortbarkeit als auch die Präzision [5]. Durch die Optimierung liegt der LF-Wert für die Raummitte zwischen 10 und 18%, welches als gut gilt. In den Ecken (MP1) haben wir einen höheren LF-Wert als im Punkt MP2.

5.2.1.7 Stärkemaß G

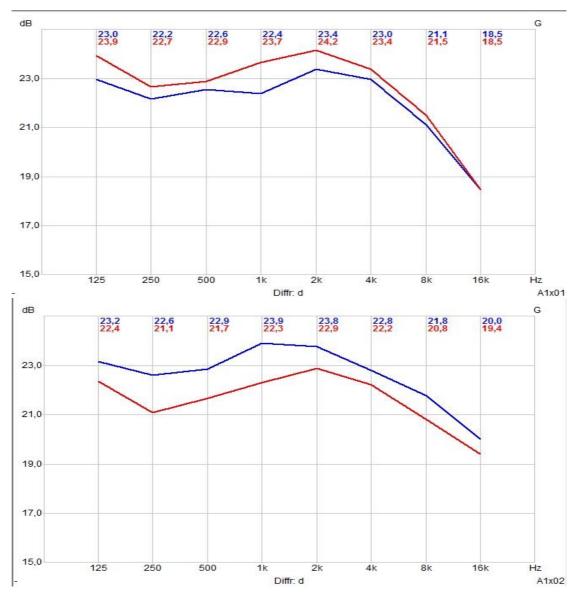


Abbildung 38: Stärkemaß für 2 Messpunkte

Das Stärkemaß ist eng an die subjektive Wahrnehmung der Lautheit gekoppelt. Bei unserem Raum liegt dieser Wert zwischen 20 und 23dB. Dieser Wert ist üblich in kleinen Räumen. Vergleicht man dieses Ergebnis mit dem Ergebnis vom leeren Raum im Kapitel 4.3.7, hat man durch die Optimierung den Wert um etwa 5dB reduziert.

5.2.2 Setup 2: Kantenabsorber und Mineralwolle

Eine weitere Möglichkeit die Nachhallzeit zu reduzieren, ist mit der Hilfe von sogenannten Kantenabsorbern. Der Vorteil von Kantenabsorbern ist, dass man mit wenig Fläche viel Schallenergie absorbieren kann. Der Kantenabsorber wird normalerweise in den Raumecken platziert und ist daher sehr platzsparend.

Aufgrund der Beschaffenheit des Raumes kann man ihn leider nicht an allen Stellen des Raumes platzieren wie zum Beispiel über den Fenstern oder Türen. Daher wird noch Mineralwolle auf der rechten Seitenwand angebracht, um die Nachhallzeit weiter auf den gewünschten Wert, um ca. 1 Sekunde, zu reduzieren.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit habe ich mich mit einem speziellen Kantenabsorber aus einer Fachausgabe über die Lärmbekämpfung von Herr Prof. Dr.-Ing. Helmut Fuchs beschäftigt.

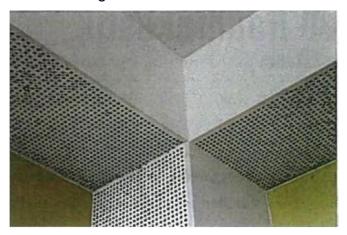


Abbildung 39: Anwendung eines Kantenabsorbers in einer Raumecke [6]

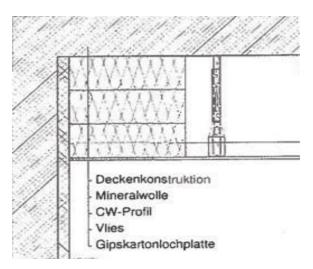


Abbildung 40: Aufbauprinzip eines Kantenabsorbers [6]

Die einseitig perforierten Gipskartonplatten (alternativ auch Stahl und Holz möglich) mit Mineralwollfüllung (0,4 x 0,5m im Querschnitt) wirken breitbandig von 63 bis 4000Hz. Der Kanten-Absorber wird entlang der Raumkante der linken Seitenwand installiert. Die Länge des Kanten-Absorbers entspricht der Höhe von 2,8m und der Breite von 4,7m des Raumes.

Die benötigte Fläche für den Kanten-Absorber entspricht insgesamt 7,5 m²

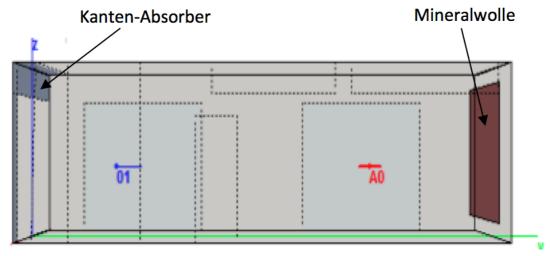


Abbildung 41: Optimierung mit Kantenabsorber und Mineralwolle (Schema)

Für dieses Setup habe ich das Produkt "AF-Akustik-Filz" von der Firma Isover ausgesucht. Es besteht aus einem Mineralwolle-Dämmstoff, der sich als gute Wärme- und Schalldämmung eignet. Die Abmessung des AF-Akustik-Filz beträgt 4m*2,5m und ist 80mm dick. Der Mineralwolle-Dämmstoff benötigt eine Fläche von 9m². Er wird großflächig an der linken Seitenwand mit einem Abstand von 60mm zur Wand platziert.

Für detaillierte Informationen zum Material und Absorptionsgrad siehe Isover Produktinformation AF-Akustik-Filz.

Frequenz [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
α des Kantenabsorbers	0,65	0,55	0,50	0,50	0,35	0,50
α der Minerallwollplatte	0,42	0,74	0,90	0,90	0,90	0,90
A des Kantenabsorbers	4,88	4,13	3,75	3,75	2,63	3,75
A der Minerallwolle AF- 80	3,78	6,66	8,10	8,10	8,10	8,10
A _{Gesamt}	8,66	10,79	11,85	11,85	10,73	11,85

Abbildung 42: Absorptionskoeffizienten für den Kantenabsorber und Minerallwolle

5.2.2.1 Betrachtung der Nachhallzeit

Bei dieser platzsparenden Maßnahme wurde die Nachhallzeit deutlich im Tiefenbereich verbessert, was eine positive Wirkung auf die Sprachverständlichkeit hat.

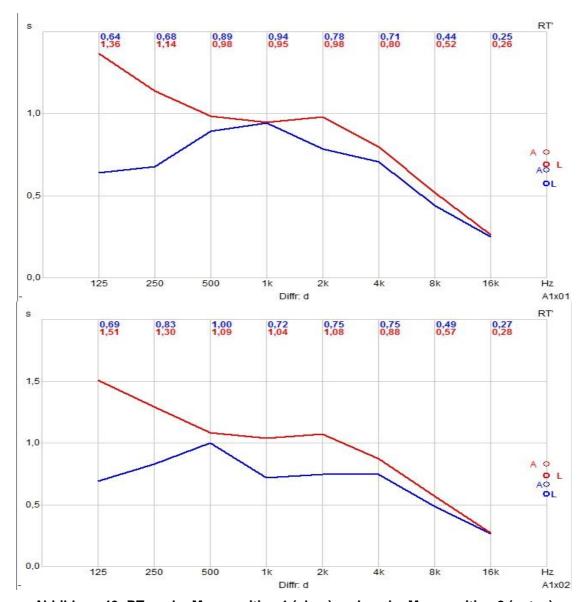


Abbildung 43: RT an der Messposition 1 (oben) und an der Messposition 2 (unten)

Der Frequenzgang zwischen 250Hz und 1000Hz ist leider nicht mehr linear, aber dennoch in einem akzeptablen Ausmaß. Auch die Verteilung der verschiedenen RT über den ganzen Raum liegt im unteren Toleranzbereich für die Sprachanwendung (siehe Abbildung 27), wie beim RT map measure bei 1kHz zu sehen ist.

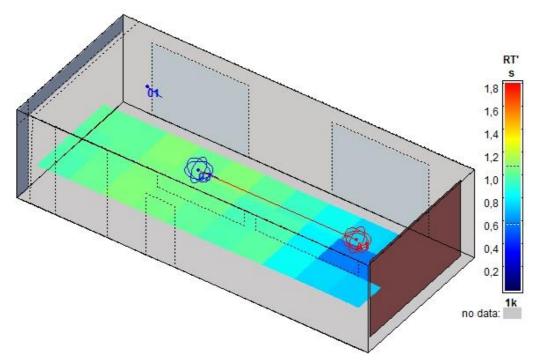


Abbildung 44: RT Map measure bei 1kHz

5.2.2.2 EDT Early Deday Time

Ähnlich wie bei den anderen Simulationen hat man, im Vergleich zum Messpunkt MP2, in der Raumecke MP1 einen leicht erhöhten Wert. Analog zum RT₆₀ ist die EDT-Kurve weniger linear als im Mittenfrequenzbereich. Jedoch ist die Halligkeitempfindung deutlich gesunken.

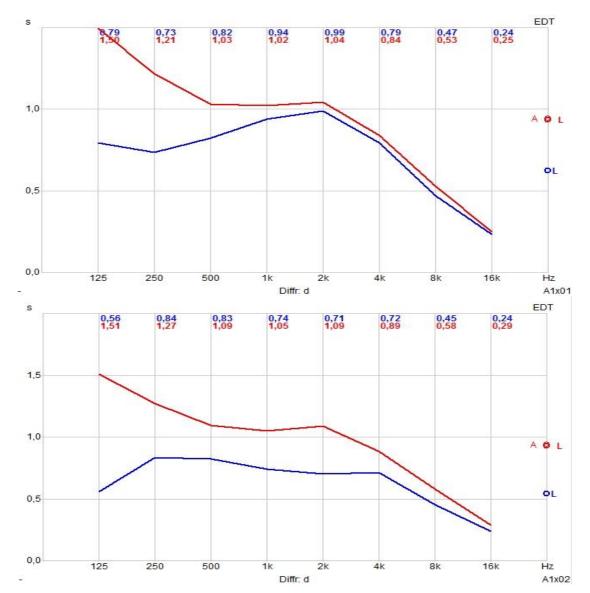


Abbildung 45: EDT an der Messposition 1 (oben) und an der Messposition 2 (unten)

5.2.2.3 C50 Deutlichkeitsmaß

Beim Deutlichkeitsmaß ist zu erkennen, dass durch die Optimierung eine Verbesserung der Sprachverständlichkeit über den gesamten Frequenzbereich gegeben ist.

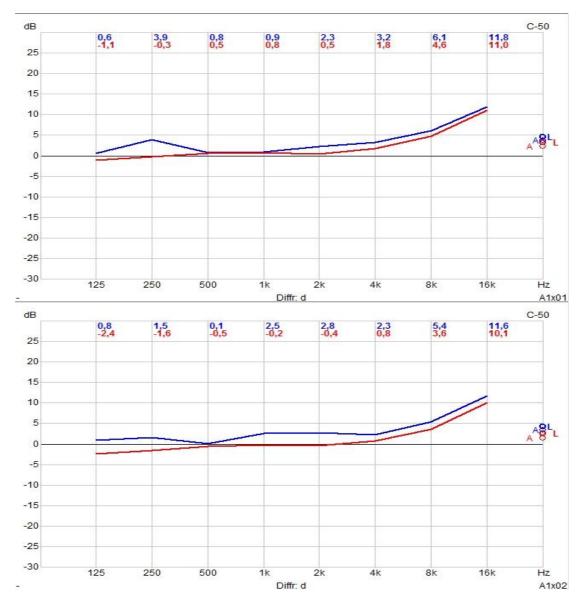


Abbildung 46: C50 an der Messposition 1 (oben) und an der Messposition 2 (unten)

5.2.2.4 C80 Klarheitsmaß

Alle Werte sind über 5dB, obwohl eine hohe Durchsichtigkeit von Musik bereits schon ab 0db gegeben ist. Bei der Frequenz 125 Hz beträgt dies einen Wert von 13 dB, welches auf eine sehr hohe Durchsichtigkeit weist.

Die als optimal geltenden Messgrößen des Klarheitsmaßes sind sogar von der musikalischen Stilrichtung abhängig. Daraus ergibt sich, dass Werte die größer oder gleich -4,6 dB erreichen, optimal für die Musik der Romantik eignen, wobei für die klassische Musik Ergebnisse um -1,6 dB als Optimum anzusehen sind [2]

Fakt ist, dass durch die Optimierung das Klarheitmaß durchschnittlich von -5dB auf einen positiven Wert angehoben wurde.

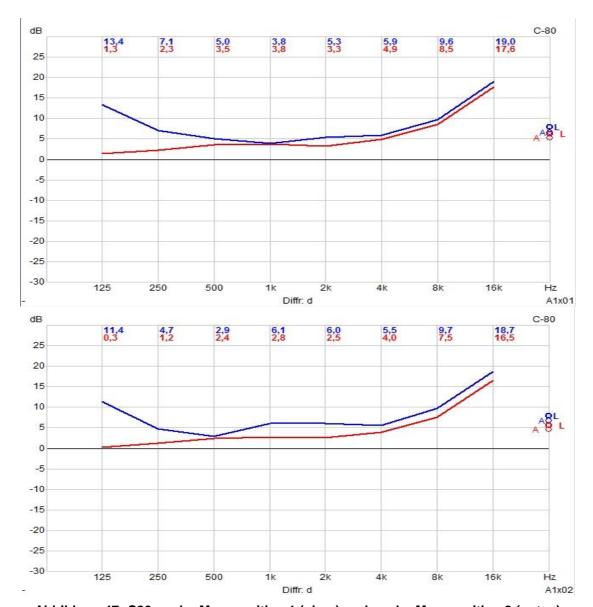


Abbildung 47: C80 an der Messposition 1 (oben) und an der Messposition 2 (unten)

5.2.2.5 STI Speech Transmission Index

STI beschreibt die zu erwartende Sprachverständlichkeit beim Zuhörer. Durch die Reduzierung der Nachhallzeit liegt der STI-Wert über den ganzen Raum zwischen 0,6 und 0,7. Das spricht für eine gute Sprachverständlichkeit.

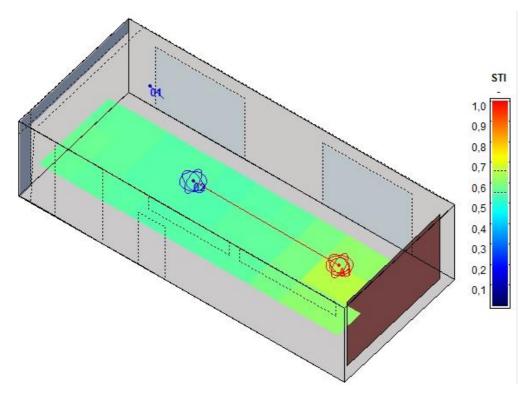
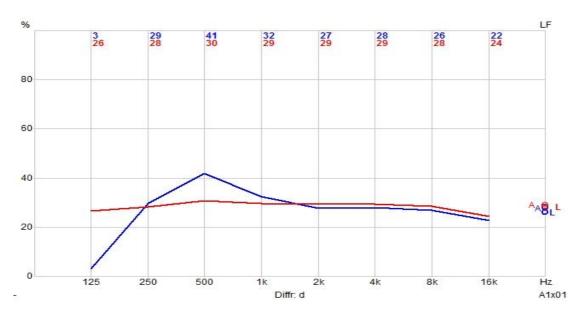


Abbildung 48: STI map measure bei 1kHZ

5.2.2.6 LF Seitenschallgrad

Der Seitenschallgradverlauf hat Ähnlichkeiten mit dem Seitenschallgradverlauf aus Kapitel5.2.1.6. In der Raummitte liegt dieser Wert bei ca. 10%. Bei 125Hz ist es ziemlich niedrig, ca. 1db. Das bedeutet, dass durch die Optimierung weniger seitliche Reflexionen wahrzunehmen ist.



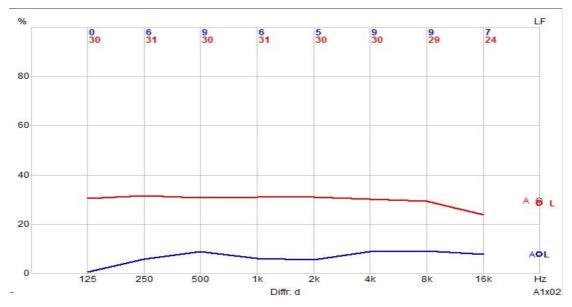
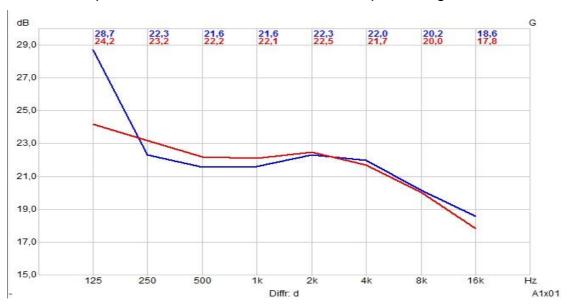


Abbildung 49: LF an der Messposition 1 (oben) und an der Messposition 2 (unten)

5.2.2.7 Stärkemaß G

Das Stärkemaß ist eng mit der subjektiven Wahrnehmung der Lautheit gekoppelt. Bei unserem Raum liegt dieser Wert zwischen 18 und 23dB. Dieser Wert ist üblich in kleinen Räumen. Vergleicht man dieses Ergebnis mit dem Ergebnis vom leeren Raum im Kapitel 4.3.7, wurde der Wert durch die Optimierung um ca. 5 dB reduziert.



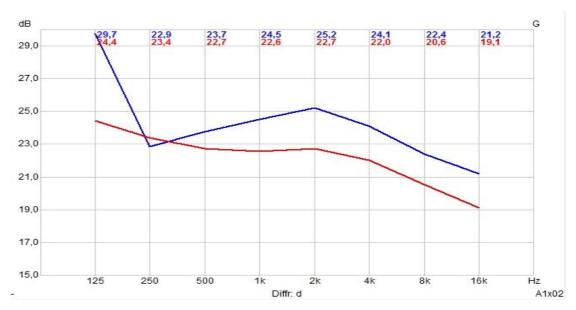


Abbildung 50: G an der Messposition 1 (oben) und an der Messposition 2 (unten)

5.2.3 Setup 3: Mineralwollplatte

Eine weitere Möglichkeit, die Schallenergie zu absorbieren und damit die Nachhallzeit zu reduzieren, ist der Einsatz einer Mineralwollplatte.

Für dieses Setup wurde die Mineralwollplatte AP-Akustik-Platte mit einer Dicke von 100mm von der Firma Isover gewählt und simuliert. Die Abmessung einer Platte beträgt 1200mm in der Länge und 600mm in der Breite.

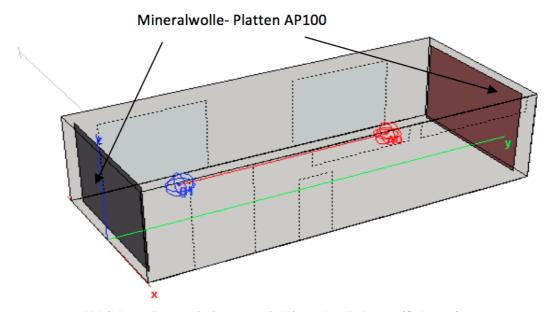


Abbildung 51: Optimierung mit Mineralwollplatten (Schema)

Um genügend Absorptionsfläche zu bekommen wurden 9 Platten nebeneinander gestellt. Die gesamte Fläche beträgt somit 6,5m² pro Seitenwand. Die Platten wurden an den Seitenwänden mit einem Abstand von 150mm zur Wand platziert.

Für detaillierte Informationen zum Material und Absorptionsgrad siehe Isover Produktinformation AP-Akustik-Platte.

Frequenz [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
α der Minerallwollplatte	0,65	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
A der Minerallwolle AF-80	4,23	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
A _{Gesamt}	8,45	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4

Abbildung 52: Absorptionskoeffizienten für den Minerallwolleplatte

5.2.3.1 Betrachtung der Nachhallzeit

Mit den hohen Absorptionskoeffizienten des Absorbers ist es möglich, die Nachhallzeit des Raumes stark zu reduzieren (ca. 0,8s). Bei der Simulation erzielt man mit dem Absorber sehr gute Werte, wobei der Frequenzgang des Messpunktes 1 (Raumecke) etwas unlinear ist. Das weist auf eine ungleichmäßige Absorption auf, da die Decke und der Boden unbehandelt sind. Im realen Umfeld werden durch die Möbel, Dekorationen, Teppich, Lampen usw. möglicherweise diesen Wert anders beeinflussen. Dennoch liegt die Verteilung des RT über den ganzen Raum im optimalen Bereich.

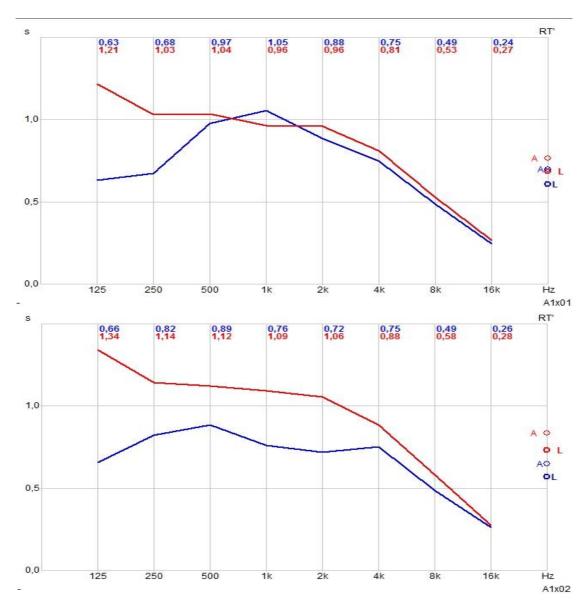


Abbildung 53: RT an der Messposition 1 (oben) und an der Messposition 2 (unten)

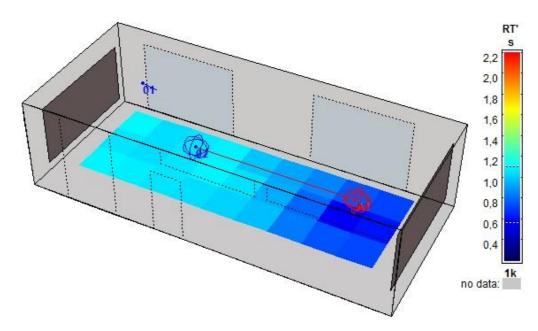


Abbildung 54: RT map measure bei 1kHz

5.2.3.2 Early Decay Time EDT

Die EDT Kurve hat einen ähnlichen Verlauf wie RT, die empfundene Nachhallzeit wurde durch die Optimierung ebenfalls stark gesenkt.

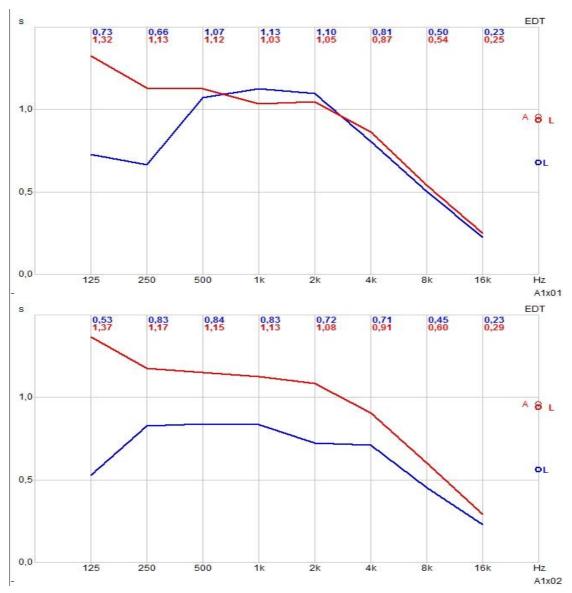


Abbildung 55: EDT an der Messposition 1 (oben) und an der Messposition 2 (unten)

5.2.3.3 Deutlichkeitsmaß C50

Wie erwartet, hat man durch die Optimierung sowohl im gesamten Raum als auch in den Raumecken einen sehr guten C50 Wert. Dies ist ersichtlich bei der Map measure für 1kHz.

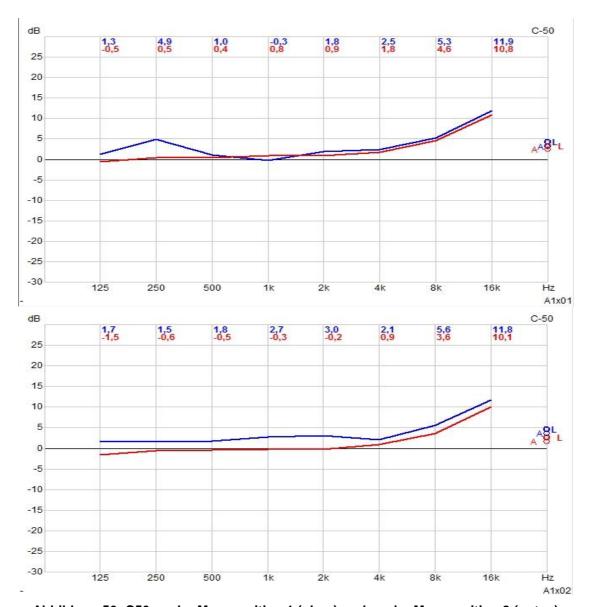


Abbildung 56: C50 an der Messposition 1 (oben) und an der Messposition 2 (unten)

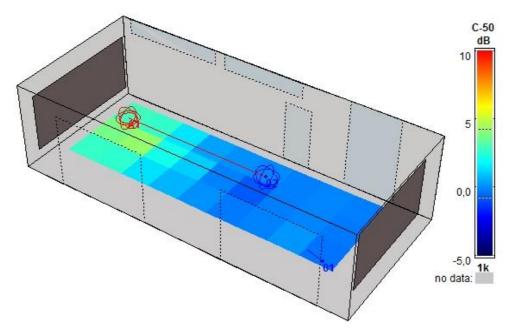


Abbildung 57: C50 map measure bei 1kHz

5.2.3.4 Klarheitsmaß C80

Durch diese Optimierung erreicht man einen sehr guten Wert für die Transparenz bei einer musikalischen Aufführung. C80 > 0 dB entspricht eine hohe Durchsichtigkeit von Musik. Diese Messergebnisse ähneln jene vom Kapitel 5.2.2.4

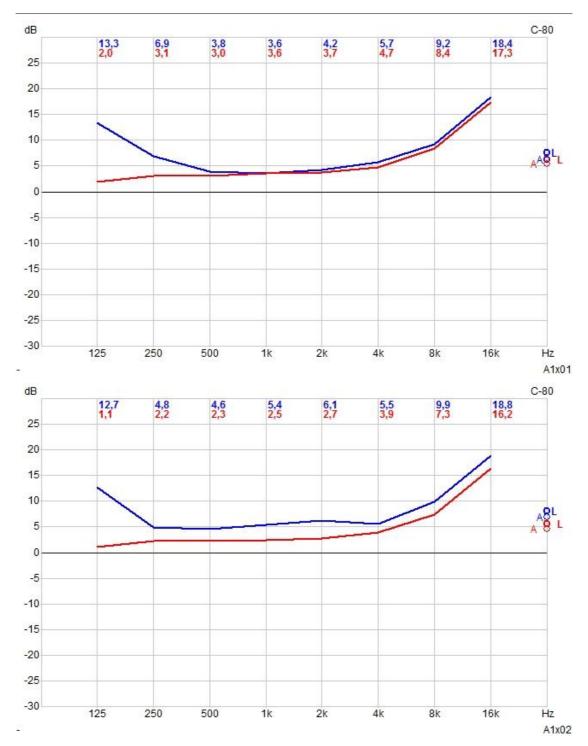


Abbildung 58: C80 an der Messposition 1 (oben) und an der Messposition 2 (unten)

5.2.3.5 Speech transmission index STI

Wie erwartet, erzielt man nach der Optimierung ebenfalls sehr gute STI Werte, ca. 0,75 über den Auditorium-Bereich.

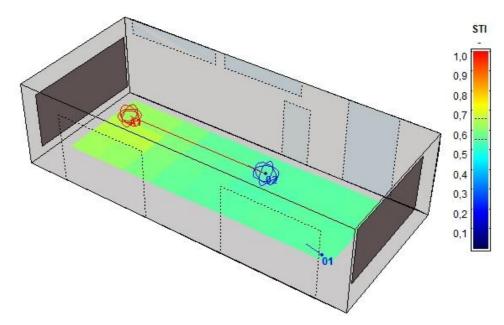


Abbildung 59: STI map measure bei 1kHz

5.2.3.6 Seitenschallgrad Lf

Der Verlauf von LF für Messpunkt 1 und 2 ist im Vergleich zum Kapitel 5.2.2.6 sehr ähnlich, es treten erhöhte Werte in der Raumecke auf. Bei dem Messpunkt 2 in der Raummitte ist der Wert LF ziemlich niedrig. Das heißt, dass die seitlichen Reflexionen bei der Optimierung ziemlich stark reduziert wurden. Dies hat aber keinen Einfluss auf die Sprachverständlichkeit, sondern nur auf die empfundene Räumlichkeit.

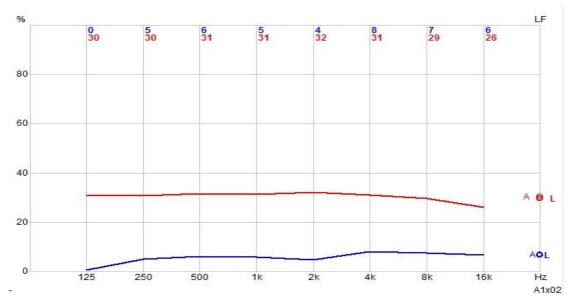


Abbildung 60: LF an der Messposition 1 (oben) und an der Messposition 2 (unten)

5.2.3.7 Stärkemaß G

Für das Stärkemaß gilt die Empfehlung: $G \ge 0 dB$ (im mittleren Frequenzbereich 500...1000Hz). Optimale Werte liegen für Musik und Sprachdarbietungsräume zwischen 1 und 10 dB. Das bedeutet, dass die Lautheit an einem beliebigen Zuhörerplatz in realen Räumen annähernd so laut oder doppelt so laut wie im Freien bei 10m Abstand zur Schallquelle sein soll.

Historische Aufführungsräume für Musik weisen einen hohen Wert für G bis zum +18dB aufgrund ihres kleineren Volumen auf. Ein raumakustisches Qualitätskriterium ist nicht nur eine ausreichende Lautheit an allen Zuhörerplätzen, sondern eine gleichmäßige Verteilung der Lautheit über den gesamten Zuhörerbereich [2] In unserer Simulation liegt dieser Wert weit über 10dB, dennoch ist die gleichmäßige Verteilung von G gegeben.

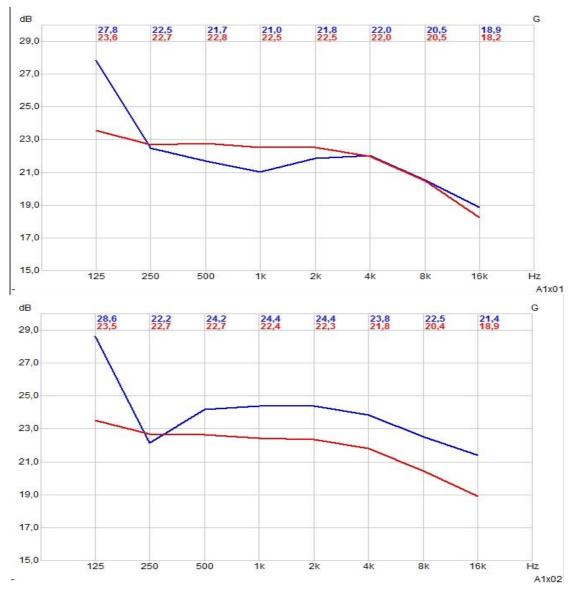


Abbildung 61: G an der Messposition 1 (oben) und an der Messposition 2 (unten)

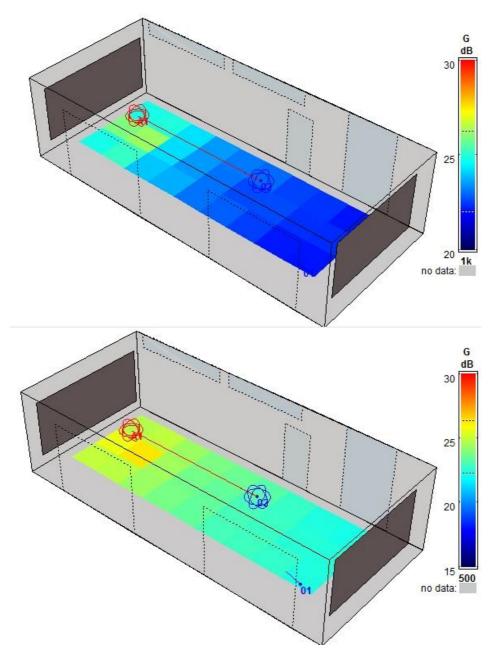


Abbildung 62: G Verteilung bei 1000Hz (oben) und bei 500Hz (unten)

6 Vergleichung der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die bisher wichtigsten Simulationsergebnisse miteinander verglichen und diskutiert.

6.1 Nachhallzeit T₂₀

Als erstes wurde die gemessene, gemittelte Nachhallzeit T_{20} (Abbildung 11) mit der simulierten Nachhallzeit T_{20} (Abbildung 14) in Catt-Acoustic verglichen.

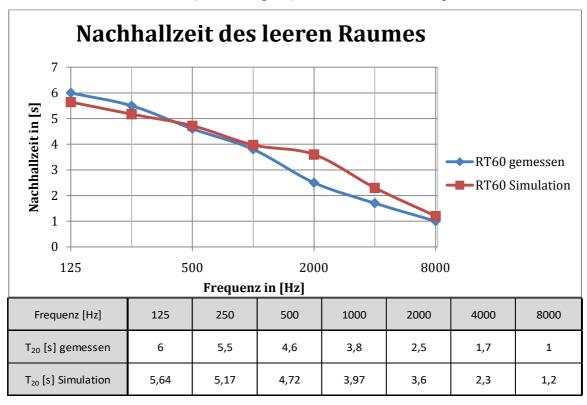


Abbildung 63: gemessene Nachhallzeit und die simmulierte Nachhallzeit

Die gemessene Nachhallzeit T₂₀ stimmt mit dem Simmulation-Ergebnis einigermaßen überein. Es gibt eine leichte Abweichung bei 1000Hz bis 4000Hz. Aber dennoch ist das Ergebnis von Catt-Acoustic ziemlich realistisch und brauchbar. Man muss dabei berücksichtigen, dass bei der realen Messung zwei Personen im Raum befinden, welche auch einen Einfluss auf die Absorption bewirken.

6.2 Nachhhallzeit RT₆₀

Nun werden die Nachhallzeiten RT₆₀ bei verschiedenen Optimierungen unter Berücksichtigung des Toleranzbereiches verglichen.

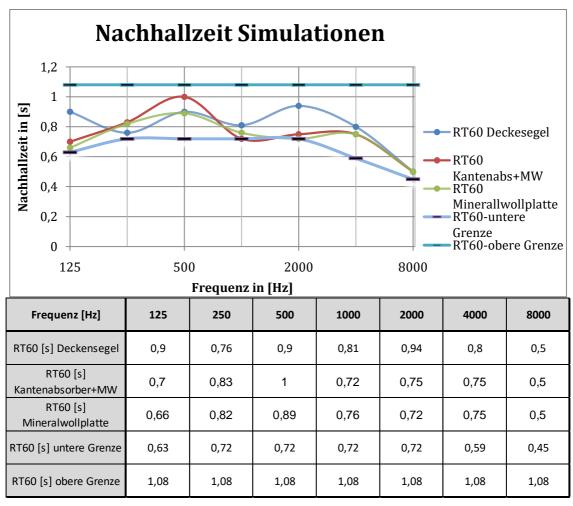


Abbildung 64: Nachhallzeit bei 3 verschiedenen Optimierungsvarianten

Alle Varianten liegen im Toleranzbereich. Der Frequenzgang vom Setup 1 ist mit dem Deckensegel am "linearsten". Bei dem Setup 2 und 3 kann man aus der obigen Abbildung erkennen, dass in den tiefen Bereichen ziemlich viel absorbiert wurde, die Werte liegen nahe der unteren Grenze. Das ist gut für die Sprachverständlichkeit, aber bei der musikalischen Darbietung wird sie möglicherweise ein wenig "Wärme" verlieren.

6.3 Early Decay Time EDT

Hier werden die verschieden EDT-Werte mit dem EDT-Verlauf des leeren Raumes verglichen. Analog zum RT60 haben auch EDT Kurve einen ähnlichen Verlauf. Somit ist zu erkennen, dass die Nachhallzeitempfindung deutlich reduziert worden ist.

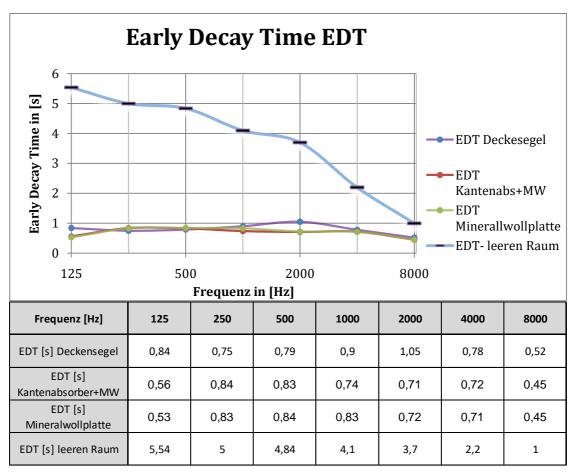


Abbildung 65: EDT bei 3 verschiedenen Optimierungsvarianten

6.4 Deutlichkeitsmaß C50

Der Deutlichkeitsmaß wurde bei allen Varianten erheblich verbessert. Wobei bei Setup 1 (mit dem Deckensegel) ein Wert von 3,8 dB bei 250 Hz erreicht wurde. Am schlechtesten schlägt sich Setup 2 mit Kantenabsorber und Mineralwolle durch. Nichtsdestotrotz ist eine gute Verständlichkeit gegeben, da alle Werte über 0dB liegen.

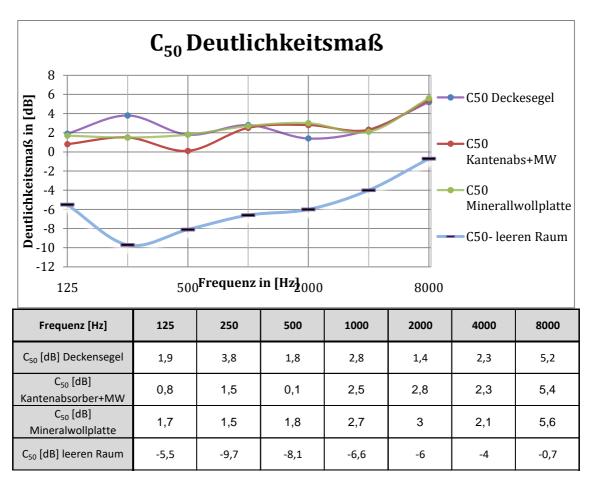


Abbildung 66: C₈₀ bei 3 verschiedenen Optimierungsvarianten

6.5 Klarheitsmaß C₈₀

Nach der Optimierung hat der Raum einen hohen Wert von C_{80} . Das weist auf eine hohe Durchsichtigkeit von Musik hin. Wobei Setup 2 und 3 einen extrem hohen Wert von 125Hz aufweisen.

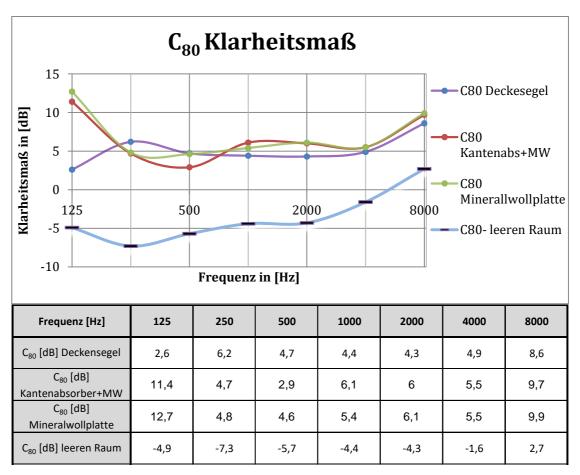


Abbildung 67: C₈₀ bei 3 verschiedenen Optimierungsvarianten

6.6 Seitenschallgrad

Der Seitenschallgrad beschreibt die subjektiv empfundene Breite der Schallquelle, da wir für unseren Raum mehr Wert auf Sprachverständlichkeit legen, spielt der Seitenschallgrad hier weniger eine Rolle. Zu Gunsten der Vollständigkeit habe ich sie dennoch aufgelistet und zur Überlegung in Betracht gezogen.

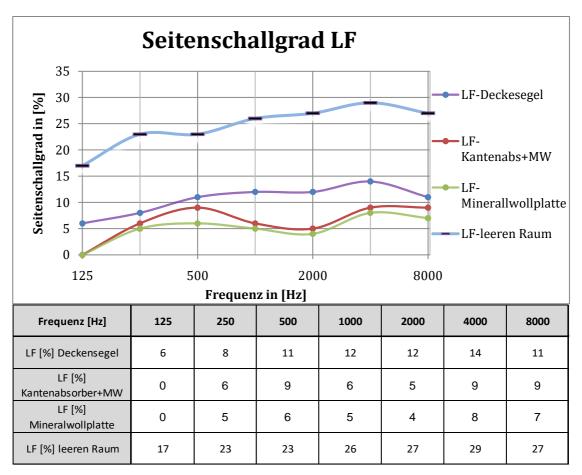


Abbildung 68:LF bei 3 verschiedenen Optimierungsvarianten

Je Größer der LF-Wert, desto breiter wird auch die akustische Schallquelle. Der optimale LF-Wert soll für Konzertsäle zwischen 12-22%, da es hier um einen kleinen Raum handelt, spielt dies hier weniger eine Rolle. Von allen Varianten, liegen die Werte von Setup 1 am nähersten zu den optimalen Werten.

6.7 Stärkemaß G

Das Stärkemaß G ist entscheidend für die empfundene Lautheit. In kleinen Räumen ist dieser üblicherweise ziemlich hoch. Ist jener Wert zu hoch, so wird die Schallquelle als zu laut empfunden. Bei allen Varianten konnte man eine breitbandige Reduzierung um ca. 4-5dB über das gesamte Spektrum erzielen.

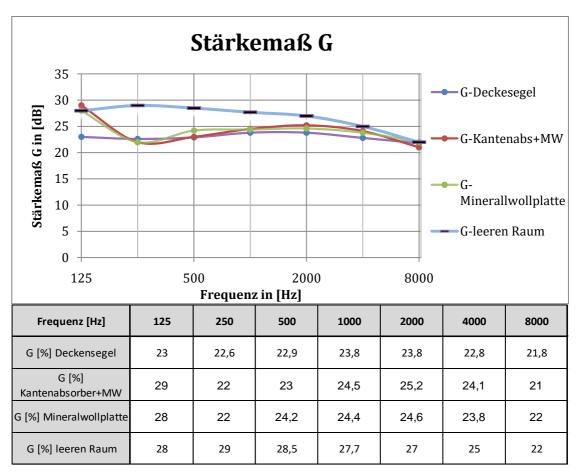


Abbildung 69:G bei 3 verschiedenen Optimierungsvarianten

7 Fazit

Anhand der Ergebnisse von Kapitel 6, erfüllen alle Optimierungsvarianten, meiner Meinung nach, ihre Aufgaben. Durch die Reduktion der Nachhallzeit ist die Sprachverständlichkeit gegeben. Setup 1 (mit dem Deckensegel) liefert die besten Ergebnisse, aber man benötigt dadurch auch am meisten Absorptionsfläche. Bei Setup 2 und 3 benötigt man zwar wenig Absorptionsfläche, doch leider ist der Frequenzgang bei der Nachhallzeit weniger linear.

Ich persönlich bevorzuge das Setup 1 aus ästhetischen Gründen.

Das Programm CATT-Acoustic liefert mit seinen Messergebnissen gute Vorhersagen über die akustische Beschaffenheit von Räumen. Die Genauigkeit der Vorhersagen des Programms ist abhängig von den passenden Materialparametern, welche meist unzureichend in der Produktinformation aufzufinden sind.