

Fakultät für
Maschinenbau,
Fahrzeugtechnik,
Flugzeugtechnik



HOCHSCHULE
FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN
MÜNCHEN

**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES



MASTERARBEIT

im Studiengang Ingenieurakustik

Herr
Andreas Kühlewind

**Raumakustische Planung ei-
nes Ausstellungsraumes des
Carl-Orff-Museums mit flexib-
ler Nutzung**

2022

MASTERARBEIT

Raumakustische Planung eines Ausstellungsraumes des Carl-Orff-Museums mit flexibler Nutzung

Autor/in:
Herr Andreas Kühlewind

Studiengang:
Master Ingenieurakustik

Seminargruppe:
IA17w1-M

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Stefan Sentpali

Zweitprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

MASTER THESIS

Planning the room-acoustics of an exhibition hall with flexi- ble use at the Carl-Orff-Mu- seum

author:

Mr. Andreas Kühlewind

course of studies:

Master Acoustical Engineering

seminar group:

IA17w1-M

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Stefan Sentpali

second examiner:

Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

Bibliografische Angaben

Nachname, Vorname: Kühlewind, Andreas

Raumakustische Planung eines Ausstellungsraumes des Carl-Orff-Museums mit flexibler Nutzung

Planning the room-acoustics of an exhibition hall with flexible use at the Carl-Orff-Museum

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

Masterarbeit, 2022

Abstract

Die Carl-Orff-Stiftung plant den Neubau einer Ausstellungshalle für das Carl-Orff-Museum. Die Ausstellungshalle soll zusätzlich zu seiner Hauptnutzung auch als Veranstaltungsstätte für Konzerte, interaktive musikalische Nutzungen bspw. Body-Percussion und Vorträge genutzt werden. Nutzungsabhängig bestehen verschiedene Anforderungsprofile an die Raumakustik. Für die Halle ist daher eine Planung flexibler Raumakustik-Maßnahmen erforderlich. Des Weiteren bestehen Einschränkungen bei der Auswahl der möglichen raumakustischen Maßnahmen aus optischen Gründen. So soll die Optik der geplanten Tonnengewölbe erhalten bleiben und nicht durch eine Akustikdecke oder ähnliche Maßnahmen verdeckt werden. Daher werden zwei Möglichkeiten für die Deckenmaßnahmen untersucht, bei denen die Deckenform erhalten bleibt. Zusätzlich werden flexibel einsetzbare Wandmaßnahmen untersucht, um nutzungsabhängig verschiedene Anforderungen an die Raumakustik erfüllen zu können. Die Auslegung der raumakustischen Maßnahmen erfolgt nach einer Vordimensionierung mit statistischen Methoden anhand geometrisch-raumakustischer Simulationen mit dem Simulationsprogramm EASE 4.4 [9]. Die Bewertung der Simulationsergebnisse erfolgt anhand verschiedener raumakustischer Kenngrößen. Mit den vorgeschlagenen Maßnahmen können die in der Literatur genannten Zielbereiche der raumakustischen Kenngrößen weitgehend eingehalten werden. In Teilbereichen kommt es aus Gründen vorgenannter Einschränkungen zu Abweichungen der in der Literatur genannten Zielbereiche für die Kenngrößen. Insgesamt weisen die Ergebnisse auf einen guten Raumklang für musikalische Darbietungen und eine angemessene Sprachverständlichkeit hin.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Symbolverzeichnis	IX
Formelverzeichnis	XII
Abbildungsverzeichnis	XIV
Tabellenverzeichnis	XVI
1 Motivation	1
2 Zielsetzung	2
3 Grundlagen der Raumakustik	3
3.1 Schallfelder in Räumen	3
3.1.1 Reflexion und Absorption	3
3.1.2 Wellentheoretische Raumakustik	4
3.1.3 Geometrische Raumakustik	5
3.1.4 Statistische Raumakustik	6
3.2 Schallabsorber	7
3.2.1 Poröse Absorber	7
3.2.2 Resonatoren	8
4 Bewertungsgrößen der Raumakustik	10
4.1 Nachhallzeit	10
4.2 Anfangsnachhallzeit	13
4.3 Bass-Verhältnis	13
4.4 Pegelverteilung	14
4.5 Impulsantwort des Raumes	15
4.5.1 Schwerpunktzeit	15
4.5.2 Echokriterium	16
4.5.3 Artikulationsverlust	16
4.5.4 Klarheitsmaß für Musik	17
4.5.5 Deutlichkeitsmaß für Sprache	18
4.5.6 Sprach-Übertragungsindex (STI)	18
4.5.7 Seitenschallgrad und Seitenschallmaß	20
5 Simulationsmethoden der Raumakustik	21
5.1 Spiegelquellenmethode	21
5.2 Strahlverfolgung	21

5.3	AURA.....	21
6	Objektplanung und bautechnische Randbedingungen	23
7	Einfluss der Raumgeometrie auf den Raumklang	25
8	Untersuchte Schallabsorber.....	26
8.1	Deckenmaßnahmen.....	26
8.1.1	In Beton eingelegte Glasschaumstreifen.....	26
8.1.2	Schlitzabsorber auf Zellulosebasis	27
8.2	Wandmaßnahmen.....	28
8.2.1	Schallabsorptionsgrade der Wandmaßnahmen.....	29
8.2.2	Bestimmung der Schallabsorption mobiler Trennwände im virtuellen Hallraum	30
9	Vorbemessung mit statistischer Raumakustik	34
9.1	Bestimmung des Klarheitsmaßes für Musik.....	36
9.2	Nachhallzeitvorausberechnung	37
9.2.1	Ausgangsfall ohne akustische Maßnahmen	37
9.2.2	Variantenuntersuchung der Deckenmaßnahmen bei Musiknutzung.....	38
9.2.3	Nachhallzeitvorausberechnung für sprachliche Nutzungen	40
10	Erstellung des Simulationsmodells	43
11	Raumakustische Simulation mit EASE AURA.....	45
11.1	Raumnutzung Konzert	46
11.1.1	Variante 1: Zellulose-Schlitzabsorber 5/20	46
11.1.2	Variante 2: Glasschaumstreifen 33 %	50
11.2	Raumnutzung Musik interaktiv	51
11.3	Raumnutzung Vortrag	52
11.4	Raumnutzung Führung	55
12	Simulationsergebnisse und Beurteilungen.....	57
12.1	Raumnutzung Konzert	57
12.1.1	Pegelverteilung – Konzert	57
12.1.2	Nachhallzeit – Konzert	58
12.1.3	Bassverhältnis – Konzert	60
12.1.4	Schwerpunktzeit – Konzert.....	61
12.1.5	Klarheitsmaß für Musik – Konzert	61
12.1.6	Seitenschallmaß – Konzert	61
12.2	Raumnutzung Musik interaktiv	61

12.2.1	Pegelverteilung – Musik interaktiv	62
12.2.2	Nachhallzeit – Musik interaktiv	62
12.2.3	Bass-Verhältnis – Musik interaktiv.....	64
12.2.4	Schwerpunktzeit – Musik interaktiv	64
12.2.5	Klarheitsmaß für Musik – Musik interaktiv	65
12.2.6	Seitenschallmaß – Musik interaktiv	65
12.3	Raumnutzung Vortrag	65
12.3.1	Pegelverteilung – Vortrag.....	65
12.3.2	Nachhallzeit – Vortrag.....	67
12.3.3	Bass-Verhältnis – Vortrag	69
12.3.4	Schwerpunktzeit – Vortrag	69
12.3.5	Artikulationsverlust – Vortrag	70
12.3.6	Deutlichkeitsmaß für Sprache – Vortrag.....	71
12.3.7	Sprach-Übertragungs-Index (STI) – Vortrag.....	72
12.4	Raumnutzung Führung	73
12.4.1	Pegelverteilung – Führung	73
12.4.2	Nachhallzeit – Führung	74
12.4.3	Bass-Verhältnis – Führung.....	75
12.4.4	Schwerpunktzeit – Führung.....	76
12.4.5	Artikulationsverlust – Führung.....	76
12.4.6	Deutlichkeitsmaß für Sprache – Führung	77
12.4.7	Sprach-Übertragungs-Index (STI) – Führung	77
13	Unsicherheiten und zusätzliche variable Einflüsse	78
13.1	Fehlende Kalibrierung	78
13.1.1	Konzertnutzung.....	79
13.1.2	Vortrag.....	80
13.2	Personenbelegung	81
13.2.1	Konzertnutzung.....	81
13.2.2	Vortrag.....	82
13.3	Möblierung und Ausstellungsgegenstände	84
13.4	Tiefe Frequenzen	84
13.5	Grundgeräuschpegel.....	84
14	Variantenvergleich	86
14.1	Raumnutzung Konzert	87
14.2	Raumnutzung Musik interaktiv	89
14.3	Raumnutzung Vortrag	91
14.4	Raumnutzung Führung	93

15	Fazit und Ausblick	95
16	Zusammenfassung	97
	Literaturverzeichnis	XI
	Anlagen.....	XIII
	Eigenständigkeitserklärung	LXXIV

Symbolverzeichnis

A	[m ²]	äquivalente Schallabsorptionsfläche
a_i	[-]	Gewichtungsfaktor zur Ermittlung des STI
AL_{cons}	[-]	Artikulationsverlust
b_i	[-]	Gewichtungsfaktor zur Ermittlung des STI
BR	[-]	Bassverhältnis
c	[m/s]	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit
c_0	[m/s]	Schallgeschwindigkeit in Luft
C_{50}	[dB]	Deutlichkeitsmaß für Sprache
C_{80}	[dB]	Klarheitsmaß für Musik
E	[J]	Energie
EDT	[s]	Frühe Nachhallzeit
EK	[-]	Echokriterium
F	[Hz]	Modulationsfrequenz
f_n	[Hz]	Eigenfrequenz des Raumes
G	[dB]	Stärkemaß
I_α	[W/m ²]	absorbierte Schallintensität
I_δ	[W/m ²]	dissipierte Schallintensität
I_ε	[W/m ²]	einfallende Schallintensität
I_ρ	[W/m ²]	reflektierte Schallintensität
I_τ	[W/m ²]	transmittierte Schallintensität
k	[-]	Reflexionsordnung
L_W	[dB]	Schalleistungspegel
L_x	[dB]	Schalldruckpegel im Abstand x zur Schallquelle
LF	[-]	Seitenschallgrad
m	[1/dB]	Energiedämpfungs-konstante für Luft
MTI	[-]	Modulationstransferindex

$m(F)$	[-]	Modulationsfaktor
N	[-]	Anzahl ebener Wände im Raum
n_k	[-]	Anzahl Spiegelschallquellen bis zur k-ten Ordnung
p	[Pa]	Schalldruck
r	[-]	Reflexionsgrad
r_H	[m]	Hallradius
S/N	[-]	Signal-Rausch-Verhältnis
S_S	[dB]	Seitenschallmaß
S_{ges}	[m ²]	Gesamte Raumboberfläche
STI	[-]	Sprach-Übertragungsindex
t	[s]	Zeit
t_s	[ms]	Schwerpunktzeit
T_{Soll}	[s]	Soll-Nachhallzeit
T_{60}	[s]	Nachhallzeit
T_{30}	[s]	Nachhallzeit gemessen bei einem 30 dB-Abfall
$T_{63 \text{ Hz}}$	[s]	Nachhallzeit bei 63 Hz
$T_{125 \text{ Hz}}$	[s]	Nachhallzeit bei 125 Hz
$T_{250 \text{ Hz}}$	[s]	Nachhallzeit bei 250 Hz
$T_{500 \text{ Hz}}$	[s]	Nachhallzeit bei 500 Hz
$T_{1000 \text{ Hz}}$	[s]	Nachhallzeit bei 1000 Hz
V	[m ³]	Volumen
x	[m]	Abstand zur Schallquelle
x_0	[m]	Bezugsabstand zur Schallquelle im Freifeld, $x_0 = 10 \text{ m}$
X	[-]	Wirksames Signal-Stör-Verhältnis
Z	[Pa s/m ²]	Schallimpedanz
α	[-]	Schallabsorptionsgrad
$\bar{\alpha}$	[-]	mittlerer Schallabsorptionsgrad
α_s	[-]	Schallabsorptionsgrad im Diffusfeld

α_p	[-]	praktischer Schallabsorptionsgrad
$\Delta\tau$	[ms]	Zeitkonstante zur Ermittlung des Echokriteriums
δ	[-]	Dissipationsgrad
ϑ	[rad]	Einfallswinkel
ϑ'	[rad]	Reflexionswinkel
ρ	[-]	Reflexionsgrad
ρ_0	[kg/m ³]	Dichte der Luft
τ	[-]	Transmissionsgrad

Formelverzeichnis

Gleichung (1)	Summe der Intensitäten bei Schalleinfall	3
Gleichung (2)	Verhältnisse Intensitäten bei Schalleinfall	4
Gleichung (3)	Schallabsorptionsgrad in Abhängigkeit des Reflexionsgrades	4
Gleichung (4)	Winkelabhängigkeit des Schallabsorptionsgrades	4
Gleichung (5)	Raummoden für Quaderförmige Räume	5
Gleichung (6)	Schröderfrequenz	5
Gleichung (7)	Reflexionswinkel	6
Gleichung (8)	Anzahl Spiegelschallquellen	6
Gleichung (9)	Nachhallzeit nach Eyring	10
Gleichung (10)	Energiedämpfungskonstante für Luft	10
Gleichung (11)	Soll-Nachhallzeiten für die Raumgruppen A1, A2 und A3 gemäß DIN 18041 [2]	11
Gleichung (12)	Bassverhältnis	13
Gleichung (13)	Alternativvorschlag für das Bassverhältnis nach H.V. Fuchs [18]	14
Gleichung (14)	Stärkemaß	14
Gleichung (15)	Schwerpunktzeit	15
Gleichung (16)	Echokriterium	16
Gleichung (17)	Artikulationsverlust	16
Gleichung (18)	Klarheitsmaß für Musik berechnet aus der Raumimpulsantwort	17
Gleichung (19)	Hallradius	17
Gleichung (20)	Klarheitsmaß für Musik - statistische Abschätzung	17
Gleichung (21)	Deutlichkeitsmaß für Sprache	18
Gleichung (22)	Modulationsfaktor	18
Gleichung (23)	Signal-Stör-Verhältnis	19
Gleichung (24)	Modulations-Transfer-Index	19
Gleichung (25)	Sprach-Übertragungsindex	19

Gleichung (26)	Seitenschallgrad	20
Gleichung (27)	Seitenschallmaß	20
Gleichung (28)	Berechnung des Schallabsorptionsgrades nach DIN EN ISO 354 [6]	31
Gleichung (29)	Resonanzfrequenz von Vorsatzschalen massiver Bauteile	35

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Soll-Nachhallzeit RG A1, A2 und A3 gem. DIN 18041 [2]</i>	<i>11</i>
<i>Abbildung 2: Toleranzbereich der Nachhallzeit gem. DIN 18041 [2]</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 3: Schnitt Entwurfsplanung Sonderausstellung, Meck Architekten [27]</i>	<i>23</i>
<i>Abbildung 4: Grundriss Entwurfsplanung Sonderausstellung, Meck Architekten [27]</i>	<i>24</i>
<i>Abbildung 5: Virtueller Hallraum in Anlehnung an [30]</i>	<i>30</i>
<i>Abbildung 6: Diagramm $\Delta T_1(\alpha)$, Kalibrierkurve exemplarisch für 2 kHz</i>	<i>32</i>
<i>Abbildung 7: Klarheitsmaß C80 in Abhängigkeit der Nachhallzeit T</i>	<i>36</i>
<i>Abbildung 8: Nachhallzeitvorausberechnung ohne zusätzliche Maßnahmen und Toleranzbereich für Nachhallzeit der Raumgruppe A1 „Musik“ gem. DIN 18041 [2]</i>	<i>37</i>
<i>Abbildung 9: Nachhallzeitvorausberechnung, Variantenvergleich, Raumgruppe A1</i>	<i>39</i>
<i>Abbildung 10: Nachhallzeitvorausberechnung, Variantenvergleich, Raumgruppe A3</i>	<i>40</i>
<i>Abbildung 11: 3D-Raum-Modell, Gittermodell</i>	<i>43</i>
<i>Abbildung 12: Mit AURA simulierte Nachhallzeit und Nachhallzeit nach Eyring</i>	<i>44</i>
<i>Abbildung 13: Raumanordnung Nutzungsart Konzert eingetragen in Grundrissplanung, Meck Architekten [27]</i>	<i>46</i>
<i>Abbildung 14: Akustikmaßnahmen auf Basis der Vordimensionierung – Konzert – Variante 1, eingetragen in Schnitt Meck Architekten [27]</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 15: Akustikmaßnahmen auf Basis der Vordimensionierung – Konzert – Variante 1, eingetragen in Grundriss Meck Architekten [27]</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 16: Nachhallzeit, Akustikmaßnahmen auf Basis der Vordimensionierung, RG A1 Musik</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 17: Schemenhafte Darstellung exemplarische Strahlenwege mit Abschirmung durch die Deckenform, eingetragen in Schnitt Meck Architekten [27]</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 18: Akustikmaßnahmen Konzert - Variante 1 optimiert, eingetragen in Schnitt Meck Architekten [27]</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 19: Akustikmaßnahmen Konzert - Variante 1 optimiert, eingetragen in Grundriss Meck Architekten [27]</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 20: Akustikmaßnahmen Konzert - Variante 2, 3D-Modell Absorptionsgrad bei 1000 Hz</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 21: Akustikmaßnahmen Nutzung Konzert - Variante 2, eingetragen in Schnitt Meck Architekten [27]</i>	<i>51</i>
<i>Abbildung 22: Schallquellenanordnung Musik interaktiv, eingetragen in Grundriss Meck Architekten [27]</i>	<i>52</i>
<i>Abbildung 23: Wandmaßnahmen Vortrag, eingetragen in Grundriss Meck Architekten [27]</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 24: Skizze Lautsprecherausrichtung, eingetragen in Grundriss und Schnitt Meck Architekten [27]</i>	<i>54</i>
<i>Abbildung 25: Untersuchte Anordnungen von Schallquellen und Zuhörern, Führung, eingetragen in Grundriss Meck Architekten [27]</i>	<i>55</i>
<i>Abbildung 26: Anordnung Wandabsorber, Führung, eingetragen in Grundriss Meck Architekten [27]</i>	<i>56</i>
<i>Abbildung 27: Schalldruckpegelverteilung im Raum bei der Oktavmittenfrequenz 2000 Hz, A-bewertet, Konzert – Variante 1</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 28: Nachhallzeit Konzert - Variante 1</i>	<i>58</i>
<i>Abbildung 29: Vergleich EDT mit T30, Raumnutzung Konzert - Variante 1</i>	<i>59</i>

<i>Abbildung 30: Vergleich EDT mit T30, Raumnutzung Konzert - Variante 2</i>	60
<i>Abbildung 31: Vergleich EDT mit T30, Raumnutzung Musik interaktiv – Variante 1</i>	63
<i>Abbildung 32: Frühe Nachhallzeit Raumnutzung Musik interaktiv – Variante 2</i>	63
<i>Abbildung 33: Schwerpunktzeit, Raumverteilung bei Oktavmittenfrequenz 1000 Hz, Musik interaktiv – Variante 1</i>	64
<i>Abbildung 34: Schalldruckpegelverteilung im Raum bei der Oktavmittenfrequenz 2000 Hz, A-bewertet, Vortrag – Variante 1 ohne Lautsprecher</i>	66
<i>Abbildung 35: Schalldruckpegelverteilung im Raum bei der Oktavmittenfrequenz 2000 Hz, A-bewertet, Vortrag – Variante 1 mit Lautsprecher</i>	66
<i>Abbildung 36: Stärkemaß G, Vergleich Vortrag und Konzert, Variante 1</i>	67
<i>Abbildung 37: Nachhallzeit Vortrag - Variante 1</i>	68
<i>Abbildung 38: Nachhallzeit Vortrag - Variante 2</i>	69
<i>Abbildung 39: ALcons Vortrag, Variante 1 ohne Lautsprecher</i>	70
<i>Abbildung 40: ALcons Vortrag, Variante 1 mit Lautsprechern</i>	71
<i>Abbildung 41: STI Vortrag, Variante 1 ohne Lautsprecher</i>	72
<i>Abbildung 42: STI Vortrag, Variante 1 mit Lautsprechern</i>	73
<i>Abbildung 43: Nachhallzeiten Maxima und Minima, Führung, Variante 1</i>	74
<i>Abbildung 44: Nachhallzeiten Maxima und Minima, Führung, Variante 2</i>	75
<i>Abbildung 45: Verteilung der Schwerpunktzeit im Zuschauerbereich, Führung - Variante 1, Anordnung 1, Oktavmittenfrequenz 1000 Hz</i>	76
<i>Abbildung 46: Vergleich Nachhallzeiten Unsicherheiten – Konzert</i>	79
<i>Abbildung 47: Vergleich Nachhallzeiten Unsicherheiten – Vortrag</i>	80
<i>Abbildung 48: Vergleich Nachhallzeiten besetzter und unbesetzter Raum – Konzert</i> ..	82
<i>Abbildung 49: Vergleich Nachhallzeiten besetzter und unbesetzter Raum – Vortrag</i> ...	83
<i>Abbildung 50: Nachhallzeit Mittelwerte, Variantenvergleich – Konzert</i>	88
<i>Abbildung 51: Klarheitsmaß für Musik Mittelwerte, Variantenvergleich – Konzert</i>	89
<i>Abbildung 52: Nachhallzeit Mittelwerte, Variantenvergleich - Musik interaktiv</i>	90
<i>Abbildung 53: Seitenschallmaß, Mittelwerte Variantenvergleich - Musik interaktiv</i>	91
<i>Abbildung 54: Nachhallzeit, Mittelwerte Variantenvergleich – Vortrag</i>	92
<i>Abbildung 55: Nachhallzeit, Mittelwerte Variantenvergleich – Führung</i>	93

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Toleranzgrenzen der Soll-Nachhallzeit gem. DIN 18041 [2].....</i>	<i>12</i>
<i>Tabelle 2: Bewertung des Artikulationsverlustes [9].....</i>	<i>17</i>
<i>Tabelle 3: STI-Bewertung nach DIN EN ISO 9921 [7].....</i>	<i>19</i>
<i>Tabelle 4: Frequenzabhängige Wirkung des Seitenschalls [9].....</i>	<i>20</i>
<i>Tabelle 5: Schallabsorptionsgrade α_p von Absorberstreifen aus porösem Glasschaum basierend auf gemessenen Schallabsorptionsgraden α_s des Fraunhofer Instituts [13]27</i>	<i>27</i>
<i>Tabelle 6: Schallabsorptionsgrade α_p von Schlitzabsorbern auf Zellulosebasis [21] ...</i>	<i>28</i>
<i>Tabelle 7: Schallabsorptionsgrade, Wandmaßnahmen</i>	<i>29</i>
<i>Tabelle 8: Konfiguration virtueller Hallraum</i>	<i>31</i>
<i>Tabelle 9: Abgleich simulierte Absorptionsgrade mit gemessenen Absorptionsgraden</i>	<i>32</i>
<i>Tabelle 10: Simulationsergebnisse Stellwände 5 cm Wandabstand</i>	<i>33</i>
<i>Tabelle 11: Berücksichtigte Schallabsorptionsgrade α der Raumbegrenzungsflächen</i>	<i>34</i>
<i>Tabelle 12: Schallabsorptionsgrade α einer GK-Platte $d = 9,5$ mm, Wandabstand $d = 25$ mm gem. DIN 18041 [2]</i>	<i>35</i>
<i>Tabelle 13: Geschätzte Schallabsorptionsgrade α einer GK-Platte, Wandabstand $d = 520$ mm.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabelle 14: Beschreibung der Varianten Nachhallzeitvorausberechnung „Musik“.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabelle 15: Beschreibung der Varianten Nachhallzeitvorausberechnung „Sprache“....</i>	<i>41</i>
<i>Tabelle 16: Schallabsorptionsgrade α Mittelwert aus stehender Person im Anzug und stehender Person im Kleid, eine Person je 3 m².....</i>	<i>55</i>
<i>Tabelle 17: Untersuchte abweichende Schallabsorptionsgrade α der Raumbegrenzungsflächen.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabelle 18: Variantenvergleich Konzert, Erfüllung Planungsziel</i>	<i>86</i>
<i>Tabelle 19: Variantenvergleich Musik interaktiv, Erfüllung Planungsziel.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabelle 20: Variantenvergleich Vortrag, Erfüllung Planungsziel.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabelle 21: Variantenvergleich Führung, Erfüllung Planungsziel</i>	<i>87</i>

1 Motivation

Für den Neubau einer Ausstellungshalle des Erweiterungsbaus des Carl-Orff-Museums mit vielseitiger Nutzung, wie bspw. Musikveranstaltungen, sprachlichen Darbietungen und Ausstellungen, sollen raumakustischen Maßnahmen ausgelegt werden.

Je nach Nutzungsart ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an den Raumklang, die im Planungsprozess möglichst vereinbart werden sollen. So ist bspw. gem. DIN 18041 ([2], S. 12 f.) aus Gründen der Sprachverständlichkeit bei sprachlichen Darbietungen eine niedrigere Nachhallzeit anzustreben als bei musikalischen Darbietungen.

Zudem bestehen u.a. optische Ansprüche an die Raumplanung, die den Einsatz ggfs. schalltechnisch sinnvoller Maßnahmen einschränken. Durch die geometrischen Eigenschaften des Raumes können raumakustisch ungünstige Situationen entstehen, so sind bspw. Tonnengewölbe an der Decke geplant, in denen schalltechnisch ungünstige Reflexionen entstehen können. Die der romanischen Architektur entlehene Gewölbeform der Decken soll erhalten bleiben und offengehalten werden und somit dem Ausstellungsraum eine besondere Optik verleihen, wodurch die Auswahl geeigneter Deckenmaßnahmen eingeschränkt wird.

Die Außenwände werden aus ungedämmten Infralichtbeton geplant. Großflächige nicht hinterlüftete Absorber aus Dämmstoffen an Außenwänden stellen Innendämmungen dar, die zu feuchteschutztechnischen Problemen führen können. Diese sind daher zu vermeiden.

Für die Ausstellungshalle sollen anhand von geometrisch-raumakustischen Simulationen mit der Simulationssoftware EASE 4.4 [9] ein akustisches Maßnahmenkonzept entwickelt werden, welches unterschiedliche raumakustische Anforderungen und sonstige planerische Anforderungen, wie bspw. den optischen Anspruch vereinbaren kann.

2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine vielseitig nutzbare raumakustische Auslegung für den Neubau einer Ausstellungshalle mit anspruchsvollen akustischen Anforderungen unter Berücksichtigung weiterer planerischer Belange, bspw. optischer Ansprüche.

Da die Halle zu musikalischen Darbietungen, sprachlichen Vorträgen, Ausstellungen und Gruppenevents jeweils ggfs. auch mit elektroakustischen Anlagen genutzt werden sollen, bestehen sowohl Anforderungen an eine gute Sprachverständlichkeit als auch an einen ansprechenden musikalischen Raumklang.

Anhand raumakustischer Simulationen soll ein variables raumakustisches Maßnahmenkonzept zur Realisierung möglichst optimaler Raumklänge für die unterschiedlichen Raumnutzungen entwickelt werden. Die Bewertung erfolgt anhand verschiedener raumakustischer Größen bspw. Nachhallzeit, Klarheitsmaß, Deutlichkeitsmaß, Speech Transmission Index, Pegelverteilung im Raum.

Die Maßnahmen an der Decke sind so zu gestalten, dass die Optik der Gewölbedecke möglichst ungestört bleibt.

3 Grundlagen der Raumakustik

E. Skudrzyk ([33], S. 654 f.) schlägt in seinem Werk „Grundlagen der Akustik“ vor, die Raumakustik als Handwerk oder als Kunst zu verstehen: „...als Handwerk, weil sie die elementaren und unerläßlichen (sic!) Bedingungen für eine gute Hörsamkeit schafft; als Kunst, weil ein tieferes Eingehen auf die Eigenarten von Sprache, Musik und Ohr es ermöglicht, außergewöhnliche Wirkungen herauszuarbeiten... ([33], S. 654 f.)“.

Ebenso wenig wie „perfekte“ Kunst lässt sich eine „perfekte“ Raumakustik schaffen, da die Beurteilung des Klanges im Raum zuallererst subjektiv durch den Hörer erfolgt und die Wahrnehmung von Hörer zu Hörer unterschiedlich ist. Bis zu einem gewissen Grad lässt sich jedoch durch akustische Gestaltung des Raumes mit dem Handwerkszeug der Wissenschaft ein möglichst angenehmer bzw. nutzungsoptimierter Raumklang für ein möglichst breites Publikum anstreben.

Das beschriebene Handwerk bzw. die beschriebene Kunst bedienen sich hierbei der Kenntnis über die Schallfelder, sowie den Einfluss der Raumbegrenzungsflächen und der Raumgeometrie auf deren Ausprägung.

3.1 Schallfelder in Räumen

Das Schallfeld in geschlossenen Räumen ist maßgeblich beeinflusst durch Reflexionen an Begrenzungsflächen des Raums und den durch die Welleneigenschaften des Schalls beeinflussten Überlagerungs- und Resonanzeffekten.

3.1.1 Reflexion und Absorption

Erfährt Schall einen Medienwechsel bspw. beim Auftreffen auf eine Wand, wird gem. H. Henn et al. ([19], S. 265 f.) beim Medienübergang ein Teil der auftreffenden Schallintensität I_ε reflektiert und ein Teil absorbiert. Unter der absorbierten Schallintensität I_α versteht man hierbei den Teil, der nicht in den Raum zurückgeworfen wird. Dieser setzt sich zusammen aus einem Anteil, der in der Wand in Wärme umgewandelt wird, der dissipativen Schallintensität I_δ und dem Anteil, der auf der Rückseite der Wand wieder austritt, der transmittierten Schallintensität I_τ .

Die Summe der absorbierten Schallintensitäten I_δ , I_τ und dem reflektierten Anteil I_ρ entspricht der einfallenden Schallintensität I_ε ([19], S. 266):

$$\frac{I_\delta}{I_\varepsilon} + \frac{I_\tau}{I_\varepsilon} + \frac{I_\rho}{I_\varepsilon} = \frac{I_\alpha}{I_\varepsilon} + \frac{I_\rho}{I_\varepsilon} = 1 \quad (1)$$

Die Verhältnisse der resultierenden Komponenten zur einfallenden Schallintensität bilden hierbei den Absorptionsgrad α , den Dissipationsgrad δ , den Transmissionsgrad τ und den Reflexionsgrad ρ ([19], S. 266):

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{I_\delta}{I_\varepsilon} \\ \tau &= \frac{I_\tau}{I_\varepsilon} \\ \rho &= \frac{I_\rho}{I_\varepsilon} \\ \alpha &= \frac{I_\alpha}{I_\varepsilon} = \delta + \tau\end{aligned}\tag{2}$$

Der Reflexionsfaktor r der das Verhältnis des Schalldrucks der reflektierten Welle zur einfallenden Welle beschreibt steht mit dem Schallabsorptionsgrad α in folgender rechnerischen Beziehung ([19], S. 268):

$$\alpha = 1 - r^2\tag{3}$$

Bei schrägem Schalleinfall ist der Reflexionsfaktor r abhängig vom Einfallswinkel ϑ , sowie der Schallgeschwindigkeit c im reflektierenden Medium und der Schallimpedanz Z des reflektierenden Mediums ([25], S. 66):

$$r(\vartheta) = \frac{Z \cos \vartheta - \rho_0 c_0 \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_0} \sin \vartheta\right)^2}}{Z \cos \vartheta + \rho_0 c_0 \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_0} \sin \vartheta\right)^2}}\tag{4}$$

Aus Gl. (3) und Gl. (4) ergibt sich ein winkelabhängiger Schallabsorptionsgrad.

3.1.2 Wellentheoretische Raumakustik

Gem. Henn et al. ([19], S. 260 f.) ist eine exakte wellentheoretische Bestimmung des akustischen Feldes in geschlossenen Räumen weder möglich noch notwendig. Aus der Wellengleichung des Geschwindigkeitspotenzials lassen sich jedoch Eigenwerte bestimmen, die abhängig von der Raumgeometrie sind und die Eigenfrequenzen des Raumes darstellen.

Für quaderförmige Räume mit den Abmessungen l_x, l_y, l_z wird folgende Lösung angegeben ([19], S. 261):

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (5)$$

$$n_x = 1, 2, 3 \dots$$

$$n_y = 1, 2, 3 \dots$$

$$n_z = 1, 2, 3 \dots$$

Die Raummoden sind in raumakustischen Betrachtungen vornehmlich im tieffrequenten Bereich von Relevanz, da in höheren Frequenzen von einem diffusen Schallfeld ausgegangen wird ([19], S. 260 ff.).

Als Grenze zwischen dem diffusen und dem modal geprägten Schallfeld wird die Schröderfrequenz $f_{Schröder}$ betrachtet ([9], S. 26):

$$f_{Schröder} = 2000 \text{ Hz} \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (6)$$

3.1.3 Geometrische Raumakustik

Die Welleneigenschaften des Schalls werden bei der geometrischen Betrachtungsweise der Raumakustik nicht weiter betrachtet.

Stattdessen wird laut H. Kuttruff ([22], S. 598 ff.) der von der Schallquelle abgestrahlte Schall in Form von geraden Energiestrahlen abgebildet, die von Begrenzungsflächen reflektiert werden und deren Intensität proportional zum Quadrat des Abstands zur Schallquelle abnimmt. Bei Überlagerung wird von einer zeitlichen und räumlichen Inkohärenz der aufeinandertreffenden Schallstrahlen ausgegangen. Somit können sich überlagernden Signale, der Reflexionen und des Direktschalls energetisch addiert werden. Die Inkohärenz wird mit üblicherweise nur kurzweilig konstanten und sehr breitbandigen Spektren der auftretenden Schallsignale in Räumen und mit den unterschiedlichen Laufwegen der Schallsignale begründet. Eine sinnvolle Betrachtung ist hierbei auf Wellenlängen begrenzt, die klein gegenüber den vorliegenden Raum- und Bauteildimensionen sind ([22], S. 598 ff.).

Trifft Schall auf eine schallharte Begrenzungsfläche so wird gem. H. Kuttruff ([22], S. 598 ff.) der nicht absorbierte Anteil spiegelbildlich zur Normalen der Begrenzungsfläche reflektiert. Der Einfallswinkel ϑ ist also gleich dem Ausfallswinkel ϑ' :

$$\vartheta = \vartheta' \quad (7)$$

Der reflektierte Anteil wird somit scheinbar nicht von der ursprünglichen Schallquelle Q, sondern von einer an der reflektierenden Fläche gespiegelten Schallquelle Q' abgestrahlt. Wird der reflektierte Anteil erneut an einer zweiten Begrenzungsfläche reflektiert, lässt sich diese Reflexion erneut einer Spiegelschallquelle Q'' zuordnen, hierbei spricht man von einer Spiegelschallquelle 2. Ordnung. Bei Betrachtung der Reflexionen bis zur k-ten Ordnung lässt sich die Anzahl n_k der Spiegelschallquellen für einen Raum mit N ebenen Wänden berechnen ([22], S. 599):

$$n_k \approx N \frac{(N-1)^k}{N-2} \quad (8)$$

Bei entsprechend vielen und regelmäßig im Raum verteilten Reflexionen wird von einer statistischen Gleichverteilung der Schallenergie im Raum ausgegangen. Dieser Grundgedanke liegt ebenfalls der statistischen Raumakustik zugrunde.

3.1.4 Statistische Raumakustik

Im Gegensatz zur geometrischen Raumakustik werden die Ausbreitungswege der Schallwellen in der statistischen Raumakustik nicht betrachtet. Gem. R. Lerch et al. ([25], S. 226) wird von einem diffusen Schallfeld ausgegangen, welches sich durch eine räumlich konstante Energiedichte auszeichnet.

M. Möser ([28], S. 232 ff.) zieht für einen Raum mit diffusem Schallfeld das Analogon eines undichten Behälters, der mit Wasser gefüllt wird, heran:

„Wie die Wasserzuleitung beim Gefäß füllt der Schallsender nach dem Einschalten den Raum allmählich mit Schallenergie, bis ein gewisser Gleichgewichtszustand erreicht ist. Der dann eingependelte Pegel (Flüssigkeits- oder eben Schallpegel) erklärt sich durch den Ausgleich zwischen Zufluss und dem Abfluss durch die Undichtigkeiten, die dem Energieentzug durch Absorption entsprechen. Schaltet man die Quelle nach Erreichen des stationären, eingeschwungenen Zustandes wieder ab, so sinkt der Pegel wieder, die Flüssigkeit bzw. die Schallenergie fließt ab ([28], S. 232)“.

Mit der statistischen Raumakustik lassen sich frequenzabhängig der sich einstellende Schalldruckpegel bei laufender Schallquelle und die Zeit, in der sich das Schallfeld nach Abschalten der Schallquelle abbaut, bestimmen.

Maßgeblich für die statistische Raumakustik ist die Kenntnis des akustischen Absorptionsvermögens im Raum, welches durch die Beschaffenheit und Materialität der begrenzenden Flächen und Einrichtung bestimmt ist ([28], S. 232 ff.).

3.2 Schallabsorber

Schallabsorber können entsprechend ihrer Funktionsweise gruppiert werden:

- Poröse Absorber
- Resonanzabsorber
- Interferenzabsorber

Im Weiteren wird auf die Funktionsweise der für diese Arbeit relevanten Absorptionsmechanismen eingegangen.

3.2.1 Poröse Absorber

In porösen Absorber wird Schallenergie durch Reibung der schwingenden Luftmoleküle an der Struktur des Absorbermaterials in Wärme umgewandelt. Kennzeichnend für das Absorptionsvermögen eines porösen Materials ist u.a. der spezifische Strömungswiderstand R_S . Bei geringem Strömungswiderstand kann der Luftstrom den Stoff mit geringen Reibungsverlusten passieren, wohingegen bei hohem Strömungswiderstand der Schall reflektiert wird ([11], S. 233 ff.).

Die größte absorbierende Wirkung erreicht ein Dämmstoff, wenn das Schnelleximum \hat{v} innerhalb des Absorbers liegt. Bei Reflexion einer Welle von einer schallharten Wand hinter dem Dämmstoff, ist das Schnelleximum \hat{v} in einem Abstand $x = \lambda/4$ vor der Wand zu verorten. Um bei sinkenden Frequenzen eine hohe absorbierende Wirkung zu erreichen, sind somit steigende Dämmstärken d oder hohe Abstände Δx des Absorbers zur Wand erforderlich ([28], S. 204).

Poröse Absorber stellen Absorber mit ungünstigen Absorptionseigenschaften im tieffrequenten Bereich dar, bzw. sind für eine gute Wirksamkeit im tieffrequenten Bereich sehr hohe Aufbaustärken erforderlich.

3.2.2 Resonatoren

Vergleichsweise schmalbandige Absorber, die sich auf tiefe Frequenzbereiche abstimmen lassen, können durch Resonatoren realisiert werden.

Plattenresonatoren

Plattenresonatoren funktionieren auf dem Prinzip, dass schwingfähige Massen in Form von Platten oder Folien im Resonanzfall angeregt werden, wodurch dem Schallfeld im Resonanzbereich Energie entzogen wird. Hierbei wird eine geschlossene Platte vor einer Luftschicht und einem Schallabsorber angeordnet. Eine solche Anordnung weist eine recht schmalbandige Wirksamkeit auf und ist somit geeignet gezielt einzelne Frequenzbänder zu dämpfen ([17] S. 41 f.).

Eine Weiterentwicklung der sehr schmalbandig wirksamen Plattenresonatoren stellen Verbundplattenresonatoren dar. Hierbei wird eine elastische Schicht zwischen zwei möglichst frei schwingbaren Platten vorgesehen, wobei die zweite Platte das Luftpolster des herkömmlichen Plattenresonators ersetzt. Diese Konstruktion ermöglicht eine vielseitigere Anregung der Platten als ein herkömmlicher Plattenresonator und damit ein breiteres Absorptionsspektrum und schlankere Konstruktionen ([17] S. 50 ff.).

Breiband-Kompakt-Absorber

Der Breitband-Kompakt-Absorber stellt konstruktiv eine Weiterentwicklung des Verbundplattenresonators dar, wobei raumseitig vor die schwingfähige Platte eine weitere poröse Absorptionsschicht vorgesehen wird. Hierdurch werden neben den tiefen Frequenzen auch mittlere bis hohe Frequenzen absorbiert, wodurch eine sehr breitbandige Absorption erreicht werden kann ([17], S. 130).

Schlitzabsorber

Der grundsätzliche Aufbau eines Schlitzabsorbers besteht aus einer geschlitzten Platte der Stärke t mit einem dahinterliegenden Luftvolumen V , das zur Verbesserung der absorbierenden Eigenschaften mit porösen Schallschluckstoffen ausgekleidet werden kann.

Schlitzabsorber nutzen das Prinzip, dass die flächenbezogene Luftmasse m' in den Schlitzten zum Schwingen angeregt wird und dem Schallfeld durch diese Schwingung Energie entzogen wird. Der Schall wird durch die Schlitzte in den dahinter liegenden Absorber gebeugt, wodurch die absorbierende Eigenschaft frequenzselektiv erhöht wird ([17], S. 66 ff.).

Durch eine geeignete Wahl der Schlitzbreite und den Schlitzabstand, sowie der Materialien sind somit die wirksamen Frequenzbereiche und die wirksame Bandbreite einstellbar.

4 Bewertungsgrößen der Raumakustik

Bei der Beschreibung der raumakustischen Eigenschaften werden verschiedene Kennwerte zur Objektivierung und Quantifizierung verschiedener, je nach Planungsziel gewünschter Kriterien wie z.B. einer guten Sprachverständlichkeit angewandt. In diesem Kapitel werden die in dieser Arbeit verwendeten raumakustischen Größen beschrieben.

4.1 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit T_{60} beschreibt die Zeit, in der der Schalldruckpegel L_p nach Abschalten der Schallquelle um 60 dB abklingt ([2], S. 8).

Die Nachhallzeit kann rechnerisch abhängig vom Raumvolumen V , der Raumbofläche S_{ges} , des mittleren schallabsorptionsgrades $\bar{\alpha}$ und der Energiedämpfungs-konstante für Luft m ermittelt werden ([11], S. 190):

$$T_{60} = 0,163 \frac{V}{-\ln(1 - \bar{\alpha}) S_{ges} + 4 m V} \quad (9)$$

Die Energiedämpfungs-konstante für Luft m kann laut DEGA Empfehlung 101 [12] mit einem Umrechnungsfaktor 4,35 aus dem frequenzabhängigen Dämpfungskoeffizienten für Luft α_L berechnet werden ([12], S. 60):

$$m = \frac{\alpha_L}{4,35} \quad (10)$$

Die Tabelle 1 der ISO 9613-1 [8] liefert umfangreiche Angaben für die Dämpfungskoeffizienten für Luft α_L bei verschiedenen Lufttemperaturen und Luftfeuchtigkeiten.

Die Nachhallzeit hat starken Einfluss auf die Hörsamkeit in Räumen. Länger verzögerte Reflexionen wirken sich ungünstig auf die Sprachverständlichkeit bei Kommunikation über größere Distanzen aus. Bei verbal kommunikativen Nutzungen soll der Raumklang durch Direktschall und kurzverzögerte Reflexionen geprägt sein, somit ist eine geringe Nachhallzeit anzustreben. Für musikalische Darbietungen hingegen ist ein längerer Nachhall anzustreben. DIN 18041 bietet Soll-Werte für die Nachhallzeit T_{Soll} bei verschiedenen Nutzungsarten (S. [2], S. 12). Diese können bei Mehrzweckhallen bis zu Raumvolumina $V \leq \text{ca. } 30000 \text{ m}^3$ angewandt werden (S. [2], S. 5).

Die Ausstellungshalle lässt sich aufgrund der geplanten Nutzungen gem. Tabelle 1 der DIN 18041 [2] folgenden Raumgruppen zuordnen:

- Raumgruppe A1 „Musik“
- Raumgruppe A2 „Sprache/Vortrag“
- Raumgruppe A3 „Sprache/Vortrag inklusiv“

Bei der Raumgruppe A3 wird eine Inklusion bspw. von Leuten mit eingeschränktem Hörvermögen und Leuten mit Sprachbarrieren bei Nutzungen mit sprachlicher Darbietung angestrebt. Folgende Nachhallzeiten sind für die o.g. Raumgruppen gem. DIN anzustreben ([2], S. 12):

$$\begin{aligned}
 T_{Soll,A1} &= \left(0,45 \lg \frac{V}{\text{m}^3} + 0,07\right) \text{s} \\
 T_{Soll,A2} &= \left(0,37 \lg \frac{V}{\text{m}^3} - 0,14\right) \text{s} \\
 T_{Soll,A3} &= \left(0,32 \lg \frac{V}{\text{m}^3} - 0,17\right) \text{s}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

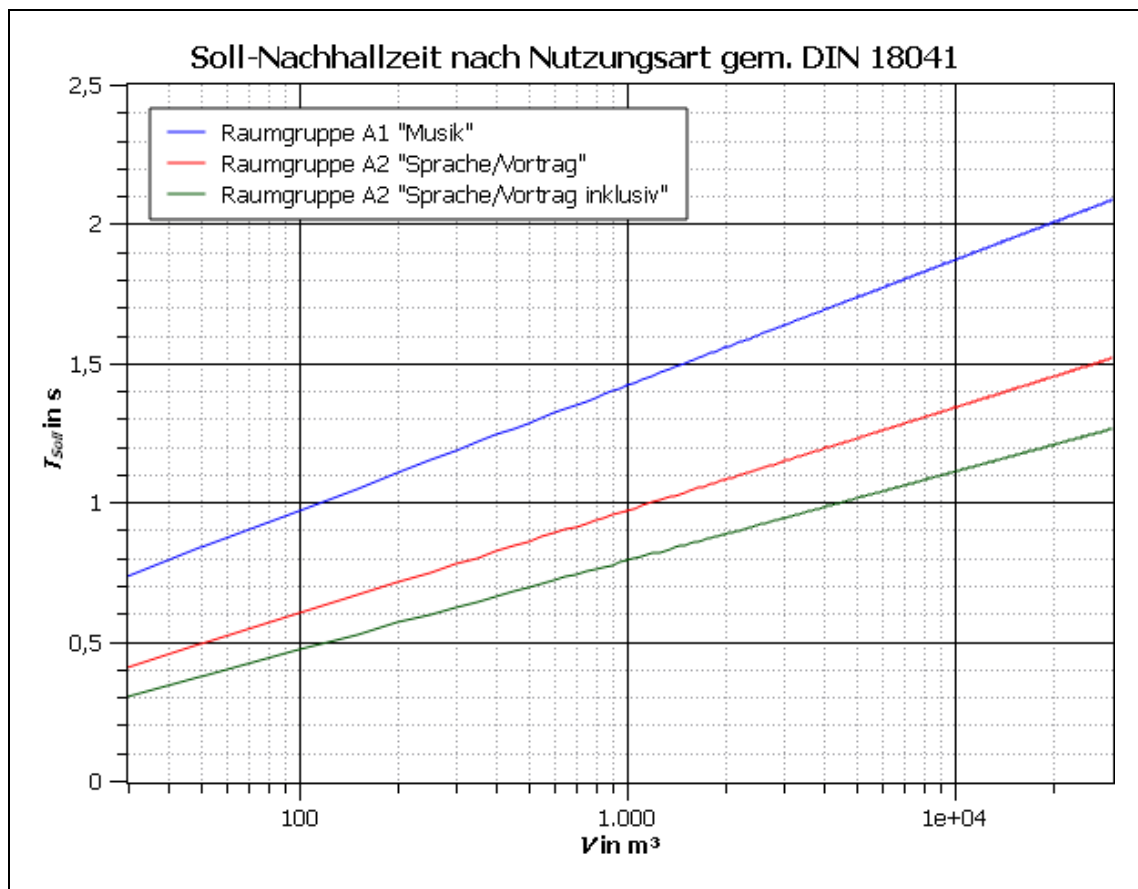


Abbildung 1: Soll-Nachhallzeit RG A1, A2 und A3 gem. DIN 18041 [2]

Die Nachhallzeit ist eine frequenzabhängige Größe. Gem. DIN 18041 gelten für die Einhaltung der geforderten Nachhallzeiten T_{Soll} folgende Toleranzbereiche ([2], S. 14):

Oktavmittelfrequenz in Hz	Obere Toleranzgrenze	Untere Toleranzgrenze
63 Hz	$1,70 T_{Soll}$	$0,50 T_{Soll}$
125 Hz	$1,45 T_{Soll}$	$0,65 T_{Soll}$
250 Hz	$1,20 T_{Soll}$	$0,80 T_{Soll}$
500 Hz	$1,20 T_{Soll}$	$0,80 T_{Soll}$
1000 Hz	$1,20 T_{Soll}$	$0,80 T_{Soll}$
2000 Hz	$1,20 T_{Soll}$	$0,80 T_{Soll}$
4000 Hz	$1,20 T_{Soll}$	$0,65 T_{Soll}$
8000 Hz	$1,20 T_{Soll}$	$0,50 T_{Soll}$

Tabelle 1: Toleranzgrenzen der Soll-Nachhallzeit gem. DIN 18041 [2]

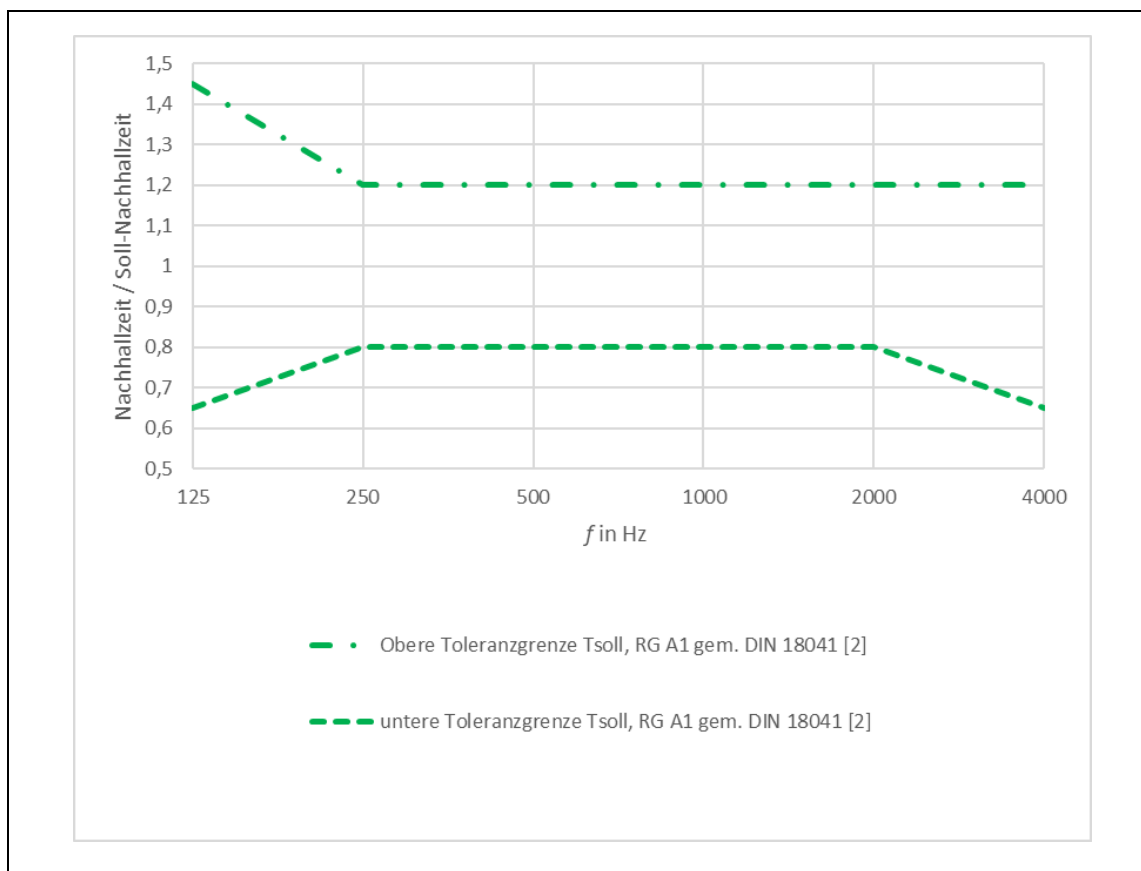


Abbildung 2: Toleranzbereich der Nachhallzeit gem. DIN 18041 [2]

Die Messung der Nachhallzeit T_{60} erfolgt im Bereich -5 dB bis -65 dB bzw. -5 dB bis -35 dB wobei beim letztgenannten Verfahren die gemessene Zeit mit dem Faktor 2 zu multiplizieren ist, das Ergebnis wird mit T_{30} bezeichnet.

4.2 Anfangsnachhallzeit

Die Anfangsnachhallzeit (Early Decay Time *EDT*) beschreibt gem. W. Ahnert und H.-P. Tennhardt ([11], S. 188) ebenso wie die Nachhallzeit T_{60} die Abklingzeit des Schallfeldes um 60 dB nach Abschalten der Schallquelle. Diese wird bei Messungen im Bereich der Abnahme des Schalldruckpegels zwischen 0 und -10 dB bestimmt und zur Vergleichbarkeit der Anfangsnachhallzeit mit der Nachhallzeit T_{60} mit dem Faktor 6 multipliziert.

Gem. W. Ahnert und H.-P. Tennhardt ([11], S. 188) wird die Anfangsnachhallzeit bestimmt, da diese sich besser mit der subjektiv wahrgenommenen Nachhallzeit deckt.

Die Ursache hierfür liegt darin, dass der bei T_{30} und T_{60} gemessene Pegelabfall meist außerhalb der menschlichen Wahrnehmung liegt. Für musikalische Darbietung erweist es sich nach W. Fasold und E. Verres als positiv, wenn die frühe Nachhallzeit über der Nachhallzeit T_{30} bzw. T_{60} liegt ([15], S. 141).

4.3 Bass-Verhältnis

Das Bassverhältnis BR ist definiert als das Verhältnis der Summe der Nachhallzeiten bei 250 Hz und 125 Hz zur Summe der Nahhallzeiten bei 500 Hz und 1000 Hz und stellt eine Größe für die Klangfarbe des Nachhalls dar ([11], S. 191):

$$BR = \frac{T_{125 \text{ Hz}} + T_{250 \text{ Hz}}}{T_{500 \text{ Hz}} + T_{1000 \text{ Hz}}} \quad (12)$$

W. Ahnert und H.-P. Tennhardt ([11], S. 191) geben für die sprachlichen und musikalischen Nutzungen folgende Zielbereiche des Bassverhältnisses an:

- Musik: $BR = 1,0$ bis $1,3$
- Sprache: $BR = 0,9$ bis $1,0$

H.V. Fuchs ([18], S. 34 ff.) beschreibt, dass bei größeren Räumen ein Bass-Verhältnis $BR > 1$ nicht zwingend ein Gütekriterium darstellt, da bei Überlagerungen in tiefen Frequenzen destruktive Interferenzen auftreten können, was sich ungünstig auf den Höreindruck im Bassbereich auswirkt. Um dem entgegenzuwirken ist eine stärkere Dämpfung des Raumes im tieffrequenten Bereich mit einem Bass-Verhältnis $BR < 1$ förderlich. In dem Zusammenhang wird eine alternative Definition des Bass-

Verhältnisses beschrieben, die von Musikern und Toningenieuren ein sinnvolles Qualitätskriterium darstellt ([18], S. 36):

$$BR = \frac{3}{2} \frac{T_{63 \text{ Hz}} + T_{125 \text{ Hz}}}{T_{500 \text{ Hz}} + T_{1000 \text{ Hz}} + T_{2000 \text{ Hz}}} \quad (13)$$

Hierbei geht zusätzlich die Nachhallzeit der 63 Hz-Oktave ein.

Da die Prognoseberechnung mittels geometrisch-raumakustischen Methoden in tiefen Frequenzen unsicherheitsbehaftet ist und im Frequenzbereich 63 Hz für die meisten verwendeten Materialien keine Daten vorliegen, ist diese Definition des Bass-Verhältnisses mit den in dieser Arbeit verwendeten Methoden schwer zu beurteilen, zumal die geometrische Simulation mit dem verwendeten Tool EASE AURA keine Daten unterhalb der 125 Hz-Oktave berücksichtigt. Eine Abschätzung bei 63 Hz kann somit nur statistisch vorgenommen werden, wobei gerade hier die statistische Methode, ebenso wie die geometrische Methode mangels eines Diffusfeldes auf ihre Grenzen stößt.

4.4 Pegelverteilung

Als wesentlich für die subjektive Beurteilung des Raumklanges wird in der Literatur die Pegelverteilung im Raum beschrieben.

H.V. Fuchs ([16], S. 184) beschreibt eine maximale Pegeldifferenz zwischen Zuschauerplätzen $\Delta L = 5$ dB als einen gut zu wertenden Bereich.

Als Bemessungsgröße für die Pegelverteilung kann auch das Stärkemaß G herangezogen werden, das den am Empfangsort im Raum erreichten Schalldruckpegel L_x in Verhältnis zu dem Schalldruckpegel setzt, der sich in einem Abstand $x_0 = 10$ m von der gleichen Quelle mit einem Schalleistungspegel L_W und Kugelcharakteristik im Freifeld ergeben würde ([16], S. 184):

$$G = L_x - L_W + 20 \log x_0 + 11 \text{ dB} \quad (14)$$

In sehr gut bewerteten Konzertsälen liegt gem. H.V. Fuchs ([16], S. 185) das Stärkemaß in den Frequenzbereichen 500 Hz und 1000 Hz in einem Abstand von 10 m bei $G = 4$ dB bis 6 dB.

Gem. DIN EN ISO 3382-1, Tabelle A.2 [3] stellt ein über die Oktavbänder 500 Hz bis 1000 Hz arithmetisch gemitteltes Stärkemaß $G = -2$ dB bis $+10$ dB einen für unbesetzte Aufführungsräume üblichen Bereich dar.

W. Fasold und E. Ferres ([15], Tabelle 4.18) beschreiben einen optimalen Bereich für das Stärkemaß $G = +1$ dB bis $+10$ dB.

4.5 Impulsantwort des Raumes

Durch kurzzeitige Anregung des Raumes und der ortsabhängigen Messung bzw. Berechnung der Reflexionen durch den Raum, der Impulsantwort, können zahlreiche Beurteilungsgrößen der Raumakustik ermittelt werden ([9], S. 20 ff.).

4.5.1 Schwerpunktzeit

Als Maß für den Raumeindruck und die Durchsichtigkeit von musikalischen und sprachlichen Darbietungen kann die Schwerpunktzeit t_s herangezogen werden. Sie ist definiert als die Summe der Produkte der Energien E_i der an einem Messplatz eintreffenden Reflexionen mit den entsprechenden Verzögerungszeiten t_i , bezogen auf die gesamte eintreffende Schallenergie E_{ges} ([9], S. 45):

$$t_s = \frac{\sum_i t_i E_i}{E_{ges}} = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (15)$$

Eine hohe Schwerpunktzeit liefert einen hohen räumlichen Eindruck. Folgende Zielwerte für die Schwerpunktzeit werden von W. Ahnert, S. Feistel ([9], S. 45) genannt:

- Musik: $t_s = 70$ ms bis 150 ms bei 1000 Hz
- Sprache: $t_s = 60$ ms bis 80 ms bei 500 Hz bis 4000 Hz

W. Fasold und E. Ferres ([15], Tabelle 4.18) geben leicht abweichende Zielbereiche an:

- Musik: $t_s = 100$ ms bis 150 ms
- Sprache: $t_s < 80$ ms

Gem. DIN EN ISO 3382-1, Tabelle A.2 [3] stellt eine über die Oktavbänder 500 Hz bis 1000 Hz arithmetisch gemittelte Schwerpunktzeit $t_s = 60$ ms bis 260 ms einen für unbesetzte Aufführungsräume üblichen Bereich dar.

4.5.2 Echokriterium

Ein Echo wird wahrgenommen, wenn einzelne starke Reflexionen in einem Zeitraum $\Delta t > 50$ ms nach dem Direktschall beim Zuhörer eintreffen. Zur Erkennung von Echos, kann das Echo-Kriterium EK herangezogen werden, welches aus der Aufbaufunktion der Schwerpunktzeit gebildet wird ([9], S. 45 f.):

$$t_s(\tau) = \frac{\int_0^\tau |p(t)|^n t dt}{\int_0^\tau |p(t)|^n dt} \quad (16)$$

$$EK(\tau) = \frac{\Delta t_s(\tau)}{\Delta \tau}$$

Für den Exponent n und der Zeitkonstante $\Delta \tau$ werden bei musikalischer Nutzung und sprachlicher Nutzung folgende Werte berücksichtigt ([9], S. 46):

- Musik: $n = 1, \Delta \tau = 14$ ms
- Sprache: $n = 2/3, \Delta \tau = 9$ ms

Für Sprache und Musik werden folgende Grenzwerte des Echokriteriums von W. Ahnert und S. Feistel ([9], S. 46) beschrieben:

- Musik: $EK_{50\%} \geq 1,8, EK_{10\%} \geq 1,5$
- Sprache: $EK_{50\%} \geq 1,0, EK_{10\%} \geq 0,9$

Hierbei beschreiben die Werte $EK_{50\%}$ bzw. $EK_{10\%}$ die Schwelle ab der mindestens 50 % bzw. 10 % der Zuhörer ein Echo wahrnehmen ([9], S. 46).

4.5.3 Artikulationsverlust

Der Artikulationsverlust gesprochener Konsonanten AL_{cons} stellt gem. W. Ahnert und S. Feistel [9] ein Kriterium für die Sprachverständlichkeit in Räumen dar, die vom Hallradius r_H , dem Abstand des Hörers zur Schallquelle x und der Nachhallzeit T_{60} abhängt und welcher außerdem aus der Raumimpulsantwort durch Messung der eintreffenden Schallenergie E_{35} bis zu einer Verzögerungszeit $\Delta t = 35$ ms und der danach eintreffenden Restenergie $E_\infty - E_{35}$ ermittelt werden kann ([9], S. 43):

$$AL_{cons} \approx 52 \left(\frac{x}{r_H} \right)^2 T_{60} \% = 0,652 \left(\frac{E_\infty - E_{35}}{E_{35}} \right) T_{60} \% \quad (17)$$

Zur Bewertung geben W. Ahnert und S. Feistel ([9], S. 43) die in Tabelle 2 beschriebenen Kriterien an.

Verständlichkeit	AL_{cons}
gut	3...8 %
angemessen	8...11 %
schwach	>11 %
unbrauchbar	>20 %

Tabelle 2: Bewertung des Artikulationsverlustes [9]

4.5.4 Klarheitsmaß für Musik

Das Klarheitsmaß für Musik C_{80} kann als Größe zur Beschreibung der Unterscheidbarkeit aufeinander folgender Töne insbesondere bei schnellen Passagen herangezogen werden. Es wird mit Hilfe der Raumimpulsantwort bestimmt aus dem Verhältnis der am Messort innerhalb von 80 ms nach dem Direktschall eintreffenden Schallenergie E_{80} zur nachfolgend eintreffenden Schallenergie $E_{\infty} - E_{80}$ ([16], S. S. 187):

$$C_{80} = 10 \log \left(\frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}} \right) \text{ dB} \quad (18)$$

Unter Annahme eines idealen diffusen Schallfeldes, kann das Klarheitsmaß in Abhängigkeit des Hallradius r_H , der Entfernung zur Schallquelle x und der Nachhallzeit T prognostiziert werden ([9], S. 46):

$$r_H = \sqrt{\frac{A}{16\pi}} \approx 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}} \quad (19)$$

$$C_{80} = 10 \log \frac{\left(\frac{r_H}{x}\right)^2 + 1 - e^{-\frac{1,1}{T}}}{e^{-\frac{1,1}{T}}} \text{ dB} \quad (20)$$

Gem. W. Ahnert und S. Feistl ([9], S. 46) liegt der optimale Zielbereich für das Klarheitsmaß für Musik bei $C_{80} = -3$ dB bis $+4$ dB.

W. Fasold und E. Ferrer ([15], Tabelle 4.18) schränken den Optimumsbereich weiter auf $C_{80} = -1$ dB bis $+3$ dB ein.

H. V. Fuchs ([16], S. 187) beschreibt ein Klarheitsmaß für Musik bei $C_{80} = -5$ dB für weiter entfernte Plätze in Konzertsälen als tolerierbar.

Gem. DIN EN ISO 3382-1, Tabelle A.2 [3] stellt ein über die Oktavbänder 500 Hz bis 1000 Hz arithmetisch gemittelt Klarheitsmaß für Musik $C_{80} = -5$ dB bis $+5$ dB einen für unbesetzte Aufführungsräume üblichen Bereich dar.

4.5.5 Deutlichkeitsmaß für Sprache

Das Deutlichkeitsmaß für Sprache und stark akzentuierte Musik entspricht dem Klarheitsmaß für Musik, bezogen auf eine Verzögerungszeit 50 ms statt auf 80 ms ([16], S. 187):

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}} \right) \text{ dB} \quad (21)$$

Als Zielwert nennt H.V. Fuchs ([16], S. 187) ein Deutlichkeitsmaß $C_{50} \geq 0$ dB. Der relevante Frequenzbereich liegt hierbei zwischen 500 und 4000 Hz.

Gem. DIN EN ISO 3382-1, Tabelle A.2 [3] stellt ein über die Oktavbänder 500 Hz und 1000 Hz arithmetisch gemittelt Deutlichkeitsmaß für Sprache $C_{50} = -3,7$ dB bis $+3,7$ dB einen für unbesetzte Aufführungsräume üblichen Bereich dar.

4.5.6 Sprach-Übertragungsindex (STI)

Störgeräusche, fremde Signale und Signalveränderungen, die sich mit dem direkten Sprechschall überlagern, wirken sich negativ auf die Sprachverständlichkeit aus. Zur Beurteilung der Störeinflüsse, wird der Modulationsfaktor $m(F)$ für 14 Modulationsfrequenzen F in Terzen zwischen 0,63 Hz und 12,5 Hz herangezogen, bei dem die Nachhallzeit T , das Signal-Rauschverhältnis S/N , sowie die Modulationsfrequenz F eingehen ([11], S. 194):

$$m(F) = \frac{1}{\left(1 + 10^{-\frac{S/N}{10} \text{ dB}}\right) \sqrt{1 + \left(2\pi F \frac{T_{60}}{13,8}\right)^2}} \quad (22)$$

Durch Aufteilung der Modulationsübertragungsfunktion in 7 Frequenzbänder ergeben sich Modulationsreduktionsfaktoren m_i , aus welchen das wirksame Signal-Stör-Verhältnis X_i berechnet werden kann ([11], S. 194):

$$X_i = 10 \log \frac{m_i}{1 - m_i} \text{ dB} \quad (23)$$

Aus den gemittelten und in Oktaven getrennten Signal-Stör-Verhältnissen $X_{average}$ ergeben sich die Modulations Transfer Indizes MTI ([11], S. 194):

$$MTI = \frac{X_{average} + 15}{30} \quad (24)$$

Zur Ermittlung des STI werden die MTI frequenzabhängig mit Gewichtungsfaktoren a_i und b_i bewertet ([24], S. 271):

$$STI = \sum_1^7 a_i MTI_i \sum_1^6 b_i \sqrt{MTI_i MTI_{i+1}} \quad (25)$$

Zur Bewertung der Silbenverständlichkeit werden gem. DIN EN ISO 9921 [7] die in Tabelle 3 dargestellten STI -Werte angegeben.

Silbenverständlichkeit	STI-Wert
schlecht	0...0,3
schwach	0,3...0,45
angemessen	0,45...0,6
gut	0,6...0,75
ausgezeichnet	0,75...1,0

Tabelle 3: STI -Bewertung nach DIN EN ISO 9921 [7]

4.5.7 Seitenschallgrad und Seitenschallmaß

Zur Quantifizierung der Räumlichkeit bzw. der wahrgenommenen Einhüllung durch den Schall kann als physikalische Größe der Seitenschallgrad LF als Verhältnis der durch Reflexionen am Empfangsort seitlich im Zeitraum von 5 ms bis 80 ms eintreffenden Schallenergie $E_{80Bi} - E_{5Bi}$ zur gesamten beim Empfänger im Zeitraum von 0 ms bis 80 ms eintreffenden Schallenergie E_{80} ermittelt werden ([11], S. 204):

$$LF = \frac{E_{80Bi} - E_{5Bi}}{E_{80}} \quad (26)$$

Gem. W. Ahnert und S. Feistel ([11], S. 204) sollen Werte zwischen 10 % und 25 % angestrebt werden.

Üblich ist es auch den Seitenschallgrad logarithmisch als Seitenschallmaß S_S anzugeben [16]:

$$S_S = 10 \log LF \quad (27)$$

Nach H.V. Fuchs ([17], S. 157 f.) liegt der optimale Wert für Konzertsäle zwischen -4 und -6 dB, während der anzustrebend Zielbereich von W. Fasold und E. Ferres ([15], Tabelle 4.18) auf -4 dB bis -7 dB erweitert wird.

Die Wirkung des Seitenschalls ist dabei frequenzabhängig und wird in Tabelle 4 beschrieben.

Frequenzbereich	Wirkung
125 Hz bis 500 Hz	Eingehülltsein
500 Hz bis 4000 Hz	Quellverbreiterung
ab 4000 Hz	Quellverschiebung

Tabelle 4: Frequenzabhängige Wirkung des Seitenschalls [9]

5 Simulationsmethoden der Raumakustik

In Simulationsprogrammen, bspw. EASE kann anhand von 3D-Modellen die Ausbreitung der Schallfelder in den zu untersuchenden Räumen simuliert werden. Die Programme bedienen sich hierbei verschiedener Methoden, die auf den Prinzipien der geometrischen Raumakustik basieren (vgl. Kapitel 3.1.3).

5.1 Spiegelquellenmethode

Bei der Spiegelquellenmethode wird die Schallausbreitung durch die Ermittlung aller Spiegelschallquellen bis zur i -ten Ordnung ermittelt (vgl. Kapitel 3.1.3). Aufgrund sehr hoher Rechenzeiten ist üblicherweise die maximale Anzahl der Begrenzungsflächen auf $N < 50$ und die Ordnung der Reflexionen auf $i < 6$ begrenzt ([11], S. 244 f).

5.2 Strahlverfolgung

Eine Methode mit geringerem Rechenaufwand stellt die Strahlverfolgung (Ray tracing) dar. Hierbei werden durch Strahlenverfolgung zunächst die für bestimmte Empfangsorte relevanten Spiegelschallquellen ermittelt, um weitere Spiegelschallquellen, die keinen Einfluss auf die ausgewählten Empfangsort haben, auszuschließen und die Rechenzeit so zu verkürzen ([11], S. 245).

Bei Unterschreitung eines bestimmten Pegelwerts oder Eintreffen des Strahls im Empfangsbereich, der sich in Form eines Kugelvolumens darstellt, wird die Strahlenverfolgung beendet. Im Anschluss kann die Impulsantwort an den Empfangsorten unter Ausschluss der für den Empfangsort irrelevanten Spiegelschallquellen berechnet werden ([11], S. 245).

Mit der Funktion „Ray Tracing“ lassen sich im Programm EASE außerdem Reflexionsmuster berechnen und darstellen.

5.3 AURA

Das Berechnungsmodul AURA für das Simulationsprogramm EASE 4.4 [9] ermöglicht es gem. [13] auf Basis der Strahlenverfolgung die Raumimpulsantwort zu simulieren und hieraus verschiedene raumakustische Kenngrößen zu berechnen und deren Ausprägung und Verteilung im Raum darzustellen ([13], S. 228).

Dabei kann die Auflösung gewählt werden, welche die Anzahl der Punkte im betrachteten Empfangsbereich vorgibt, für welche die Raumimpulsantwort berechnet wird. Die Auflösung korreliert jedoch sehr stark mit der nötigen Berechnungszeit, es ist somit ein Kompromiss zwischen einer ausreichend genauen Auflösung und der Berechnungsdauer zu finden ([13], S. 232).

Die Berechnung kann außerdem für einzelne definierte Empfangsorte durchgeführt werden. Diese werden durch Zuhörerplätze symbolisiert.

Des Weiteren kann die Anzahl der betrachteten Strahlen „particles“ eingestellt werden, wobei mit einer höheren Anzahl neben dem Anstieg der Genauigkeit auch ein deutlicher Anstieg der Berechnungsdauer die Folge ist. Ebenso wie bei der Auflösung ist ein Kompromiss aus ausreichender Genauigkeit und Berechnungsdauer zu finden ([13], S. 232).

Die Berechnungsdauer wird außerdem durch die Länge des Zeitfensters, in dem die Impulsantworten berechnet werden, beeinflusst. Hierbei sollte mindestens ein Zeitfenster von $2/3$ der erwarteten Nachhallzeit umfasst werden ([13], S. 232).

Für die Schallausbreitungssimulation besteht die Möglichkeit zwischen dem Verfahren „Energy Loss“ und „Particle Loss“ zu wählen. Beim Verfahren „Energy Loss“ wird die Strahlenenergie bei jeder Reflexion um den Faktor $(1 - \alpha)$ verringert. Der Algorithmus von „Particle Loss“ vergleicht bei jeder Reflexion eine Zufallszahl mit dem Schallabsorptionsgrad der reflektierenden Fläche. Je nachdem wie der Vergleich ausfällt, wird der Strahl weiterverfolgt oder nicht ([13], S. 233 f.).

Das Prinzip „Energy Loss“ stellt das genauere Verfahren dar, benötigt jedoch eine höhere Berechnungszeit. Das Verfahren „Particle Loss“ sollte nur bei hohen Partikelanzahlen verwendet werden. ([13], S. 233 f.)

Die Simulationsmethode „diffuse Rain“ generiert bei Auftreffen eines Strahls auf einer Oberfläche neue zusätzliche Strahlen, deren Energiegehalt abhängig vom Absorptions- und Diffusionsgrad der reflektierenden Oberfläche ist. Bei dieser Methode sind deutlich geringere Anzahlen der Strahlen, ca. das 0,1-fache als ohne „diffuse Rain“ erforderlich. Dieser Algorithmus wird besonders für Räume mit hohen Nachhallzeiten, Räume mit teilabgeschirmten Bereichen und Nebenräume empfohlen ([13], S. 234).

6 Objektplanung und bautechnische Randbedingungen

Randbedingungen

Bei dem geplanten Raum handelt es sich um einen rechteckigen Raum mit den Maßen $a = 16,3 \text{ m}$, $b = 9,2 \text{ m}$. Das Dach aus Stahlbeton wird in Form von Tonnengewölben mit 4 halben Tonnen mit Radius $r = 1,28 \text{ m}$ und 2 Vierteltonnen mit dem gleichen Radius am östlichen und am westlichen Raumende ausgebildet. Die Gewölbe sind jeweils in einem Abstand von 70 cm zum nächsten Gewölbe angeordnet.

Eine lange Raumseite und jeweils die kurzen Raumseiten stellen Außenwände aus unverputztem Infralichtbeton dar. Die zweite lange Raumseite besteht aus einer unverputzten Stahlbeton-Innenwand mit raumseitiger Vorsatzschale, 2x12,5 mm GK-Platte Wandabstand ca. 52 cm. Im Inneren der Vorsatzschale verlaufen haustechnische Anlagen die kleinteilig abgekoffert werden. Eine akustische Bedämpfung der Vorsatzschale ist mit Ausnahme der kleinteiligen Abkofferungen zunächst nicht vorgesehen. Für den Schallpegel der haustechnischen Anlagen ist ein maximaler Spitzen-Schalldruckpegel $L_{AF,max} = 25 \text{ dB(A)}$ geplant.

In der Außenwand an der langen Seite sind Fenster mit einer Gesamtfläche $S = 14,4 \text{ m}^2$ geplant, die auf der westlichen Hälfte angeordnet sind.

An der Innenwand befindet sich am östlichen Raumende eine Holztür mit $S = 9,45 \text{ m}^2$. Am westlichen Raumende befindet sich eine Holztür mit $S = 4,85 \text{ m}^2$.

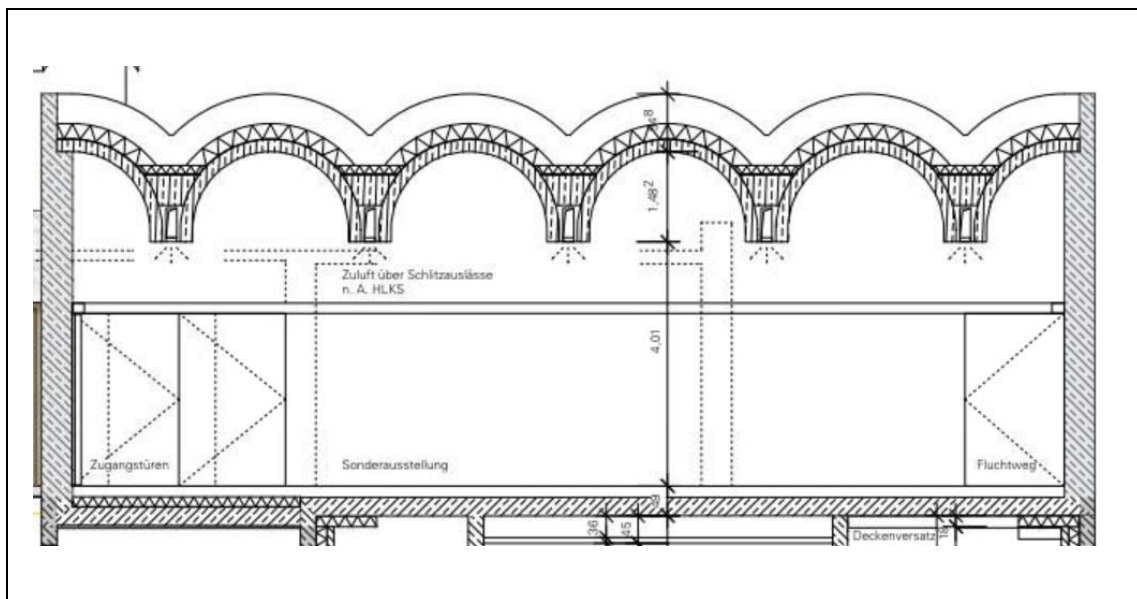


Abbildung 3: Schnitt Entwurfsplanung Sonderausstellung, Meck Architekten [27]

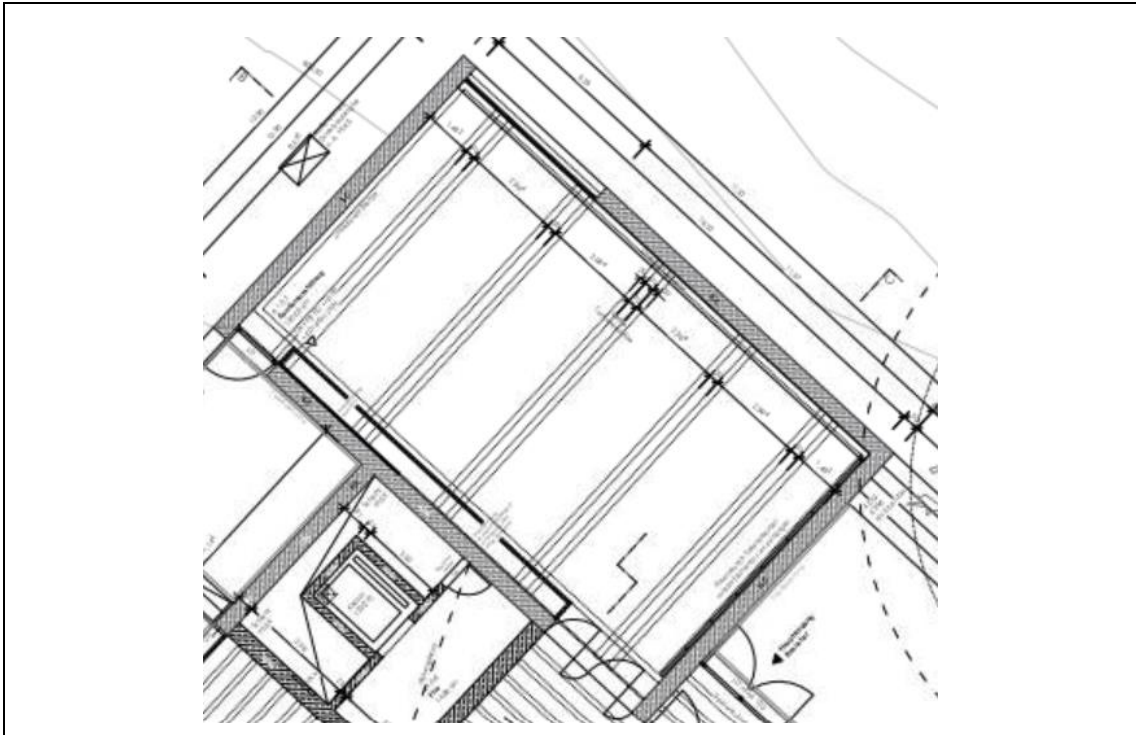


Abbildung 4: Grundriss Entwurfsplanung Sonderausstellung, Meck Architekten [27]

Der Raum soll neben einer Funktion als Ausstellungsraum auch als Veranstaltungsort für Konzerte, interaktive Veranstaltungen bspw. Bodypercussion und Vorträge ausgelegt werden.

7 Einfluss der Raumgeometrie auf den Raumklang

Der rechteckige schmale Grundriss führt gem. W. Fasold und E. Ferres ([15], S. 160) bei Anordnung der Bühne vor einer der kurzen Wände zu einer guten räumlichen Wahrnehmung des Raumklanges bei den mittleren und hinteren Plätzen.

Durch die parallele Anordnung der weiter auseinander liegenden Wände besteht das Risiko der Entstehung eines Flatterechos, also dass die Schallenergie zwischen den parallelen Flächen mehrfach hin und her reflektiert wird. Dies kann durch Absorptionsmaßnahmen an den Begrenzungsflächen oder durch Strukturen an der Begrenzungsfläche mit Winkeln $\geq 5^\circ$ vermieden werden ([15], S. 159).

Bei konkaven Raumbegrenzungsflächen entstehen ähnlich wie bei einer Linse akustische Brennpunkte. Diese sollen zur Vermeidung unausgeglichener Schallfelder außerhalb des Empfangsbereichs liegen. Bei Tonnengewölben mit Halbkreisform ist dies der Fall, wenn der Radius r der Tonne kleiner als die halbe Höhe h zwischen Boden und Kreismittelpunkt ist ([15], S. 170 f.).

Im vorliegenden Fall ist die Höhe $h = 4,21$ m und der Radius $r = 1,28$ m, wodurch die Anforderung $r \leq \frac{h}{2}$ erfüllt und eine störende Fokussierung des Schalls in der Zuhörerenebene nicht zu erwarten ist.

Nach Gl. (6) errechnen sich für den Raum abhängig von den nach Gl. (11) berechneten Soll-Nachhallzeiten der unterschiedlichen Nutzungen unter Berücksichtigung der Toleranzgrenzen für die Nachhallzeit nach Tabelle 1 folgende Schröderfrequenzen.:

- Musik: $f_{\text{Schröder}} = \text{ca. } 80 \text{ Hz bis } 90 \text{ Hz}$
- Sprache: $f_{\text{Schröder}} = \text{ca. } 60 \text{ Hz bis } 80 \text{ Hz}$

Unterhalb dieser Frequenzen ist das Schallfeld des Raumes durch Raummoden geprägt.

Abschätzend mittels Gl. (5) ergeben sich Raummoden zwischen $f_{111} = \text{ca. } 40 \text{ Hz}$ bei einer Deckenhöhe $h = 4,01$ m und $f_{332} = \text{ca. } 90 \text{ Hz}$ bei einer Deckenhöhe $h = 5,49$ m. Aufgrund der unebenen Deckenform können die Raummoden im Hinblick auf die ungleichmäßige Raumhöhe nicht verlässlich mittels Gl. (5) bestimmt werden, sondern sind durch Lösung der Wellengleichung des Geschwindigkeitspotenzials, bspw. durch FEM-Simulationen zu berechnen.

8 Untersuchte Schallabsorber

Für das Projekt kommen akustische Maßnahmen in Frage, welche die Optik des Raumes möglichst wenig beeinflussen. Gleichzeitig soll eine hohe thermische Speichermasse des Raumes erhalten bleiben, um für möglichst stabile thermische Konditionen zu sorgen. Dies erfordert eine möglichst geringe Belegung der Raumbegrenzungsflächen mit Dämmmaterial.

Da der Raum flexibel mit unterschiedlichen raumakustischen Anforderungen genutzt werden soll, bieten sich aus raumakustischer Sicht neben einer fest verbauten Grundausstattung mobile Maßnahmen an, die nach Bedarf eingesetzt werden.

Es werden Absorber mit den Wirkprinzipien entsprechend Abschnitt 3.2 verwendet.

8.1 Deckenmaßnahmen

Um eine leichte Nachrüstung mit zusätzlichen Maßnahmen für sprachliche Raumnutzung zu ermöglichen, sollen die grundlegenden Maßnahmen für Musiknutzungen mit geringeren erforderlichen Belegungsflächen der Maßnahmen an der Decke realisiert werden.

Von den Deckenmaßnahmen wird neben den akustischen Eigenschaften auch die Wahrung einer möglichst ungestörten Optik der Tonnengewölbe gefordert.

Hierfür werden zwei Varianten untersucht:

- In den Beton eingelegte Glasschaumstreifen
- Schlitzabsorber auf Zellulosebasis

8.1.1 In Beton eingelegte Glasschaumstreifen

Zur Wahrung der Optik der Tonnengewölbe sollen in den Beton Absorberstreifen eingelegt werden. Diese Maßnahme weist außerdem gute thermische Eigenschaften auf, wodurch die thermische Speichermasse weitgehend erhalten bleibt, was gerade in Museen zur Herstellung stabiler thermischer Bedingungen im Raum vorteilhaft ist.

Untersuchungen des Fraunhofer Instituts [13] zeigen, dass aufgrund von streuenden Eigenschaften der Streifenabsorber ein höherer Schallabsorptionsgrad resultiert, als eine flächengewichtete Mittelung der Absorptionsgrade erwarten lässt. Für verschiedene Belegungsdichten $\lambda_x = d_{\text{Absorber}} + d_{\text{Beton}}$ sind Schallabsorptionsgrade α_s im Diffusfeld

von 5 cm tiefen und $d_{\text{Absorber}} = 5$ cm breiten Streifen aus porösem Glasschaum simuliert und gemessen worden.

Hierbei wurde Glasschaum mit einem längenbezogenen Strömungswiderstand $\varepsilon = 10$ kPa s/m² untersucht [34].

Die berücksichtigten praktischen Schallabsorptionsgrade α_p werden entsprechend DIN EN ISO 11654 [5] durch arithmetische Mittelung der in [13] durch Hallraummessungen nach ISO 354 [6] ermittelten Schallabsorptionsgrade α_s gebildet.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
$\Lambda_x = 250$ mm, Belegungsgrad 20 %	0,05	0,25	0,60	0,55	0,50	0,45
$\Lambda_x = 150$ mm, Belegungsgrad 33 %	0,10	0,30	0,80	0,70	0,65	0,60

Tabelle 5: Schallabsorptionsgrade α_p von Absorberstreifen aus porösem Glasschaum basierend auf gemessenen Schallabsorptionsgraden α_s des Fraunhofer Instituts [13]

8.1.2 Schlitzabsorber auf Zellulosebasis

P. Kautsch et al. [21] entwickelten ein Absorbermaterial auf Zellulosebasis mit einem längenbezogenen Strömungswiderstand $\varepsilon = 19600$ Pa s/m² bei einer Stärke $d = 7$ cm, welches sich auf Wände und Decken aufspritzen lässt und insbesondere auch für unebene und gekrümmte Bauteile geeignet ist, wodurch die Deckengeometrie erhalten bleiben kann. Auf die Zelluloseschicht kann eine streifenförmige Putzschicht aufgetragen werden, durch die Schlitzte ausgebildet werden können. Aufgrund des Eigengewichts des Zellulosematerials ist die maximale Schichtstärke an Decken auf $d = 7$ cm beschränkt. Die Schlitzte können zusätzlich offenporig verputzt werden, wodurch die schallabsorbierenden Eigenschaften jedoch reduziert werden. Aufgrund seiner thermischen Eigenschaften ist das System zur Belegung von Außenbauteilen ohne die Gefahr der Kondensatbildung hinter oder in dem System, geeignet [21].

Die berücksichtigten praktischen Schallabsorptionsgrade α_p wurden in [21] durch Hallraummessungen nach ISO 354 [6] bestimmt.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
15 mm Poraverputz, 5 cm Schlitzbreite / 20 cm Schlitzabstand, Schlitz mit Zellulose gefüllt, 40 mm Zellulose	0,25	0,50	0,55	0,55	0,50	0,45
15 mm Poraverputz, 2 cm Schlitzbreite / 20 cm Schlitzabstand, Schlitz leer mit Gitter Lochanteil > 60 % überdeckt, 40 mm Zellulose	0,25	0,50	0,50	0,40	0,30	0,25

Tabelle 6: Schallabsorptionsgrade α_p von Schlitzabsorbemern auf Zellulosebasis [21]

8.2 Wandmaßnahmen

Ergänzend zu den Deckenmaßnahmen werden Wandmaßnahmen untersucht, die einerseits tiefe Frequenzen tilgen und andererseits als breitbandig absorbierende mobile Elemente eingesetzt werden sollen, um eine flexible Raumakustik für die unterschiedlichen Nutzungen zu ermöglichen.

Die Wandmaßnahmen sollen zum Teil flexibel einsetzbar sein und müssen daher mit geringem Aufwand ein- und ausgebaut werden können. Hierfür wird eine Kombination aus porösen Wandabsorbemern, Breibandkompakt-Absorbemern und Verbund-Platten-Resonatoren vorgeschlagen.

Die porösen Wandabsorber in Form mobiler Trennwände werden auf dem Markt in einer maximalen Höhe $h = \text{ca. } 180 \text{ cm}$ angeboten. Bei größeren Höhen sind Sonderanfertigungen oder Sonderkonstruktionen erforderlich. Da für das Produkt Sigel GmbH Businessproducts, Akustik-Stellwand Sound Balance belastbare Schallabsorptionsgrade in Form eines Prüfzeugnisses vorliegen, werden diese Werte auch für Maßnahmen mit größeren Höhen als herstellerseits angeboten in den Berechnungen angesetzt. In dem Fall, dass diese Höhen nicht lieferbar sind, können statt der vom Hersteller vorgesehenen Aufstellung auf Standfüßen die Absorber bspw. quer übereinander angeordnet werden.

Um den Aufwand beim Auf- und Abbau bei Stellwänden, die aufgrund der erforderlichen Höhe nicht in Stellfüßen aufgestellt werden, sowie bei den weiteren vorgeschlagenen Wandmaßnahmen möglichst gering zu halten, wird bspw. in Betracht gezogen die Absorber in eine Drahtseilvorrichtung oder in ein Schienensystem einzuhängen.

Für die Breitbandkompakt-Absorber und die Verbundplatten-Resonatoren jeweils in Kassettenform sind, sofern diese in Abstand zur Raumbegrenzungsfläche vorgesehen werden Rückenplatten, bspw. $d = \text{ca. } 2\text{-}3 \text{ mm}$ Stahl-Platten erforderlich ([17], S. 51).

Zur flexiblen Befestigung der Breitbandkompakt-Absorber und der Verbundplatten-Resonatoren direkt an der Wand wird bspw. ein absperrender Klapprahmen vorgeschlagen.

8.2.1 Schallabsorptionsgrade der Wandmaßnahmen

Bei den angesetzten Schallabsorptionsgraden für den Verbundplattenresonator handelt es sich um Herstellangaben.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Renz Verbundplattenresonator [31]	1,14 ¹⁾	0,83	0,57	0,37	0,25	0,14
Renz Breitband-Kompakt-Absorber BKA-I [32]	0,60	1,23 ¹⁾	1,17 ¹⁾	1,23 ¹⁾	1,20 ¹⁾	0,88
Sigel GmbH Businessproducts, Akustik-Stellwand Sound Balance, Wandabstand 5 cm, ermittelt im virtuellen Hallraum, basierend auf Messwerten [29] nach DIN EN ISO 354	0,40	0,65	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabelle 7: Schallabsorptionsgrade, Wandmaßnahmen

Für die mobilen Trennwände liegen Herstellerangaben in Form von schalltechnischen Prüfzeugnissen vor. Die Schallabsorptionsgrade des Produkts sind freistehend im Hallraum nach ISO 354 [6] gemessen. Die mobilen Trennwände sollen bei dem vorliegenden Vorhaben ca. 5 cm vor den Raumwänden aufgestellt werden, wodurch das Absorptionsverhalten der Trennwände verändert wird und nicht mit den Absorptionsgraden aus den Prüfzeugnissen übereinstimmt. Um das veränderte Absorptionsverhalten zu ermitteln, wird in Anlehnung an [30] ein virtueller Hallraum in EASE 4.4 [9] nachgebaut. Die Vorgehensweise ist in Kap. 8.2.2 beschrieben.

¹⁾ In den Berechnungen ist ein Schallabsorptionsgrad $\alpha = 1$ berücksichtigt

8.2.2 Bestimmung der Schallabsorption mobiler Trennwände im virtuellen Hallraum

Um eine Flexibilität im Hinblick auf Nutzungen mit unterschiedlichen raumakustischen Anforderungen zu realisieren, werden mobile Stellwände mit schallabsorbierenden Eigenschaften, die bei Bedarf eingesetzt werden können, schalltechnisch untersucht. Für mobile Trennwände liegen Herstellerangaben in Form von schalltechnischen Prüfzeugnissen vor. Die Schallabsorptionsgrade des Produkts sind freistehend im Hallraum nach DIN EN ISO 354 [6] gemessen. Die mobilen Trennwände sollen ca. 5 cm vor den Raumwänden aufgestellt werden, wodurch das Absorptionsverhalten der Trennwände verändert wird. Um das veränderte Absorptionsverhalten zu ermitteln, wird in Anlehnung an [30] ein virtueller Hallraum im Simulationsprogramm EASE nachgebaut.

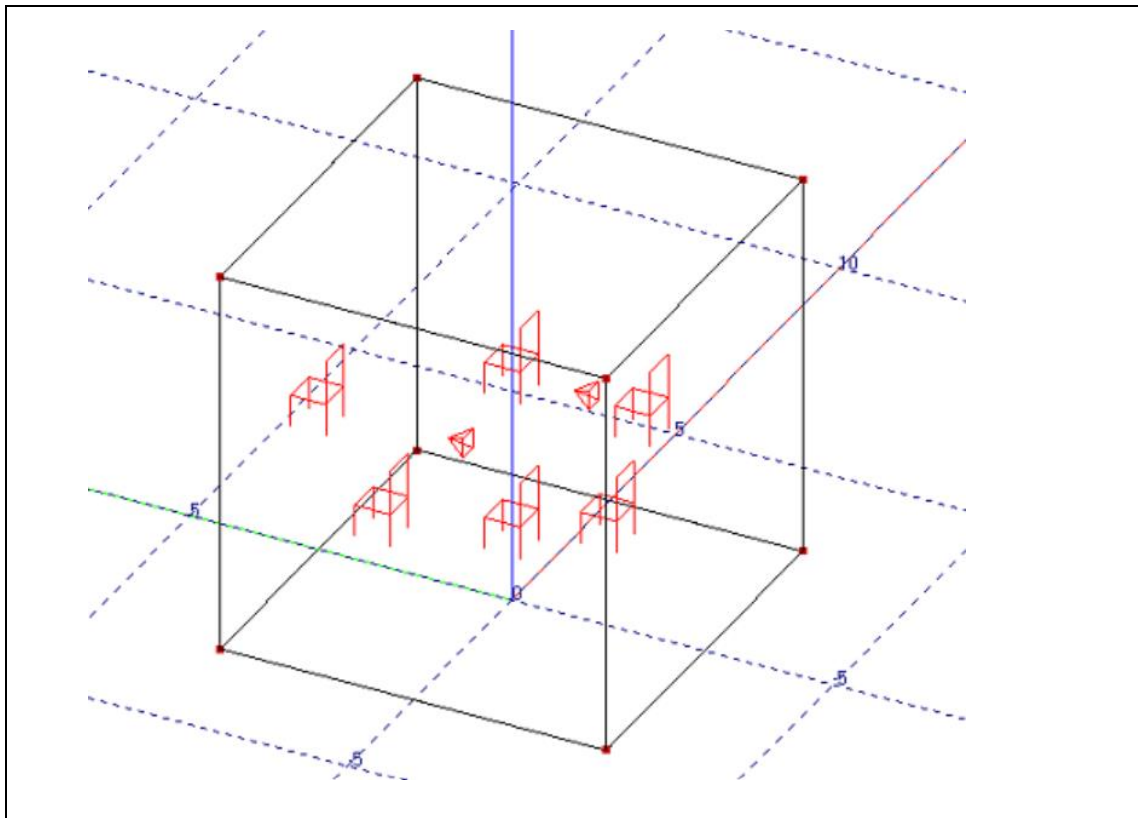


Abbildung 5: Virtueller Hallraum in Anlehnung an [30]

Der würfelförmige Raum hat eine Kantenlänge $l = 6$ m. Die Anordnung der Sende- und Messpositionen entspricht den Vorgaben gem. DIN EN ISO 354 ([6], S. 11). Es werden zwei gleichlaute Kugelschallquellen mit einem weißen Rauschen und sechs Messpositionen angeordnet. Die Absorptionsgrade der Wände mit 100 % Streuung sind so angepasst, dass, wie in Tabelle 8 zu sehen eine Simulation der Nachhallzeit T_{30} mit dem AURA-Algorithmus mit der Nachhallzeit nach Eyring, Gl. (9) übereinstimmt.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Absorptionsgrad Hallraum- wand α	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,09
Simulierte Nachhallzeit T_{30}	2,62 s	2,59 s	2,53 s	2,12 s	1,77 s	1,38 s
Nachhallzeit nach Eyring T_{Eyring} Gl. (9)	2,62 s	2,59 s	2,53 s	2,12 s	1,77 s	1,38 s

Tabelle 8: Konfiguration virtueller Hallraum

Zum Abgleich werden wie im Messaufbau für die geprüften Stellwände [29] zwei freistehende beidseitig absorbierende Stellwände mit je $S = 1,5 \text{ m}^2$ je Seite in den virtuellen Hallraum gestellt und in mehreren Rechendurchgängen mit unterschiedlichen Schallabsorptionsgraden beaufschlagt. Die angesetzten Schallabsorptionsgrade werden mit den im virtuellen Hallraum in Anlehnung an DIN EN ISO 354 [6] bestimmten Absorptionsgraden verglichen:

$$\alpha = 55,3 \frac{V}{c_0 S} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (28)$$

T_1 : Nachhallzeit ohne Absorber
 T_2 : Nachhallzeit mit Absorber

Der Abgleich zeigt, dass insbesondere bei höheren Absorptionsgraden $\alpha \geq \text{ca. } 0,6$ Abweichungen der gemessenen Schallabsorptionsgrade zu den eingegebenen Schallabsorptionsgraden bestehen.

Zur Korrektur der Abweichungen wird zunächst die Höhe des Summanden ΔT_1 ermittelt, um den T_1 in Gl. (28) angepasst werden muss, damit der simulierte Wert mit dem gemessenen Wert übereinstimmt. Der Absorptionsgrad α wird gegen den Korrektursummanden ΔT_1 aufgetragen und durch polynomiale bzw. lineare Anpassung werden frequenzabhängig Kalibrierfunktionen $\Delta T_1(\alpha)$ bestimmt, mit deren Hilfe die aus der Simulation bestimmten Absorptionsgrade korrigiert werden können.

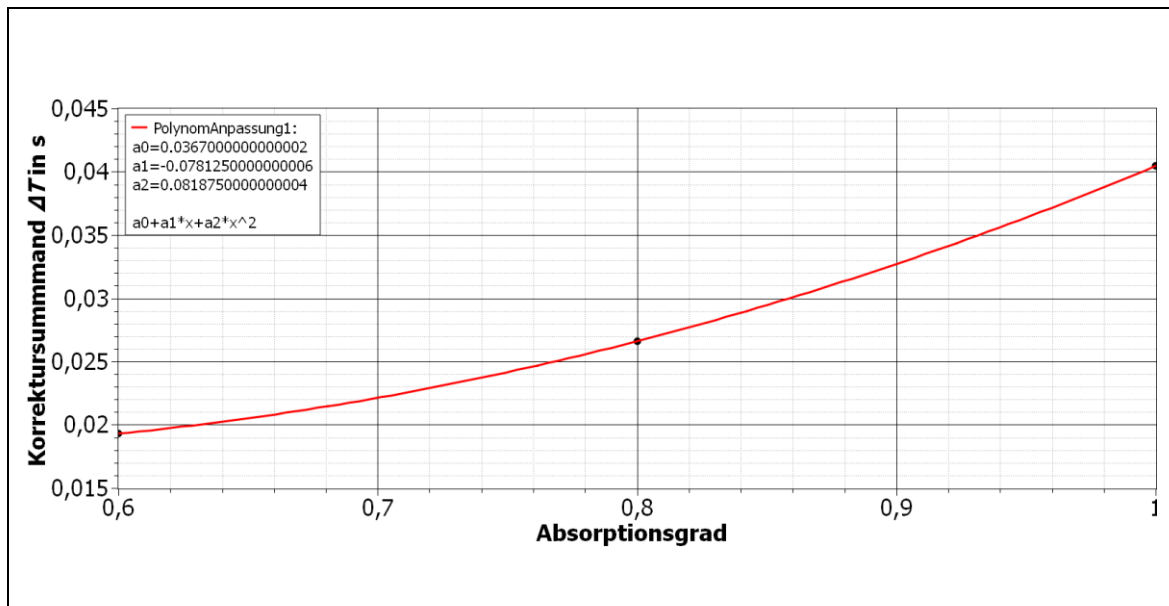


Abbildung 6: Diagramm $\Delta T_1(\alpha)$, Kalibrierkurve exemplarisch für 2 kHz

Die simulierten Absorptionsgrade können somit über die Kalibrierfunktion korrigiert werden. Die frequenzabhängigen Kalibrierfunktionen können Anlage 1 entnommen werden.

Bei Belegung der freistehenden Probekörper mit den in [29] gemessenen Schallabsorptionsgraden, stimmen unter Ansatz der Korrekturen die simulierten und gemessenen Schallabsorptionsgrade weitgehend überein.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_1 in s	2,62	2,59	2,53	2,12	1,77	1,38
T_2 in s	2,27	2,10	1,88	1,58	1,38	1,11
$\alpha_{gemessen}$ [29]	0,35	0,54	0,84	1,00	1,00	1,00
$\alpha_{simuliert}$	0,34	0,52	0,79	0,94	0,93	0,93
$\alpha_{Korrigiert}$	0,34	0,54	0,84	1,00	1,00	1,00

Tabelle 9: Abgleich simulierte Absorptionsgrade mit gemessenen Absorptionsgraden

Anschließend werden die Absorptionsgrade für die gleichen Stellwände mit 5 cm Wandabstand berechnet und anhand der Kalibrierfunktionen korrigiert. Der Abstand zwischen Hallraumwand und Stellwand wird in der Simulation seitlich schalldicht abgeschlossen. Bei der Ermittlung der gesuchten Absorptionsgrade α_{ges} ist $\alpha_{Korrektur}$ zu variieren bis $\alpha_{ges} = \alpha_{Korrektur}$.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T_1 in s	2,62	2,59	2,53	2,12	1,77	1,38
T_2 in s	2,41	2,29	2,12	1,78	1,53	1,22
$\alpha_{\text{Simuliert}}, S = 3 \text{ m}^2$	0,39	0,59	0,89	1,00	1,00	1,00
$\alpha_{\text{Korrigiert}}, S = 3 \text{ m}^2$	0,39	0,56	0,92	1,00	1,00	1,00

Tabelle 10: Simulationsergebnisse Stellwände 5 cm Wandabstand

Die Werte sind auf die verdeckte Wandfläche im vorliegenden Fall $S = 3 \text{ m}^2$ statt auf die Fläche der Vorder- und Rückseite der Stellwände $S = 6 \text{ m}^2$ bezogen.

Bei der Simulation sind v.a. abschirmende Effekte berücksichtigt. Eine spektrale Verschiebung des Absorptionsmaximums $f = \frac{c_0}{4d}$ aufgrund der Abstandsveränderung zur Wand (vgl. Kap. 3.2.1) oder Beugungseffekte werden nicht berücksichtigt.

Da bei einem Wandabstand $d = 5 \text{ cm}$ das Absorptionsmaximum eines porösen Dämmstoffes bei $f = \text{ca. } 2000 \text{ Hz}$ liegt und in diesem Bereich und in den angrenzenden Frequenzbereichen ein Absorptionsgrad $\alpha = 1$ ermittelt wurde, ist der Effekt der spektralen Verschiebung des Absorptionsmaximums durch Veränderung des Wandabstands im vorliegenden Fall vernachlässigbar.

Beugungseffekte spielen vornehmlich in den tieferen Frequenzen eine Rolle, in denen bedingt durch das Simulationsverfahren Unsicherheiten bestehen, wodurch das Prognoseverfahren im Frequenzbereich unterhalb von ca. 200 Hz als abschätzend zu charakterisieren ist.

9 Vorbemessung mit statistischer Raumakustik

Als Grundlage für das Simulationsmodell erfolgt zunächst eine Vordimensionierung von erforderlichen Absorptionsflächen mit statischen Methoden.

Für die Raumbegrenzungsflächen wurden die Schallabsorptionsgrade gem. DIN 18041, Anhang G [2] und DIN EN 12354-6 Anhang B [1] berücksichtigt.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Beton gem. DIN 12354-6 [1]	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Harter Bodenbelag auf massiver Boden- decke gem. DIN 12354-6 [1]	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06
Fenster Isolierverglä- sung gem. DIN 18041 [2]	0,28	0,20	0,11	0,06	0,03	0,02
Tür, Holz, lackiert gem. DIN 18041 [2]	0,10	0,08	0,06	0,05	0,05	0,05
Personen sitzend in einer Reihe, Mittel- wert aus typischem Höchstwert und typi- schem Mindestwert gem. DIN 12354-6 [1]	0,40	0,55	0,65	0,75	0,80	0,80
Einzelne Person je 6 m ² in einer Gruppe stehend, Mittelwert aus typischem Höchstwert und typi- schem Mindestwert gem. DIN 12354-6 [1]	0,01	0,05	0,08	0,13	0,15	0,17

Tabelle 11: Berücksichtigte Schallabsorptionsgrade α der Raumbegrenzungsflächen

Für die Gipskarton-Vorsatzschale mit Abstand $d = \text{ca. } 52 \text{ cm}$ an der Südwand liegen keine Schallabsorptionsgrade vor.

Gem. 18041 Anhang G [2] können für eine GK-Platte einer Stärke $d = 9,5$ mm, Wandabstand $d = 25$ mm folgende Werte angesetzt werden:

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
0,27	0,17	0,10	0,09	0,11	0,12

Tabelle 12: Schallabsorptionsgrade α einer GK-Platte $d = 9,5$ mm, Wandabstand $d = 25$ mm gem. DIN 18041 [2]

Die Berechnung der Resonanzfrequenz dieser Anordnung $f_0 = 150$ Hz mittels Berechnungsverfahren nach DIN 4109-34, Gleichung (1) [4] lässt darauf schließen, dass der vergleichsweise hohe Absorptionsgrad bei 125 Hz auf Resonanzeffekte zurückzuführen ist:

$$f_0 = 160 \sqrt{s' \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad (29)$$

s' : dynamische Steifigkeit der Hohlraumschicht
 m'_i : flächenbezogene Masse der Schale i

Für die vorliegende Konstruktion 2xGK-Platte, 50 cm Luftraum, massive Stahlbetonwand ergibt sich rechnerisch eine Resonanzfrequenz $f_0 = 20$ Hz. Von einer erhöhten Absorption durch Resonanzeffekte ist demnach im Frequenzbereich 125 Hz bis 4000 Hz nicht auszugehen. Auf dieser Grundlage und im Vergleich mit weiteren Konstruktionen aus GK-Platten [20] werden für die vorliegende Konstruktion folgende Schallabsorptionsgrade abgeschätzt:

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
0,10	0,10	0,10	0,09	0,11	0,12

Tabelle 13: Geschätzte Schallabsorptionsgrade α einer GK-Platte, Wandabstand $d = 520$ mm

9.1 Bestimmung des Klarheitsmaßes für Musik

Der Erwartungswert des Klarheitsmaßes für Musik C_{80} lässt sich mit Gl. (20) in Abhängigkeit der Nachhallzeit T und Abstand zu Schallquelle berechnen.

Bei dem vorliegenden Ausstellungsraum ist von Abständen von ca. 2 m bis 15 m zur Schallquelle auszugehen. Um den in Kapitel 4.5.4 beschriebenen Zielbereich $C_{80} = -5$ bis $+5$ dB zu erreichen, muss die Nachhallzeit bei den angenommenen Abständen zwischen $T = 1,1$ s bis $4,1$ s liegen.

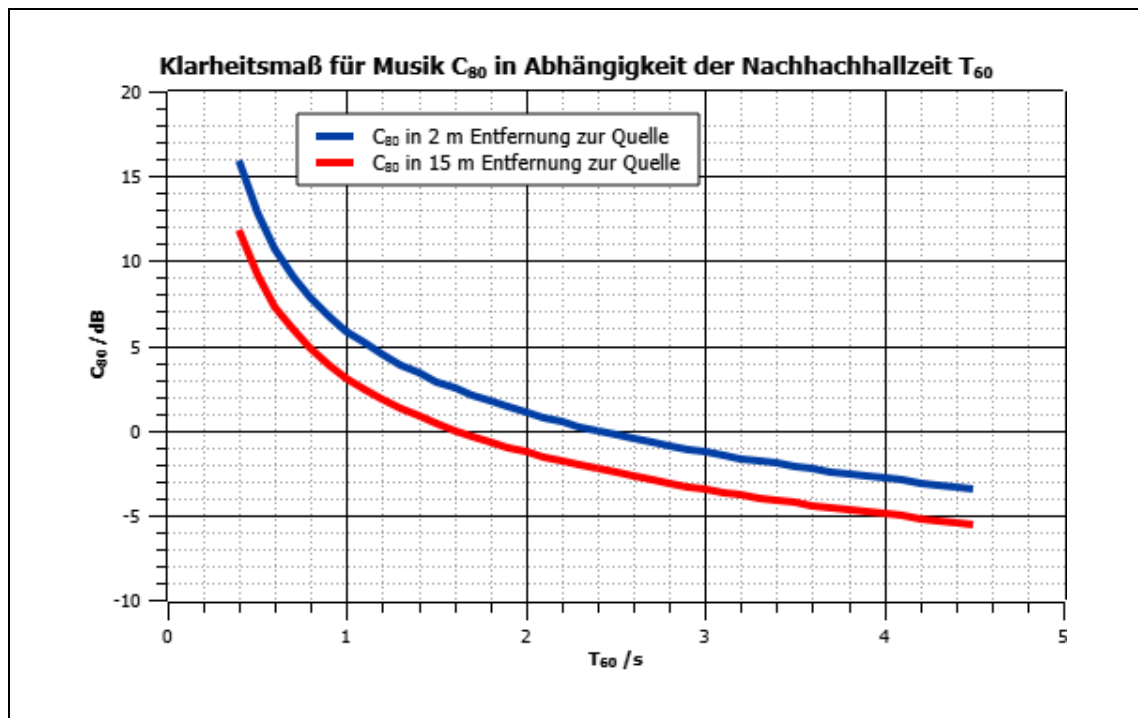


Abbildung 7: Klarheitsmaß C_{80} in Abhängigkeit der Nachhallzeit T

Die ermittelten Grenzen der Nachhallzeit zwischen $T = 1,1$ s bis $4,1$ s zum Erreichen des Zielbereichs für das Klarheitsmaßes für Musik $C_{80} = -5$ bis $+5$ dB werden mit den Toleranzgrenzen für die Raumgruppe A1 gem. DIN 18041 [2] abgedeckt (vgl. Kap. 9.2).

9.2 Nachhallzeitvorausberechnung

Die Nachhallzeit T_{60} gilt gemeinhin als die wichtigste statistische Kenngröße. Für die verschiedenen vorgesehenen Nutzungen des Raumes werden zunächst die Soll-Nachhallzeiten gem. DIN 18041 [2] mit Hilfe Gl. (11) für das Raumvolumen $V = 765,75 \text{ m}^3$ ermittelt.

Die Berechnungen erfolgen mittels Gl. (9) bei 20°C und 60 % relative Luftfeuchte.

Gem. DIN 18041 ([2], S. 13) gelten die Anforderungen an die Nachhallzeit für den besetzten Zustand. Es wird eine Fläche $S = 55 \text{ m}^2$ mit besetzten Stuhlreihen angesetzt.

9.2.1 Ausgangsfall ohne akustische Maßnahmen

Abbildung 8 zeigt die ermittelte Nachhallzeit für die Mehrzweckhalle ohne zusätzliche raumakustische Maßnahmen bei einer Belegung von $S = 55 \text{ m}^2$ mit besetzten Stuhlreihen. Dies bildet die Nutzung des Raumes als Konzertraum ab.

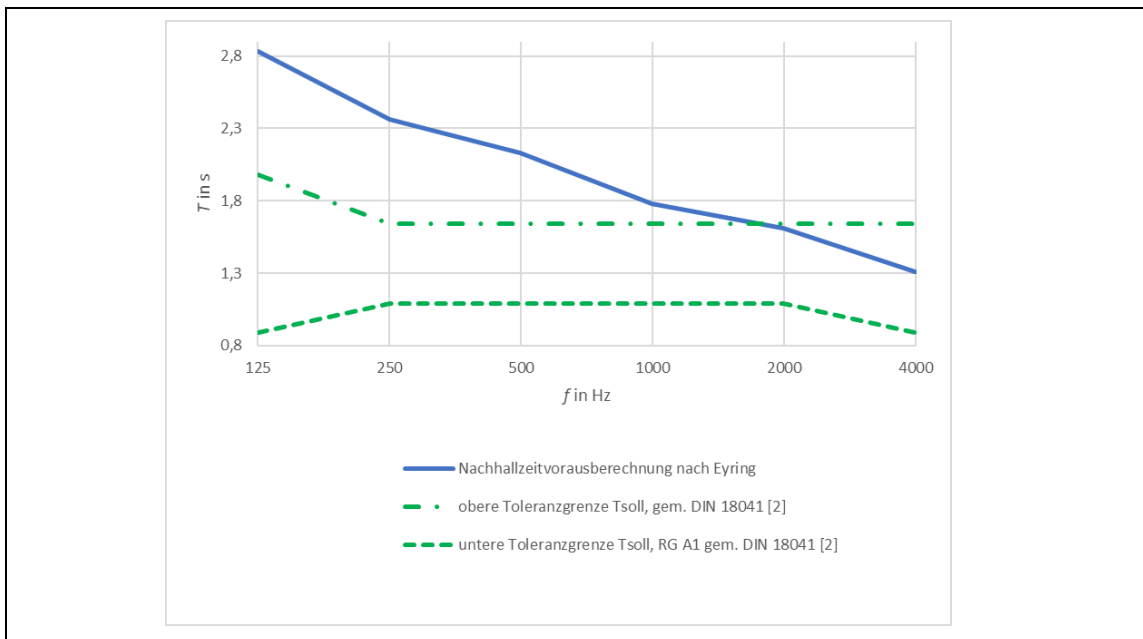


Abbildung 8: Nachhallzeitvorausberechnung ohne zusätzliche Maßnahmen und Toleranzbereich für Nachhallzeit der Raumgruppe A1 „Musik“ gem. DIN 18041 [2]

Mit dargestellt sind die Toleranzgrenzen der Raumgruppe A1 gem. DIN 18041 [2], da diese die Nutzungsart mit den höchsten erforderlichen Nachhallzeiten bzw. den geringsten Anforderungen an die Nachhallzeit ist.

Im Frequenzbereich 125 Hz bis 1000 Hz wird die obere Toleranzgrenze der Raumgruppe A1 gem. DIN 18041 [2] überschritten. Die Nachhallzeit steigt mit sinkender Frequenz. Es ist eine maximale Überschreitung der oberen Toleranzgrenze $\Delta T = 0,8$ s im Oktavband 125 Hz festzustellen. Die Nachhallzeiten im Frequenzbereich 1000 Hz und 4000 Hz liegen innerhalb der Toleranzgrenzen für die Soll-Nachhallzeit der Raumgruppe A1 „Musik“ gem. DIN 18041 [2].

9.2.2 Variantenuntersuchung der Deckenmaßnahmen bei Musiknutzung

Zur Verringerung der Nachhallzeiten werden die in Kap. 8.1 beschriebenen Deckenmaßnahmen gegenübergestellt. Da bei allen vorgeschlagenen Deckenmaßnahmen eine sehr hohe Belegung zur Unterschreitung der oberen Toleranzgrenze für die Nachhallzeit im tieffrequenten Bereich erforderlich ist und dies eine Überdämpfung der mittleren und hohen Frequenzen zur Folge hat, wird in allen Varianten ein Tiefenabsorber in Form eines Verbundplatten-Resonators gem. Kap. 8.2 angesetzt.

Im Hinblick auf die Nutzungen mit niedrigeren Nachhallzeiten wird für die Nutzungsart „Musik“ möglichst die untere Toleranzgrenze der Nachhallzeit gem. DIN 18041 [2] angestrebt.

Abbildung 9 zeigt die berechneten Nachhallzeiten der in Tabelle 14 beschriebenen Varianten im Vergleich.

Variantenbezeichnung	Deckenmaßnahme	Wandmaßnahme
33 % Glasschaum	Absorberstreifen aus porösem Glasschaum, $\Lambda_x = 150$ mm, Belegungsgrad 30 %, Belegungsfläche ca. 35 m ²	Renz Verbund-Platten-Resonator, Belegungsfläche ca. 30 m ²
20 % Glasschaum	Absorberstreifen aus porösem Glasschaum, $\Lambda_x = 250$ mm, Belegungsgrad 20 %, Belegungsfläche ca. 50 m ²	Renz Verbund-Platten-Resonator, Belegungsfläche ca. 30 m ²

Tabelle 14: Beschreibung der Varianten Nachhallzeitvorausberechnung „Musik“

Zellulose 5/20	15 mm Poraverputz, 5 cm Schlitzbreite / 20 cm Schlitzabstand, Schlitz mit Zellulose gefüllt, 40 mm Zellulose, Belegungsfläche 60 m ²	Renz Verbund-Platten-Resonator, Belegungsfläche 30 m ²
Zellulose 2/20	15 mm Poraverputz, 2 cm Schlitzbreite / 20 cm Schlitzabstand, Schlitz leer mit Gitter Lochanteil > 60 % überdeckt, 40 mm Zellulose, Belegungsfläche 60 m ²	Renz Verbund-Platten-Resonator, Belegungsfläche 30 m ²

Tabelle 14: Beschreibung der Varianten Nachhallzeitvorausberechnung „Musik“, Fortsetzung

Bei allen Varianten liegen die Nachhallzeiten innerhalb der Toleranzgrenzen der Raumgruppe A1 „Musik“ gem. DIN 18041 [2]. Die Varianten mit Glasschaumstreifen „33 % Glasschaum“ und „20 % Glasschaum“ weisen recht ähnliche Verläufe auf, wobei für die Variante „20 % Glasschaum“ eine größere Absorptionsfläche erforderlich ist. Bei den Varianten mit Schlitzabsorber auf Zellulosebasis „Zellulose 5/20“ und „Zellulose 2/20“ ist die Nachhallzeit bei 125 Hz und 250 Hz im Vergleich zu den Varianten mit Glasschaumstreifen bei gleicher Belegungsfläche des Platten-Resonators geringer. Insgesamt erweist sich die Variante „Zellulose 5/20“ durch einen relativ gleichmäßigen Verlauf im Frequenzbereich 250 Hz bis 4000 Hz als diejenige Variante mit den meisten Variationsmöglichkeiten, was die Belegung der Flächen angeht.

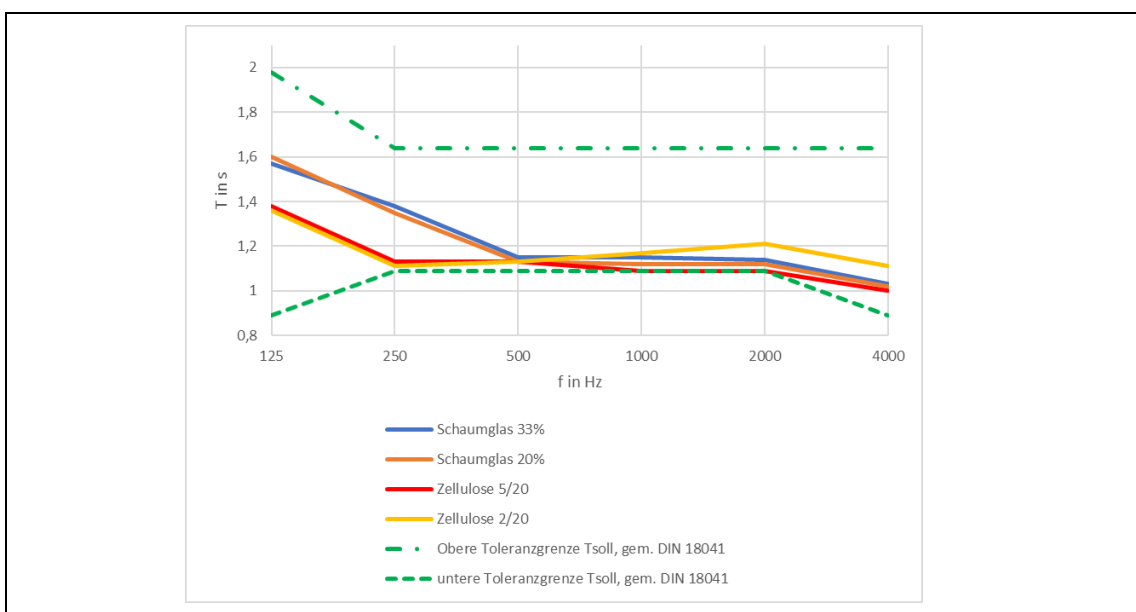


Abbildung 9: Nachhallzeitvorausberechnung, Variantenvergleich, Raumgruppe A1

Das Bass-Verhältnis BR liegt bei allen Varianten innerhalb des W. Ahnert und H.-P. Tennhardt ([11], S. 191) beschriebenen Zielbereichs $BR = 1,0$ bis $1,3$. Die Varianten mit Glasschaumstreifen liegen jedoch an der oberen Grenze. Durch den hohen Absorptionsgrad der Glasschaumstreifen bei 500 Hz bestehen hier wenige Möglichkeiten zur Optimierung, ohne dass der Frequenzbereich 500 Hz überdämpft wird. In der Variante „Zellulose 5/20“ besteht das meiste Optimierungspotenzial.

9.2.3 Nachhallzeitvorausberechnung für sprachliche Nutzungen

Um die Sprachverständlichkeit bspw. bei Vorträgen zu erhöhen, soll die Nachhallzeit reduziert werden. Zur Berücksichtigung eines benachteiligten Publikums, bspw. von Leuten mit Hörbehinderungen oder Nicht-Muttersprachlern sind nach Möglichkeit die Soll-Nachhallzeiten der Raumgruppe A3 „Sprache/Vortrag inklusiv“ gem. DIN 18041 [2] einzuhalten.

Die Reduzierung der Nachhallzeit soll möglichst mit mobilen Elementen gem. Tabelle 7, Zeile 2 erreicht werden.

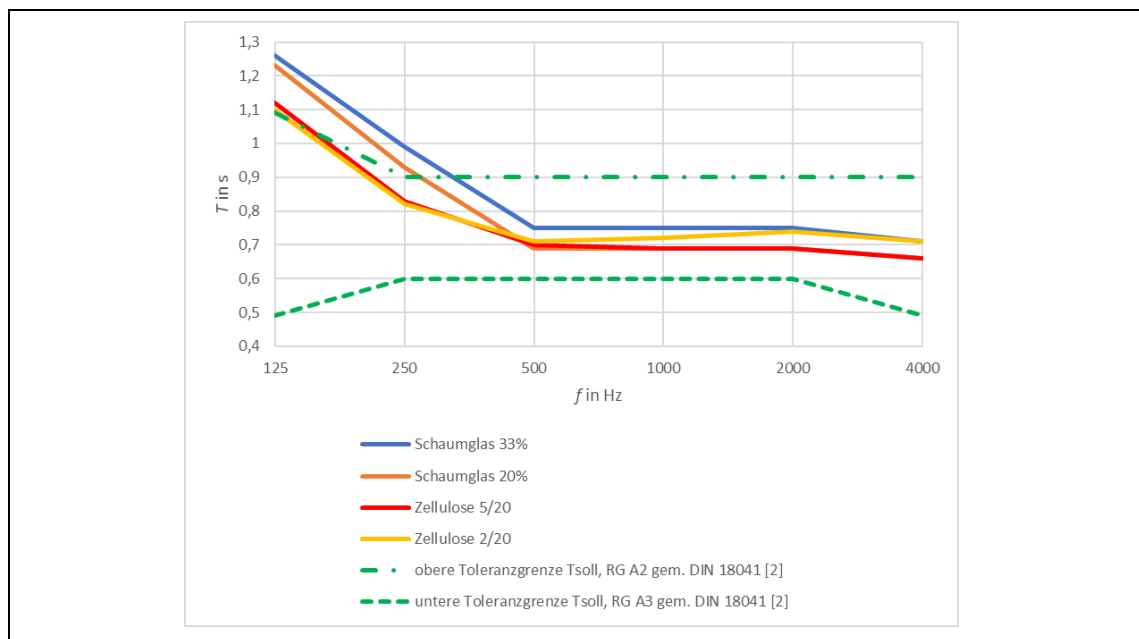


Abbildung 10: Nachhallzeitvorausberechnung, Variantenvergleich, Raumgruppe A3

Variantenbezeichnung	Deckenmaßnahme	Wandmaßnahme
33 % Glasschaum	Absorberstreifen aus porösem Glasschaum, $\Lambda_x = 150$ mm, Belegungsgrad 30 %, Belegungsfläche ca. 35 m ²	Renz Verbund-Platten-Resonator, Belegungsfläche ca. 30 m ² + Sigel GmbH Businessproducts, Akustik-Stellwand Sound Balance, Wandabstand 5 cm, Belegungsfläche ca. 60 m ²
20 % Glasschaum	Absorberstreifen aus porösem Glasschaum, $\Lambda_x = 250$ mm, Belegungsgrad 20 %, Belegungsfläche ca. 50 m ²	Renz Verbund-Platten-Resonator, Belegungsfläche ca. 30 m ² + Sigel GmbH Businessproducts, Akustik-Stellwand Sound Balance, Wandabstand 5 cm, Belegungsfläche ca. 60 m ²
Zellulose 5/20	15 mm Poraverputz, 5 cm Schlitzbreite / 20 cm Schlitzabstand, Schlitz mit Zellulose gefüllt, 40 mm Zellulose, Belegungsfläche 60 m ²	Renz Verbund-Platten-Resonator, Belegungsfläche 30 m ² + Sigel GmbH Businessproducts, Akustik-Stellwand Sound Balance, Wandabstand 5 cm, Belegungsfläche ca. 60 m ²
Zellulose 2/20	15 mm Poraverputz, 2 cm Schlitzbreite / 20 cm Schlitzabstand, Schlitz leer mit Gitter Lochanteil > 60 % überdeckt, 40 mm Zellulose, Belegungsfläche 60 m ²	Renz Verbund-Platten-Resonator, Belegungsfläche 30 m ² + Sigel GmbH Businessproducts, Akustik-Stellwand Sound Balance, Wandabstand 5 cm, Belegungsfläche ca. 60 m ²

Tabelle 15: Beschreibung der Varianten Nachhallzeitvorausberechnung „Sprache“

Bei allen Varianten liegen die Nachhallzeiten im Frequenzbereich 500 Hz bis 4000 Hz innerhalb der Toleranzgrenzen der Raumgruppe A3 „Sprache/Vortrag inklusiv“ gem. DIN 18041 [2]. Bei den Varianten mit Schaumglas wird die obere Toleranzgrenze der Nachhallzeit bei 250 Hz leicht überschritten. Zu deutlicheren Überschreitungen kommt es im Frequenzbereich 125 Hz mit einer maximalen Differenz zur oberen Toleranzgrenze $\Delta T = 0,14$ s. Auch bei den Varianten mit Zellulose-Schlitzabsorbemern kommt es zu leichten Überschreitungen der Nachhallzeit im Frequenzbereich 125 Hz.

Das Bassverhältnis liegt bei allen Varianten bei $BR > 1,3$.

Zum Erreichen dieser Werte sind bereits sehr hohe Belegungsflächen mit den mobilen Trennwänden erforderlich. Des Weiteren ist zur Einhaltung der Nachhallzeiten im tieffrequenten Bereich und zur Verringerung des Bassverhältnisses eine Erhöhung der äquivalenten Absorptionsfläche im Frequenzbereich unterhalb von 500 Hz notwendig. Dabei ist eine maßgebliche Erhöhung der Schallabsorption in den mittleren bis hohen Frequenzen zu vermeiden. Auf den Frequenzbereich 125 Hz bis 250 Hz abgestimmte Resonanzabsorber stellen hierbei eine geeignete Maßnahme dar. Die genauere Dimensionierung der zusätzlich erforderlichen Bass-Absorber erfolgt im Rahmen der Simulationen.

10 Erstellung des Simulationsmodells

Die Raumgeometrie wird als 3D-Modell in die CAD-Umgebung der Simulationssoftware EASE 4.4 [9] eingegeben.

Da runde Flächen nicht eingegeben werden können, sind die Gewölbe in mehrere kleine Teilflächen zerlegt, welche die Rundungen im Rahmen der Eingabemöglichkeiten möglichst genau abbilden. Die eingegebene Fläche je Vierteltonne ist im eingegebenen Modell um 0,02 m² geringer als in der Planung. Die Stirnflächen der Tonnen stimmen im Rahmen der Genauigkeit mit der Planung überein.

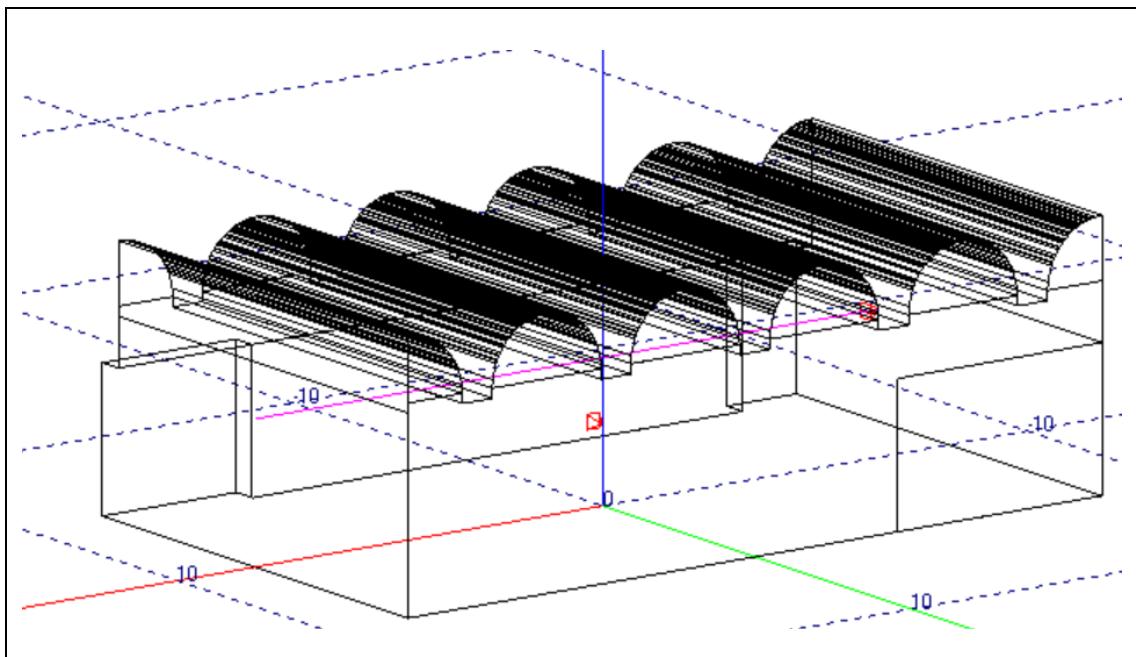


Abbildung 11: 3D-Raum-Modell, Gittermodell

Den Bauteilflächen werden die Absorptionsgrade gem. Tabelle 11 und Tabelle 13 zugewiesen.

Zum Modellabgleich wird die Nachhallzeit T_{30} an sechs Empfangsorten bei zwei Kugelschallquellenpositionen nach DIN 3382-1 ([3], S. 11 f.) mit EASE AURA [9] ohne zusätzliche Akustikmaßnahmen berechnet und mit der Nachhallzeit nach Eyring (Gl. (9)) verglichen. Die Berechnung wurde mit folgenden Einstellungen durchgeführt:

- Anzahl der Partikel: 110.000
- Länge: 5.000 ms
- Streuung: Default S-Curve, diffuse rain
- Simulationsverfahren: Energy Loss

- Zwei Sende- und sechs Messpositionen in Anlehnung an DIN EN ISO 354 [6]

Die simulierte Nachhallzeit T_{30} des Raumes weicht insbesondere im Frequenzbereich 250 Hz und 500 Hz von der berechneten Nachhallzeit nach Eyring ab. Dies weist auf eine abnehmende Gleichverteilung der Schallenergie im Raum bei den betroffenen Frequenzen hin.

Die minimale Abweichung liegt bei der Oktavmittenfrequenz 4000 Hz und beträgt 0,02 s. Die maximale Abweichung liegt bei der 500 Hz–Oktave und beträgt 0,34 s.



Abbildung 12: Mit AURA simulierte Nachhallzeit und Nachhallzeit nach Eyring

Zur Kalibrierung des Modells gleicht man i.d.R. gemessene Nachhallzeiten des Raumes mit den simulierten Nachhallzeiten ab und passt die Absorptionsgrade der Raumbegrenzungsflächen so an, dass die gemessenen Nachhallzeiten mit den gemessenen übereinstimmen. Da sich das Gebäude noch in der Planungsphase befindet, ist eine Messung der Nachhallzeiten nicht möglich. Ein Referenzgebäude zum Abgleich liegt im Rahmen dieser Arbeit nicht vor. Daher basieren die Simulationen auf Literaturwerten gem. Tabelle 11 und Tabelle 13. Eine Abschätzung der hieraus resultierenden Unsicherheiten erfolgt in Kap. 13.

11 Raumakustische Simulation mit EASE AURA

Zur Auslegung zur Anordnung der akustischen Maßnahmen in der Ausstellungshalle werden geometrisch-raumakustische Simulationen mit EASE AURA 4.4 [9] durchgeführt. Hierfür werden verschiedene Nutzungsszenarien des Raumes abgebildet:

- Konzert: Musikalische Darbietung mit Bestuhlung und Bühne
- Musik interaktiv: Interaktive musikalische Aktivitäten, bspw. Bodypercussion, mehrere Schallquellen im Raum verteilt, diese stellen gleichzeitig die Empfangspositionen dar
- Vortrag: Sprachliche Darbietung, bspw. Vortrag mit Bestuhlung und Bühne
- Führung: Museumsausstellung mit Führung mit verschiedenen Sende- und Empfangspositionen

Die raumakustische Grundausstattung wird anhand der beiden Nutzungsszenarien „Konzert“ und „Musik interaktiv“ bemessen, da für diese Varianten nach der Vorbemessung (Kap. 9) die geringste Belegungsfläche mit raumakustischen Maßnahmen erforderlich ist. Auf dieser Basis werden im Anschluss mobile Maßnahmen zur Optimierung der Nachhallzeit für sprachliche Nutzungen dimensioniert.

Die in den Simulationen angesetzten Schallabsorptionsgrade können den Tabellen 5-7, 11 und 13 entnommen werden.

Die Simulationen für Musiknutzungen erfolgen mit folgenden Parametern:

- Auflösung: 1 m
- Anzahl der Partikel: 400000
- Länge: 1700 ms
- Streuung: Default S-Curve, diffuse rain
- Simulationsverfahren: Energy Loss
- Orientierungspunkt für Seitenschallgrad: Schallquelle

Die Varianten für Sprachnutzungen werden grundsätzlich mit den gleichen Parametern simuliert, aufgrund der höheren Bedämpfung und des damit verbundenen schnelleren Energieabfalls kann die Länge auf 1200 ms reduziert werden.

Bei der Ermittlung der STI-Werte und des Artikulationsverlustes ist ein Grundgeräuschpegel $L_p = 40$ dB(Z) berücksichtigt. Dies entspricht einem A-bewerteten Summen-Schalldruckpegel $L_{p,A} = \text{ca. } 52$ dB(A) dB. Der angesetzte Grundgeräuschpegel liegt zur Vorhaltung zusätzlicher Geräusche, bspw. verursacht durch das Publikum 27 dB(A) über dem geplanten Spitzen-Schalldruckpegel $L_{AF,max} \leq 25$ dB(A) für Geräusche haus-technischer Anlagen.

11.1 Raumnutzung Konzert

Vor der Westwand wird eine mobile Bühne vorgesehen. Berücksichtigt ist eine Bühne mit 1 m Höhe, 7 m Breite und 3 m Tiefe. In einem Abstand von 2 m zur Bühne wird eine besetzte Bestuhlung über eine Fläche $S = 55 \text{ m}^2$ berücksichtigt. Die Empfangsfläche wird in einer Höhe $h = 1,2 \text{ m}$ angesetzt. Die Schallquellenposition befindet sich mittig auf der Bühne, 1,6 m über der Bühnenoberfläche. Als Schallquelle wird eine Kugelschallquelle mit einem Schallleistungspegel $L_w = 110 \text{ dB}$ bei allen betrachteten Terzfrequenzen zwischen 100 Hz und 10 kHz gewählt. Das entspricht einem A-Bewerteten Summen-Schallleistungspegel $L_{w,A} = \text{ca. } 122 \text{ dB(A)}$.



Abbildung 13: Raumanordnung Nutzungsart Konzert eingetragen in Grundrissplanung, Meck Architekten [27]

Um störende Reflexionen mit höheren Reflexionszeiten zu vermeiden, gilt zunächst der Grundsatz die akustischen Maßnahmen möglichst in größeren Abständen zur Quelle anzuordnen. Dies hat außerdem den Effekt, dass der Schall durch Reflexionen mit kürzeren Reflexionszeiten besser in den Raum getragen wird und den Raum somit mit nützlicher Schallenergie versorgt.

11.1.1 Variante 1: Zellulose-Schlitzabsorber 5/20

Entsprechend der Vordimensionierung mittels Nachhallzeitvorausberechnung nach Eyring (Gl. (9)) wird eine Fläche der Deckenmaßnahme $S_{\text{Decke}} = \text{ca. } 62 \text{ m}^2$, entspricht ca.

1,5 Tonnen mit dem Zellulose-Schlitzabsorber 5/20 und eine Fläche $S_{VPR} = 30 \text{ m}^2$ mit einem Verbundplatten-Resonator an der Wand vorgesehen, die der Bühne gegenüberliegt.

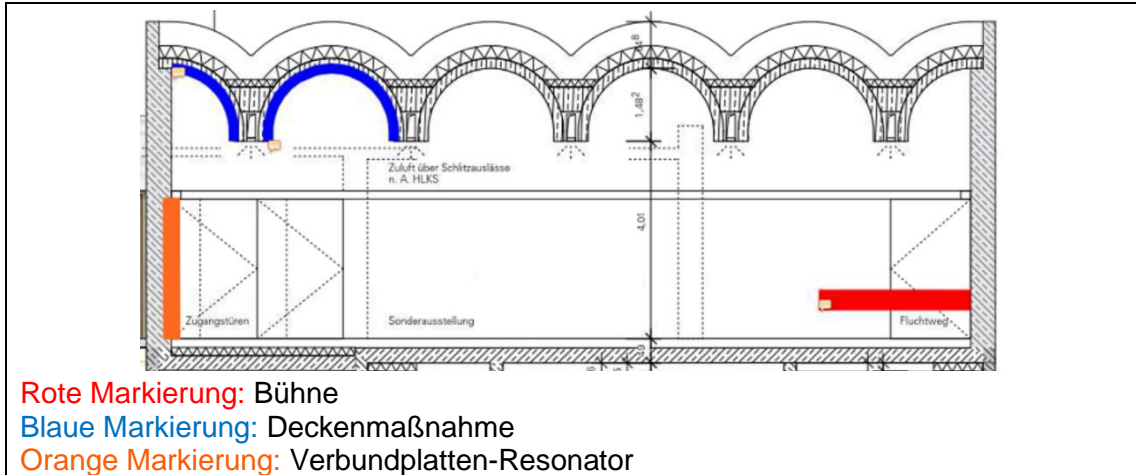


Abbildung 14: Akustikmaßnahmen auf Basis der Vordimensionierung – Konzert – Variante 1, eingetragen in Schnitt Meck Architekten [27]

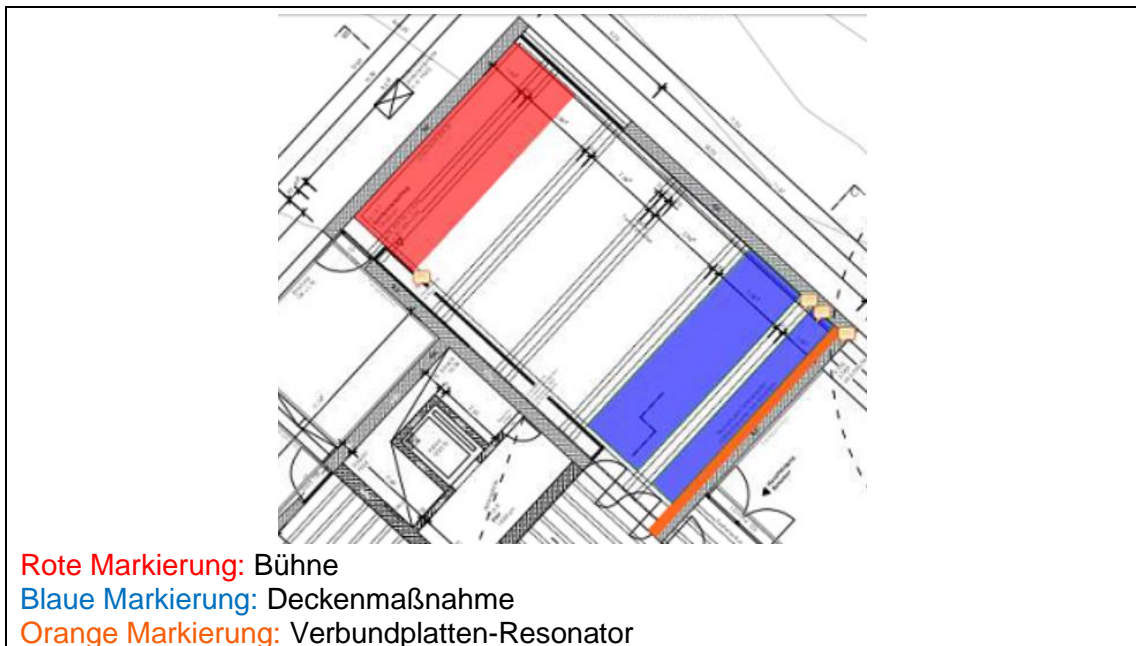


Abbildung 15: Akustikmaßnahmen auf Basis der Vordimensionierung – Konzert – Variante 1, eingetragen in Grundriss Meck Architekten [27]

Die simulierten Nachhallzeiten liegen oberhalb der statistisch berechneten Nachhallzeit nach Eyring. Insbesondere bei der Oktavmittelfrequenz 500 Hz wird der Toleranzbereich für die Nachhallzeit der Raugruppe A1 „Musik“ gem. DIN 18041 [2] überschritten.

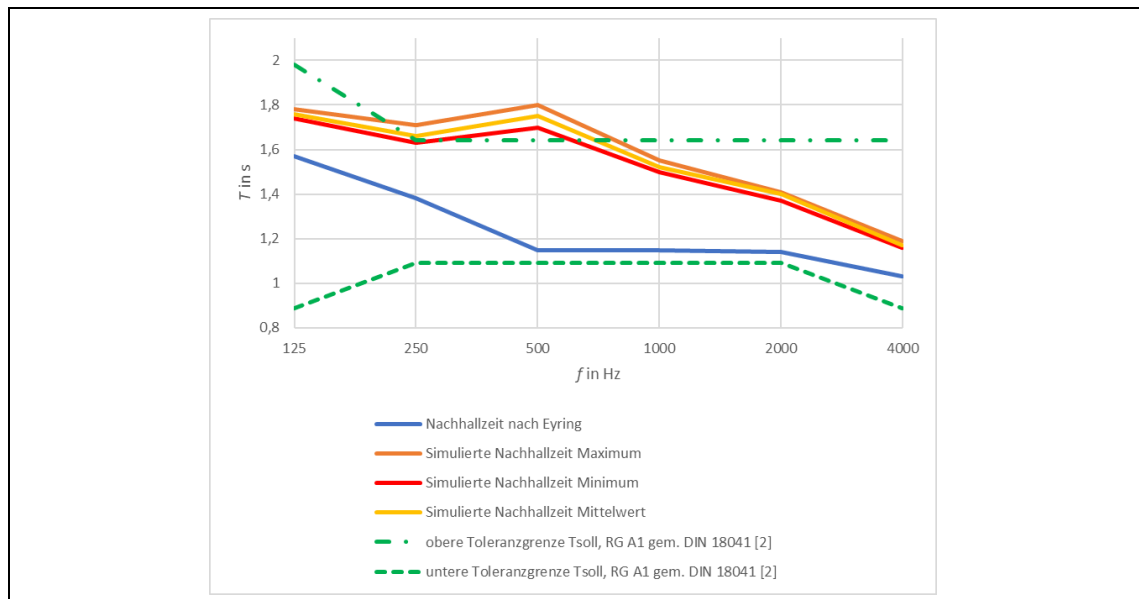


Abbildung 16: Nachhallzeit, Akustikmaßnahmen auf Basis der Vordimensionierung, RG A1 Musik

Die starke Abweichung zur statischen Berechnung lässt sich durch ein in der Simulation weniger diffuses Schallfeld insbesondere im Bereich der Tonnengewölbe erklären. Durch Abschirmung insbesondere des Direktschalls und früher Reflexionen durch die Gewölbeform, erfolgt eine geringere Absorption als im statistisch gleichverteilten diffusen Schallfeld zu erwarten ist.

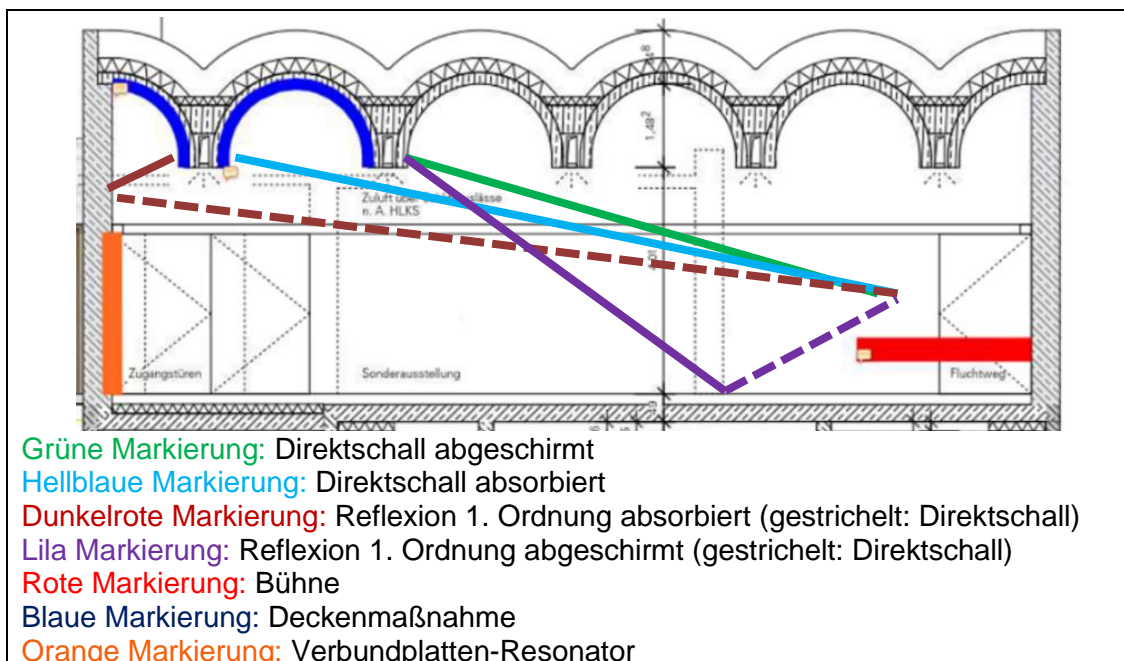
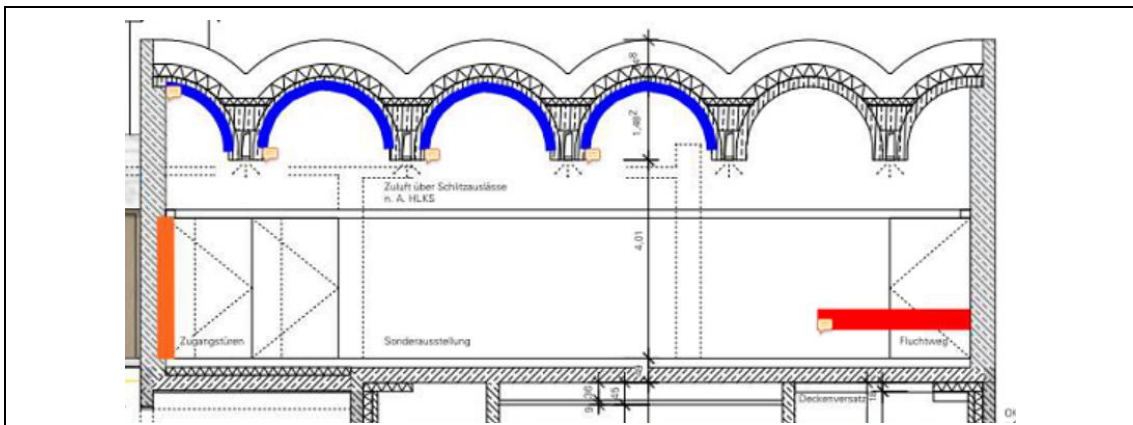


Abbildung 17: Schemenhafte Darstellung exemplarische Strahlenwege mit Abschirmung durch die Deckenform, eingetragen in Schnitt Meck Architekten [27]

Zur weiteren Bedämpfung wird die Belegungsfläche der Deckenmaßnahme auf $S_{Decke} = 131,6 \text{ m}^2$ erhöht.



Rote Markierung: Bühne
Blaue Markierung: Deckenmaßnahme
Orange Markierung: Verbund-Plattenresonator

Abbildung 18: Akustikmaßnahmen Konzert - Variante 1 optimiert, eingetragen in Schnitt Meck Architekten [27]



Rote Markierung: Bühne
Blaue Markierung: Deckenmaßnahme
Orange Markierung: Verbund-Plattenresonator

Abbildung 19: Akustikmaßnahmen Konzert - Variante 1 optimiert, eingetragen in Grundriss Meck Architekten [27]

11.1.2 Variante 2: Glasschaumstreifen 33 %

Wie bei Variante 1 wird die Belegungsfläche der Decke im Vergleich zur statistischen Vorbemessung erhöht, um die untere Toleranzgrenze der Raumgruppe A1 „Musik“ gem. DIN 18041 [2] zu erreichen. Die Belegungsfläche der Deckenmaßnahme beträgt $S_{Decke} = 101 \text{ m}^2$. Eine höhere Belegung der Decke mit den Glasschaumstreifen führt bei Musikknutzungen zu einer Überdämpfung des Raumes mit Unterschreitungen des Toleranzbereichs für die Nachhallzeit der Raumgruppe A1 gem. DIN 18041 [2] um bis zu 0,1 s in den höheren Frequenzen und tendenziell ungünstigeren-Bassverhältnissen $BR = \text{ca. } 1,2$ und wird daher nicht angesetzt.

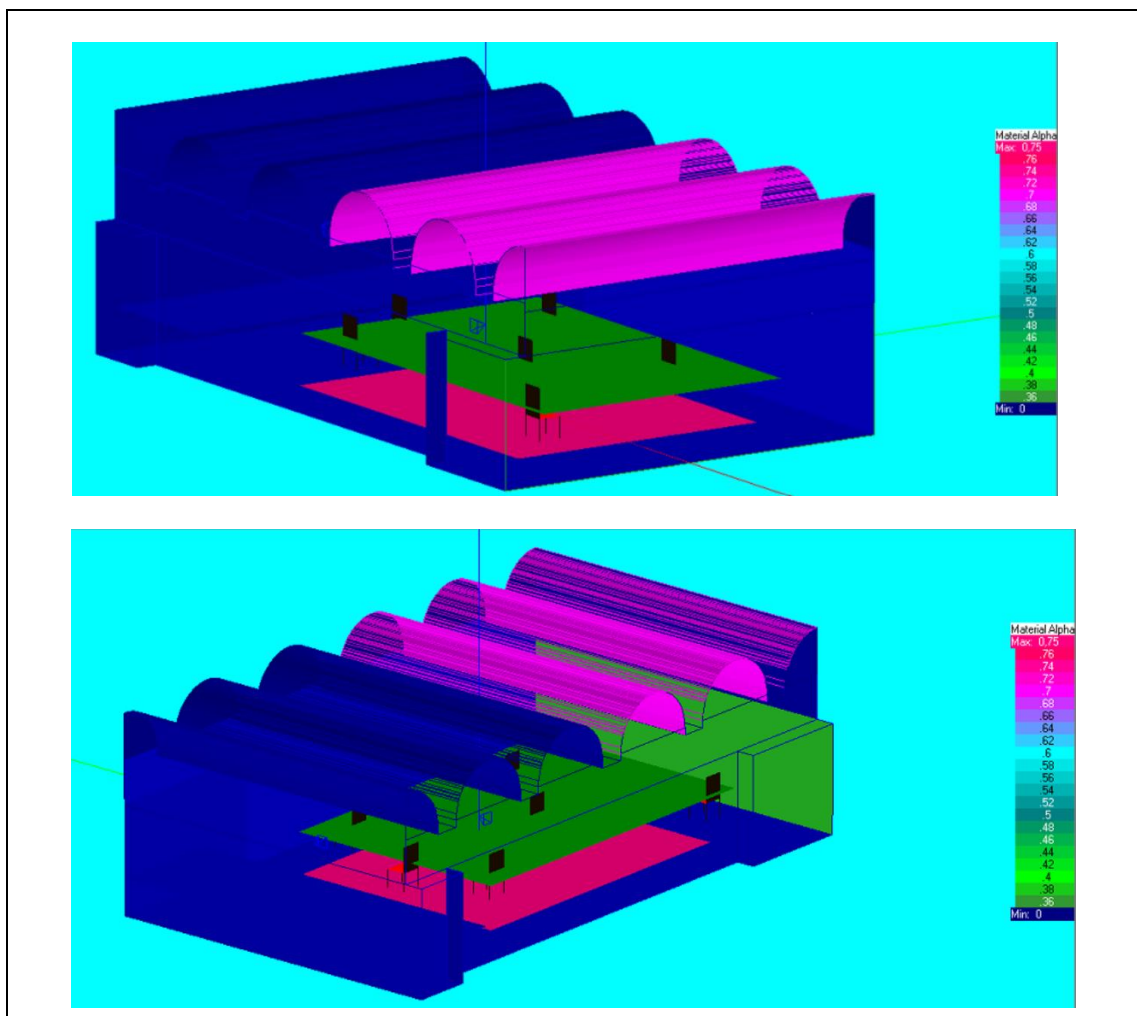


Abbildung 20: Akustikmaßnahmen Konzert - Variante 2, 3D-Modell Absorptionsgrad bei 1000 Hz

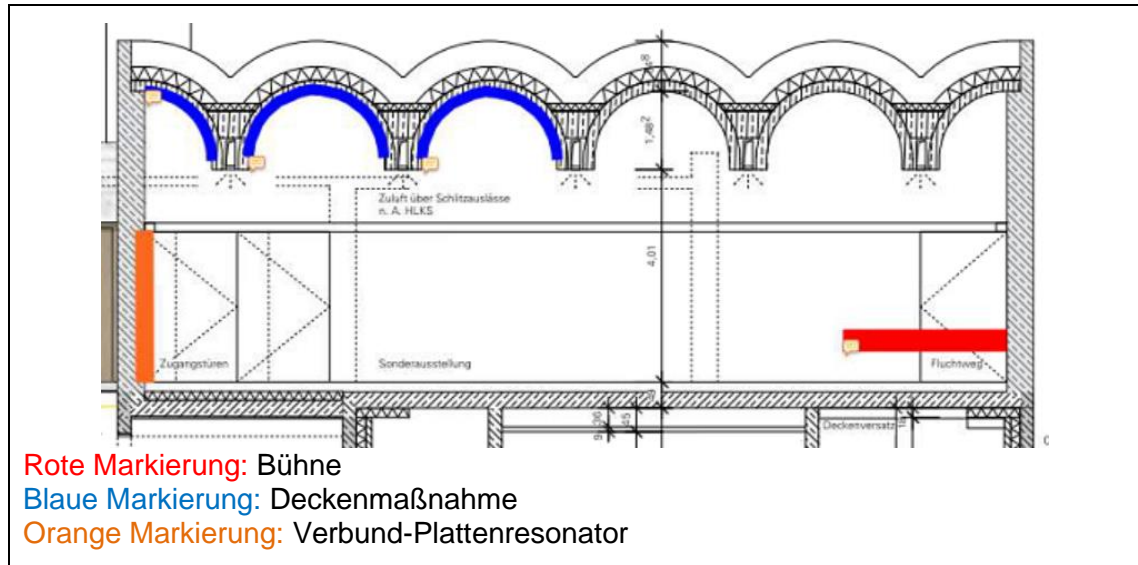


Abbildung 21: Akustikmaßnahmen Nutzung Konzert - Variante 2, eingetragen in Schnitt Meck Architekten [27]

11.2 Raumnutzung Musik interaktiv

Die in Kap. 11.1 beschriebenen Maßnahmen werden für eine interaktiven Musiknutzung, bspw. Bodypercussion untersucht.

Für die Besetzung werden 16 stehende Personen in vier Reihen in einer Besetzungsdichte von 1 Person je 6 m^2 , sowie einer anleitenden Person berücksichtigt, die jeweils gleichzeitig eine Schallquelle darstellen berücksichtigt. Die Empfangsfläche und die Schallquellen werden in einer Höhe $h = 1,7 \text{ m}$ angesetzt.

Die Absorberanordnung entspricht der für die Konzernutzung (vgl. Kap. 11.1). Bei der Variante mit Glasschaumabsorbern ergibt sich ein unausgewogenes Bassverhältnis. Daher werden zusätzliche Verbundplatten-Resonatoren VPR mit einer Fläche $S_{VPR} = \text{ca. } 21 \text{ m}^2$ angeordnet.

Da sich aufgrund der vielen Schallquellen sehr hohe Berechnungszeiten ergeben, wird der schnellere Algorithmus „Particle loss“ verwendet. Die weiteren Berechnungsparameter entsprechen denen in Kap. 11.1.

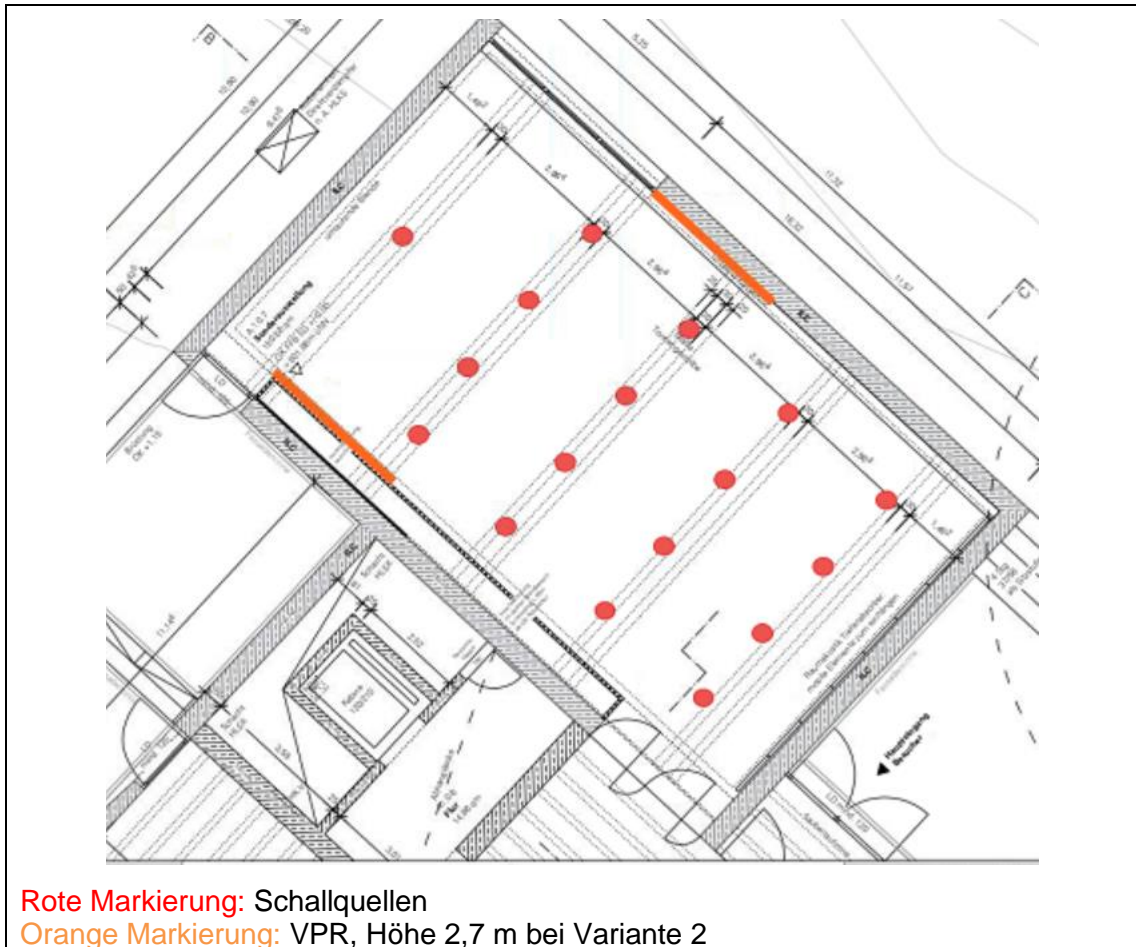


Abbildung 22: Schallquellenanordnung Musik interaktiv, eingetragen in Grundriss Meck Architekten [27]

11.3 Raumnutzung Vortrag

Die Anordnung von Bühne und Zuhörerbereich, sowie der Deckenmaßnahmen entspricht der Anordnung für die Konzernutzung. Zusätzlich zu den Deckenmaßnahmen werden seitlich mobile Stellwände mit einer Höhe 2,7 m mit einer Gesamtfläche $S_{Stellwand} = 28 \text{ m}^2$ und Breitbandkompaktabsorber mit $S_{BKA} = \text{ca. } 11 \text{ m}^2$ vorgesehen. Die Breitbandkompakt-Absorber werden vorgesehen, um auch im tieffrequenten Bereich eine bessere Absorption zu erhalten. Da dies alleine nicht ausreicht, um einen angemessen ausgewogenen Verlauf der Absorption über alle Frequenzen zu erreichen, werden außerdem zusätzlich Verbundplatte-Resonatoren mit einer Fläche $S_{VPR} = \text{ca. } 21 \text{ m}^2$ vorgesehen. Die zusätzlichen Verbundplatten-Resonatoren werden weiter vorne angeordnet, um die breitbandige Absorption im Ausbreitungsweg zur Gewährleistung einer ausgeglicheneren Pegelverteilung im Raum zu minimieren.



Abbildung 23: Wandmaßnahmen Vortrag, eingetragen in Grundriss Meck Architekten [27]

Gem. W. Fasold und E. Ferrer ([15], S. 23) liegt der Schalleistungspegel für Unterhaltungssprache bei $L_{w,A} = \text{ca. } 70 \text{ dB(A)}$ und für laute Sprache bei $L_{w,A} = \text{ca. } 90 \text{ dB(A)}$, wobei geübte Sprecher Schalleistungspegel bis zu $L_{w,A} = \text{ca. } 94 \text{ dB(A)}$ erreichen.

Als Schallquelle wird eine Kugelschallquelle mit einem Schalleistungspegel $L_w = 71 \text{ dB(Z)}$ über alle Terzfrequenzen zwischen 100 Hz und 10 kHz gewählt. Das entspricht einem A-bewerteten Summen-Schalleistungspegel $L_{w,A} = 83 \text{ dB(A)}$ und befindet sich somit in einem Pegelbereich zwischen Unterhaltungssprache und lauter Sprache für geübte Sprecher. Die Schallquellenposition befindet sich mittig auf der Bühne, 1,6 m über der Bühnenoberfläche.

Um eine gleichmäßigere Pegelverteilung im Raum zu erreichen, werden außerdem Varianten mit elektroakustischer Unterstützung untersucht.

Dazu werden zwei Lautsprecher an beiden Seitenwänden im hinteren Saalbereich in einer Höhe von $h = 3,2 \text{ m}$ angeordnet. Exemplarisch wird der Lautsprecher Fa.

Seeburg Serie A4 60x90 angesetzt. Als Schallquelle auf der Bühnenmitte wird zur Darstellung einer gerichteten Schallquelle die Kugelschallquelle ebenfalls gegen den Lautsprechertyp Fa. Seeburg Serie A4 60x90 ausgetauscht. Für jede Schallquelle ist die gleiche Schalleistung $L_{w,A} = 83 \text{ dB(A)}$ angesetzt. Die Lautsprecherausrichtung ist in Abbildung 24 dargestellt.

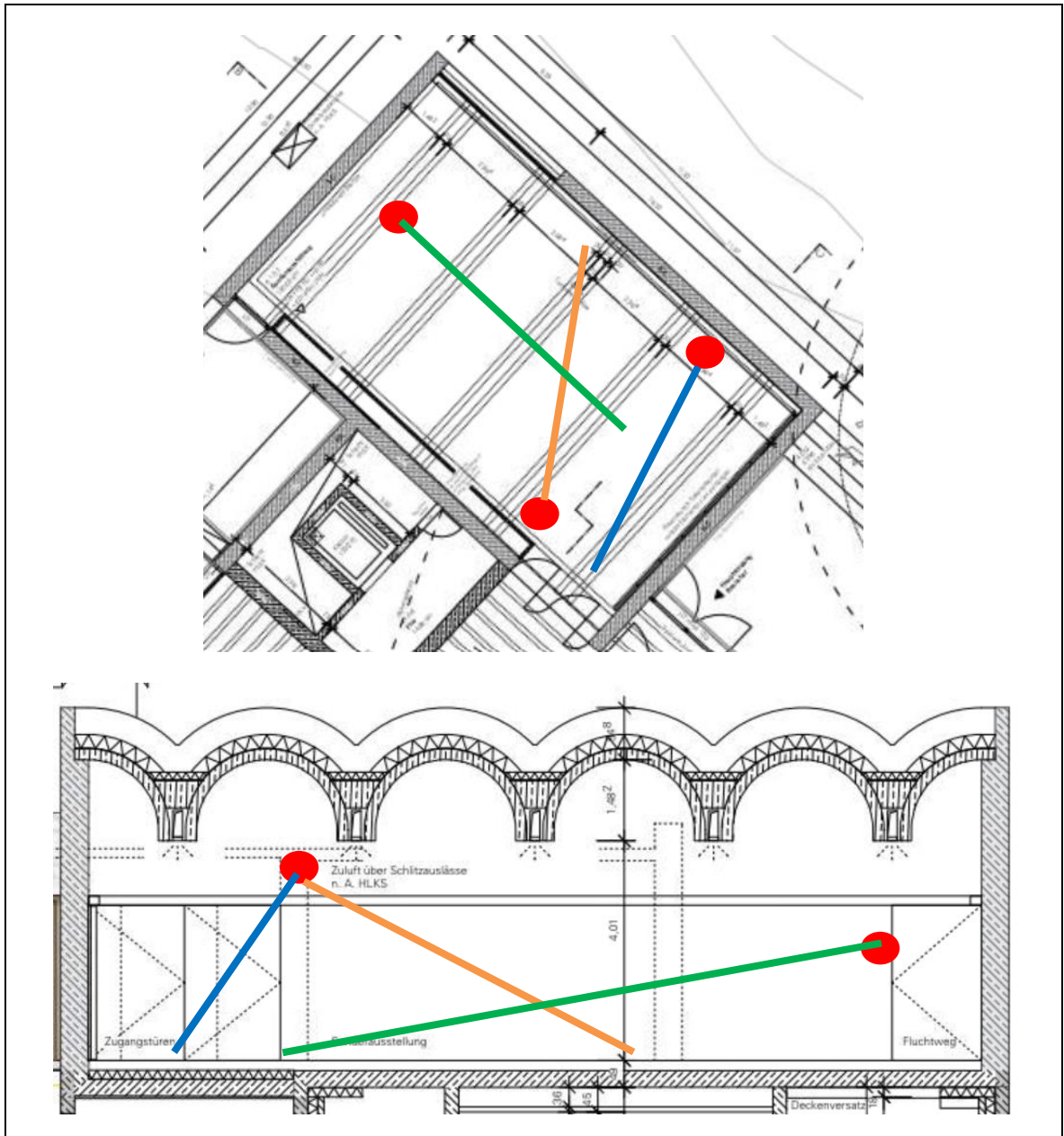


Abbildung 24: Skizze Lautsprecherausrichtung, eingetragen in Grundriss und Schnitt Meck Architekten [27]

11.4 Raumnutzung Führung

Zur Untersuchung der Raumnutzung Führung werden unterschiedliche Schallquellenpositionen untersucht, um die herum 15 stehende Personen, je eine Person pro 3 m² verortet sind. Je Person wird für den Schallabsorptionsgrad ein Mittelwert aus stehender Person im Anzug und stehender Person im Kleid gem. [20] bezogen auf die Zuhörerfläche in einer Höhe $h = 1,7$ m angesetzt.

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
0,03	0,06	0,14	0,23	0,29	0,32

Tabelle 16: Schallabsorptionsgrade α Mittelwert aus stehender Person im Anzug und stehender Person im Kleid, eine Person je 3 m²

Die Deckenmaßnahmen entsprechen den untersuchten Maßnahmen gem. Kap.11.1.

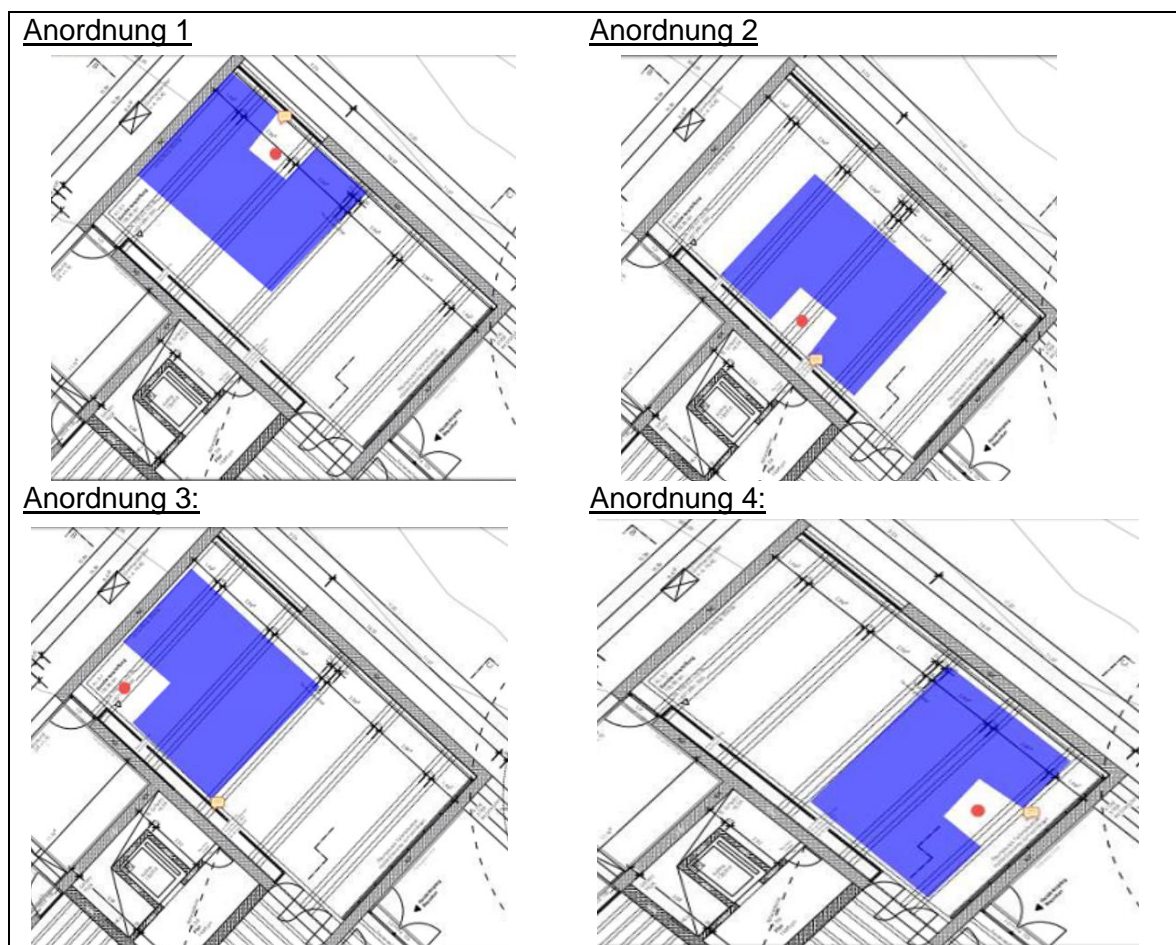


Abbildung 25: Untereordnete Anordnungen von Schallquellen und Zuhörern, Führung, eingetragen in Grundriss Meck Architekten [27]

Voruntersuchungen ergeben bei den Anordnungen 1, 2, 3 ungünstige Werte für die Sprachverständlichkeit. Diese lassen sich auf fehlende Absorber im nordwestlichen Bereich des Raumes zurückführen. Zur Optimierung werden insbesondere dort Wandabsorber vorgesehen. Da die mobilen Stellwände eine relativ geringe Wirkung im tieffrequenten Bereich aufweisen, werden stattdessen 5 Breitbandkompaktabsorber je mit einer Fläche $S = 5,4 \text{ m}^2$ vorgesehen. Zur weiteren Optimierung des Bassverhältnisses sind außerdem Absorber mit guter Wirksamkeit im tieffrequenten Bereich und geringer Wirksamkeit bei mittleren und hohen Frequenzen vorgesehen. Hierfür werden weitere 4 Verbundplatten-Resonatoren je mit einer Fläche $S = 5,4 \text{ m}^2$ vorgesehen. Die Wandmaßnahmen werden zur Vorhaltung von Ausstellungsgegenständen in einem Abstand $d = \text{ca. } 2 \text{ m}$ zueinander angeordnet.

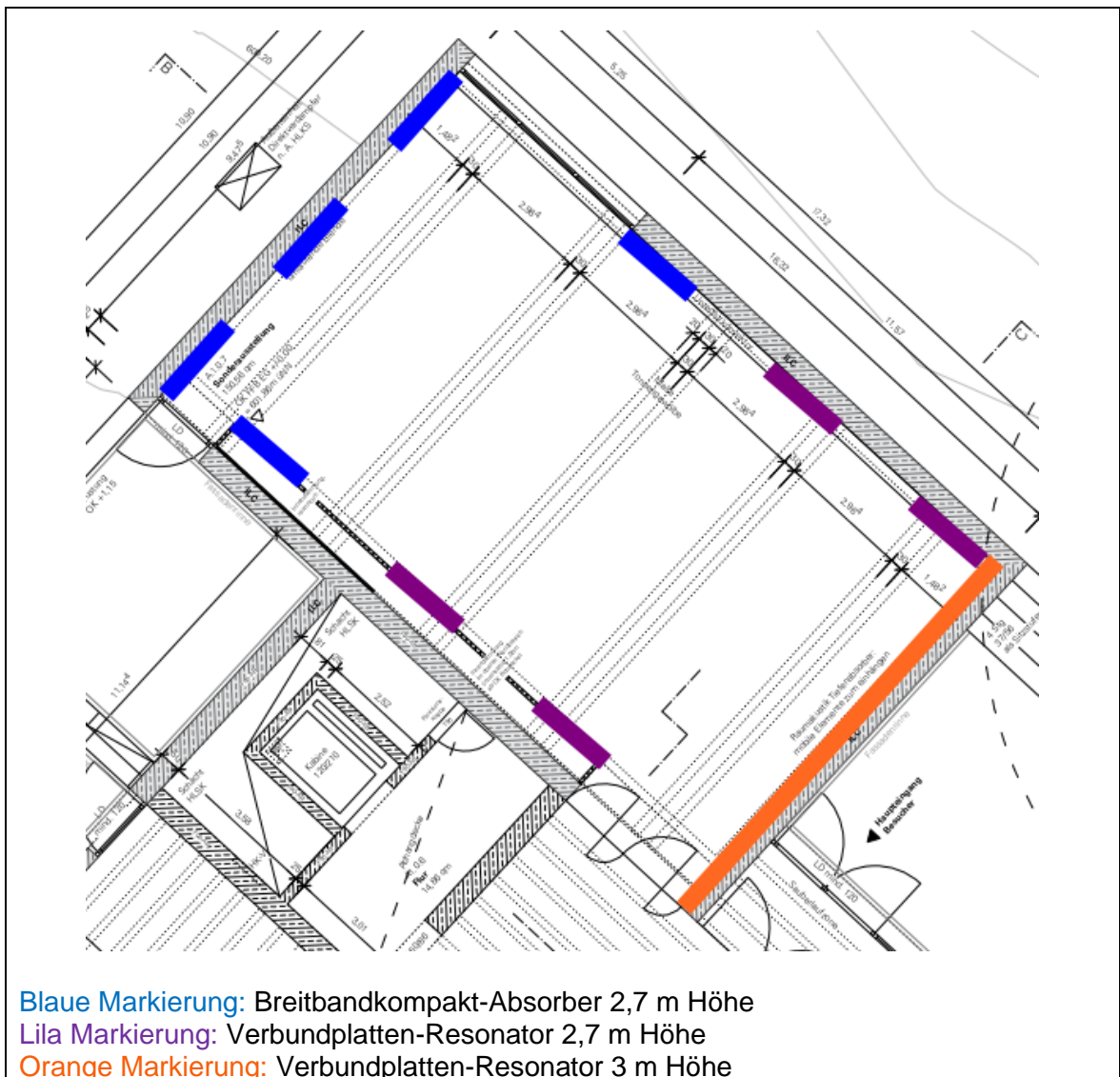


Abbildung 26: Anordnung Wandabsorber, Führung, eingetragen in Grundriss Meck Architekten [27]

12 Simulationsergebnisse und Beurteilungen

Nachfolgend sind die Ergebnisse der in Kap. 11 beschriebenen Simulationsvarianten beschrieben.

Das Echokriterium liegt bei allen Varianten bei $EK = \text{ca. } 0,5$. Aufgrund des niedrigen Wertes ist nicht von einer Echowahrnehmung auszugehen.

12.1 Raumnutzung Konzert

Die detaillierten Ergebnisse können Anlage 2 und 3 entnommen werden.

12.1.1 Pegelverteilung – Konzert

Das Stärkemaß liegt bei beiden Varianten im vorderen Zuhörerbereich um bis zu 9 dB über dem von W. Fasold und E. Ferres ([15], Tabelle 4.18) beschriebenen Optimalbereich für Aufführungsräume, was durch einen hohen Diffusanteil des Raumes zu begründen ist. Zur Verringerung des Stärkemaßes sind zusätzliche Absorber im Raum erforderlich. Da eine Erhöhung der Schallabsorption im Raum zur Überdämpfung des Raumes führt, wird eine erhöhte Stärkemaß zugunsten weiterer raumakustischer Kriterien toleriert.

Zwischen den vorderen und den hinteren Plätzen ergeben sich bei beiden Varianten Pegeldifferenzen $\Delta L = 5$ dB. Die von H.V. Fuchs ([16], S. 184) als gut geltend beschriebene Pegeldifferenz $\Delta L = 5$ dB wird eingehalten.

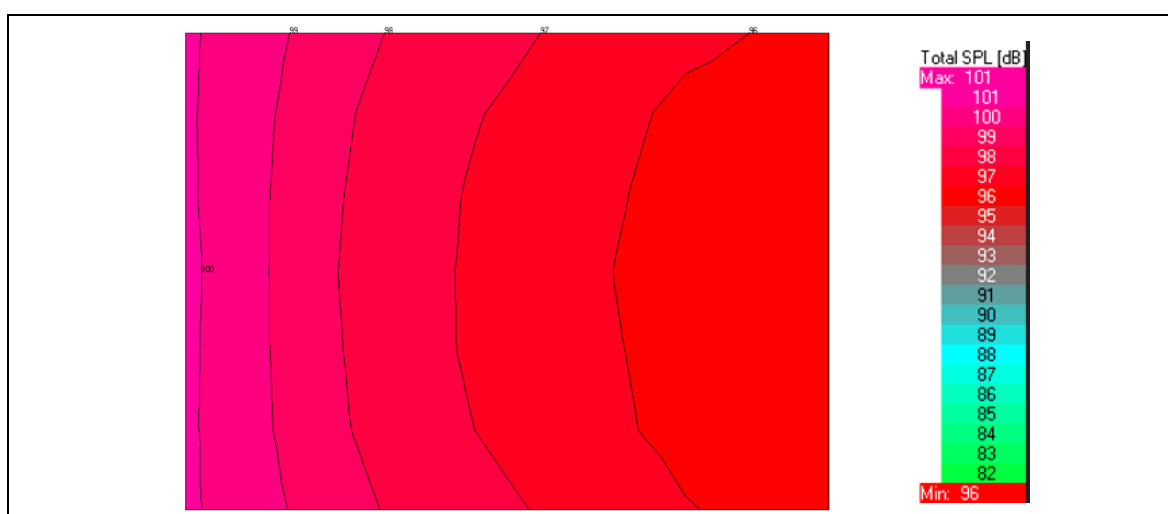


Abbildung 27: Schalldruckpegelverteilung im Raum bei der Oktavmittenfrequenz 2000 Hz, A-bewertet, Konzert – Variante 1

12.1.2 Nachhallzeit – Konzert

Die räumliche Verteilung der Nachhallzeit T_{30} gestaltet sich bei beiden untersuchten Varianten weitgehend gleichmäßig.

Variante 1: Zellulose-Schlitzabsorber 5/20

Bei Variante 1 liegen die Nachhallzeiten weitestgehend innerhalb der Toleranzgrenzen der Raumgruppe A1 „Musik“ gem. DIN 18041 [2]. Örtlich kommt es zu leichten Unterschreitungen der unteren Toleranzgrenze der Raumgruppe A1 „Musik“ gem. DIN 18041 [2] um maximal ca. 0,04 s im Frequenzbereich 2000 Hz. Durch die leichte Unterschreitung ist nicht von einer maßgeblichen Überdämpfung des Raumes auszugehen.

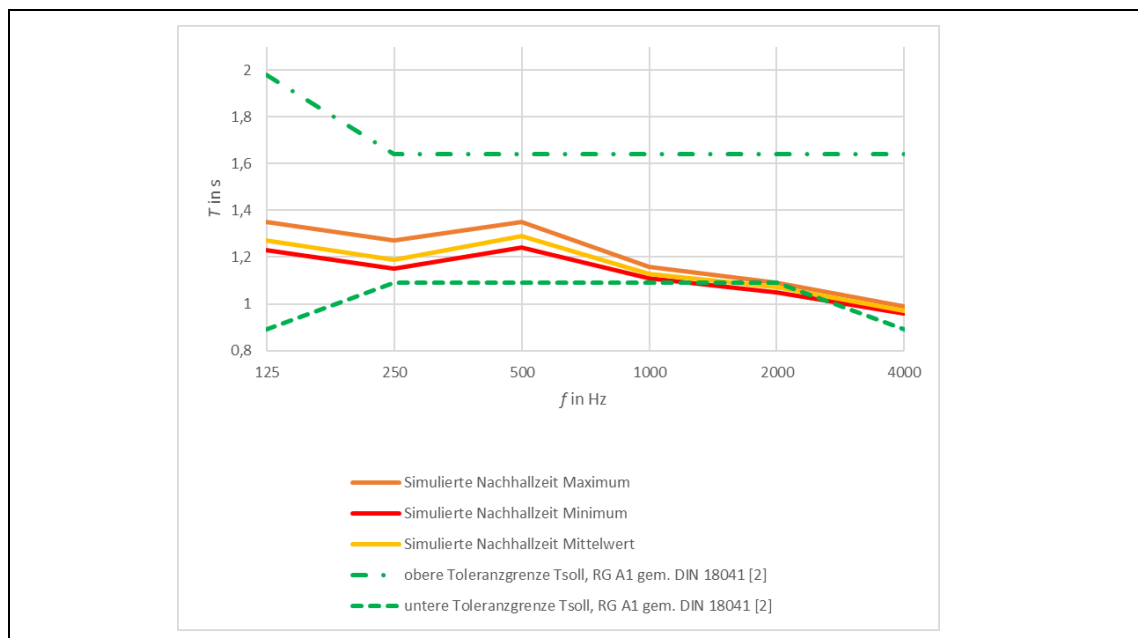


Abbildung 28: Nachhallzeit Konzert - Variante 1

Die frühe Nachhallzeit liegt im gesamten betrachteten Frequenzbereich innerhalb der Toleranzgrenzen für die Nachhallzeit der Raumgruppe A1 „Musik“ gem. DIN 18041 [2]. Im Frequenzbereich 1000 Hz bis 4000 Hz liegt die frühe Nachhallzeit EDT leicht über der Nachhallzeit T_{30} . Dies wird gem. W. Fasold und E. Ferres ([15], S. 141 f.) positiv gewertet.

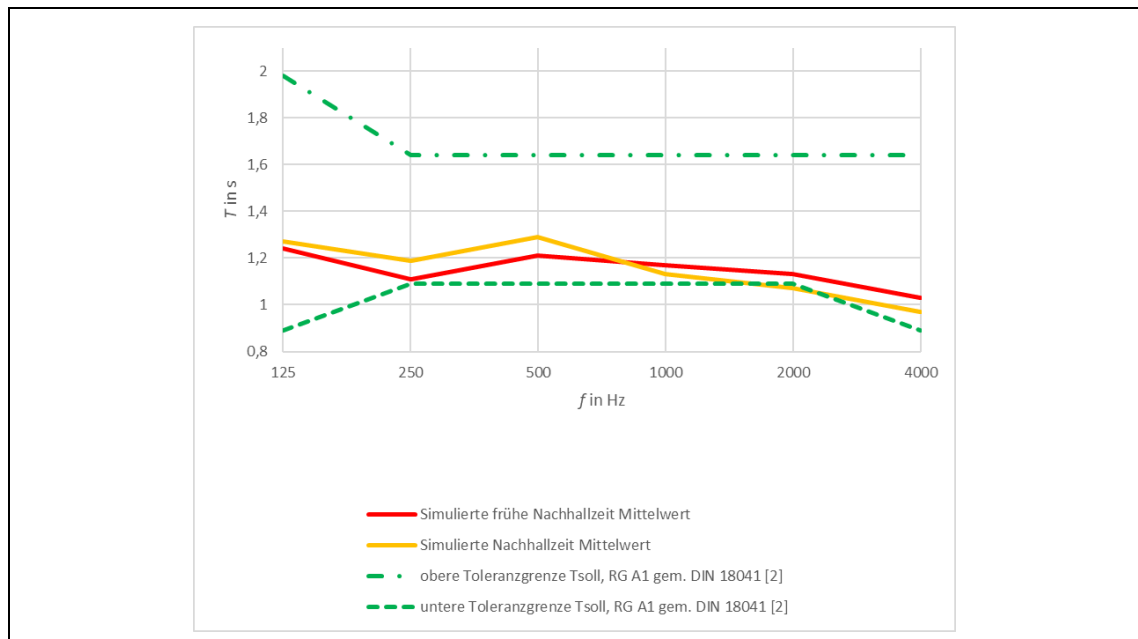


Abbildung 29: Vergleich EDT mit T_{30} , Raumnutzung Konzert - Variante 1

Variante 2: Glasschaumstreifen 33 %

Die Nachhallzeiten liegen bei Variante 2 im gesamten betrachteten Frequenzbereich innerhalb der Toleranzgrenzen der Raumgruppe A1 „Musik“ gem. DIN 18041 [2].

Einen ähnlichen Verlauf wie die Nachhallzeit T_{30} , mit Einhaltung der Toleranzgrenzen der Raumgruppe A1 „Musik“ gem. DIN 18041 [2] weist die frühe Nachhallzeit auf. Die frühe Nachhallzeit EDT ist im Frequenzbereich 1000 Hz bis 4000 Hz über der Nachhallzeit T_{30} . Dies ist gem. W. Fasold und E. Ferrer ([15], S. 141 f.) positiv zu werten.

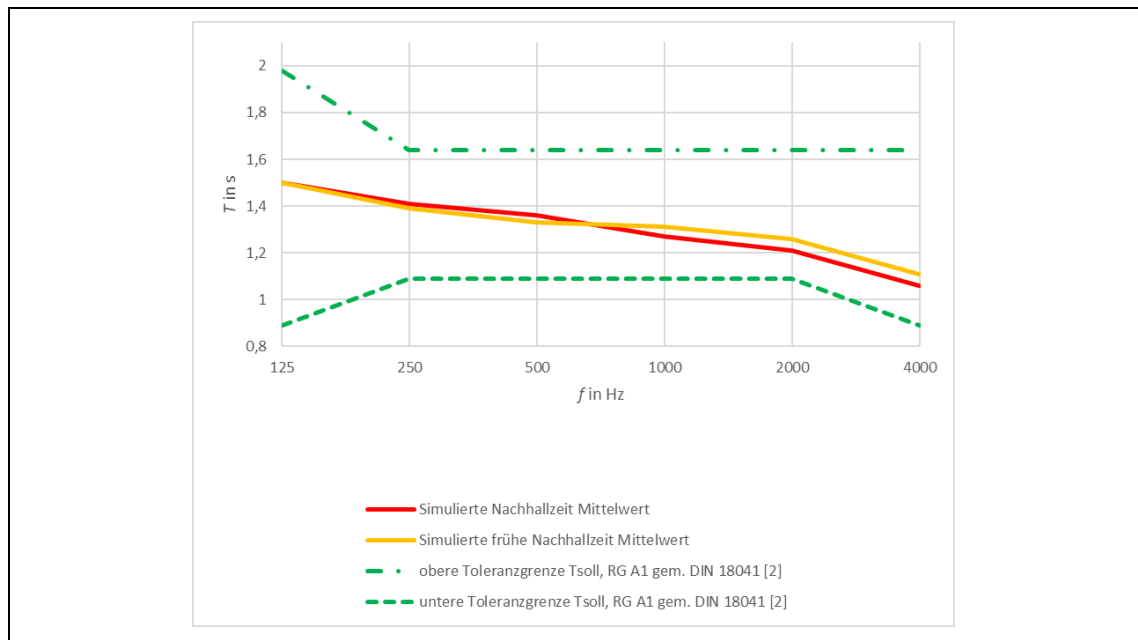


Abbildung 30: Vergleich EDT mit T30, Raumnutzung Konzert - Variante 2

12.1.3 Bassverhältnis – Konzert

Variante 1: Zellulose-Schlitzabsorber 5/20

Das Bass-Verhältnis liegt bei Variante 1 bei $BR = \text{ca. } 1,0$ und damit an der unteren Grenze des von W. Ahnert und H.-P. Tennhardt ([11], S. 191) beschriebenen Zielbereichs für Musik. Es kann, oberhalb der Schröderfrequenz $f_{\text{Schröder}} = \text{ca. } 80 \text{ Hz}$ im Rahmen der Simulationsgenauigkeit von einer ausgewogenen Wahrnehmung tiefer Frequenzen ausgegangen werden.

Variante 2: Glasschaumstreifen 33 %

Bei Variante 2 liegt das Bass-Verhältnis $BR = \text{ca. } 1,1$ und damit innerhalb des von W. Ahnert und H.-P. Tennhardt ([11], S. 191) beschriebenen Zielbereichs für Musik. Da gem. H.V. Fuchs ([18], S. 35 ff.) auch bei einem $BR > 1$ ungünstige Interferenzen im tieffrequenten Bereich auftreten können, sind ggfs. zusätzliche Maßnahmen mit guter Wirksamkeit im tieffrequenten Bereich sinnvoll, um das Bass-Verhältnis zu reduzieren.

12.1.4 Schwerpunktzeit – Konzert

Die Schwerpunktzeiten liegen bei beiden untersuchten Varianten im mittleren bis unteren Bereich der von W. Ahnert, S. Feistel ([9], S. 197) genannten Zielwerte 70 ms bis 150 ms bei 1000 Hz. Die Werte sprechen für eine ausreichend räumliche akustische Wahrnehmung und Durchsichtigkeit der Schallereignisse.

Im Mittel ergeben sich unter Berücksichtigung der Standardabweichung folgende Werte

- Variante 1: $t_s = 84,35 \text{ ms} \pm 3,44 \text{ ms}$
- Variante 2: $t_s = 95,74 \text{ ms} \pm 2,19 \text{ ms}$

12.1.5 Klarheitsmaß für Musik – Konzert

Die Berechnungsergebnisse für das Klarheitsmaß für Musik liegen bei beiden untersuchten Varianten bei $C_{80} = 0 \text{ dB}$ bis $+3 \text{ dB}$ und somit innerhalb des von beschriebenen W. Ahnert und S. Feistel ([9], S. 199) Zielbereichs, was für eine ausreichende Durchschaubarkeit schneller Musikpassagen spricht.

Im Mittel ergeben sich unter Berücksichtigung der Standardabweichung folgende Werte

- Variante 1: $C_{80} = 1 \text{ dB}$ bis 3 dB
- Variante 2: $C_{80} = 0 \text{ dB}$ bis 3 dB

12.1.6 Seitenschallmaß – Konzert

Über den gesamten betrachteten Frequenzbereich liegen die Seitenschallmaße bei beiden Varianten zwischen -6 dB und -5 dB . Der optimale Wert nach H.V. Fuchs ([16], S.189) für Konzertsäle wird eingehalten.

12.2 Raumnutzung Musik interaktiv

Die detaillierten Ergebnisse können Anlage 4 und 5 entnommen werden.

12.2.1 Pegelverteilung – Musik interaktiv

Da die Empfangsorte gleichzeitig Schallquellen darstellen, die gleichmäßig im Raum verteilt sind ergeben sich bei beiden untersuchten Varianten geringfügige Pegelunterschiede $\Delta L_p = 1$ bis 2 dB zwischen den Empfangsorten. Die Pegel nehmen in den hinteren Bereichen aufgrund der verorteten Deckenmaßnahmen geringfügig ab.

Das Stärkemaß liegt wie bei der Konzernutzung bei beiden Varianten aufgrund des hohen Diffusanteils im vorderen Zuhörerbereich um bis zu 10 dB über dem von W. Fasold und E. Ferres ([15], Tabelle 4.18) beschriebenen Optimalbereich für Aufführungsräume. Zur Verringerung des Stärkemaßes sind zusätzliche Absorber im Raum erforderlich. Da eine Erhöhung der Schallabsorption im Raum zur Überdämpfung des Raumes führt, wird eine erhöhte Stärkemaß zugunsten weiterer raumakustischer Kriterien toleriert.

12.2.2 Nachhallzeit – Musik interaktiv

Die Nachhallzeit T_{30} liegt bei beiden Varianten im gesamten betrachteten Frequenzbereich innerhalb der Toleranzgrenzen der Raumgruppe A1 „Musik“ gem. DIN 18041 [2]. Die höheren Nachhallzeiten im Vergleich zur Konzernutzung begründen sich in der geringeren Besetzungsdichte und fehlenden Bestuhlung des Raumes.

Variante 1: Zellulose-Schlitzabsorber 5/20

Der Frequenzverlauf der frühen Nachhallzeit gestaltet sich ähnlich wie der der Nahhallzeit, liegt jedoch im gesamten betrachteten Frequenzbereich unterhalb der Nachhallzeit T_{30} . Die frühe Nachhallzeit EDT liegt wie die Nachhallzeit T_{30} im gesamten betrachteten Frequenzbereich innerhalb der Toleranzgrenzen der Raumgruppe A1 „Musik“ gem. DIN 18041. Gem. W. Fasold und E. Ferres ([15], S. 141 f.) ist ein frühe Nachhallzeit die oberhalb der Nachhallzeiten liegt anzustreben. Dies wird hier nicht erreicht.

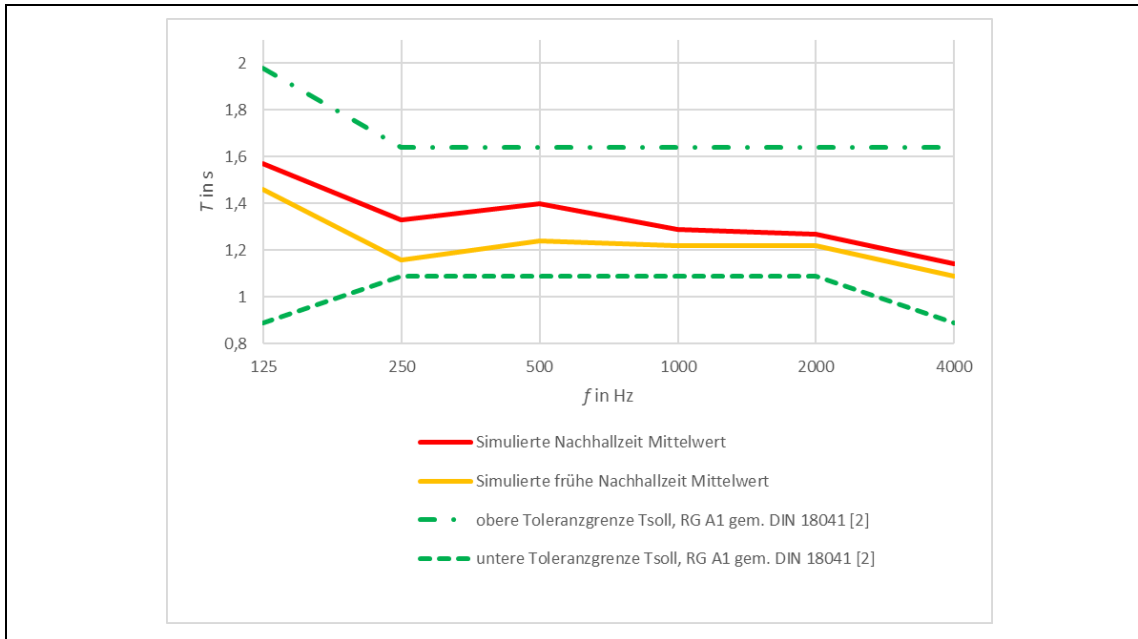


Abbildung 31: Vergleich EDT mit T_{30} , Raumnutzung Musik interaktiv – Variante 1

Variante 2: Glasschaumstreifen 33 %

Der Frequenzverlauf der frühen Nachhallzeit gestaltet sich ähnlich wie der der Nachhallzeit T_{30} . Gem. W. Fasold und E. Ferrer ([15], S. 141 f.) wird eine frühe Nachhallzeit EDT die höher ist als die Nachhallzeit T_{30} , als positiv empfunden. Die frühe Nachhallzeit EDT liegt weitgehend unterhalb der Nachhallzeit T_{30} .

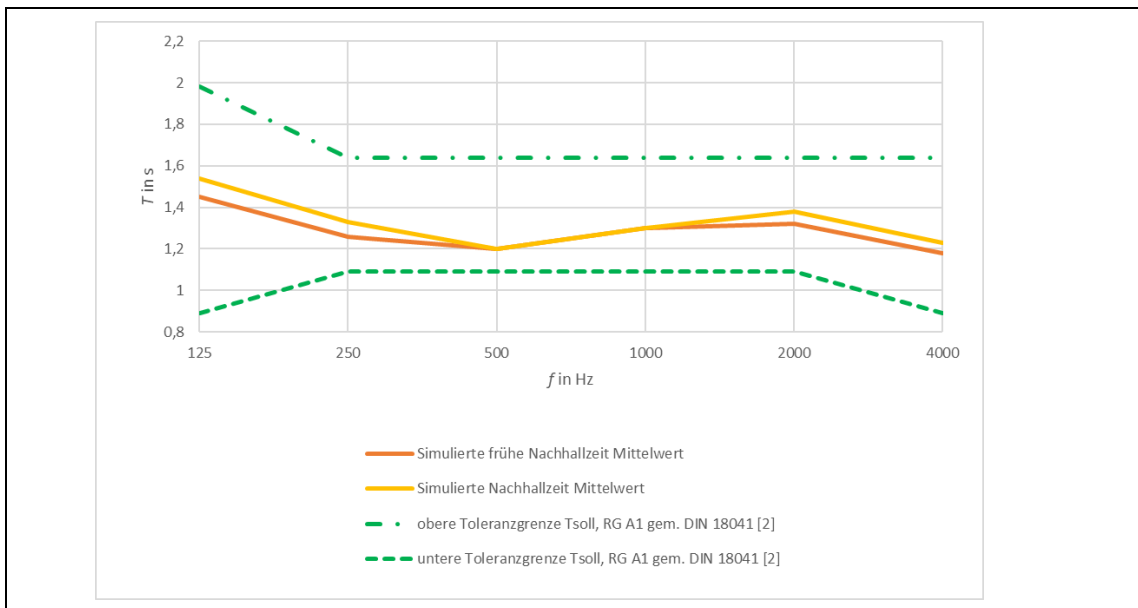


Abbildung 32: Frühe Nachhallzeit Raumnutzung Musik interaktiv – Variante 2

12.2.3 Bass-Verhältnis – Musik interaktiv

Variante 1: Zellulose-Schlitzabsorber 5/20

Das Bass-Verhältnis liegt bei $BR = \text{ca. } 1,1$ und liegt damit innerhalb des von W. Ahnert und H.-P. Tennhardt ([11], S. 191) beschriebenen Zielbereichs für Musik. Da gem. H.V. Fuchs ([18], S. 35 ff.) auch bei einem $BR > 1$ ungünstige Interferenzen im tieffrequenten Bereich auftreten können, sind ggfs. zusätzliche Maßnahmen mit guter Wirksamkeit im tieffrequenten Bereich empfehlenswert, um das Bass-Verhältnis zu reduzieren.

Variante 2: Glasschaumstreifen 33 %

Das Bass-Verhältnis liegt aufgrund zusätzlichen Verbundplatten-Resonatoren bei $BR = \text{ca. } 1,2$ und liegt damit innerhalb des von W. Ahnert und H.-P. Tennhardt ([11], S. 191) beschriebenen Zielbereichs für Musik. Da gem. H.V. Fuchs ([18], S. 35 ff.) auch bei einem $BR > 1$ ungünstige Interferenzen im tieffrequenten Bereich auftreten können, könnten zusätzliche Verbundplatte-Resonatoren oder ähnliche Maßnahmen sinnvoll sein.

12.2.4 Schwerpunktzeit – Musik interaktiv

Die Schwerpunktzeiten liegen an den Teilnehmerpositionen bei beiden Varianten mit einer minimalen Schwerpunktzeit $t_s = 55 \text{ ms}$ unterhalb der von W. Ahnert, S. Feistel ([9], S. 197) genannten Zielwerte 70 ms bis 150 ms bei 1000 Hz. Die Schwerpunktzeit nimmt zu den hinteren besser bedämpften Plätzen ab. Die Werte sprechen für eine gute Durchsichtigkeit der Schallereignisse. In den Bereichen mit geringerer Schwerpunktzeit ist von einer weniger ausgeprägten räumlichen Wahrnehmung auszugehen.

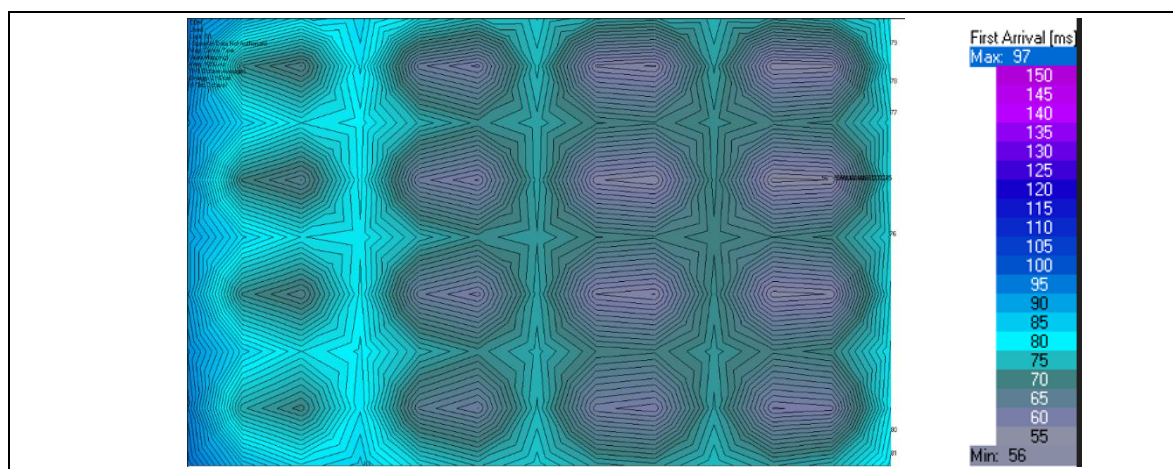


Abbildung 33: Schwerpunktzeit, Raumverteilung bei Oktavmittenfrequenz 1000 Hz, Musik interaktiv – Variante 1

12.2.5 Klarheitsmaß für Musik – Musik interaktiv

Die Berechnungsergebnisse für das Klarheitsmaß für Musik liegen bei beiden Varianten bei bis zu $C_{80} = +6$ dB bei den Teilnehmerplätzen. Der von W. Ahnert und S. Feistl ([9], S. 199) beschriebene Zielbereich $C_{80} = -3$ dB bis $+4$ dB wird um bis zu 2 dB überschritten. Dies bedeutet, dass im Vergleich zum Optimum zu wenige späte Reflexionen entstehen, die den Raumeindruck verstärken. Dabei spielt auch die Tatsache eine Rolle, dass die Empfangsorte gleichzeitig auch Schallquellen sind, wodurch der frühe Schalleintrag bei den Empfangsorten vergleichsweise hoch ist. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache und der nur geringfügigen Überschreitung des definierten Zielbereichs ist von einem angemessenem räumlichen Eindruck auszugehen.

12.2.6 Seitenschallmaß – Musik interaktiv

Über den gesamten betrachteten Frequenzbereich liegen die Seitenschallmaße bei der Variante mit Zellulose-Schlitzabsorbieren zwischen -7 dB und -5 dB. Der optimale Bereich nach W. Fasold und E. Ferres ([15], Tabelle 4.18) zwischen -4 dB und -7 dB wird eingehalten. Bei der Variante mit Glasschaum-Streifen wird das empfohlene Seitenschallmaß um 2 dB unterschritten. Bei der Bewertung ist wie bei der Bewertung des Klarheitsmaßes zu berücksichtigen, dass die Empfangsorte gleichzeitig Schallquellen darstellen, wodurch sich ein hoher Gesamt-Schalleintrag und sich damit rechnerisch ein relativ geringer Seitenschallgrad ergibt.

12.3 Raumnutzung Vortrag

Die detaillierten Ergebnisse können Anlage 6 und 7 entnommen werden.

12.3.1 Pegelverteilung – Vortrag

Die nach H.V. Fuchs ([16], S. 184) als gut geltende maximale Pegeldifferenz $\Delta L = 5$ dB wird bei beiden Varianten teilweise deutlich um $\Delta L = 1$ bis 3 dB überschritten. Die vergleichsweise starke Abnahme der Schalldruckpegel ist ein Resultat der Schallabsorption durch das Publikum und der absorbierenden Maßnahmen, die zur Optimierung weiterer raumakustischer Kenngrößen, bspw. Nachhallzeit, Artikulationsverlust o.ä. erforderlich sind. Um die Pegelabnahme zu verringern, empfiehlt sich ggfs. eine elektroakustische Unterstützung mit Anordnung von Lautsprechern im hinteren Bereich.

Mit der in Kap. 11.3 beschriebenen Lautsprecheranordnung kann die maximale Pegeldifferenz in den Zuschauerbereichen auf maximal $\Delta L = 5$ dB begrenzt werden.

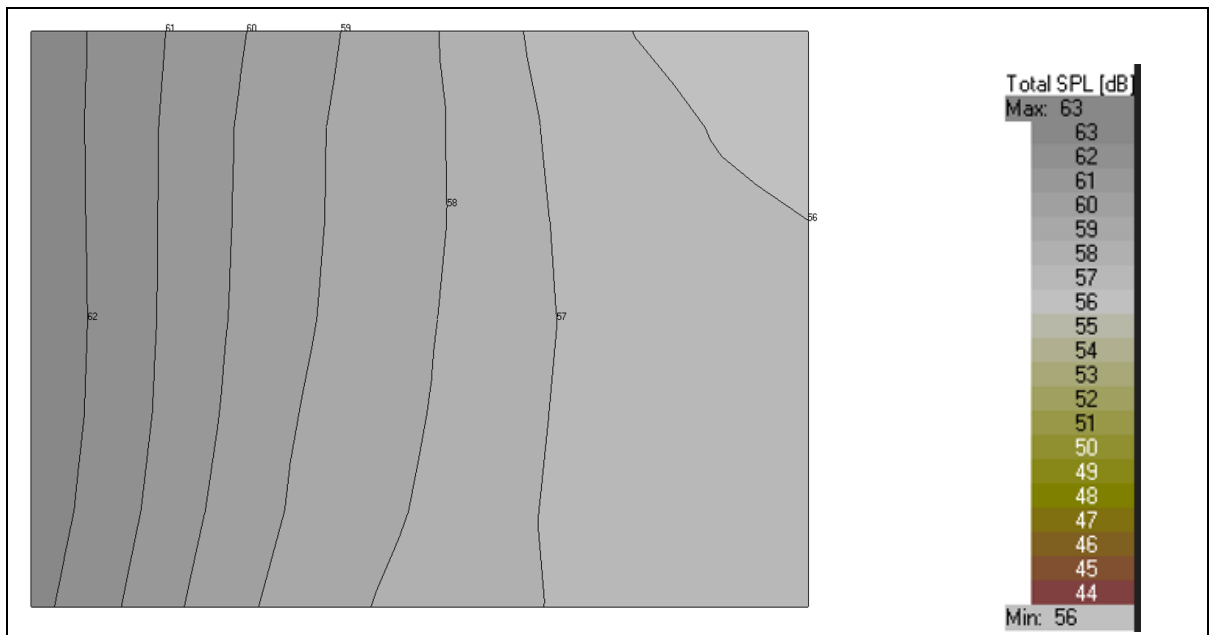


Abbildung 34: Schalldruckpegelverteilung im Raum bei der Oktavmittenfrequenz 2000 Hz, A-bewertet, Vortrag – Variante 1 ohne Lautsprecher

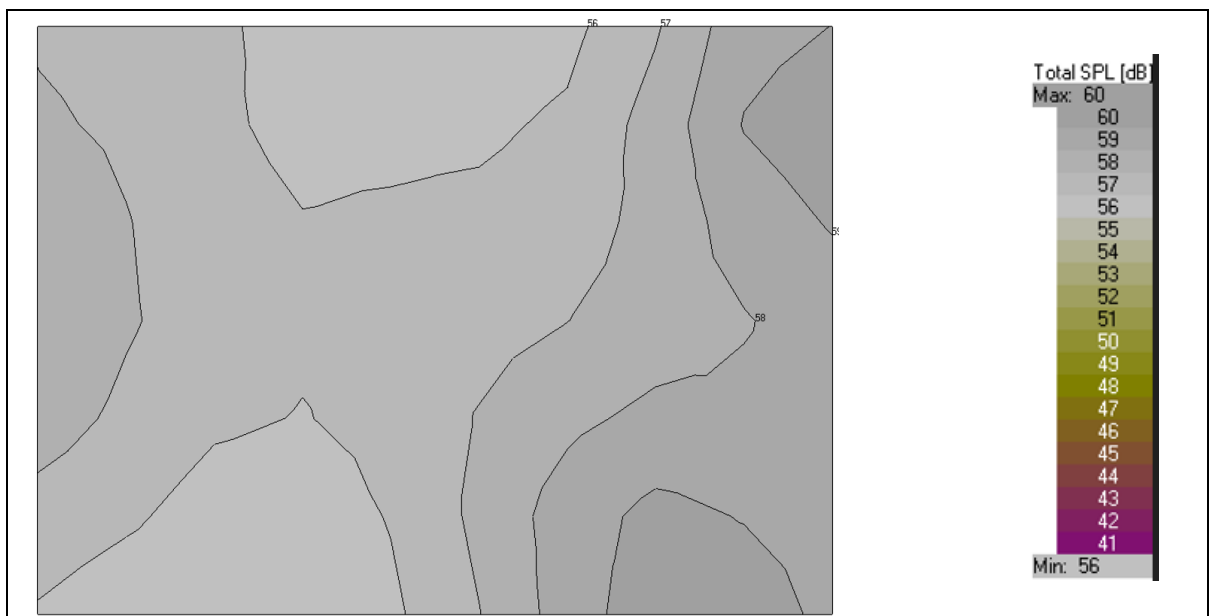


Abbildung 35: Schalldruckpegelverteilung im Raum bei der Oktavmittenfrequenz 2000 Hz, A-bewertet, Vortrag – Variante 1 mit Lautsprecher

Das Stärkemaß ist aufgrund der zusätzlichen Absorber geringer als bei der Konzernutzung, die Verbesserung beschränkt sich im vorderen Bereich aufgrund der Nähe zur Schallquelle und der vergleichsweise geringen Absorption im Ausbreitungsweg auf maximal $\Delta G = \text{ca. } 1 \text{ dB}$. Im hinteren Bereich ergeben sich um $\Delta G = \text{ca. } 4 \text{ dB}$ günstigere Werte.

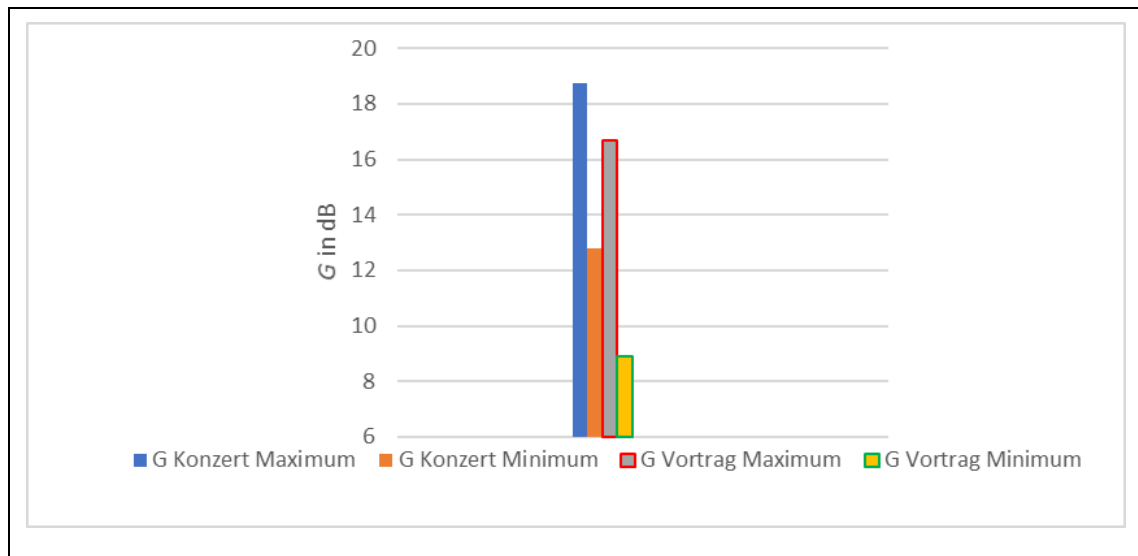


Abbildung 36: Stärkemaß G , Vergleich Vortrag und Konzert, Variante 1

Die empfohlenen Werte $G = -2$ dB bis $+10$ dB werden im hintersten Bereich eingehalten.

Im mittleren bis vorderen Bereich kommt es weiterhin zu Überschreitungen des von W. Fasold und E. Ferres ([15], Tabelle 4.18) beschriebenen Optimalbereichs für Aufführungsräume um bis zu 7 dB. Dies verdeutlicht, dass zum Erreichen des Zielbereichs $G = -2$ dB bis $+10$ dB für Aufführungsräume dieser Größe deutlich höhere Absorptionsflächen erforderlich sind, die zur Überdämpfung des Raumes führen würden. Der Bezug des Schallpegels auf eine Quelle im Freifeld bzw. der angegebene Zielbereich erscheint für Räume dieser Größe ungeeignet und wird im Weiteren nicht mehr betrachtet.

12.3.2 Nachhallzeit – Vortrag

Variante 1: Zellulose-Schlitzabsorber 5/20

Die Nachhallzeiten liegen im gesamten betrachteten Frequenzbereich innerhalb des Toleranzbereichs für die Raumgruppe A2 „Sprache Vortrag“ gem. DIN 18041 [2]. Im gesamten betrachteten Frequenzbereich wird der Toleranzbereich für die Raumgruppe A3 „Sprache Vortrag inklusiv“ gem. DIN 18041 [2] ebenfalls in vielen Bereichen eingehalten. In Teilbereichen kommt es zu Überschreitungen der oberen Toleranzgrenze für die Raumgruppe A3 „Sprache Vortrag inklusiv“ gem. DIN 18041 [2] im Frequenzbereich 250 Hz bis 1000 Hz:

In den Teilbereichen mit höheren Nachhallzeiten ist insbesondere für sprachlich benachteiligte und Hörgeschädigte von Beeinträchtigungen der Silberverständlichkeit durch Überdeckung aufeinander folgender Silben, durch längere Abklingzeiten

auszugehen. Zur Optimierung sind zusätzliche Absorber erforderlich. Dies ist platztechnisch nicht realisierbar ohne im Bühnenbereich Absorber vorzusehen. Im Bühnenbereich soll aufgrund der positiven Wirkung früher Reflexionen auf den Raumklang und die Pegelverteilung im Raum verzichtet werden.

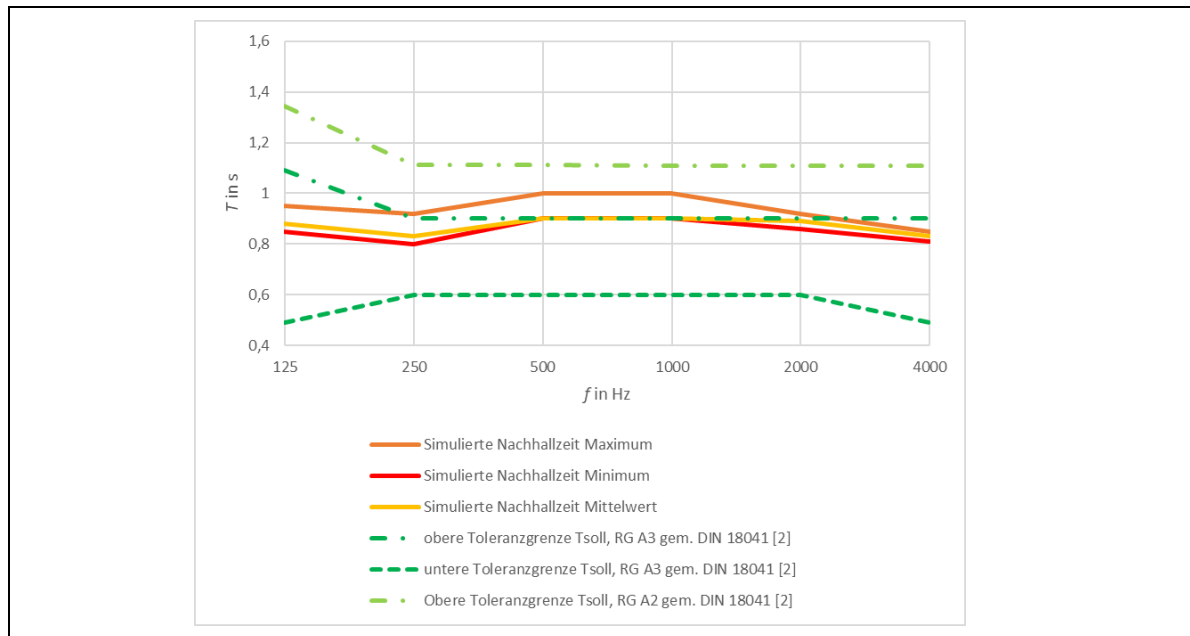


Abbildung 37: Nachhallzeit Vortrag - Variante 1

Variante 2: Glasschaumstreifen 33 %

Die Nachhallzeiten liegen im gesamten betrachteten Frequenzbereich innerhalb des Toleranzbereichs für die Raumgruppe A2 „Sprache Vortrag“ gem. DIN 18041 [2]. Im Frequenzbereich 500 Hz bis 4000 Hz wird der Toleranzbereich für die Raumgruppe A3 „Sprache Vortrag inklusiv“ gem. DIN 18041 [2] weitgehend überschritten.

In den Teilbereichen mit höheren Nachhallzeiten ist insbesondere für sprachlich und benachteiligte und hörgeschädigte von Beeinträchtigungen der Silberverständlichkeit durch Überdeckung aufeinander folgender Silben, durch längere Abklingzeiten auszugehen. Zur Optimierung wären zusätzliche Absorber erforderlich. Dies ist platztechnisch nicht realisierbar ohne im Bühnenbereich Absorber vorzusehen. Im Bühnenbereich soll aufgrund der positiven Wirkung früher Reflexionen auf den Raumklang und die Pegelverteilung im Raum verzichtet werden.

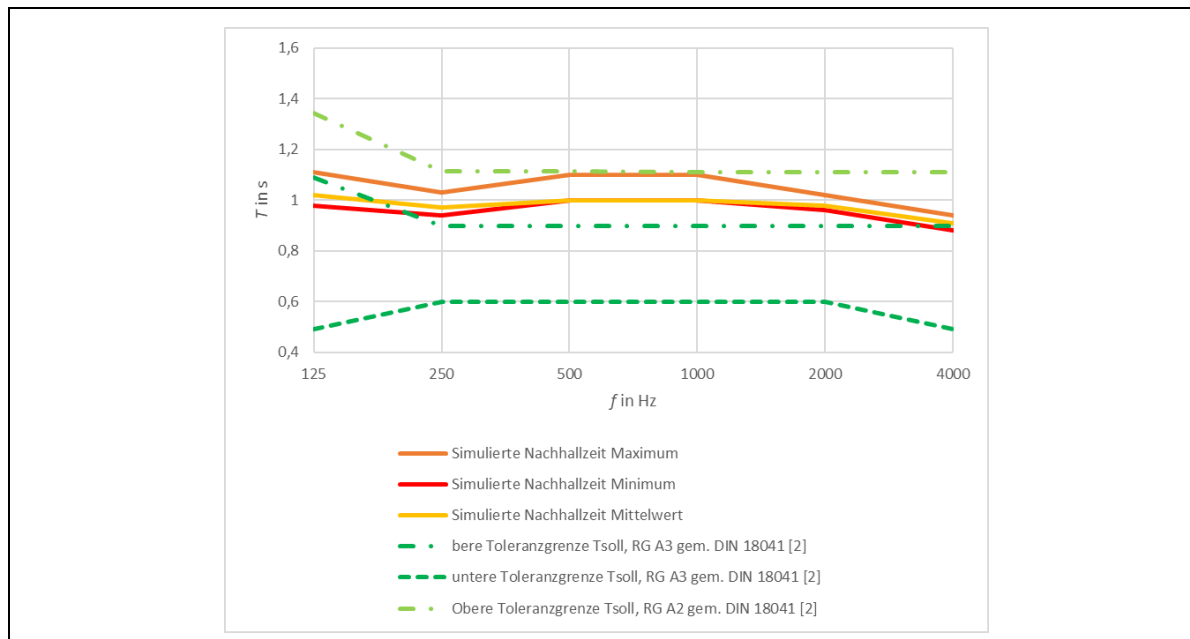


Abbildung 38: Nachhallzeit Vortrag - Variante 2

12.3.3 Bass-Verhältnis – Vortrag

Das Bass-Verhältnis liegt bei beiden Varianten bei $BR = \text{ca. } 1,0$ und liegt damit an der oberen Grenze des von W. Ahnert und H.-P. Tennhardt ([11], S. 191) beschriebenen Zielbereichs für Sprache. Es kann, oberhalb der Schröderfrequenz $f_{\text{Schröder}} = \text{ca. } 70 \text{ Hz}$ im Rahmen der Simulationsgenauigkeit von einer ausgewogenen Wahrnehmung tiefer Frequenzen ausgegangen werden.

12.3.4 Schwerpunktzeit – Vortrag

Die Schwerpunktzeiten liegen bei $t_s = 58 \text{ ms}$ bis 80 ms . Insbesondere in den vorderen Bereichen liegen die Schwerpunktzeiten bei Variante 1 teilweise leicht unterhalb der von W. Ahnert, S. Feistel ([9], S. 197) genannten Zielwerte 60 ms bis 80 ms bei 500 Hz bis 4 kHz . Die leichten Unterschreitungen der Schwerpunktzeiten lassen auf eine geringfügig verringerte räumliche akustische Wahrnehmung schließen. Von ungünstigen Auswirkungen auf die Durchsichtigkeit der Schallereignisse ist nicht auszugehen. Die von W. Fasold und E. Ferrer ([15], Tabelle 4.18) beschriebene Anforderung an eine Schwerpunktzeit $t_s < 80 \text{ ms}$ wird eingehalten.

Mit Lautsprechern liegen die Schwerpunktzeiten insgesamt deutlich niedriger als ohne Lautsprecher.

12.3.5 Artikulationsverlust – Vortrag

Der Artikulationsverlust liegt bei beiden untersuchten Varianten zwischen 7 % und 10 % und weist nach W. Ahnert und S. Feistel ([9], S. 193) auf eine angemessene bis gute Sprachverständlichkeit hin.

Mit Lautsprechern ist der Artikulationsverlust bei beiden Varianten mit einem Minimum 4 % in Teilbereichen deutlich günstiger zu werten als ohne Lautsprecher. Im ungünstigsten Fall ergeben sich dieser Variante maximal 9 %. Im Mittel ist der Artikulationsverlust mit Lautsprechern günstiger zu Werten.

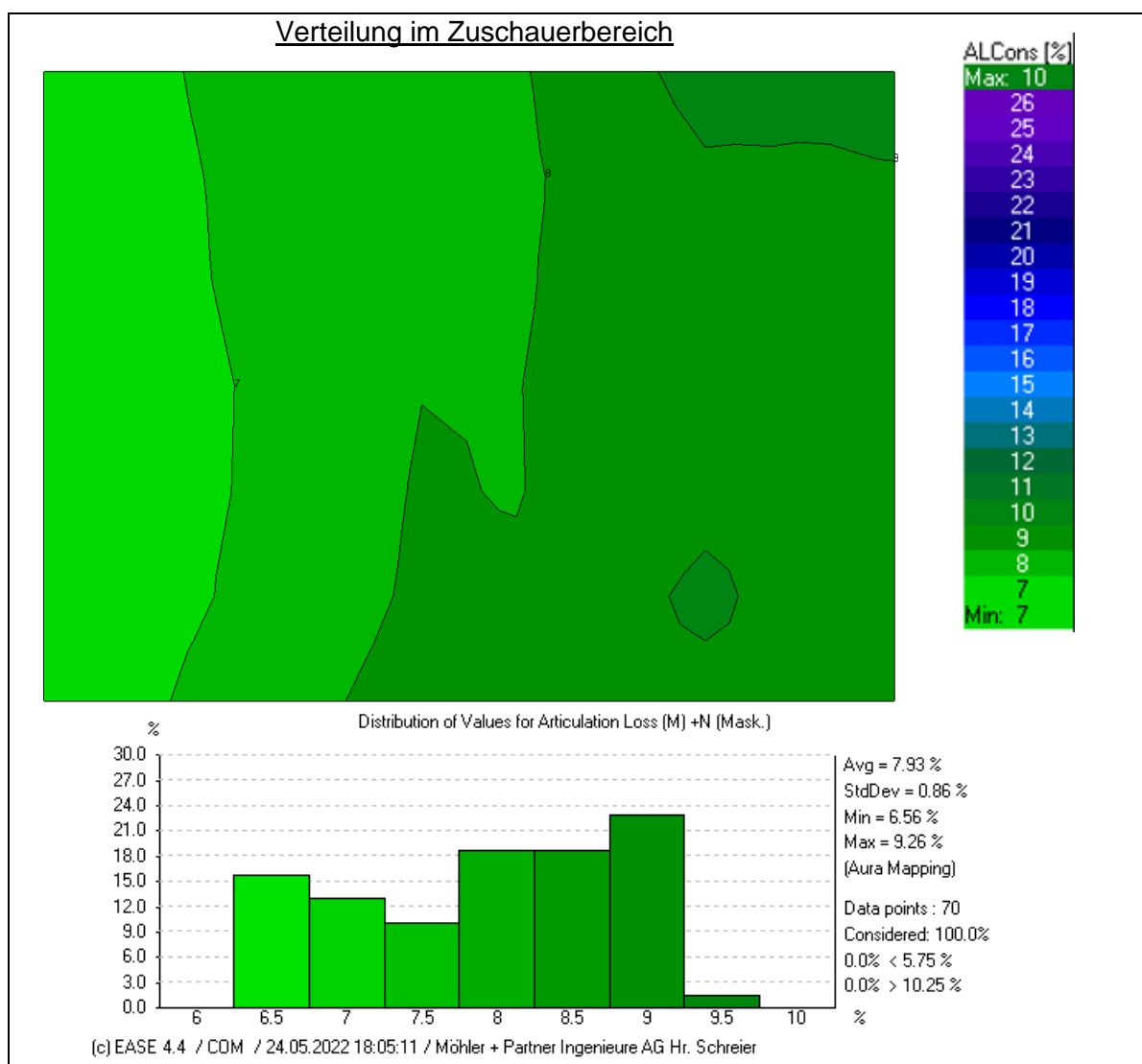


Abbildung 39: AL_{cons} Vortrag, Variante 1 ohne Lautsprecher

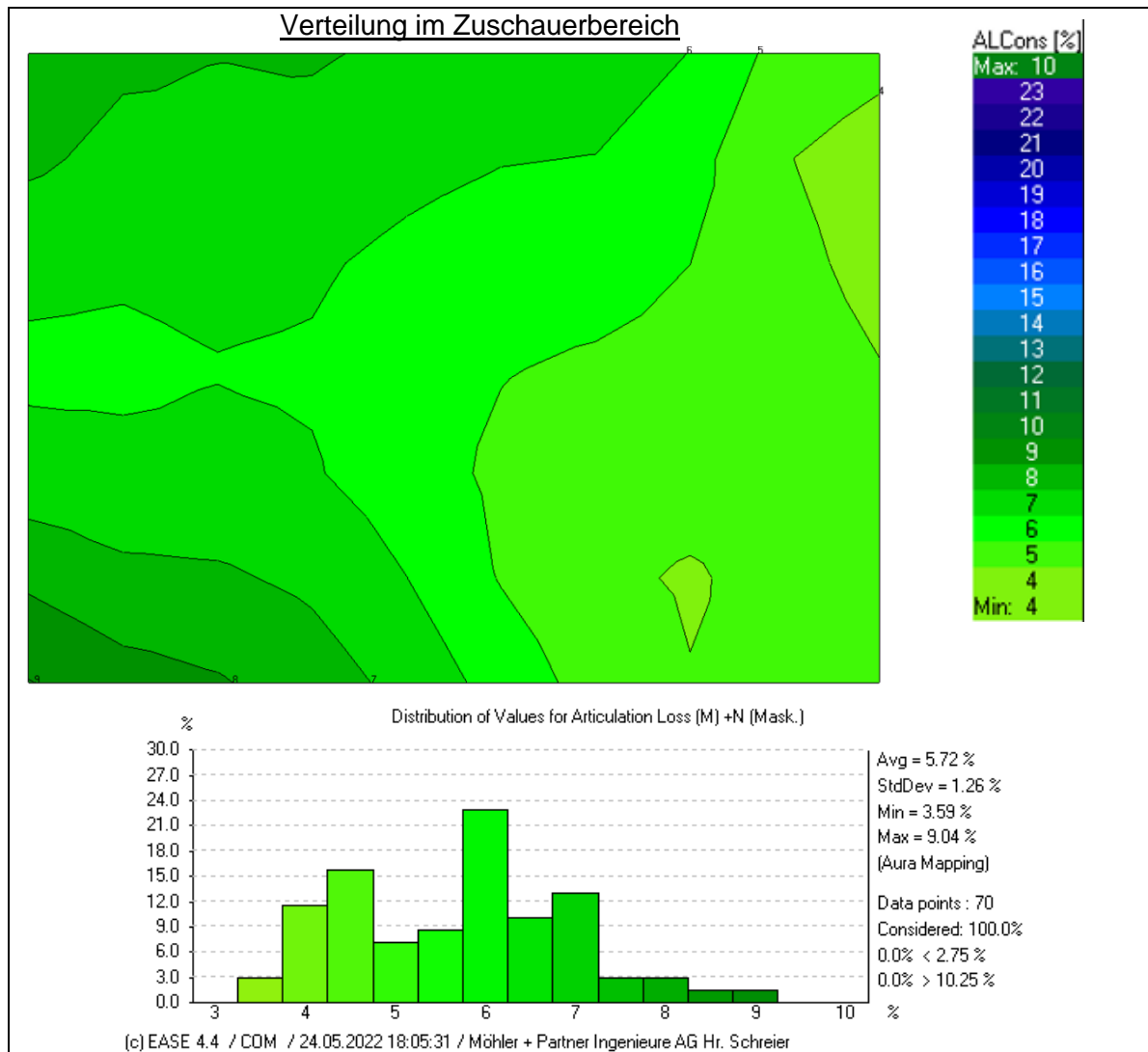


Abbildung 40: Al_{cons} Vortrag, Variante 1 mit Lautsprechern

12.3.6 Deutlichkeitsmaß für Sprache – Vortrag

Die Berechnungsergebnisse für das Deutlichkeitsmaß für Sprache liegen bei beiden untersuchten Varianten zwischen $C_{50} = 0$ dB bis +4 dB im Frequenzbereich 500 Hz bis 4000 Hz und erfüllt somit in diesen Bereichen das von H.V. Fuchs ([16], S. 187) beschriebene Planungsziel $C_{50} \geq 0$ dB.

Mit Lautsprechern werden Werte bis zu $C_{50} = +11$ dB erreicht.

12.3.7 Sprach-Übertragungs-Index (STI) – Vortrag

Der Sprach-Übertragungs-Index liegt bei $STI = \text{ca. } 0,5$ bis $\text{ca. } 0,6$. Gem. DIN EN ISO 9921 ([7], Tabelle F.1) ist eine angemessene bis gute Silbenverständlichkeit zu erwarten.

Mit Lautsprechern ergibt sich bei Variante 1 ein maximaler Wert für den Sprach-Übertragungs-Index $STI = 0,71$. Bei Variante 2 liegt der maximale Wert für den Sprach-Übertragungs-Index bei $STI = 0,69$. Die Silbenverständlichkeit ist somit günstiger zu werten als ohne Lautsprecher. In den ungünstigsten Bereichen ergibt sich ein minimaler Wert $STI = 0,54$.

Insgesamt ist die Silbenverständlichkeit mit Lautsprechern als günstiger zu bewerten.

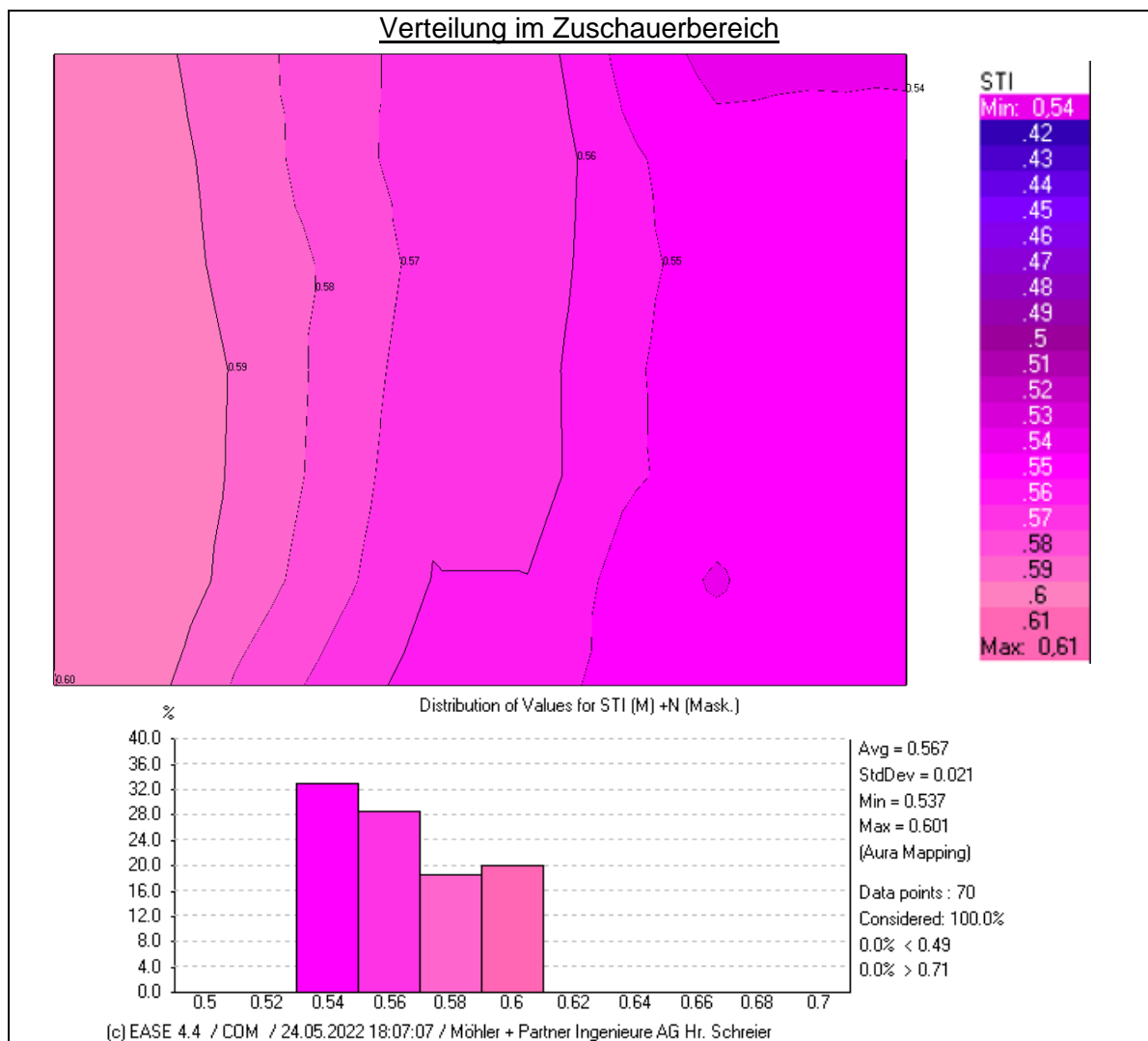


Abbildung 41: STI Vortrag, Variante 1 ohne Lautsprecher

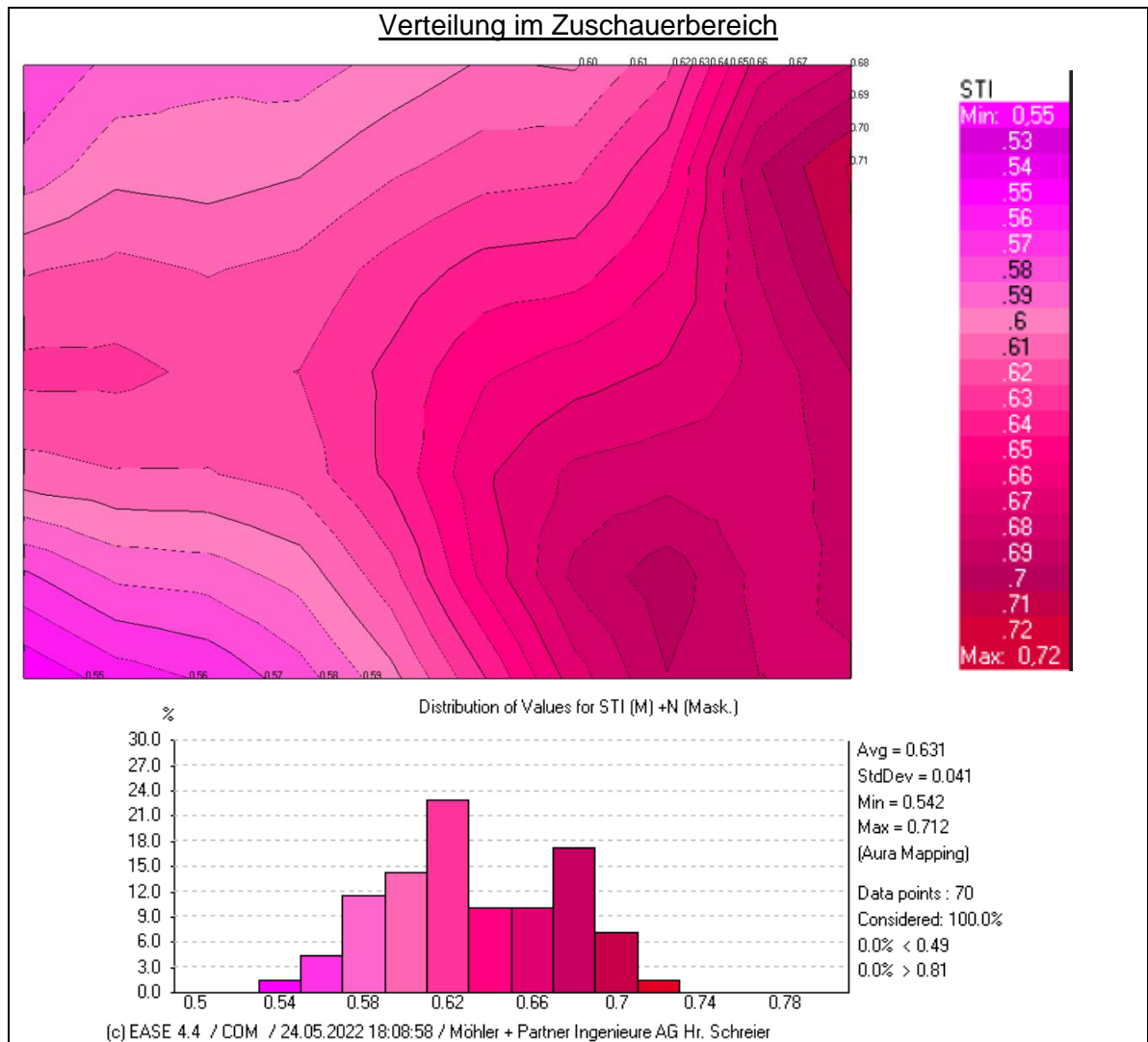


Abbildung 42: STI Vortrag, Variante 1 mit Lautsprechern

12.4 Raumnutzung Führung

Die detaillierten Ergebnisse können Anlage 8 bis 15 entnommen werden.

12.4.1 Pegelverteilung – Führung

Bei beiden Varianten wird das Planungsziel $\Delta L \leq 5$ dB um 1 dB stellenweise überschritten. In den hinteren Bereichen kann es aufgrund geringerer Pegel zu Verständnisproblemen kommen. Personen mit Verständnisschwierigkeiten sollte daher ein nahe bei der vortragenden Person gelegener Platz zugewiesen werden.

12.4.2 Nachhallzeit – Führung

Variante 1: Zellulose-Schlitzabsorber 5/20

In Abbildung 43 sind die Maxima und Minima der untersuchten Anordnungen 1, 2, 3 (vgl. Abbildung 25) dargestellt. Die Anforderungen an die Nachhallzeit der Raumgruppe A3 „Sprache/Vortrag inklusiv“ gem. DIN 18041 [2] wird weitgehend eingehalten. Die Abklingzeiten liegen somit in einem guten Bereich für Sprachverständnis. Im Frequenzbereich 250 Hz kommt es stellenweise zu leichten Überschreitungen der oberen Toleranzgrenze der Raumgruppe A3 „Sprache/Vortrag inklusiv“ gem. DIN 18041. Von einer maßgeblichen Beeinträchtigung der Hörsamkeit ist aufgrund der geringfügigen Überschreitung nicht auszugehen.

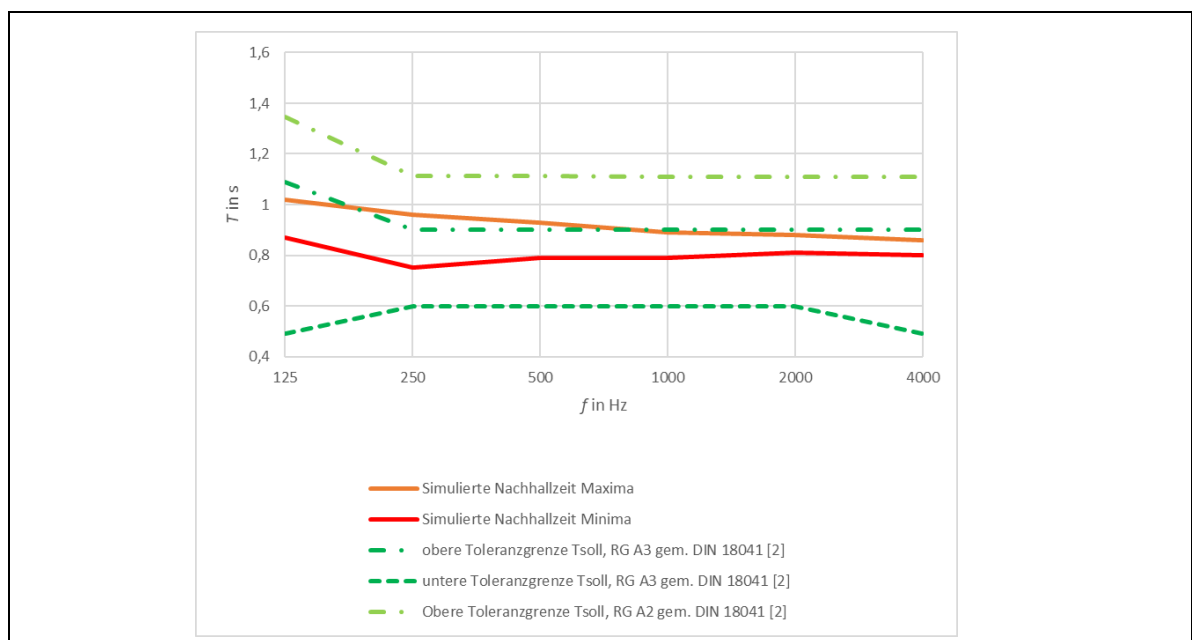


Abbildung 43: Nachhallzeiten Maxima und Minima, Führung, Variante 1

Variante 2: Glasschaumstreifen 33 %

In Abbildung 44 sind die Maxima und Minima der untersuchten Anordnungen 1, 2, 3 (vgl. Abbildung 25) dargestellt. An einigen Stellen wird die obere Toleranzgrenze der Raumgruppe A3 „Sprache/Vortrag inklusiv“ gem. DIN 18041 [2] überschritten. Im Frequenzbereich 250 Hz wird der Toleranzbereich der Raumgruppe A3 „Sprache/Vortrag inklusiv“ gem. DIN 18041 [2] im gesamten Zuhörerbereich überschritten. Die obere Toleranzgrenze der Raumgruppe A2 „Sprache/Vortrag“ gem. DIN 18041 [2] wird eingehalten. In den Bereichen mit höheren Nachhallzeiten kann es aufgrund von längeren Abklingvorgängen zur Überdeckung hintereinander erklingender Laute kommen. Dies

hat insbesondere für Hörgeschädigte und Personen mit Sprachbarrieren Auswirkungen auf die Hörsamkeit.

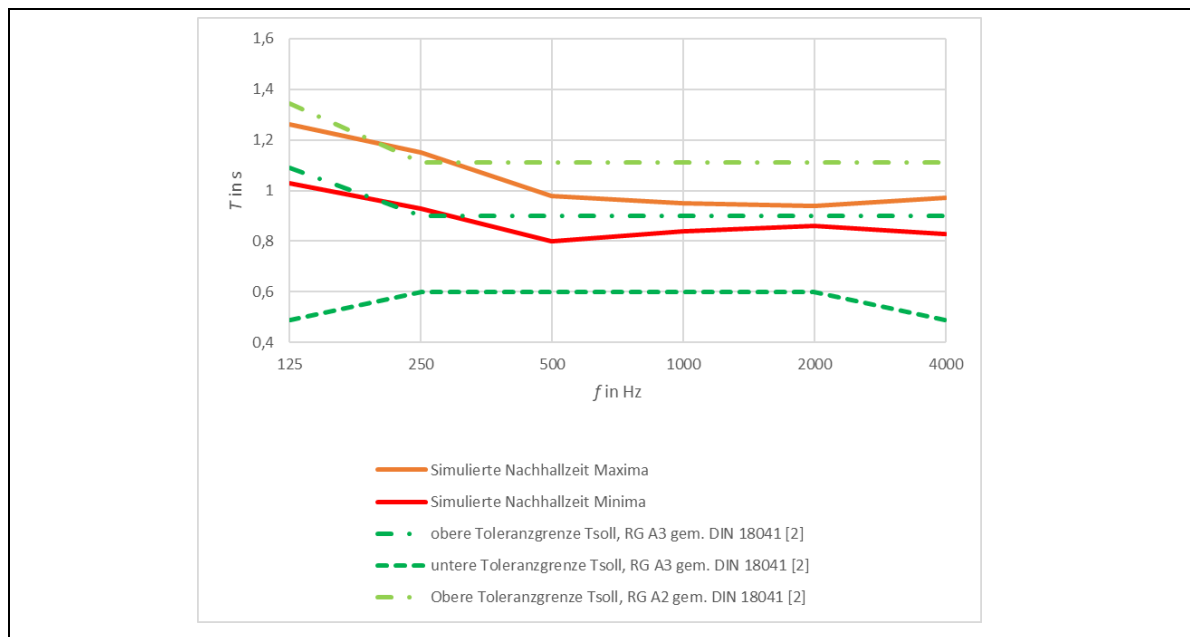


Abbildung 44: Nachhallzeiten Maxima und Minima, Führung, Variante 2

12.4.3 Bass-Verhältnis – Führung

Variante 1: Zellulose-Schlitzabsorber 5/20

Das Bass-Verhältnis liegt bei $BR = \text{ca. } 1,0$ und liegt damit an der oberen Grenze des von W. Ahnert und H.-P. Tennhardt ([11], S. 191) beschriebenen Zielbereichs für Sprache.

Variante 2: Glasschaumstreifen 33 %

Das Bass-Verhältnis liegt bei $BR = \text{ca. } 1,2$ und liegt damit oberhalb des von W. Ahnert und H.-P. Tennhardt ([11], S. 191) beschriebenen Zielbereichs für Sprache. Eine Verdeckung benachbarter Frequenzen und ungünstige Interferenzen im tieffrequenten Bereich können sich ungünstig auf die Sprachverständlichkeit auswirken. Sofern aus platztechnischer Sicht die Möglichkeit besteht zusätzliche Bassabsorber vorzusehen, sollten entsprechende Maßnahmen vorgesehen werden.

12.4.4 Schwerpunktzeit – Führung

Die Schwerpunktzeiten liegen bei $t_s = 25$ ms bis 73 ms. Bei beiden untersuchten Varianten liegen die Schwerpunktzeiten teilweise aufgrund der Nähe zur Schallquelle deutlich unterhalb der von W. Ahnert, S. Feistel ([9], S. 197) genannten Zielwerte 60 ms bis 80 ms bei 500 Hz bis 4 kHz. Die Unterschreitungen der Schwerpunktzeiten lassen auf eine verringerte räumliche akustische Wahrnehmung schließen. Von ungünstigen Auswirkungen auf die Durchsichtigkeit der Schallereignisse ist nicht auszugehen.

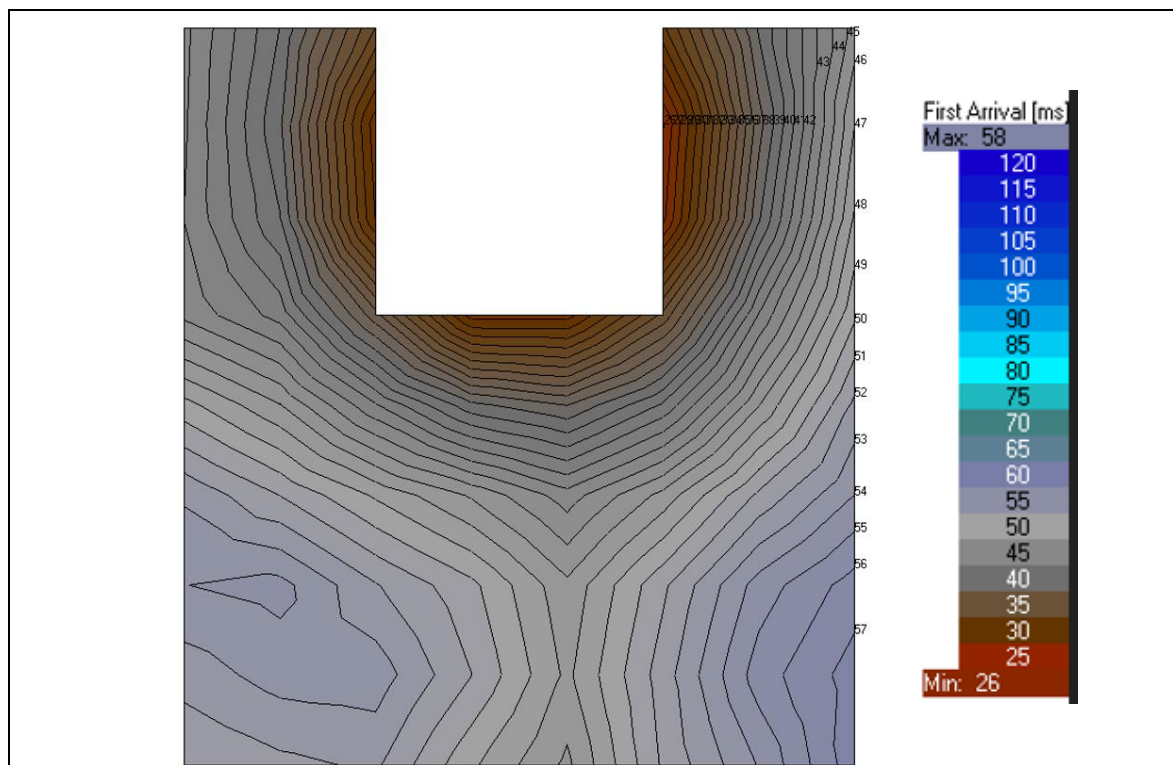


Abbildung 45: Verteilung der Schwerpunktzeit im Zuschauerbereich, Führung - Variante 1, Anordnung 1, Oktavmittenfrequenz 1000 Hz

Die von W. Fasold und E. Ferrer ([15], Tabelle 4.18) beschriebene Anforderung an eine Schwerpunktzeit $t_s < 80$ ms wird eingehalten.

12.4.5 Artikulationsverlust – Führung

Der Artikulationsverlust liegt bei beiden Varianten zwischen ca. 3 % und ca. 8,5 % und weist nach W. Ahnert und S. Feistel ([9], S. 193) auf eine angemessene bis gute Sprachverständlichkeit hin.

12.4.6 Deutlichkeitsmaß für Sprache – Führung

Die Berechnungsergebnisse für das Deutlichkeitsmaß für Sprache liegen bei beiden untersuchten Varianten zwischen $C_{50} = +0$ dB bis $+7$ dB im Frequenzbereich 500 Hz bis 4000 Hz und erfüllt somit das von H.V. Fuchs ([16], S. 187) beschriebene Planungsziel $C_{50} \geq 0$ dB. Die teilweise recht hohen Werte sind in quellnahen Positionen zur verorten.

12.4.7 Sprach-Übertragungs-Index (STI) – Führung

Der Sprach-Übertragungs-Index liegt bei Variante 1 bei $STI = \text{ca. } 0,55$ bis $\text{ca. } 0,75$. Gem. DIN EN ISO 9921 ([7], Tabelle F.1) ist eine angemessene bis gute Silbenverständlichkeit zu erwarten.

13 Unsicherheiten und zusätzliche variable Einflüsse

Die durchgeführten Simulationsberechnungen und der Einfluss auf die Ergebnisse unterliegen verschiedenen Unsicherheiten und zusätzlichen variablen Einflüssen, die im Folgenden betrachtet werden.

13.1 Fehlende Kalibrierung

Da der betrachtete Raum sich noch in Planung befindet, liegen keine Messwerte für den Raum vor, die zur Kalibrierung des Raumes herangezogen werden können. Für die Schallabsorptionsgrade der Raumbegrenzungsflächen werden Werte auf Grundlage verschiedener Literaturwerte angesetzt. Hierbei werden tendenziell niedrige Schallabsorptionsgrade aus der Literatur verwendet. Zur Abschätzung der möglichen Abweichungen der raumakustischen Kennwerte aufgrund abweichender Schallabsorptionsgrade der Raumbegrenzungsflächen werden exemplarisch für eine Variante mit hohen Absorberflächen (Glasschaumstreifen, Vortrag) und eine Variante mit geringen Absorberflächen (Glasschaumstreifen, Konzernutzung) berechnet. Folgende abweichende Schallabsorptionsgrade werden hierbei angesetzt:

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Massive Wände: Kalkzementputz gem. DIN 18041 [2]	0,03	0,03	0,02	0,04	0,05	0,05
Parkettfußboden auf- geklebt gem. DIN 18041 [2]	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06
Gipsplatte 9,5 mm stark, Wandabstand 25 mm gem. DIN 18041 [2]	0,27	0,17	0,10	0,09	0,11	0,12

Tabelle 17: Untersuchte abweichende Schallabsorptionsgrade α der Raumbegrenzungsflächen

Die detaillierten Ergebnisse können Anlage 16 und 17 entnommen werden.

13.1.1 Konzernutzung

Die sich durch die höheren Absorptionsgrade der Raumbegrenzungsflächen ergebenden Abweichung sind v.a. in den tiefen Frequenzen relevant. Dies ist hauptsächlich durch die große Fläche der Trockenbauvorsatzschale verursacht. Hierdurch ergibt sich ein deutlich geringeres Bass-Verhältnis $BR = 0,9$. Dies liegt unterhalb des von W. Ahnert und H.-P. Tennhardt ([11], S. 191) angegebenen Zielbereichs $BR = 1,0$ bis $1,3$. Gem. H.V. Fuchs ([18], S. 35 ff.) kann sich ein Bassverhältnis $BR < 1,0$ auch positiv auf den Raumklang auswirken. Ggfs. können bei Überdämpfung der Nachhallzeit im Frequenzbereich 125 Hz bis 250 Hz bei Bedarf die Verbundplatten-Resonator-Flächen reduziert werden, um eine Überdämpfung in diesem Frequenzbereich zu vermeiden.

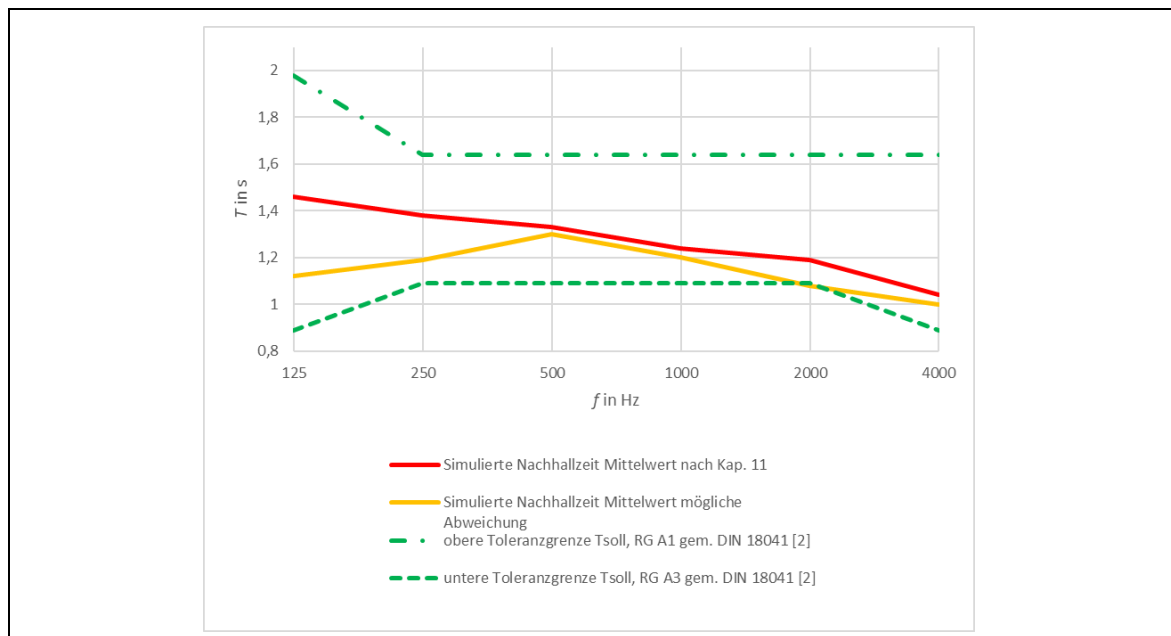


Abbildung 46: Vergleich Nachhallzeiten Unsicherheiten – Konzert

In beiden untersuchten Fällen liegen die Schwerpunkzeiten innerhalb des Zielbereichs $t_s = 70$ ms bis 150 ms. Die Schwerpunkzeiten weichen um max. 9 % ab.

Beim Klarheitsmaß für Musik beträgt die Abweichung maximal ca. 0,6 dB. Die Zielwerte werden eingehalten.

Das Seitenschallmaße weichen um ca. 0,5 dB voneinander ab. Die Zielwerte werden bei beiden Fällen eingehalten.

Durch die abweichenden Absorptionsgrade der Raumbegrenzungen ergeben sich keine negativen Auswirkungen auf den Raumklang. Da in den Simulationen in Kap. 11

tendenziell raumakustisch ungünstige Absorptionsgrade angesetzt sind, sind die Betrachtungen als auf der sicheren Seite liegend zu bewerten.

13.1.2 Vortrag

Bedingt durch die Verdeckung der Trockenbauvorsatzschale mit mobilen Maßnahmen, entstehen im tieffrequenten Bereich geringere Abweichungen als bei der Konzernutzung. Die Nachhallzeiten weichen um maximal 0,15 s voneinander ab. Durch diese Abweichung ergeben sich akustisch günstigere Werte.

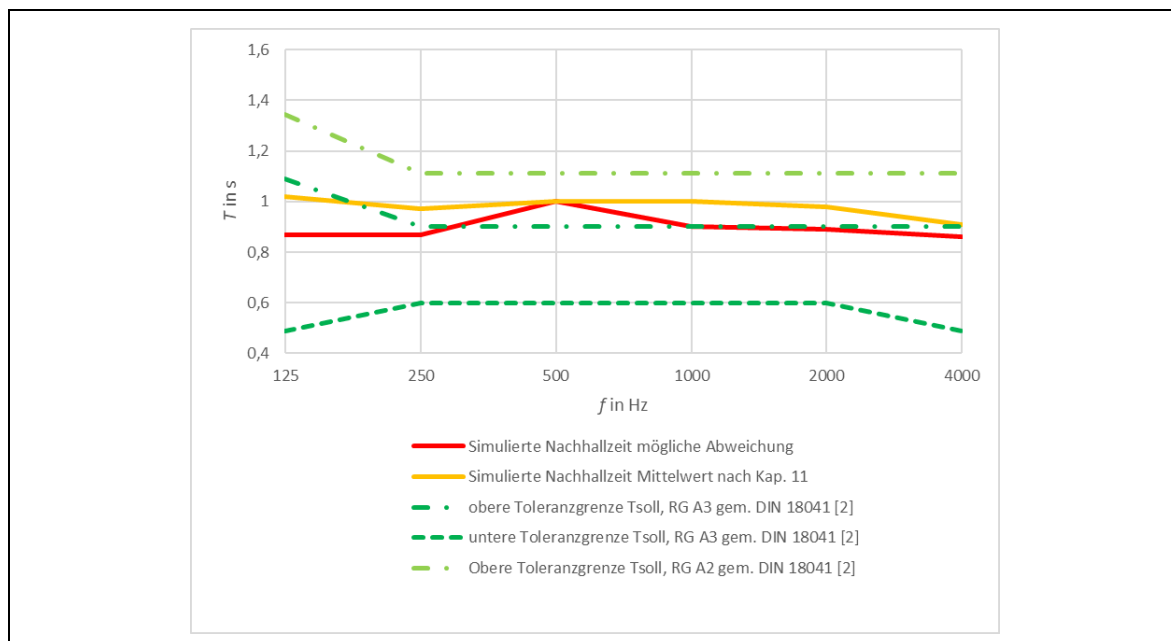


Abbildung 47: Vergleich Nachhallzeiten Unsicherheiten – Vortrag

Die Schwerpunktzeit weicht um ca. 4 ms ab. Diese Abweichung ist vernachlässigbar.

Die maximale Abweichung des Deutlichkeitsmaßes beträgt ca. +1 dB. Die Abweichungen liegen auf der akustisch günstigen Seite. Der Zielbereich für das Deutlichkeitsmaß wird eingehalten.

Der Artikulationsverlust weicht im Mittel unter Berücksichtigung der Standardabweichung um ca. 0,4 % von den in Kap. 11 berechneten Werten ab. Die Abweichung ist nicht maßgebend.

Ebenso weicht der STI im Mittel unter Berücksichtigung der Standardabweichung nur geringfügig um ca. $\Delta STI =$ ca. 0,01 ab. Die Abweichung ist nicht relevant.

Durch die abweichenden Absorptionsgrade der Raumbegrenzungen ergeben sich keine negativen Auswirkungen auf den Raumklang. Da in den Simulationen in Kap. 11 tendenziell raumakustisch ungünstige Absorptionsgrade angesetzt sind, sind die Betrachtungen als auf der sicheren Seite liegende zu bewerten.

13.2 Personenbelegung

Die in Kap. 12 beschriebenen Ergebnisse sind unter Berücksichtigung einer Personenbelegung ermittelt. Da Personen schallabsorbierend wirken, ergeben sich bei weniger Personen abweichende Schallkennwerte. Zur Quantifizierung wird eine Variante mit großen Absorberflächen (Schaumglas-Streifen, Vortrag) und eine Variante mit geringen Absorberflächen (Schaumglas-Streifen, Konzert) jeweils ohne Personen den Ergebnissen aus Kap. 12 gegenübergestellt.

Die detaillierten Ergebnisse für die Berechnungen ohne Personenbelegung können Anlage 18 und 19 entnommen werden.

13.2.1 Konzernutzung

Bedingt durch die fehlende Absorption des Publikums, liegen die Nachhallzeiten im unbesetzten Raum um bis zu ca. 20 % höher als im besetzten Raum. Im Mittel werden die Anforderungen gem. DIN 18041 [2] weiterhin weitgehend eingehalten. Das Bass-Resonanz-Verhältnis steigt im unbesetzten Raum gegenüber dem im besetzten Raum an. U.U. erweisen sich bei geringerer Besetzung des Raumes zusätzliche Resonanzabsorber als sinnvoll. Vorrichtungen zur flexiblen Anbringung entsprechender Maßnahmen werden zur Optimierung für sprachliche Nutzung vorgesehen und können zur weiteren Bedämpfung des Raumes bei geringerer Besetzung auch bei Musiknutzungen genutzt werden.

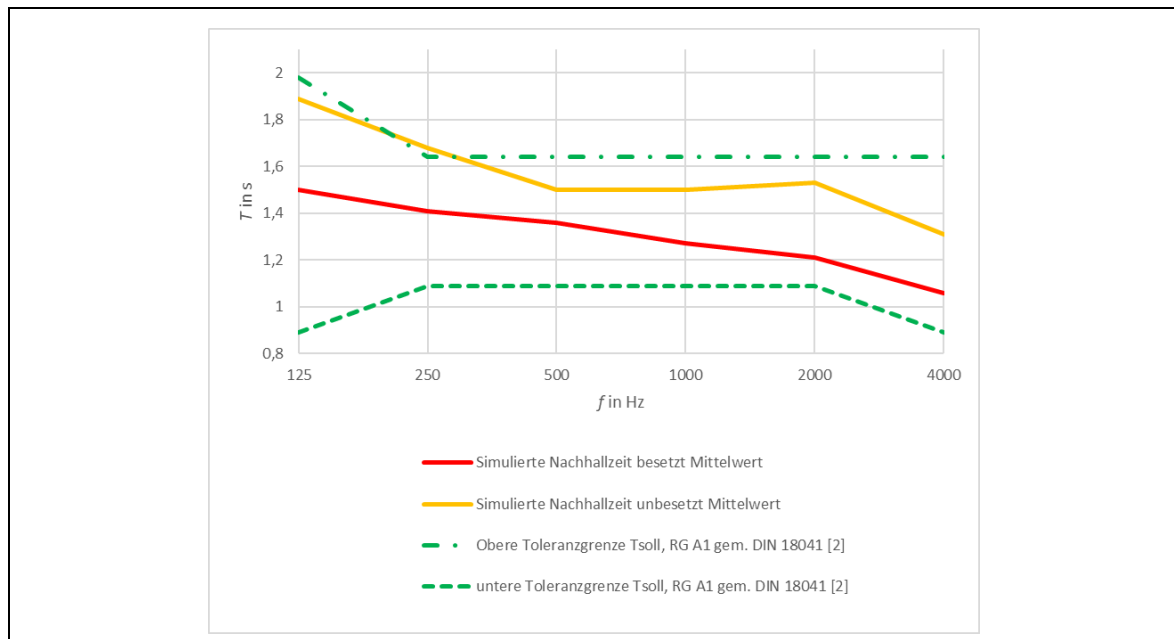


Abbildung 48: Vergleich Nachhallzeiten besetzter und unbesetzter Raum – Konzert

Im unbesetzten Raum liegt die Schwerpunktzeit um bis zu 30 % höher als die des besetzten Raumes. Dadurch ist von einer stärkeren räumlichen Wahrnehmung auszugehen. Die Schwerpunktzeiten liegen trotz der Erhöhung im unbesetzten Raum innerhalb des Zielbereichs $t_s = 70$ ms bis 150 ms.

Durch die längeren Abklingvorgänge sinkt das Klarheitsmaß für Musik im unbesetzten Raum um bis zu 1,5 dB. Dadurch wirken schnell aufeinanderfolgende Töne verwaschen. Die Werte liegen im unbesetzten Zustand innerhalb des Zielbereichs $C_{80} = -3$ dB bis +4 dB, dadurch ist auch im geringer besetzten Raum von einer ausreichenden Durchsichtigkeit auszugehen.

Das Seitenschallmaß ist bei beiden Besetzungszuständen näherungsweise gleich.

13.2.2 Vortrag

Bedingt durch die fehlende Absorption des Publikums, liegen die Nachhallzeiten im unbesetzten Raum wie bei der Konzernutzung um bis zu ca. 20 % höher als im besetzten Raum. Im Mittel werden die Anforderungen gem. DIN 18041 [2] an die Raumgruppe A2 „Sprache/Vortrag“ eingehalten. Der Toleranzbereich für eine inklusive Nutzung wird im gesamten betrachteten Frequenzbereich überschritten. Für Hörgeschädigte oder sprachlich beeinträchtigte Leute kann es damit zu Verständlichkeitsproblemen kommen.

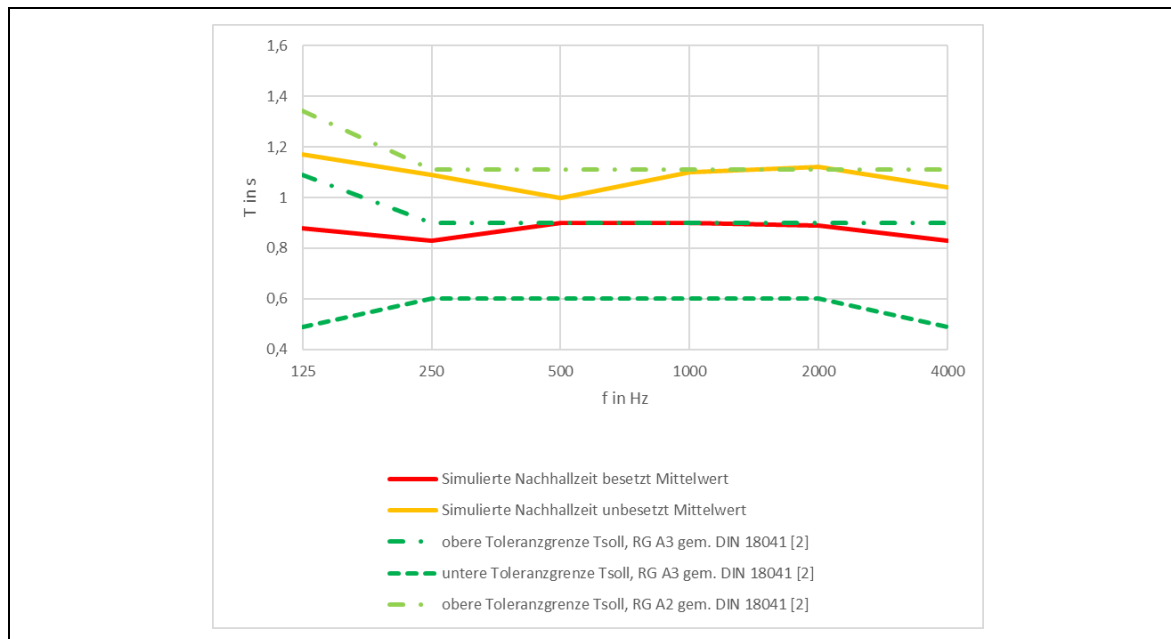


Abbildung 49: Vergleich Nachhallzeiten besetzter und unbesetzter Raum – Vortrag

Im unbesetzten Raum liegt die Schwerpunktzeit um bis zu ca. 15 % höher als die des besetzten Raumes. Dadurch ist von einer stärkeren räumlichen Wahrnehmung auszugehen. Die Schwerpunktzeiten liegen stellenweise um bis zu 7 ms oberhalb der empfohlenen Obergrenze 80 ms.

Das Deutlichkeitsmaß ist im unbesetzten Raum um bis zu 2 dB geringer als im besetzten Raum. Da im besetzten Raum die untere Grenze des Zielbereichs $C_{50} \geq 0$ dB nur knapp eingehalten ist, wird die Grenze im unbesetzten Zustand unterschritten. Die Unterscheidbarkeit aufeinander folgender Silben ist damit durch den Nachhall ungünstig beeinflusst. Der in DIN EN ISO 3382-1, Tabelle A.2 [3] beschriebene übliche Bereich für das über die Oktavbänder 500 Hz bis 1000 Hz arithmetisch gemitteltes Deutlichkeitsmaß für Sprache $C_{50} = -3,7$ dB bis $+3,7$ dB in unbesetzten Aufführungsräumen, wird eingehalten.

Der Artikulationsverlust weicht im Mittel unter Berücksichtigung der Standardabweichung um ca. 0,6 % von den in Kap. 11 berechneten Werten ab. Die Abweichung ist nicht maßgebend.

Ebenso weicht der STI im Mittel unter Berücksichtigung der Standardabweichung nur geringfügig um ca. $\Delta STI =$ ca. 0,01 ab. Die Abweichung ist nicht relevant.

Insgesamt erweisen sich bei geringer Besetzung des Raumes zusätzliche Breitband-Absorber als sinnvoll. Aufgrund Platzmangels ist dies jedoch nur schwer umsetzbar, sofern die Flexibilität der Raumakustik gewahrt werden soll.

Das Seitenschallmaß ist bei beiden Besetzungszuständen näherungsweise gleich.

13.3 Möblierung und Ausstellungsgegenstände

Die Möblierung für den Raum soll variabel sein, eine feste Möblierung ist nicht vorgesehen. In den bisherigen Betrachtungen wurden eine Möblierung und Ausstellungsgegenstände abgesehen von einer Bühne und besetzten Stühlen bei den Nutzungsarten „Konzert“ und „Vortrag“ daher nicht berücksichtigt. Da der Einfluss sehr stark von Art, Anzahl und Positionierung der Möblierung abhängt, ist dieser ohne konkrete Planung schwer zu bewerten. I.A. wird durch eine zusätzliche Möblierung die Absorptionsfläche des Raumes erhöht, i.d.R. jedoch nicht in einer Höhe in der sie den Raum überdämpfen würde. Bei ungünstiger Positionierung der Möbel können jedoch Verschattungseffekte oder Umlenkungen auftreten. Bei der Positionierung ist darauf zu achten, dass der Ausbreitungsweg zwischen Schallquelle und Empfangsort nicht gestört wird oder dass stärker absorbierende Gegenstände nicht zu nah an der Schallquelle verortet werden.

13.4 Tiefe Frequenzen

Die Schröderfrequenzen der betrachteten Varianten liegen bei $f_{Schröder} = \text{ca. } 65 \text{ bis } 90 \text{ Hz}$. Unterhalb dieser Frequenzen ist davon auszugehen, dass das Schallfeld maßgeblich durch Raummoden und nicht durch ein Diffusfeld geprägt ist. Da die angewandten geometrischen Simulationsmethoden ein Diffusfeld voraussetzen, sind die Berechnungsergebnisse bei der Oktavmittenfrequenz $f = 125 \text{ Hz}$ insbesondere bei den musikalischen Nutzungen als Schätzungen zu werten. Zur Quantifizierung der Abweichung sind wellentheoretische Simulationen erforderlich.

13.5 Grundgeräuschpegel

Bei der Ermittlung des Sprachübertragungs-Indexes und des Artikulationsverlustes ist der Grundgeräuschpegel bzw. der Abstand des Nutzsignals zum Grundgeräusch maßgeblich. In den in Kap. 11.1 durchgeführten Berechnungen beträgt der Abstand zwischen Grundgeräusch und dem Schalleistungspegel des Nutzsignals in jedem Frequenzband $\Delta L = 20 \text{ dB}$. Geringere Pegeldifferenz zwischen Nutzsignal und Störgeräusch wirken sich ungünstig auf den Sprachübertragungs-Index und den Artikulationsverlust aus.

In den Berechnungen in Kap. 11.1 ist ein Grundgeräuschpegel $L_p = 40 \text{ dB(Z)}$ bei allen Terzfrequenzen von 100 Hz bis 10 kHz angesetzt. Dies entspricht einem A-bewerteten Summen-Schalldruckpegel $L_{p,A} = \text{ca. } 52 \text{ dB(A)}$. Für die Anlagentechnik wird ein maximaler Spitzen-Schalldruckpegel $L_{AF,max,n} \leq 25 \text{ dB(A)}$ geplant. Das Plangebiet wird nicht

maßgeblich von Gewerbe- oder Verkehrslärm beeinflusst. Zusätzliche maßgebliche Schalleinträge von außerhalb des Gebäudes sind somit nicht zu erwarten. Für den Geräuscheintrag aus der eigenen Nutzung, bspw. durch das Publikum oder aus angrenzenden Bereichen innerhalb des Gebäudes ist in den Betrachtungen in Kap. 11.1 eine Erhöhung des Grundgeräusches durch die Nutzer um ca. 27 dB(A) vorgehalten, der Schalleistungspegel der Schallquelle beträgt $L_{w,A} = 83$ dB(A). Geübte Sprecher erreichen gem. W. Fasold und E. Ferrer ([15], S. 23) ca. 10 dB(A) höheren Schalleistungspegel. Sowohl der Grundgeräuschpegel als auch der Schalleistungspegel der Schallquelle sind auf der sicheren Seite liegend angesetzt. Für ungeübte Sprecher ist ggfs. dennoch eine elektroakustische Unterstützung sinnvoll.

14 Variantenvergleich

Die verglichenen Varianten unterscheiden sich hauptsächlich durch die Deckenmaßnahmen. Die Variante mit Zellulose-Schlitzabsorbern erfordert zur Erreichbarkeit einer ähnlichen akustischen Wirksamkeit eine ca. 25 % höhere Belegung der Deckenflächen. Bei beiden Varianten wird zusätzlich die gleiche Fläche der Rückwand mit Verbundplatten-Resonatoren belegt. Für Variante 2 ist eine höhere Bedämpfung der tiefen Frequenzen, durch eine höhere Belegung der Wände mit Resonanz-Absorbern insbesondere für interaktive Musiknutzungen erforderlich.

Tabelle 18 bis Tabelle 21 geben einen Überblick über die Einhaltung im Raummittel der in der Literatur angegebenen Zielbereiche für die raumakustischen Kenngrößen für die untersuchten Varianten.

- **Grüne Markierung:** Zielbereich erfüllt
- **Gelbe Markierung:** Leichte, tolerierbare Abweichung
- **Rote Markierung:** Zielbereich nicht erfüllt

	ΔL	T_{30}	BR	t_s	C_{80}	LF
Zellulose-Schlitzabsorber						
Glasschaumstreifen						

Tabelle 18: Variantenvergleich Konzert, Erfüllung Planungsziel

	T_{30}	BR	t_s	C_{80}	LF
Zellulose-Schlitzabsorber					
Glasschaumstreifen					

Tabelle 19: Variantenvergleich Musik interaktiv, Erfüllung Planungsziel

	ΔL	T_{30}	BR	AL_{cons}	C_{50}	t_s	STI
Zellulose-Schlitz- absorber	Red	Yellow	Green	Yellow	Green	Green	Yellow
Zellulose-Schlitz- absorber mit Lautsprechern	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
Glasschaumstreifen	Red	Yellow	Green	Yellow	Green	Green	Yellow
Glasschaumstreifen mit Lautsprechern	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green	Yellow

Tabelle 20: Variantenvergleich Vortrag, Erfüllung Planungsziel

	ΔL	T_{30}	BR	AL_{cons}	C_{50}	t_s	STI
Zellulose-Schlitz- absorber	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
Glasschaumstreifen	Yellow	Yellow	Red	Green	Green	Green	Yellow

Tabelle 21: Variantenvergleich Führung, Erfüllung Planungsziel

14.1 Raumnutzung Konzert

Bei beiden Varianten ist eine ähnliche Abnahme der Schalldruckpegel vom vorderen in den hinteren Zuschauerbereich festzustellen. Diese liegen innerhalb des in der Literatur angegebenen Zielbereichs $\Delta L \leq 5$ dB

Die Nachhallzeit liegt bei beiden Varianten im Toleranzbereich der Raumgruppe A1 „Musik“ gem. DIN 18041 [2], wobei die Variante mit Schlitzabsorbern die geringeren Nachhallzeiten aufweist. Dies erweist sich im Hinblick auf eine Nutzung mit geringeren erforderlichen Nachhallzeiten, bspw. für Vorträge als vorteilhaft. Eine höhere Belegung der Decke mit Glasschaum-Streifen führt in den höheren Frequenzen leicht zu einer Überdämpfung und wird daher nicht angesetzt.



Abbildung 50: Nachhallzeit Mittelwerte, Variantenvergleich – Konzert

Die Variante „Glasschaum-Streifen“ weist mit $BR = 1,1$ ein höheres Bass-Verhältnis auf, als die alternative Variante. Dennoch erfüllt sie die von W. Ahnert und H.-P. Tennhardt ([11], S. 191) beschriebene Anforderung $BR = 1,0$ bis $1,3$. Trotz der Einhaltung dieser Anforderung sind gem. H.V. Fuchs ([18], S. 35 ff.) durch Überlagerungen in tiefen Frequenzen auftretende destruktive Interferenzen nicht auszuschließen, weshalb ein Bassverhältnis $BR < 1$ empfohlen wird.

Hierfür sind bei der Variante „Glasschaum-Streifen“ zusätzliche Maßnahmen mit guter Wirksamkeit im Frequenzbereich 125 Hz bis 250 Hz und geringer Absorption in darüberliegenden Frequenzen erforderlich.

Die Variante „Schlitzabsorber“ liegt mit einem Bassverhältnis $BR = 1,0$ ohne zusätzliche Maßnahmen an der Obergrenze der von H.V. Fuchs ([18], S. 35 ff.) beschriebenen Anforderung $BR \leq 1$.

Die Schwerpunktzeiten liegen bei beiden Varianten innerhalb des Zielbereichs, wobei die der Variante „Glasschaum-Streifen“ um ca. 10 ms bis 15 ms höher sind, als die der alternativen Variante, was für einen geringfügig ausgeprägteren Raumeindruck aber für eine leicht ungünstigere Durchsichtigkeit spricht. Bei beiden Varianten ist durch die Einhaltung des Zielbereichs ein ausgewogener Raumeindruck mit angemessener Durchsichtigkeit zu erwarten. Die höhere Durchsichtigkeit bei der Variante „Zellulose-Schlitzabsorber“ spiegelt sich auch im Klarheitsmaß für Musik C_{80} wider. Dieses liegt im gesamten betrachteten Frequenzbereich bei dieser Variante oberhalb der Werte bei der Variante „Glasschaum-Streifen“. Beide Varianten erfüllen die Zielwerte für das

Klarheitsmaß, demnach ist bei beiden Varianten von einer angemessenen Durchsichtigkeit auszugehen.

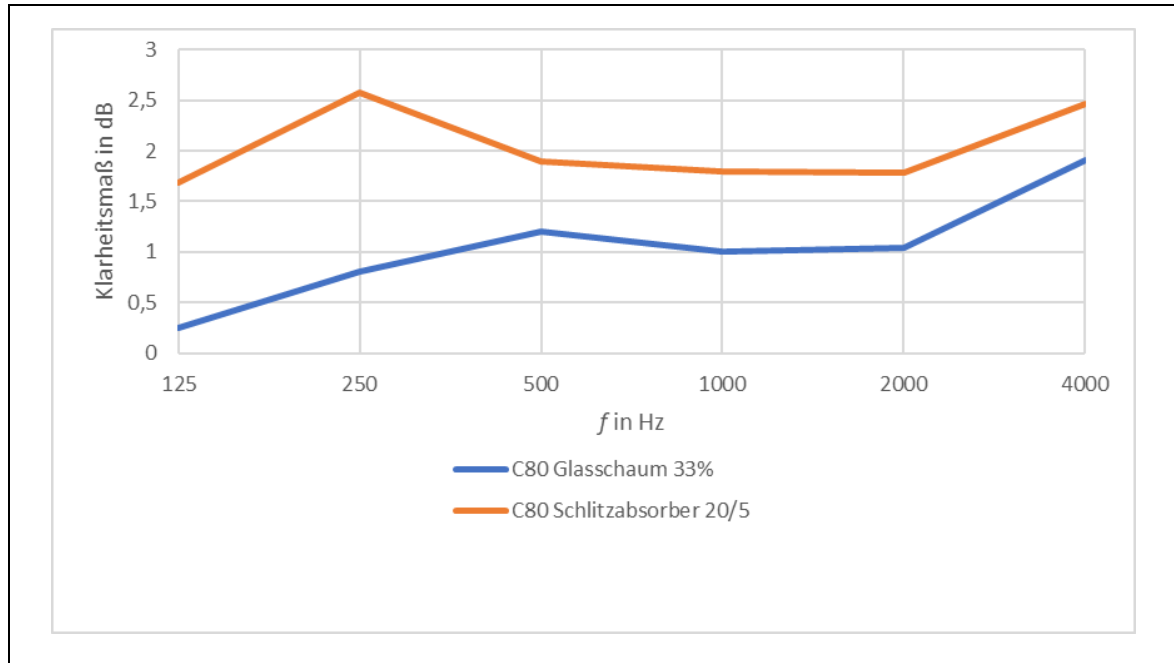


Abbildung 51: Klarheitsmaß für Musik Mittelwerte, Variantenvergleich – Konzert

Die Seitenschallmaße sind bei beiden Varianten ungefähr gleich hoch und liegen innerhalb des Zielbereichs. Dies weist auf eine ausgewogen wahrgenommene Einhüllung hin.

14.2 Raumnutzung Musik interaktiv

Bei beiden Varianten ist eine ähnliche Abnahme der Schalldruckpegel vom vorderen in den hinteren Zuschauerbereich festzustellen. Diese liegt deutlich über den dem Zielbereich $\Delta L \leq 5$ dB. Durch eine elektroakustische Unterstützung kann bei beiden Varianten der Zielbereich für den maximal zulässigen Pegelunterschied eingehalten werden.

Die Nachhallzeit liegt bei beiden Varianten im Toleranzbereich der Raumgruppe A1 „Musik“ gem. DIN 18041 [2].

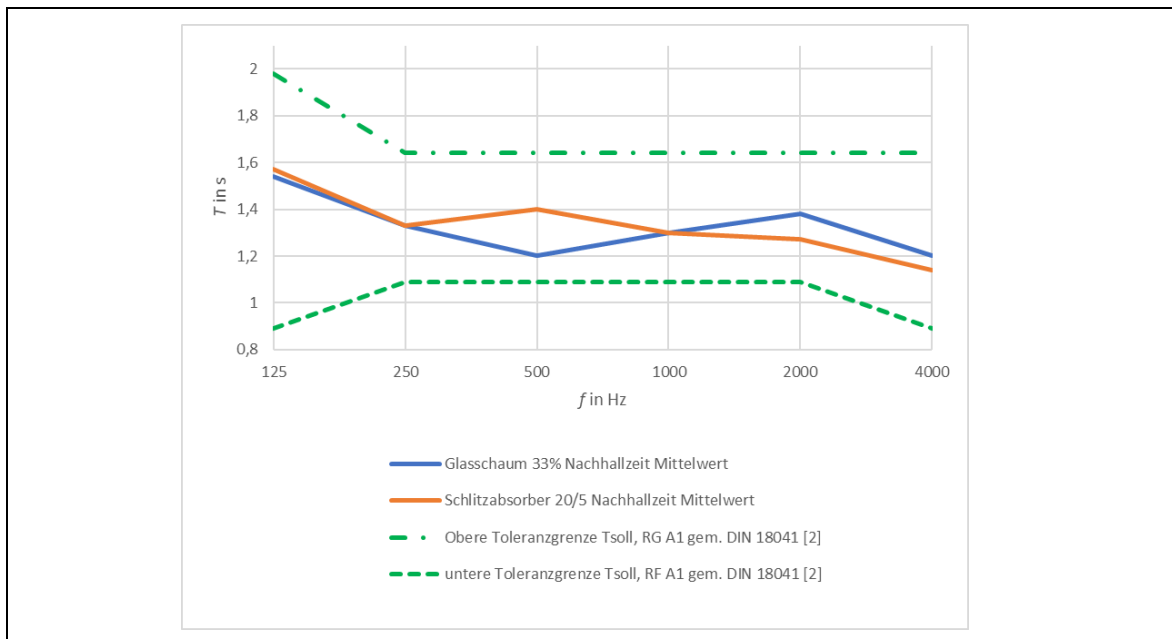


Abbildung 52: Nachhallzeit Mittelwerte, Variantenvergleich - Musik interaktiv

Die Variante „Glasschaum-Streifen“ weist mit $BR = 1,2$ ein höheres Bass-Verhältnis auf als die alternative Variante. Beide Varianten erfüllen die von W. Ahnert und H.-P. Tennhardt ([11], S. 191) beschriebene Anforderung $BR = 1,0$ bis $1,3$. Dabei ist jedoch zu beachten, dass bei Variante 2 zusätzliche Verbundplatten-Resonatoren erforderlich sind, die die Absorption im tieffrequenten Bereich erhöhen.

Die Schwerpunktzeiten liegen bei beiden Varianten innerhalb des Zielbereichs. Bei beiden Varianten ist durch die Einhaltung des Zielbereichs ein ausgewogener Raumeindruck mit angemessener Durchsichtigkeit zu erwarten. Die Schwerpunktzeiten weichen mit max. 4 ms Unterschied nur geringfügig voneinander ab.

Das Klarheitsmaß für Musik liegt bei beiden Varianten innerhalb des Zielbereichs. Zwischen den Varianten ergeben sich maximale Unterschiede um max. 1 dB.

Die Seitenschallmaße liegen im tieffrequenten Bereich deutlicher auseinander als in den mittleren bis hohen Frequenzen. Die Seitenschallmaße der Variante 1 liegen im gesamten betrachteten Frequenzbereich oberhalb von denen der Variante 2. Dies weist auf einen geringfügig höheren Seitenschallanteil bei Variante 1 hin.

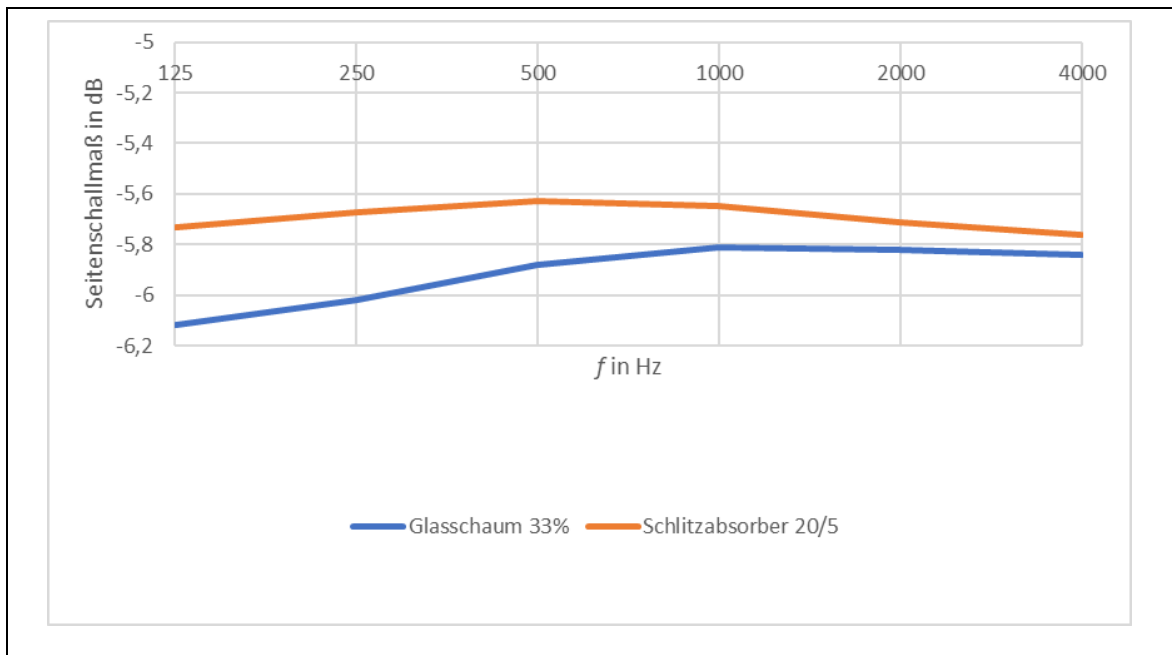


Abbildung 53: Seitenschallmaß, Mittelwerte Variantenvergleich - Musik interaktiv

Über den gesamten betrachteten Frequenzbereich liegen die Seitenschallmaße bei der Variante mit Zellulose-Schlitzabsorbern zwischen -7 dB und -5 dB. Der optimale Bereich nach W. Fasold und E. Ferrer ([15], Tabelle 4.18) zwischen -4 dB und -7 dB wird eingehalten.

Bei der Variante mit Glasschaum-Streifen wird das empfohlene Seitenschallmaß um 2 dB unterschritten. Bei der Bewertung ist zu berücksichtigen, dass die Empfangsorte gleichzeitig Schallquellen darstellen, wodurch sich ein hoher Gesamteintrag und sich damit rechnerisch ein relativ geringer Seitenschallgrad ergibt. Dennoch sind die Seitenschallgrade von Variante 1 aus akustischer Sicht günstiger zu bewerten.

14.3 Raumnutzung Vortrag

Die Nachhallzeiten von Variante 1 liegen im gesamten betrachteten Frequenzbereich unterhalb der Nachhallzeiten von Variante 2. Die mittleren Nachhallzeiten der Variante 1 erfüllen die Anforderungen der Raumgruppe A3 „Sprache/Vortrag inklusiv“ gem. DIN 18041 [2]. Die der Variante mit Glasschaum-Streifen liegen weitgehend oberhalb des Toleranzbereichs der Raumgruppe A3 „Sprache/Vortrag inklusiv“ gem. DIN 18041 [2]. Bei Variante 2 ist damit insbesondere für sprachlich Benachteiligte und Hörgeschädigte von stärkeren Beeinträchtigungen der Silberverschmelzung durch Überdeckung aufeinander folgender Silben, durch längere Abklingzeiten als bei Variante 1 auszugehen.

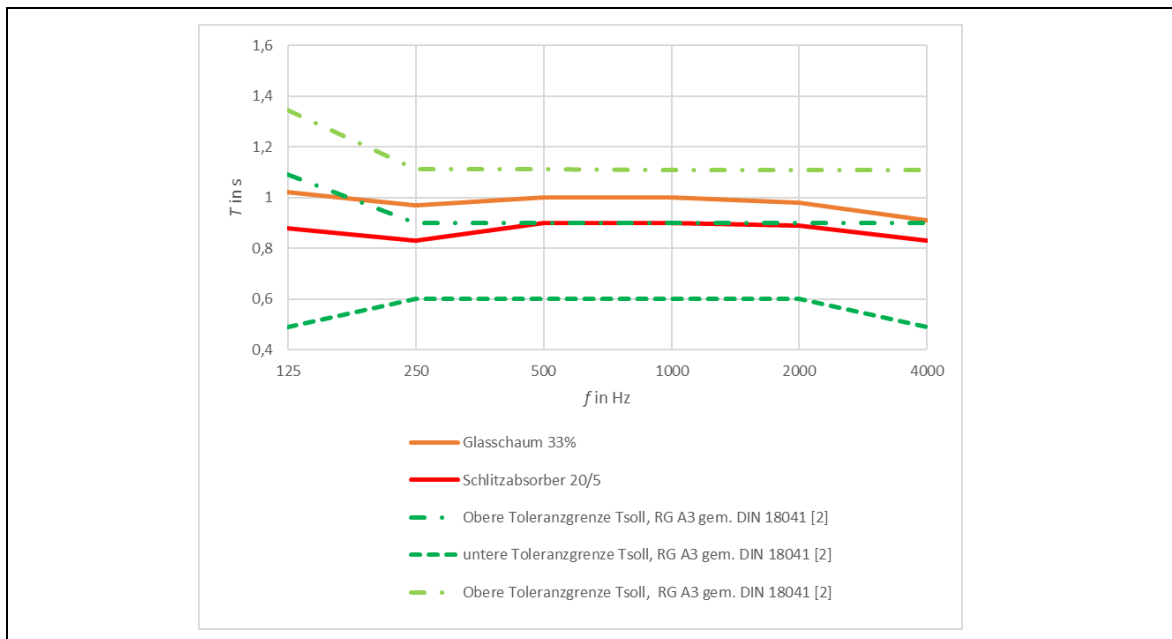


Abbildung 54: Nachhallzeit, Mittelwerte Variantenvergleich – Vortrag

Der Frequenzverlauf ist bei beiden Varianten relativ gleichmäßig. Die Bassverhältnisse liegen bei beiden Varianten bei $BR = \text{ca. } 1,0$.

Die Schwerpunktzeiten liegen bei beiden Varianten innerhalb des Zielbereichs. Bei beiden Varianten ist durch die Einhaltung des Zielbereichs ein ausgewogener Raumeindruck mit angemessener Durchsichtigkeit zu erwarten. Die Schwerpunktzeiten weichen mit max. 8 ms Unterschied nur geringfügig voneinander ab.

Die Berechnungsergebnisse für das Deutlichkeitsmaß für Sprache erfüllen bei beiden untersuchten Varianten das Planungsziel. Die Deutlichkeitsmaße für Variante 2 erfüllen die Anforderung $C_{50} \geq 0$ dB mit Ausnahme des Frequenzbereichs 500 Hz im gesamten Frequenzbereich nur knapp. Die Werte für das Deutlichkeitsmaß für Variante 1 liegen tendenziell 1 dB bis 2 dB über denen von Variante 2, was auf eine bessere Durchsichtigkeit der Variante 2 hinweist.

Der Artikulationsverlust liegt bei beiden untersuchten Varianten ohne elektroakustische Verstärkung im Mittel unter Berücksichtigung der Standardabweichung bei ca. 9 % und weist nach W. Ahnert und S. Feistel ([9], S. 193) auf eine angemessene Sprachverständlichkeit hin.

Der Sprachübertragungsindex liegt bei beiden Varianten ohne elektroakustische Untersuchung im Mittel unter Berücksichtigung der Standardabweichung ungefähr gleich hoch bei $STI = \text{ca. } 0,55$ und weist auf eine angemessene Silbenverständlichkeit hin.

Mit elektroakustischer Unterstützung können für den Sprachübertragungs-Index und den Artikulationsverlust Werte erreicht werden, die für eine angemessene bis gute Sprachverständlichkeit sprechen. Hierbei ergeben sich für Variante 1 im Mittel geringfügig günstigere Werte.

14.4 Raumnutzung Führung

Die Nachhallzeiten von Variante 1 liegen im gesamten betrachteten Frequenzbereich unterhalb der Nachhallzeiten von Variante 2. Die mittleren Nachhallzeiten der Variante 1 erfüllen die Anforderungen der Raumgruppe A3 „Sprache/Vortrag inklusiv“ gem. DIN 18041 [2]. Die Nachhallzeiten der Variante mit Glasschaum-Streifen liegen weitgehend oberhalb des Toleranzbereichs der Raumgruppe A3 „Sprache/Vortrag inklusiv“ gem. DIN 18041 [2], erfüllen jedoch die Anforderungen der Raumgruppe A2 „Sprache/Vortrag“ gem. DIN 18041 [2]. Bei Variante 2 ist damit insbesondere für sprachlich Benachteiligte und Hörgeschädigte von stärkeren Beeinträchtigungen der Silberverständlichkeit durch Überdeckung aufeinander folgender Silben, durch längere Abklingzeiten als bei Variante 1 auszugehen.

Der Frequenzverlauf ist bei Variante 1 relativ gleichmäßig. Das Bassverhältnis liegt bei beiden Varianten bei $BR = ca. 1,0$. Bei Variante 2 ergibt sich ein ungünstigeres Bassverhältnis $BR = ca. 1,2$. Durch Überdeckung benachbarter Frequenzen und ungünstige Interferenzen im tieffrequenten Bereich kann es dadurch zu Beeinträchtigungen in der Sprachverständlichkeit kommen.

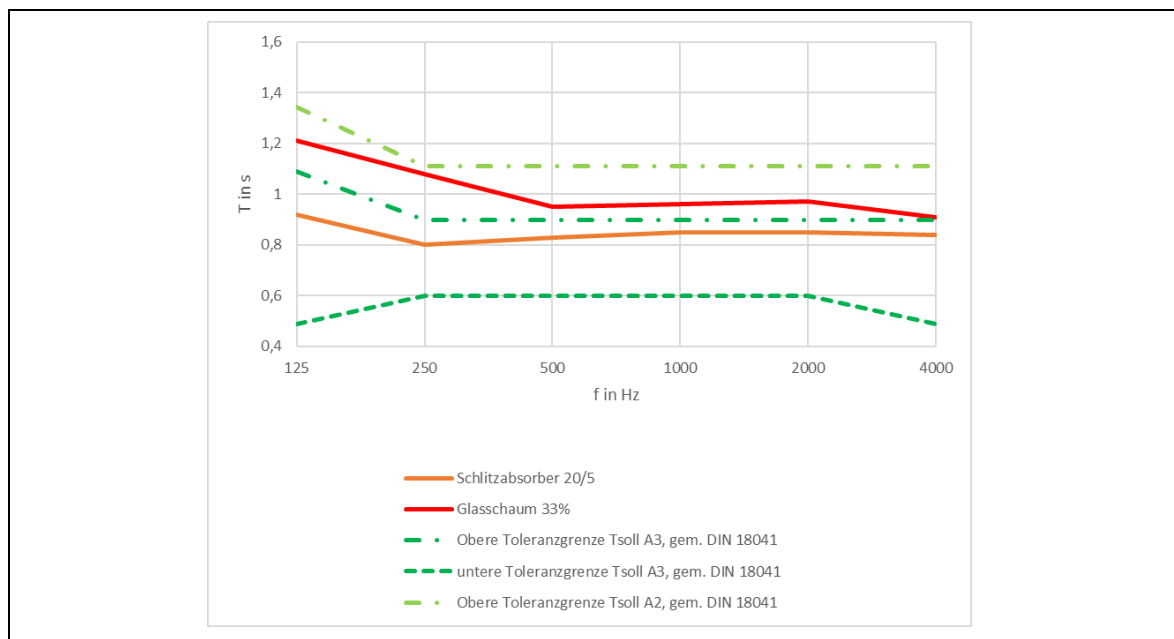


Abbildung 55: Nachhallzeit, Mittelwerte Variantenvergleich – Führung

Die Schwerpunktzeiten liegen bei beiden Varianten aufgrund der Nähe der Empfangsorte zur Schallquelle zum Teil deutlich unterhalb von $t_s = 80$ s. Die von W. Fasold und E. Ferrer ([15], Tabelle 4.18) beschriebene Anforderung an eine Schwerpunktzeit $t_s < 80$ ms wird eingehalten. Bei beiden Varianten ergibt sich dadurch eine hohe Durchsichtigkeit. Die Schwerpunktzeit liegt bei Variante 2 tendenziell über der von Variante 1, was bei Variante 2 eine stärkere räumliche Wahrnehmung erwarten lässt.

Die Berechnungsergebnisse für das Deutlichkeitsmaß für Sprache erfüllen bei beiden untersuchten Varianten das Planungsziel. Die Deutlichkeitsmaße für Variante 2 erfüllen die Anforderung $C_{50} \geq 0$ dB stellenweise nur knapp. Die Werte für das Deutlichkeitsmaß für Variante 1 liegen weitgehend 1 dB bis 2 dB über denen von Variante 2, was auf eine bessere Durchsichtigkeit der Variante 2 hinweist.

Bei beiden Varianten lassen die Werte für den Artikulationsverlust auf eine angemessene bis gute Sprachverständlichkeit schließen. Die Werte für Variante 2 liegen i.d.R. ca. 1 % über denen der Variante 1, wodurch die Sprachverständlichkeit der Variante 1 im Hinblick auf den Artikulationsverlust geringfügig günstiger zu bewerten ist.

Die Sprachübertragungsindizes unterscheiden sich nur geringfügig mit max. $\Delta STI =$ ca. 0,04 voneinander. Die Werte beider Varianten weisen auf eine angemessene bis gute Silbenverständlichkeit hin, wobei die Werte für Variante 1 auf der leicht günstigeren Seite liegen.

15 Fazit und Ausblick

Beide untersuchten Deckenmaßnahmen in Form von Zellulose-Schlitzabsorbern oder in Beton eingelegten Glasschaumstreifen erweisen sich als geeignete Maßnahmen, die bei runden Oberflächen vorgesehen werden können. Mit beiden Varianten, jeweils mit zusätzlichen Tiefenabsorbern bspw. in Form von Verbundplatten-Resonatoren kann eine angemessene Raumakustik für musikalische Nutzungen erreicht werden. Mit Hilfe zusätzlicher flexibel anbringbarer Wandabsorber wird außerdem mit beiden vorgeschlagenen Deckenmaßnahmen eine angemessene bis gute Sprachverständlichkeit für Vorträge und Führungen erreicht. Da bei Vorträgen ein vergleichsweise hoher Pegelunterschied zwischen den vorderen und hinteren Plätzen entsteht, erweist sich eine elektroakustische Unterstützung mit Lautsprechern als sinnvoll. Eine untersuchte Lautsprecheranordnung wirkt sich außerdem positiv auf den Artikulationsverlust und den Sprachübertragungs-Index aus.

Tendenziell werden mit den Zellulose-Schlitzabsorbern schalltechnisch günstigere Werte erreicht, die im Vergleich auf eine bessere Akustik sowohl für Musiknutzungen als auch für Sprachnutzungen hinweisen. Ein weiterer Vorteil der Zellulose-Schlitzabsorber besteht darin, dass nachträglich, sofern erforderlich zusätzliche Absorptionsflächen mit dem Material vorgesehen werden können. Da für die Glasschaum-Streifen im Rohbau Schalungen vorgesehen werden müssen, ist eine nachträgliche Optimierung mit dieser Maßnahme nicht möglich.

Nach Fertigstellung des Raumes empfiehlt sich zum Vergleich mit der Simulation eine Messung der raumakustischen Parameter. U.U. ist auch eine Messung im Rohbau vor dem Einbau der Akustikmaßnahmen zum Abgleich mit dem Simulationsmodell sinnvoll. Eine weitere Möglichkeit der Verifizierung der Simulationenwerte, besteht darin Messungen in einem Modell durchzuführen und frühzeitig ggfs. zusätzlich erforderliche Maßnahmen vorzusehen oder Maßnahmen zu reduzieren. Da in den Simulationen bspw. geringe Echokriterien berechnet werden, ist nicht von einer Echowahrnehmung auszugehen. Entsprechend sind bisher keine Maßnahmen zur Echominimierung vorgesehen. Sollten in Messungen dennoch Echos feststellbar sein, stellt bspw. eine Strukturierung glatter Raumboflächen zur Erhöhung der Streuung und zur Lenkung von Reflexionen einen Weg zur Reduzierung von Echos dar.

Zur besseren Beurteilung der Raumakustik im tieffrequenten Bereich unterhalb der Schröderfrequenz können welltheoretische Simulationen durchgeführt werden, um vorherrschende Raummoden zu ermitteln und Maßnahmen gezielter zu planen, als es mit geometrisch-raumakustischen Betrachtungen möglich ist.

In der weiteren Planung sind außerdem die Vorschläge zur Befestigung der flexiblen Wandmaßnahmen zu detaillieren.

16 Zusammenfassung

Die Carl-Orff-Stiftung plant den Neubau einer Ausstellungshalle für das Carl-Orff-Museum. Die Ausstellungshalle soll zusätzlich zu seiner Hauptnutzung auch als Veranstaltungsstätte für Konzerte, interaktive musikalische Nutzungen bspw. Body-Percussion und Vorträge genutzt werden. Nutzungsabhängig bestehen verschiedene Anforderungsprofile an die Raumakustik. Für die Halle ist daher eine Planung flexibler Raumakustik-Maßnahmen erforderlich. Des Weiteren bestehen Einschränkungen bei der Auswahl der möglichen Maßnahmen aus optischen Gründen. So soll die Optik der geplanten Tonnengewölbe erhalten bleiben und nicht durch eine Akustikdecke oder ähnliche Maßnahmen verdeckt werden. Daher werden zwei Möglichkeiten für raumakustische Deckenmaßnahmen untersucht, bei denen die Deckenform erhalten bleibt. Zusätzlich werden flexibel anbringbare Wandmaßnahmen untersucht, um nutzungsabhängig verschiedene Anforderungen an die Raumakustik erfüllen zu können. Für die flexible Anbringung der Maßnahmen werden bspw. Klapprahmen, Schienensysteme oder Aufhängungen an Drahtseilgespannen vorgeschlagen, diese sind in der weiteren Planung zu detaillieren.

Als Grundlage der Planung wird zunächst ein Überblick über die grundlegende Physik der Raumakustik und die verschiedenen Methoden zur Beschreibung von Schallfeldern im Raum, der statistischen, wellentheoretischen und geometrischen Raumakustik gegeben. Weiterhin werden die für diese Arbeit relevanten Absorptionsmechanismen und Bewertungsgrößen beschrieben.

Nach einem Überblick über die geometrisch-raumakustischen Simulationsmethoden erfolgt die Beschreibung des zu untersuchenden Raumes. Es handelt sich um einen rechteckigen Raum mit Raumvolumen $V = \text{ca. } 766 \text{ m}^3$ dessen Decke in Form von 4 Tonnengewölben und zwei halben Tonnengewölben ausgebildet wird. Bei konkaven Raumboflächen besteht unter ungünstigen Bedingungen die Gefahr ungünstiger Fokussierungen der Schallenergie. Aufgrund des Verhältnisses der Radien der Tonnengewölbe zur Raumhöhe liegt der Fokus ausserhalb des Zuhörerbereichs. Ungünstige Fokussierungen der Schallenergie sind nicht zu erwarten.

Zum Erhalt der Deckengeometrie und deren Einsichtbarkeit werden zwei mögliche Absorbersysteme in Form von in die Decke eingelegten Glasschaumstreifen und in Form von Schlitzabsorbern auf Zellulosebasis, die auf gekrümmten Flächen angebracht werden können, ausgewählt. Die akustische Eignung der beiden Systeme für den untersuchten Raum soll gegenübergestellt werden. Zur Gewährleistung einer Anpassungsfähigkeit des Raumklanges an die jeweiligen Raumnutzungen werden außerdem Wandmaßnahmen untersucht, die bei Bedarf im Raum angebracht oder entfernt werden können. U.a. werden hierfür mobile Stellwände vorgesehen, für die Absorptionsgrade vorliegen, die freistehend im Hallraum gemessen wurden. Da die vorgesehene Anordnung nicht der gemessenen entspricht, werden die Schallabsorptionsgrade für die vorgesehene Anordnung auf Grundlage der gemessenen Absorptionsgrade in einem virtuellen Hallraum ermittelt.

Zur Vordimensionierung der erforderlichen Absorptionsflächen erfolgt anschließend eine Nachhallzeitvorausberechnung nach Eyring. Diese ergibt, dass neben den Deckenmaßnahmen zusätzlich Absorptionsmaßnahmen für den tieffrequenten Bereich erforderlich sind. Hierfür werden Verbundplatten-Resonatoren vorgesehen.

Die ermittelten Flächen werden im Simulationsmodell angesetzt. Eine erste Simulation mit EASE AURA [9] zeigt, dass die Flächen der Deckenmaßnahmen im Vergleich zu den in der Nachhallzeitvorausberechnung ermittelten Flächen, erhöht werden müssen. Für jede Variante der Deckenmaßnahmen werden mit weiteren Simulationen mit EASE AURA [9] vier Nutzungs-Szenarien untersucht: Konzernutzung, interaktive Musiknutzung bspw. Body-Percussion, Vortrag, Museumsführung.

Die ermittelten raumakustischen Kenngrößen werden zur Bewertung mit Literaturwerten verglichen.

Mit beiden Varianten der Deckenmaßnahmen in Kombination mit Breitband-Kompakt-Absorbern können die in der Literatur beschriebenen Zielbereiche für energetische Kenngrößen und der Nachhallzeit für musikalische Nutzungen weitestgehend eingehalten werden, was einen echofreien, ausgewogenen räumlichen Klang mit guter Durchsichtigkeit erwarten lässt. Die Pegelunterschiede zwischen vorderen und hinteren Plätzen überschreiten teilweise die in der Literatur beschriebenen Optimalbereiche geringfügig. Hohe Stärkemaße, die die Zielbereiche aus der Literatur deutlich überschreiten, weisen auf einen hohen Diffusanteil und hohe Lautstärken im Raum hin. Um den Raum für Musiknutzungen nicht zu überdämpfen wird auf Maßnahmen zur Reduzierung des Stärkemaßes verzichtet.

Das Stärkemaß wird in den hinteren Zuhörerbereichen mit zusätzlichen Wandmaßnahmen zur stärkeren Raumbedämpfung bei Anforderungen mit hoher Sprachverständlichkeit in Form von Breitband-Kompaktabsorbern und Verbundplatten-Resonatoren, die bspw. an Schienensystem oder in Klapprahmen an den Wänden befestigt werden können, reduziert. In den mittleren bis vorderen Bereichen kommt es weiterhin zu deutlichen Überschreitungen der in der Literatur genannten Zielbereiche. Die Pegeldifferenz zwischen den vorderen und hinteren Zuhörerbereichen nimmt durch die zusätzlichen Absorber im Ausbreitungsweg zu. Zum Ausgleich der ungleichen Pegelverteilung ist eine elektroakustische Unterstützung mit Anordnung von Lautsprechern im hinteren Raumbereich sinnvoll. Eine mögliche Ausrichtung von zusätzlichen Lautsprechern wird als Variante untersucht.

Durch die zusätzlichen Absorber an den Wänden werden Kennwerte, die für eine angemessene Sprachverständlichkeit sprechen, ermittelt.

Da sich das Gebäude in der Planungsphase befindet und keine Vergleichsmessung zur Kalibrierung des Modells vorliegt, erfolgt eine Abschätzung der Auswirkung abweichender Absorptionsgrade der Raumbegrenzungsflächen. In der Simulation sind ungünstige Literaturwerte angesetzt. Niedrigere Absorptionsgrade an den

Raubegrenzungsflächen sind unwahrscheinlich. Sofern es zu Abweichungen kommt, liegen diese voraussichtlich über den angesetzten Absorptionsgraden, welche sich positiv auf den Raumklang auswirken.

Da in den Simulationen die Schallabsorption durch Publikum berücksichtigt ist, werden in Variantenuntersuchungen die Auswirkungen auf den Raumklang bei geringerer bzw. ohne Publikumsbesetzung untersucht. Es zeigt sich, dass auch ohne die Absorption der Zuhörer ein angemessener Raumklang entsteht. Die Sprachverständlichkeit ist im Vergleich mit einer höheren Besetzungsdichte insbesondere für Personen mit Hörschwierigkeiten und Verständnisproblemen jedoch eingeschränkt. Bei geringerer Besetzungsdichte empfehlen sich zusätzliche akustisch aktive Stellwände.

Im Vergleich der untersuchten Deckenmaßnahmen werden insgesamt bei der Variante mit den Zellulose-Schlitzabsorbern tendenziell günstigere Kennwerte für die Raumakustik berechnet, wobei hierbei eine höhere Belegung der Decke angesetzt ist.

Da die Möblierung und die Ausstellungsgegenstände flexibel gestaltet werden sollen und keine Planung hierfür vorliegt, sind diese in den Untersuchungen nicht berücksichtigt. Bei ungünstiger Positionierung der Möbel können Verschattungseffekte oder Umlenkungen auftreten. Dies ist bei der Einrichtung des Raumes zu beachten.

Die Betrachtung der tiefen Frequenzen ist mit den angewandten Methoden nur eingeschränkt sinnvoll. Zur besseren Beurteilung der Raumakustik im tieffrequenten Bereich empfiehlt es sich wellentheoretische Simulationen durchzuführen und so die Ausprägung von Raum-Moden zu ermitteln.

Als weiteres Vorgehen werden raumakustische Messungen im Modell vor Fertigstellung des Baus vorgeschlagen. Ebenfalls empfiehlt sich nach Fertigstellung des Raumes zum Vergleich mit der Simulation eine Messung der raumakustischen Parameter. U.U. ist auch eine Messung im Rohbau vor dem Einbau der Akustikmaßnahmen zum Abgleich mit dem Simulationsmodell sinnvoll.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 12354-6:2003, Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 6: Schallabsorption in Räumen; Deutsche Fassung EN 12354-6:2003, April 2004
- [2] DIN 18041:2016-03, Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung, März 2016
- [3] DIN 3382-1, Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 1: Auführungsräume (ISO 3382-1:2009), Oktober 2009
- [4] DIN 4109-34: Schallschutz im Hochbau – Teil 34: Daten für rechnerische Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Vorsatzkonstruktionen vor massiven Bauteilen, Juli 2016
- [5] DIN EN ISO 11654, Akustik – Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden – Bewertung der Schallabsorption, April 1997
- [6] DIN EN ISO 354: Messung der Schallabsorption im Hallraum, Dezember 2003
- [7] DIN EN ISO 9921, Ergonomie – Beurteilung der Sprachkommunikation (ISO 9921:2003), Februar 2004
- [8] ISO 9613-1, Akustik, Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien, Teil 1: Berechnung der Schallabsorption durch die Luft, Juni 1993
- [9] AFMG Technologies GmbH (2014): EASE Version 4.4.70.34, AURA Module 4.0,
- [10] AHNERT Wolfgang, FEISTEL Stefan: Einmessung und Verifizierung raumakustischer Gegebenheiten und von Beschallungsanlagen, in Messtechnik der Akustik, herausgegeben von M. Möser, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [11] AHNERT Wolfgang, TENNHARDT Hans-Peter: Raumakustik, in Handbuch der Audiotechnik, herausgegeben von S. Weinzierl, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008
- [12] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR AKUSTIK e.V.: DEGA-Empfehlung 101 – Akustische Wellen und Felder, Berlin, März 2006
- [13] DROTTLEFF Horst, WACK Robert: Integrale Akustiksystem für thermisch aktivierte Bauteile – Akustik in Betondecken, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2010
- [14] EASE Version 4.3, User's Guide & Tutorial, ADA (Acoustic Design Ahnert), 2009
- [15] FASOLD Wolfgang, FERRES Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis – Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen, HUSS-MEDIEN GmbH, Berlin, 2003
- [16] FUCHS Helmut V.: Raum-Akustik und Lärm-Minderung – Konzepte mit innovativen Schallabsorbern und -dämpfern, 4. Auflage, Springer-Verlag GmbH Deutschland, Berlin-Schlachtensee, 2017
- [17] FUCHS Helmut V.: Schallabsorber und Schalldämpfer - Innovative Konzepte und Bauteile mit praktischen Anwendungen und konkreten Beispielen, 2. wesentlich erweiterte und bearbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 2007
- [18] FUCHS Helmut V. (2018): Thesen zur Akustik anspruchsvoller Räume in Akustik Journal Nr. 02 / Juni 2018, 31-45

- [19] HENN Hermann, SINAMBARI Gh. Reza, FALLEN Manfred: Ingenieurakustik. Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele 4. Auflage, Vieweg + Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008
- [20] HERMANN Björn C.: Schallabsorptionsgrade verschiedener Materialien, (tabellarisch). Herausgegeben von der Universität Duisburg-Essen. URL: <https://www.uni-due.de/ibpm/BauPhy/Schall/Buch/Tabellen.htm#tab19>, Stand 12.01.2022
- [21] KAUTSCH Peter et al.: Aufgespritzte und verputzte Zellulosekompaktabsorber - Untersuchungen zur grundsätzlichen Eignung aufgespritzter und verputzter, hygrometrisch aktiver Zellulose-Schallabsorber, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2006
- [22] KUTTRUFF Heinrich.: Raumakustik, in Taschenbuch der Technischen Akustik zweite Auflage, herausgegeben von M. Heckl und H.A. Müller, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1994
- [23] KUTTRUFF Heinrich, MOMMERTZ Eckard: Raumakustik, in Taschenbuch der technischen Akustik, 3. und erweiterte überarbeitete Auflage, herausgegeben von G. Müller und M. Möser, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004
- [24] LAZARUS Hans et al. Vorhersage der Sprachverständlichkeit: Sprachindices. Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [25] LERCH Reinhard, SESSLER Gerhard, WOLF Dietrich: Technische Akustik. Grundlagen und Anwendungen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [26] MECHEL Fridolin P.: Schallabsorption, in Taschenbuch der Technischen Akustik zweite Auflage, herausgegeben von M. Heckl und H.A. Müller, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1994
- [27] MECK ARCHITEKTEN: Entwurfsplanung COM-Erweiterung Carl-Orff-Museum, München, 01.10.2021
- [28] MÖSER Michael: Technische Akustik, 9., aktualisierte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012
- [29] MÜLLER BBM: Schalltechnisches Prüfzeugnis, Schallabsorptionsgrad nach ISO 354, Sigel GmbH Businessproducts, Akustik-Stellwand Sound Balance, Planegg, 2018
- [30] PROBST Wolfgang: Die Bestimmung des Absorptionsgrads im „virtuellen“ Hallraum – Eine Anwendung der Simulationsberechnung mit dem Schallteilchenverfahren in Lärmbekämpfung Bd. 10 (2015) Nr. – September, 204-201
- [31] RENZ Systeme GmbH: Datenblatt Verbund-Platten-Resonator, Aidlingen, Januar 2017
- [32] RENZ Systeme GmbH: Datenblatt Breitband-Kompaktabsorber BKA-I, Aidlingen, Januar 2017
- [33] SKUDRZYK Eugen: Grundlagen der Akustik Volume 1, Springer-Verlag Wien GmbH, 1954
- [34] WACK R., DROTTLEFF H., SCHMID H.: IBP-Mitteilung 405 - Absorbermodell für gesinterten Glasschaum, Fraunhofer Institut Bauphysik, Stuttgart, 2002

Anlagen

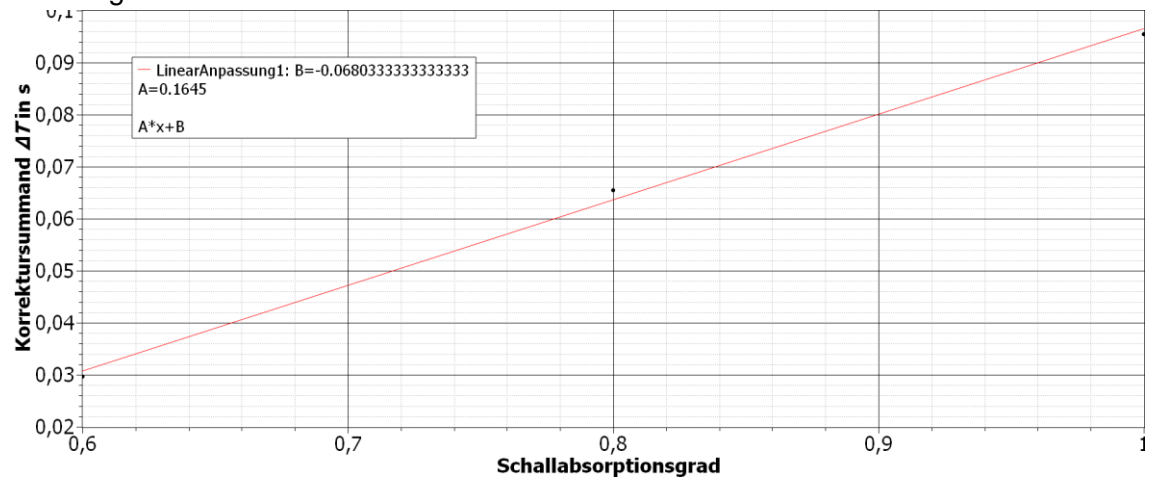
- Anlage 1: Kalibrierung Hallraum
- Anlage 2: AURA-Simulation Konzert Variante 1
- Anlage 3: AURA-Simulation Konzert Variante 2
- Anlage 4: AURA-Simulation Musik interaktiv Variante 1
- Anlage 5: AURA-Simulation Musik interaktiv Variante 2
- Anlage 6: AURA-Simulation Vortrag Variante 1
- Anlage 7: AURA-Simulation Vortrag Variante 2
- Anlage 8: AURA-Simulation Führung Variante 1, Anordnung 1
- Anlage 9: AURA-Simulation Führung Variante 1, Anordnung 2
- Anlage 10: AURA-Simulation Führung Variante 1, Anordnung 3
- Anlage 11: AURA-Simulation Führung Variante 1, Anordnung 4
- Anlage 12: AURA-Simulation Führung Variante 2, Anordnung 1
- Anlage 13: AURA-Simulation Führung Variante 2, Anordnung 2
- Anlage 14: AURA-Simulation Führung Variante 2, Anordnung 3
- Anlage 15: AURA-Simulation Führung Variante 2, Anordnung 4
- Anlage 16: AURA-Simulation Unsicherheitsabschätzung Konzert
- Anlage 17: AURA-Simulation Unsicherheitsabschätzung Vortrag

Anlage 18: AURA-Simulation ohne Besetzung Konzert

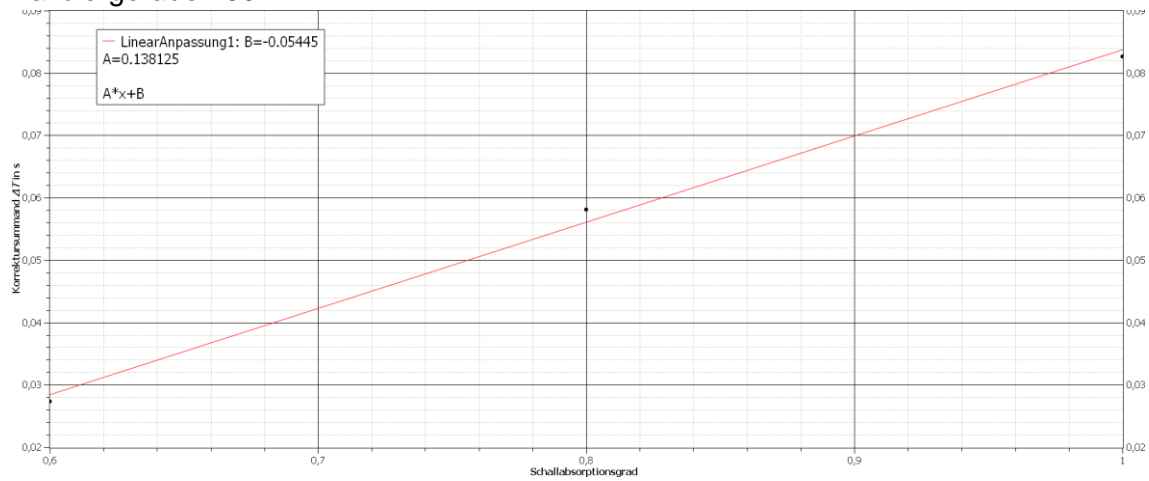
Anlage 19: AURA-Simulation ohne Besetzung Vortrag

Anlage 1: Kalibrierung Hallraum

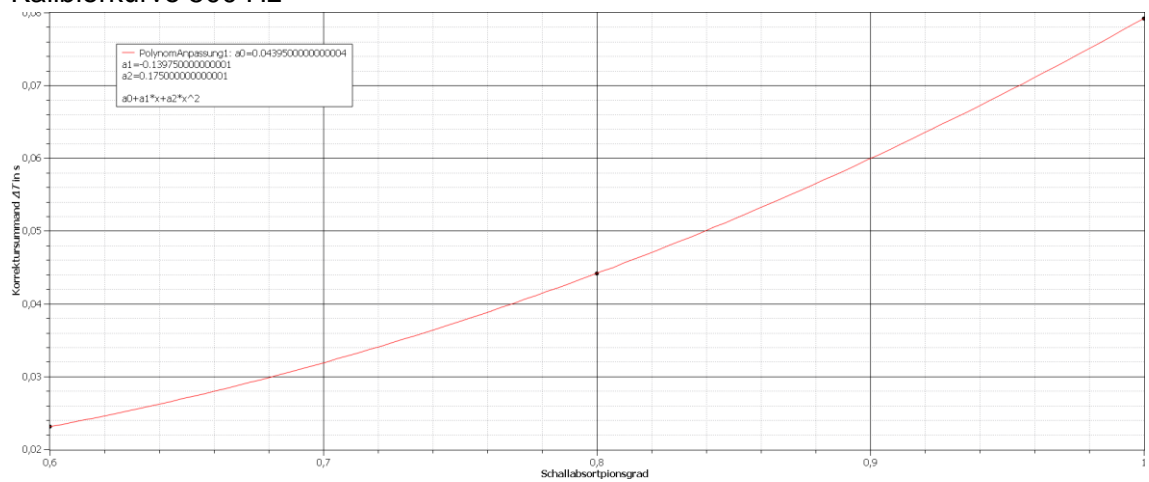
Kalibriergerade 125 Hz



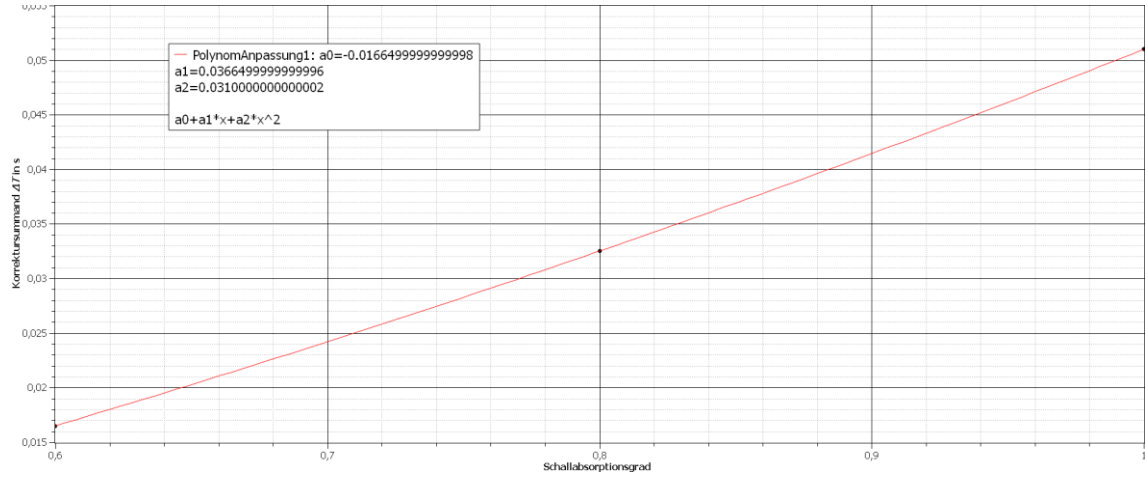
Kalibriergerade 250 Hz



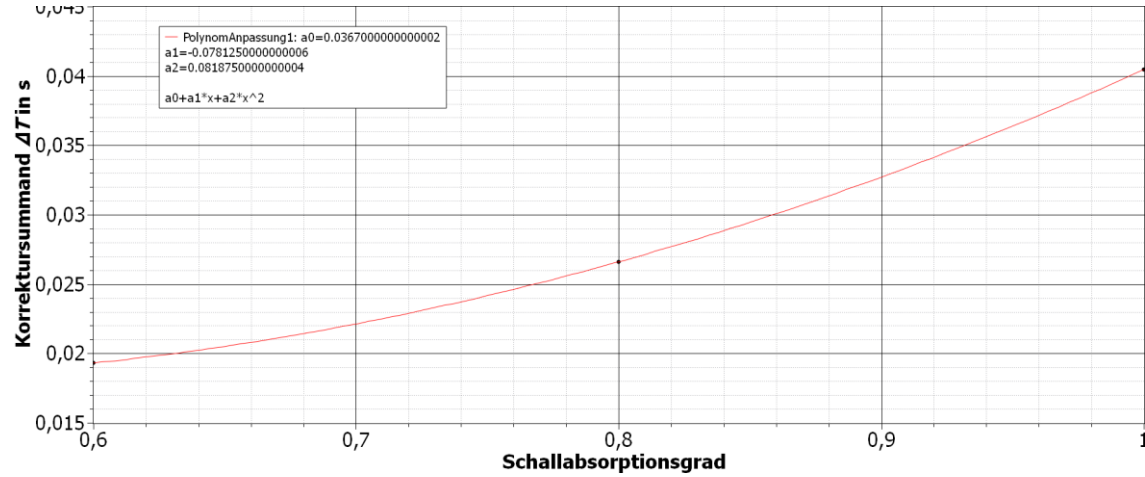
Kalibrierkurve 500 Hz



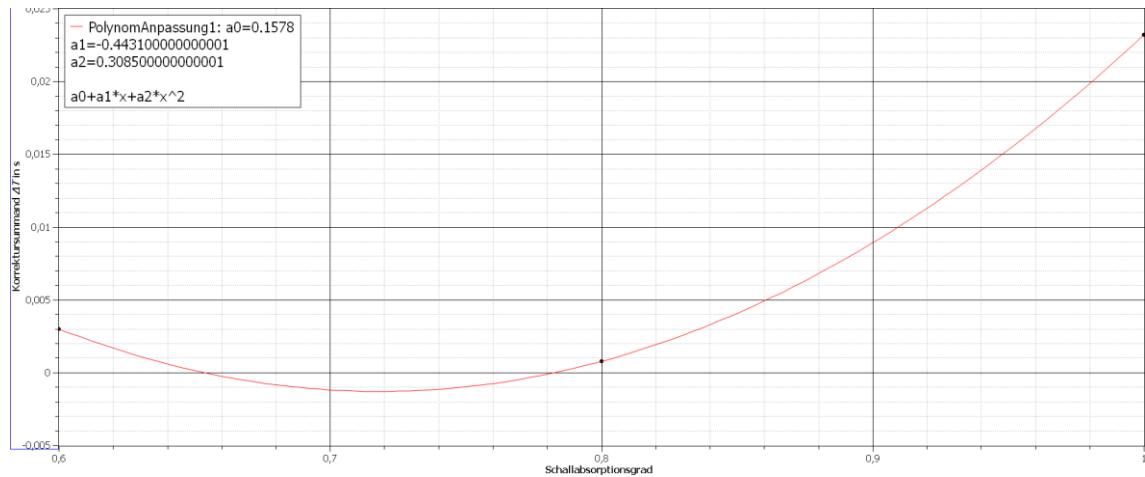
Kalibrierkurve 1000 Hz



Kalibrierkurve 2000 Hz



Kalibrierkurve 4000 Hz



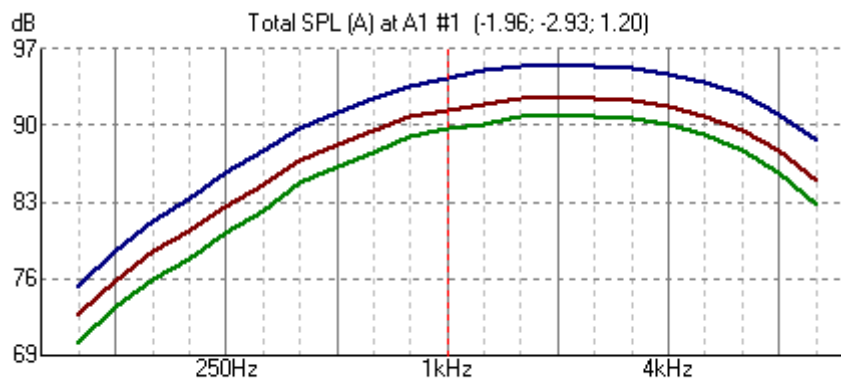
Anlage 2: AURA-Simulation Konzert Variante 1

Legende Diagramme:

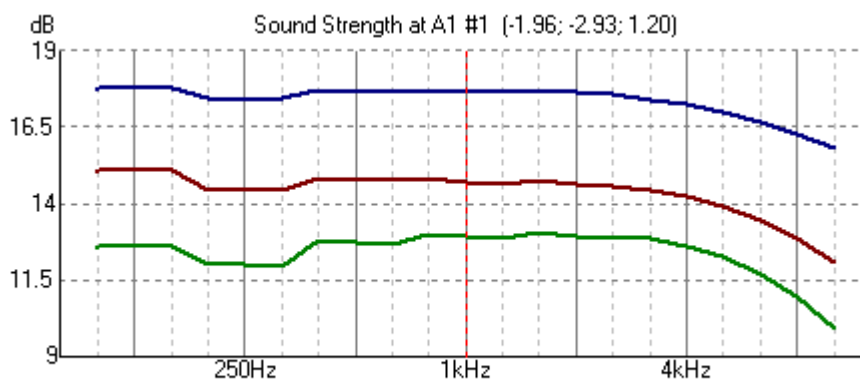
Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

Grün: Minimum

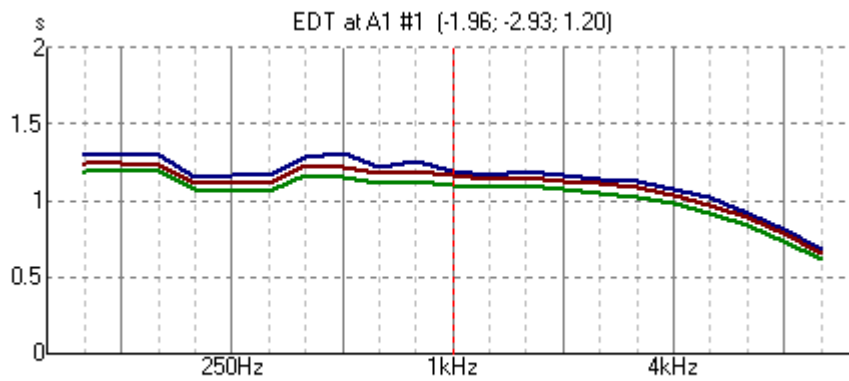
Schalldruckpegel A-bewertet L_p – Konzert Variante 1

(c) EASE 4.4 / CDM / 13.05.2022 20:05:21 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Stärkemaß G – Konzert Variante 1

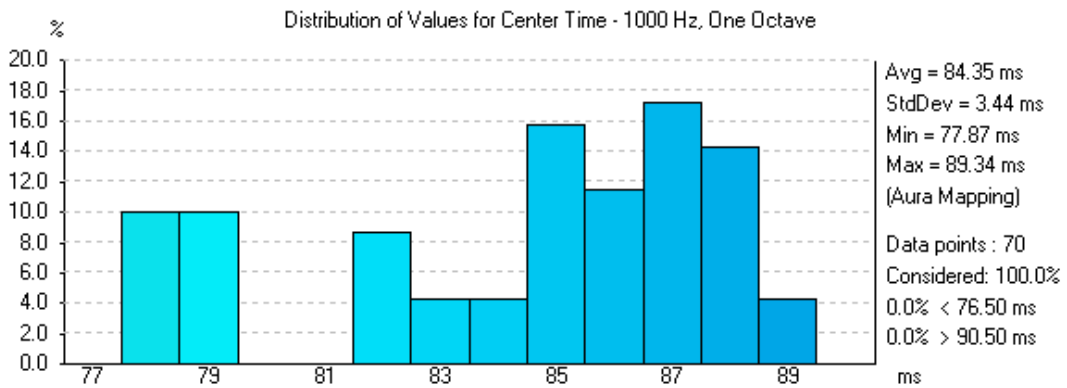
(c) EASE 4.4 / CDM / 05.05.2022 18:21:03 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Frühe Nachhallzeit EDT – Konzert Variante 1



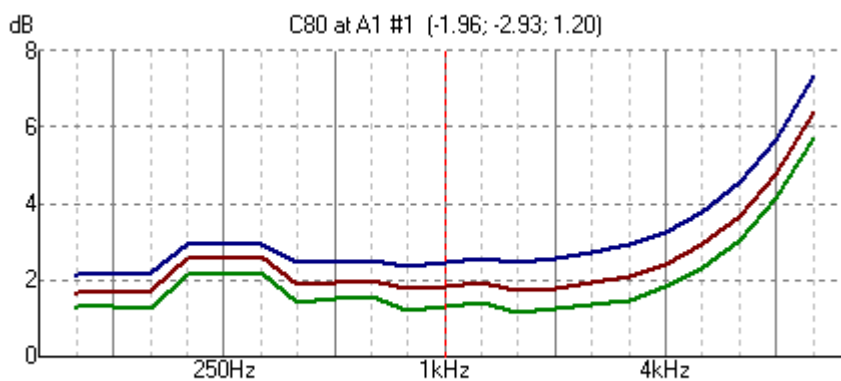
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:24:56 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Schwerpunktzeit t_s bei 1000 Hz – Konzert Variante 1

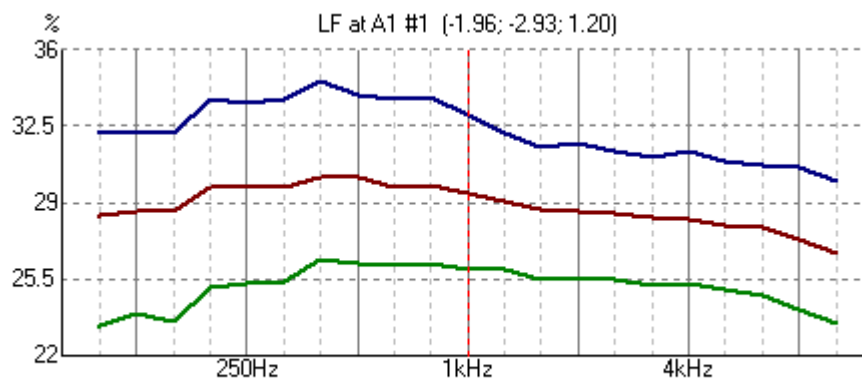


(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 20:48:03 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

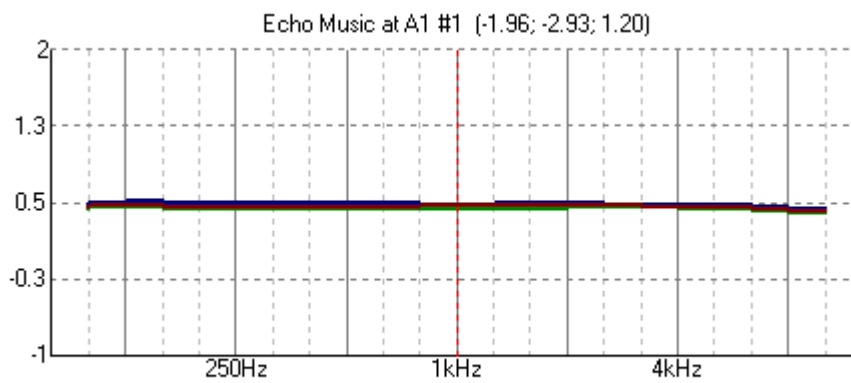
Klarheitsmaß für Musik C_{80} – Konzert Variante 1



(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:17:20 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Seitenschallgrad LF – Konzert Variante 1

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:18:15 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium EK – Konzert Variante 1

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:16:12 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

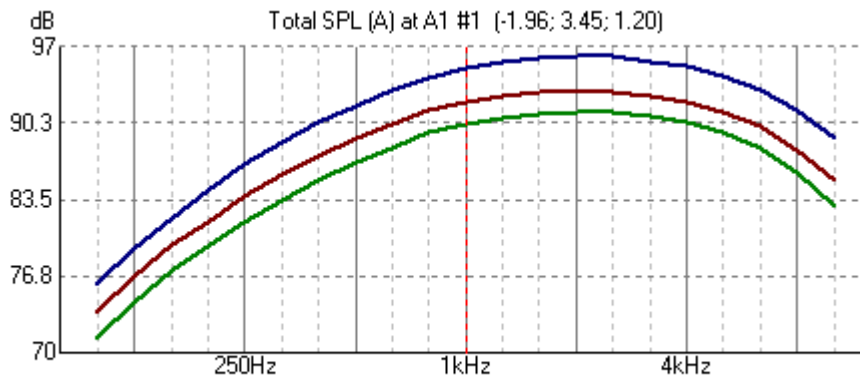
Anlage 3: AURA-Simulation Konzert Variante 2

Legende Diagramme:

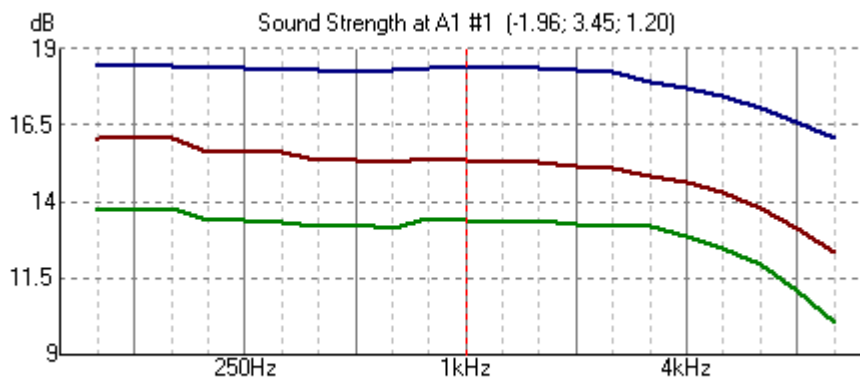
Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

Grün: Minimum

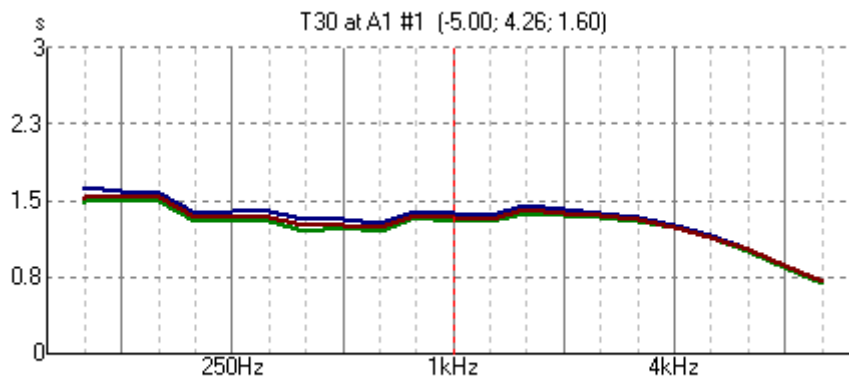
Schalldruckpegel A-bewertet L_p – Konzert Variante 2

(c) EASE 4.4 / CDM / 05.05.2022 18:20:01 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Stärkemaß G – Konzert Variante 2

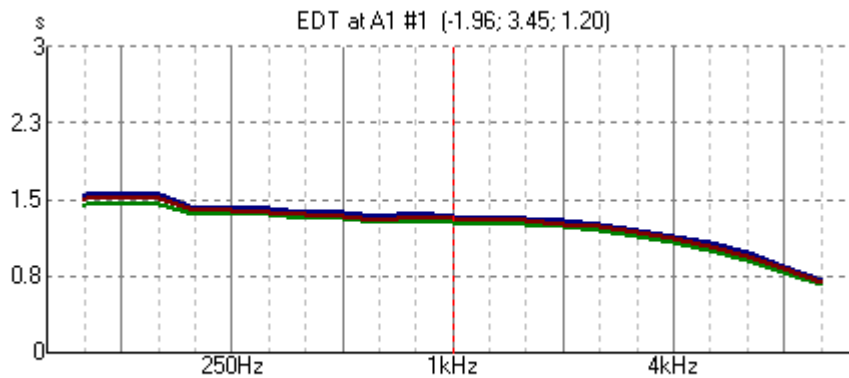
(c) EASE 4.4 / CDM / 05.05.2022 18:22:30 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Nachhallzeit T_{30} – Konzert Variante 2



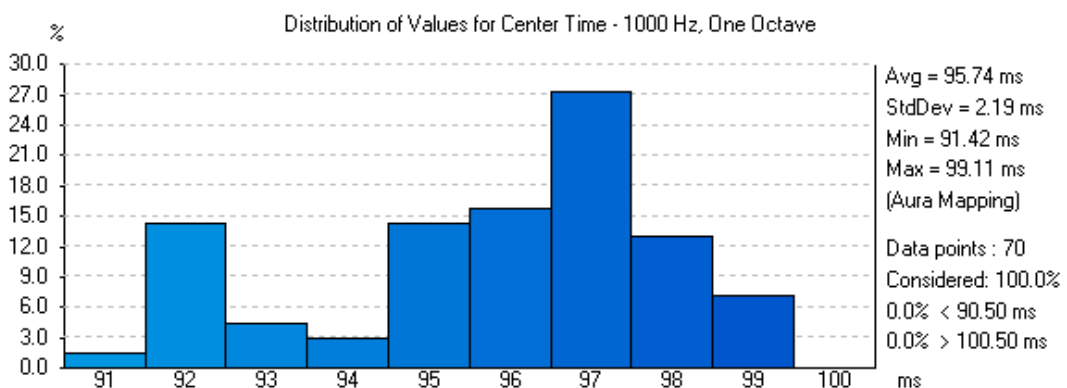
(c) EASE 4.4 / COM / 12.05.2022 21:14:41 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Frühe Nachhallzeit EDT – Konzert Variante 2

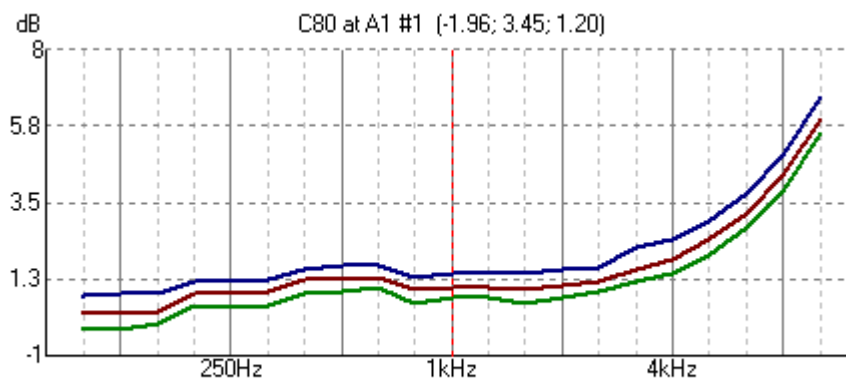


(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:27:15 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

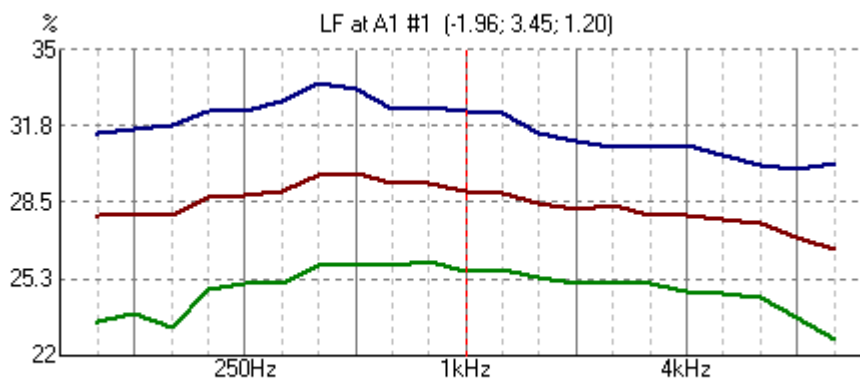
Schwerpunktzeit t_s bei 1000 Hz – Konzert Variante 2



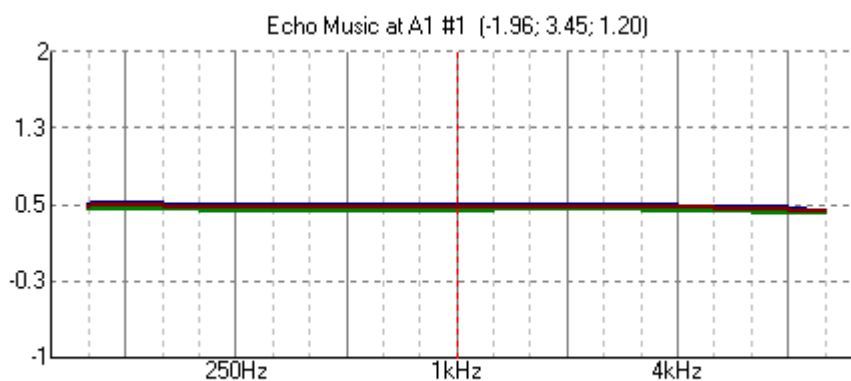
(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 20:49:48 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Klarheitsmaß für Musik C_{80} – Konzert Variante 2

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:28:56 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Seitenschallgrad LF – Konzert Variante 2

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:30:01 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium EK – Konzert Variante 2

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:07:45 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Anlage 4: AURA-Simulation Musik interaktiv Variante 1

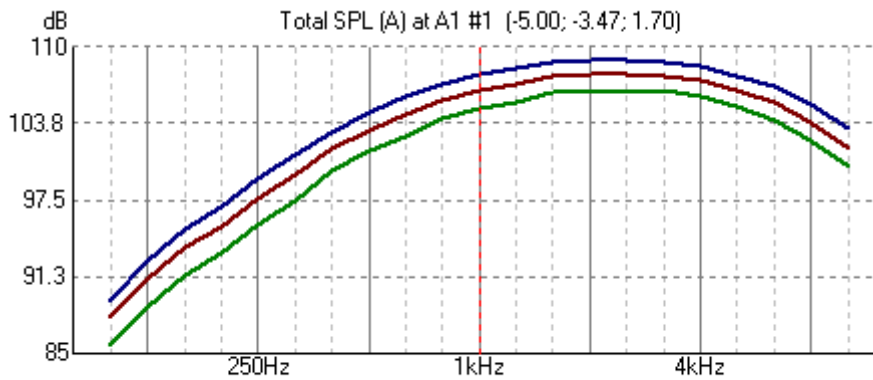
Legende Diagramme:

Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

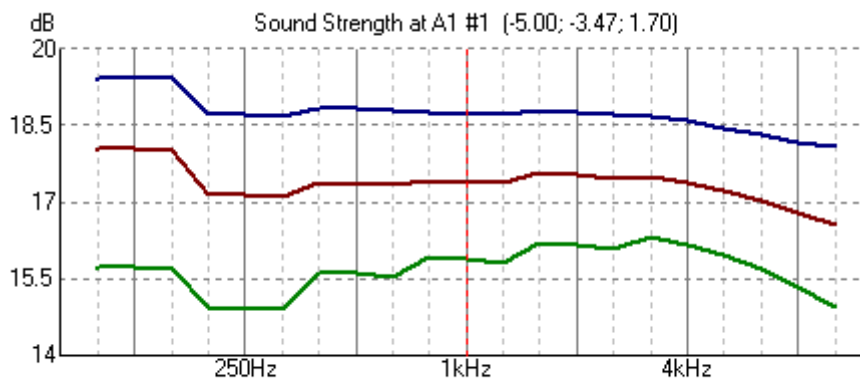
Grün: Minimum

Schalldruckpegel A-bewertet L_p – Musik interaktiv Variante 1

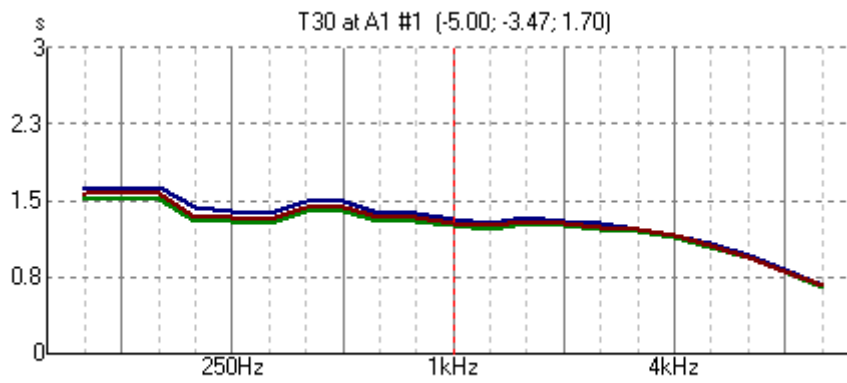


(c) EASE 4.4 / CDM / 05.05.2022 18:31:40 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

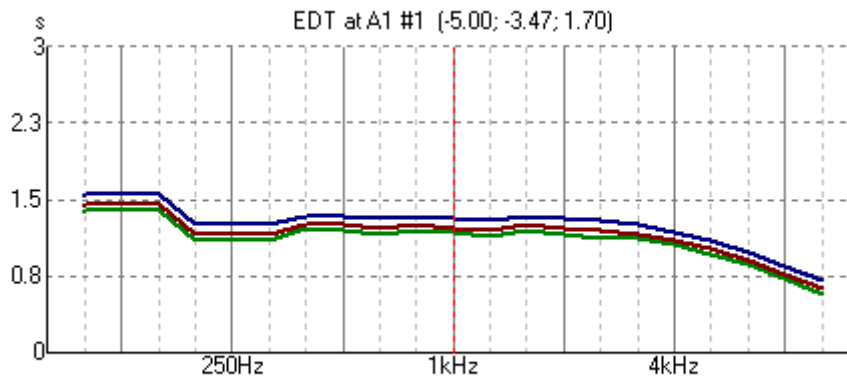
Stärkemaß G – Musik interaktiv Variante 1



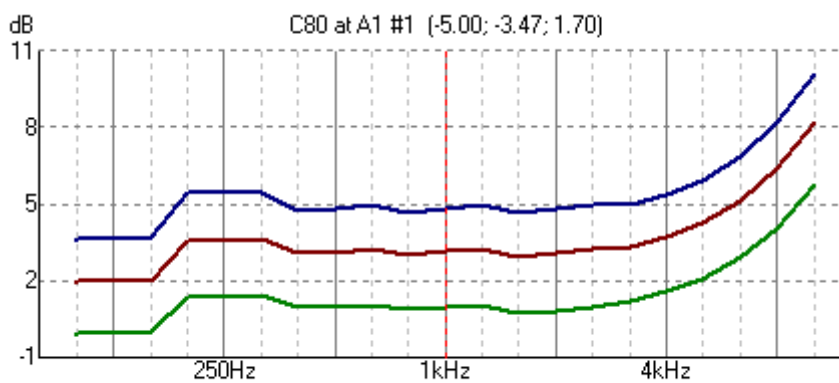
(c) EASE 4.4 / CDM / 05.05.2022 18:32:44 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Nachhallzeit T_{30} – Musik interaktiv Variante 1

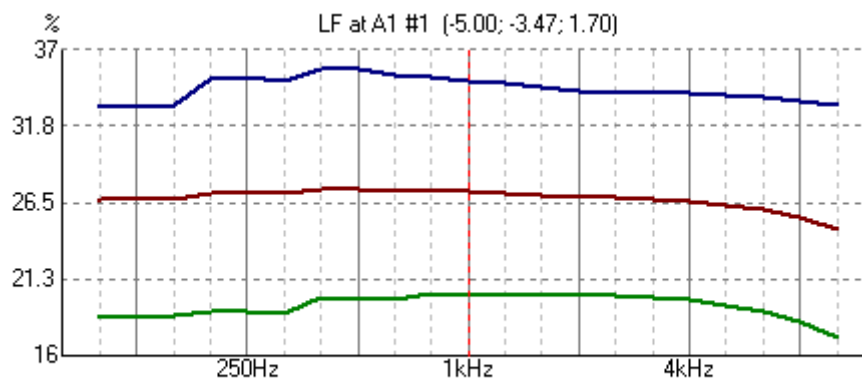
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:33:39 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Frühe Nachhallzeit EDT – Musik interaktiv Variante 1

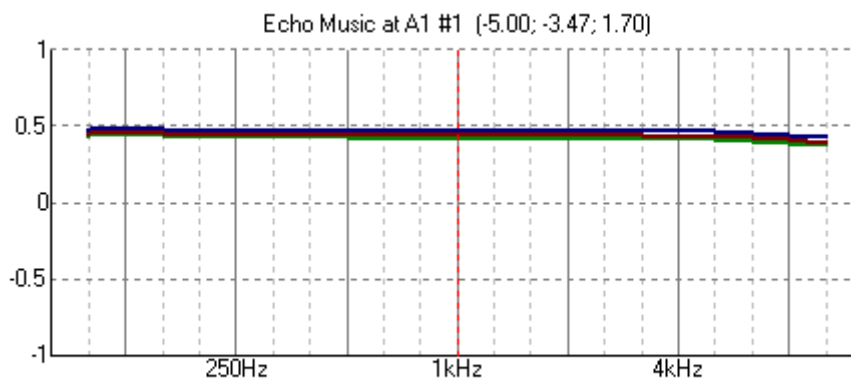
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:35:05 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Klarheitsmaß für Musik C_{80} – Musik interaktiv Variante 1

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:37:19 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Seitenschallgrad LF – Musik interaktiv Variante 1

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:38:16 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium EK – Musik interaktiv Variante 1

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:08:30 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

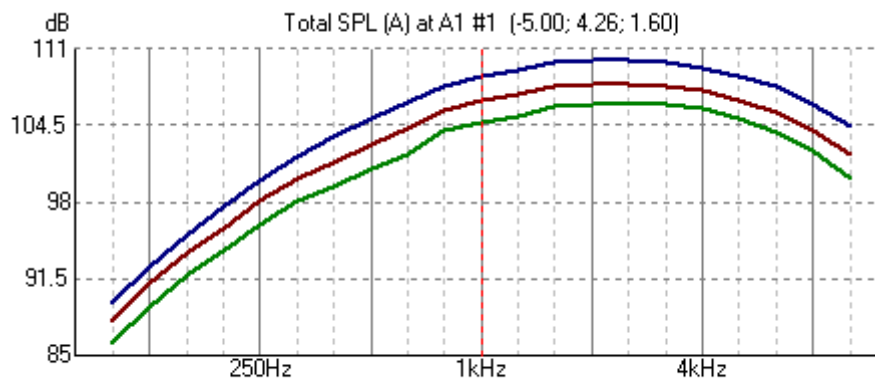
Anlage 5: AURA-Simulation Musik interaktiv Variante 2

Legende Diagramme:

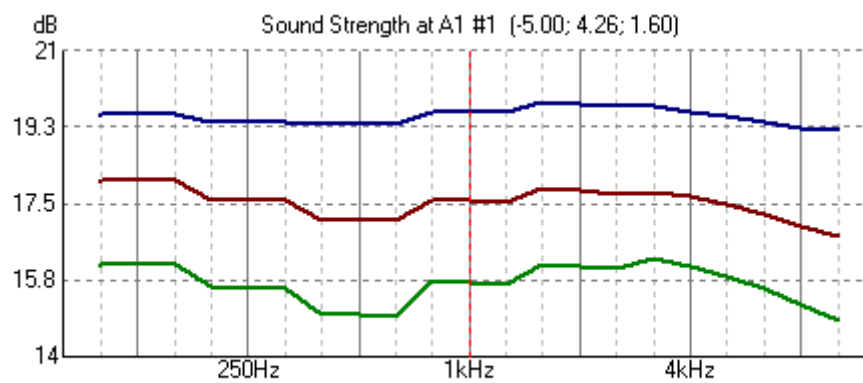
Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

Grün: Minimum

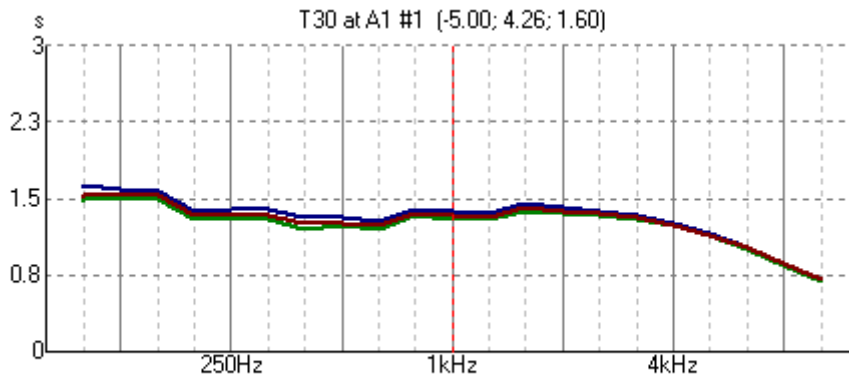
Schalldruckpegel A-bewertet L_p – Musik interaktiv Variante 2

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:39:42 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Stärkemaß G – Musik interaktiv Variante 2

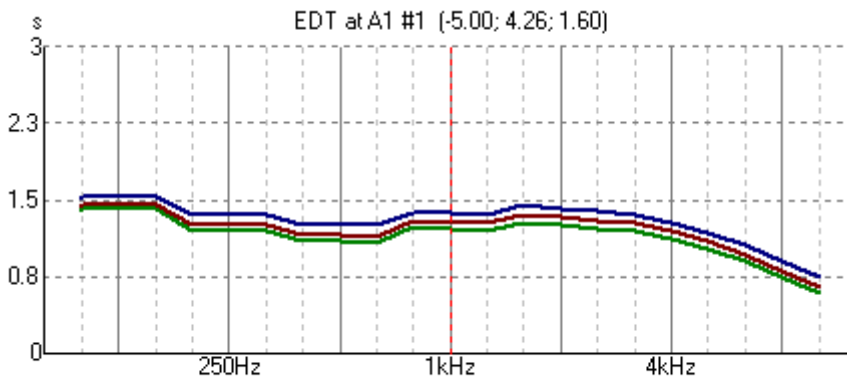
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:41:11 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Nachhallzeit T_{30} – Musik interaktiv Variante 2



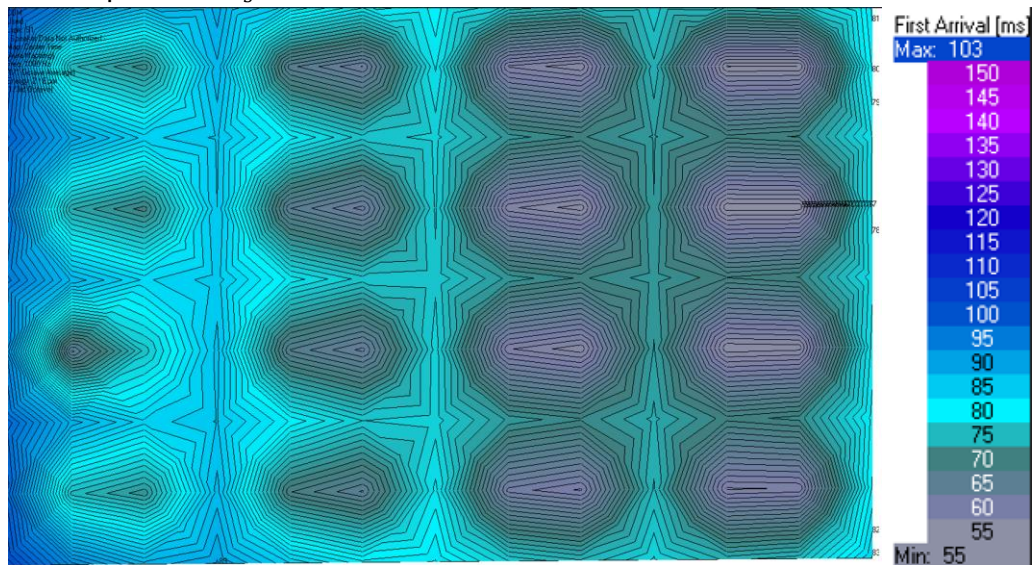
(c) EASE 4.4 / COM / 12.05.2022 21:14:41 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

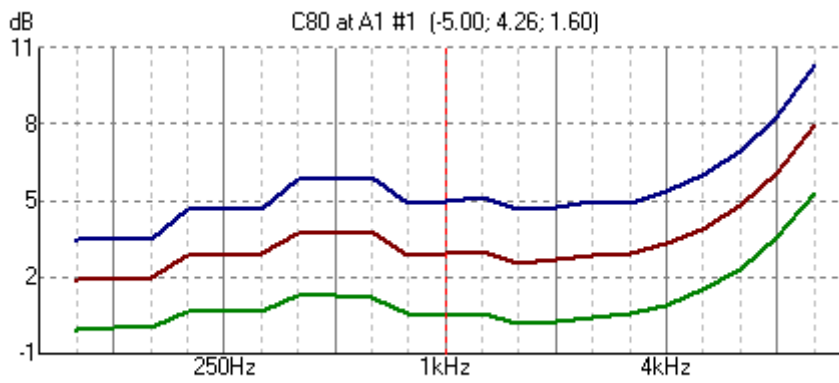
Frühe Nachhallzeit EDT – Musik interaktiv Variante 2



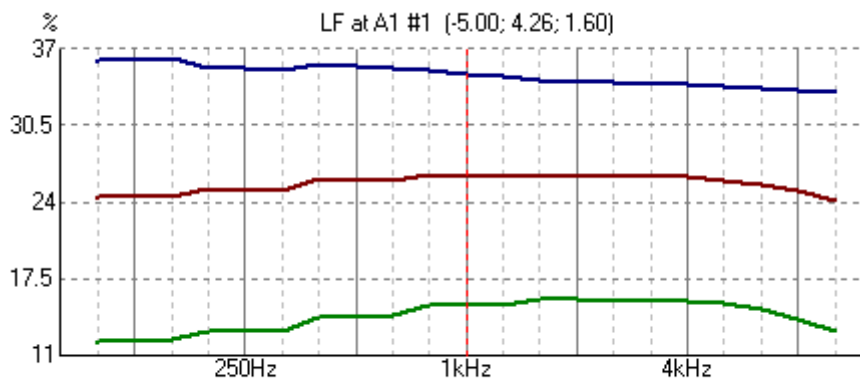
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:52:24 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Schwerpunktzeit t_s bei 1000 Hz – Musik interaktiv Variante 2

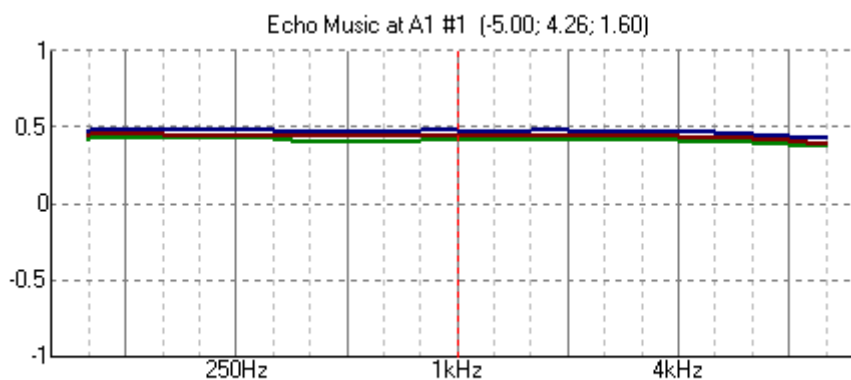


Klarheitsmaß für Musik C_{80} – Musik interaktiv Variante 2

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:43:24 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Seitenschallgrad LF – Musik interaktiv Variante 2

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:44:38 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium EK – Musik interaktiv Variante 2

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:09:14 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

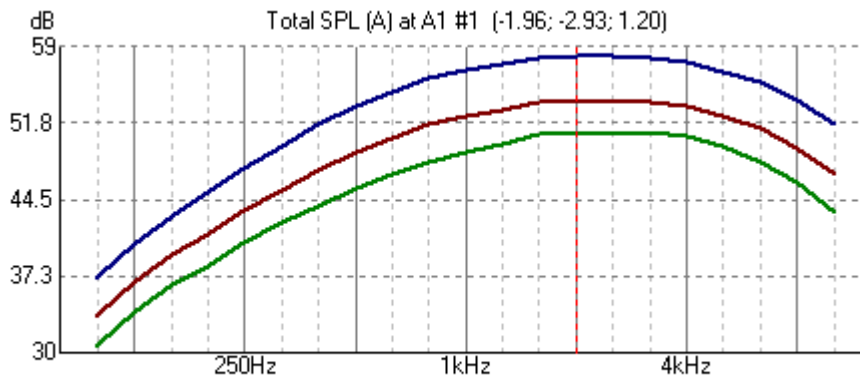
Anlage 6: AURA-Simulation Vortrag Variante 1

Legende Diagramme:

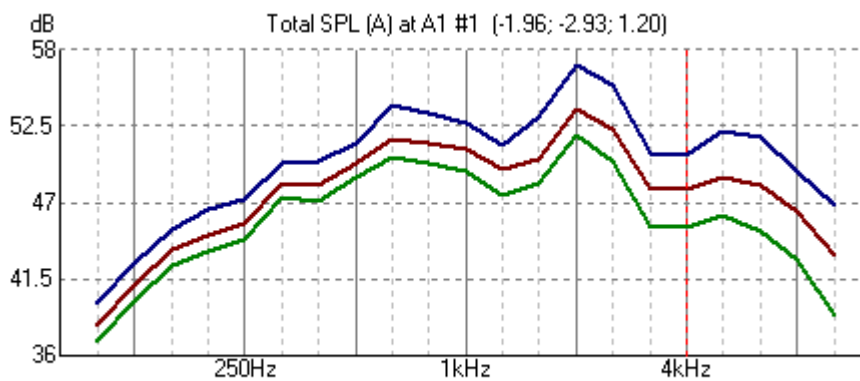
Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

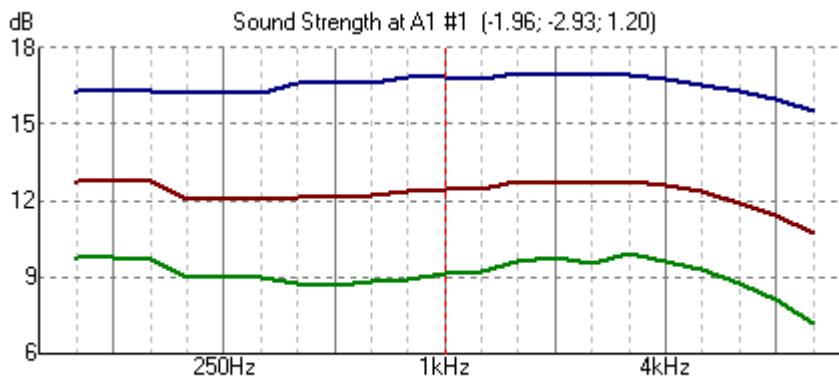
Grün: Minimum

Schalldruckpegel A-bewertet L_p ohne Lautsprecher – Vortrag Variante 1

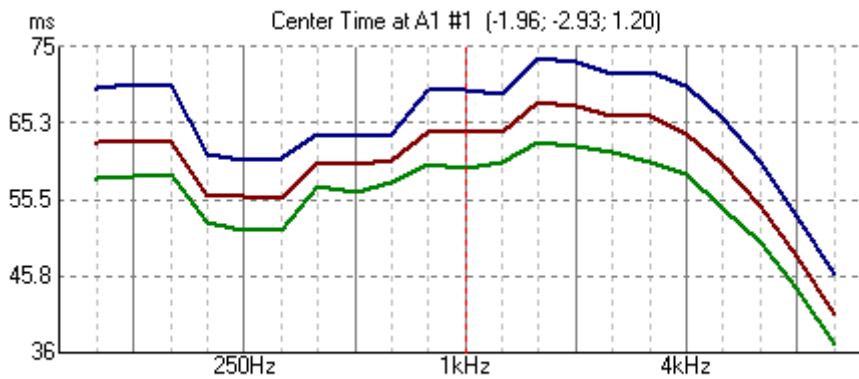
(c) EASE 4.4 / CDM / 19.05.2022 18:52:19 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Schalldruckpegel A-bewertet L_p mit Lautsprechern – Vortrag Variante 1

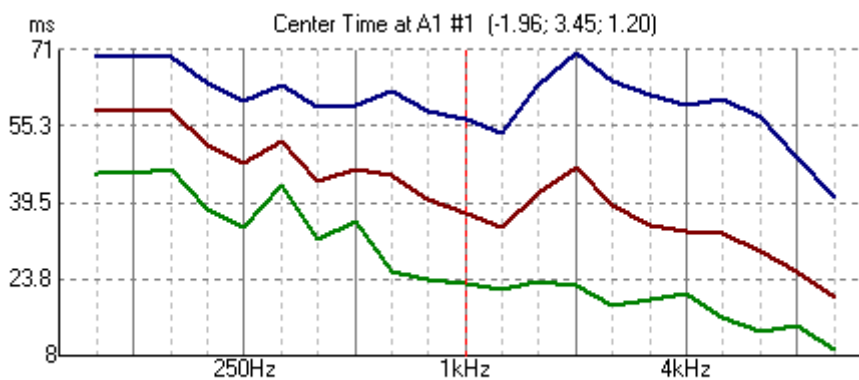
(c) EASE 4.4 / CDM / 19.05.2022 21:08:06 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Stärkemaß G ohne Lautsprecher – Vortrag Variante 1

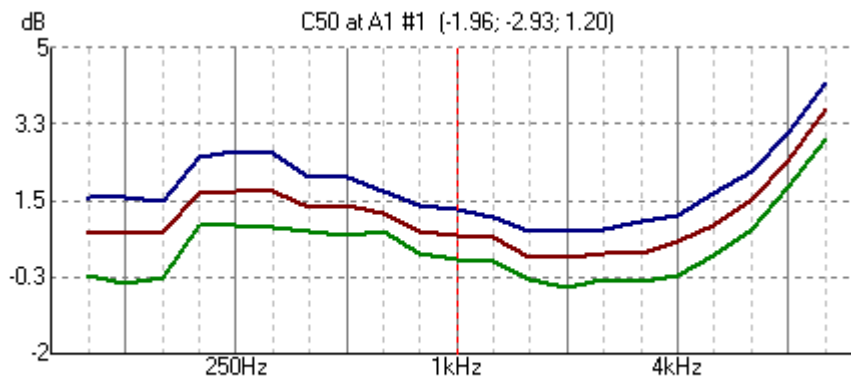
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:48:55 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Schwerpunktzeit t_s ohne Lautsprecher – Vortrag Variante 1

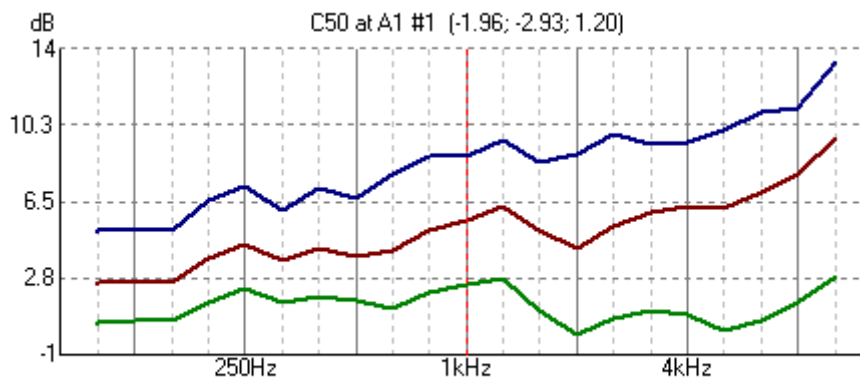
(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 14:54:28 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Schwerpunktzeit t_s mit Lautsprechern – Vortrag Variante 1

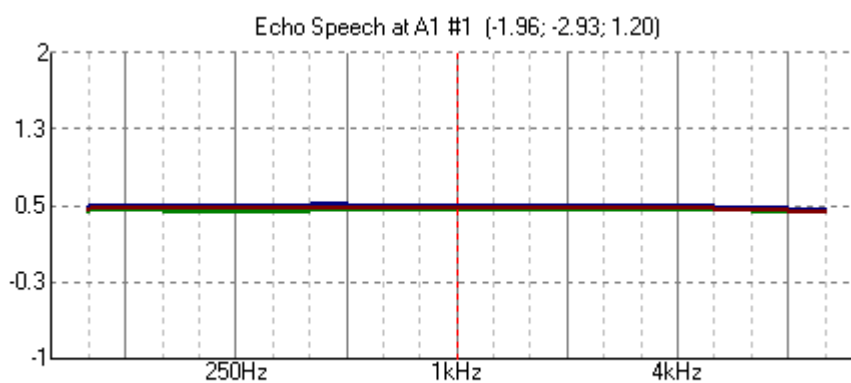
(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 14:56:19 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50} ohne Lautsprecher – Vortrag Variante 1

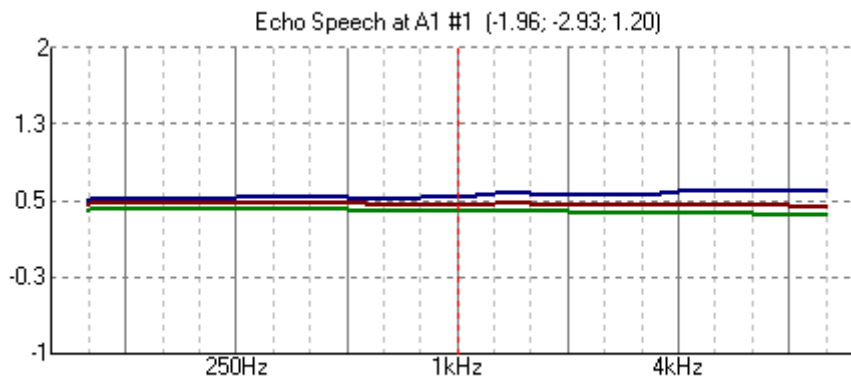
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:54:50 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50} mit Lautsprechern – Vortrag Variante 1

(c) EASE 4.4 / COM / 13.05.2022 19:52:50 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium EK ohne Lautsprecher – Vortrag Variante 1

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:24:50 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium *EK* mit Lautsprechern – Vortrag Variante 1

(c) EASE 4.4 / COM / 13.05.2022 19:53:52 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

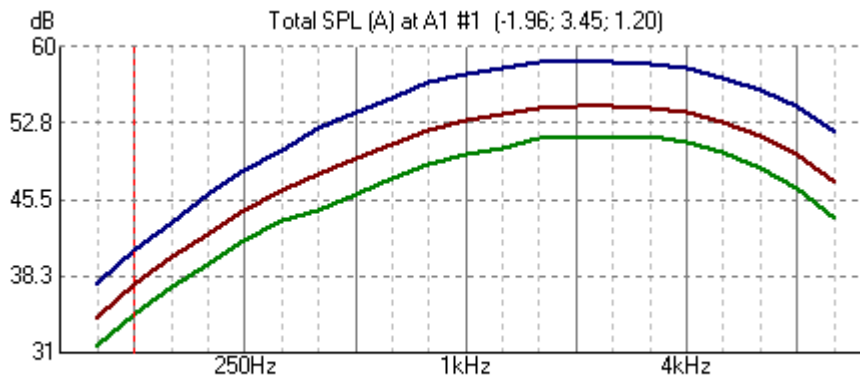
Anlage 7: AURA-Simulation Vortrag Variante 2

Legende Diagramme:

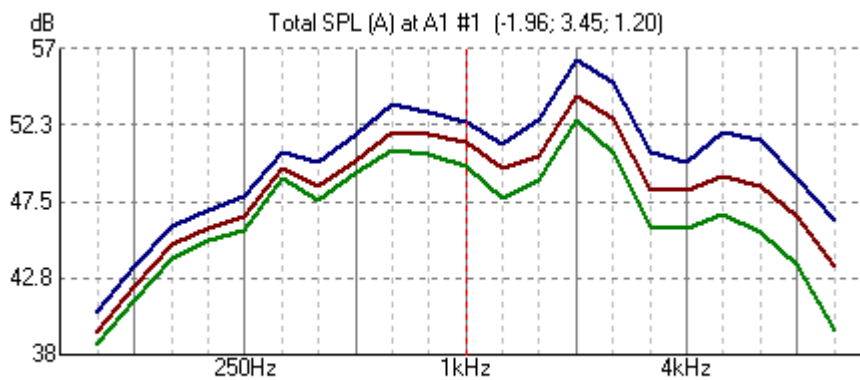
Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

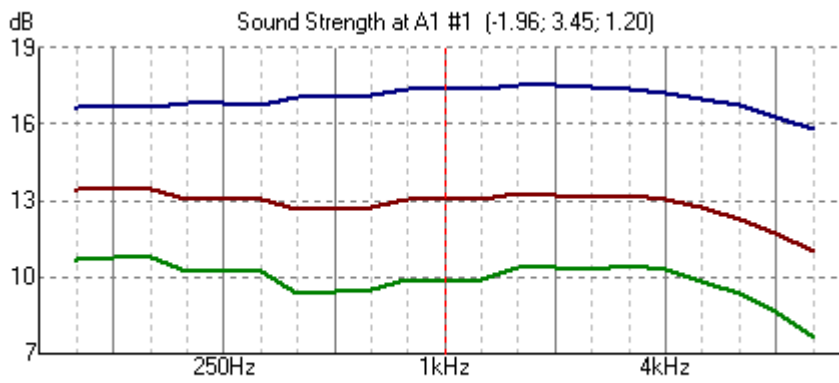
Grün: Minimum

Schalldruckpegel A-bewertet L_p ohne Lautsprecher – Vortrag Variante 2

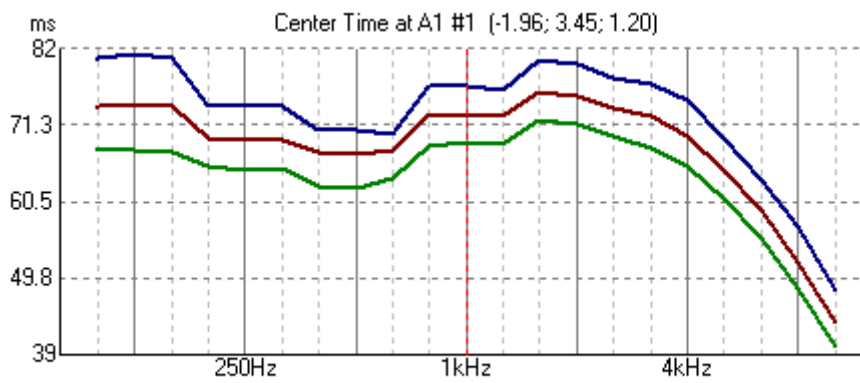
(c) EASE 4.4 / CDM / 19.05.2022 19:39:23 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Schalldruckpegel A-bewertet L_p mit Lautsprecher – Vortrag Variante 2

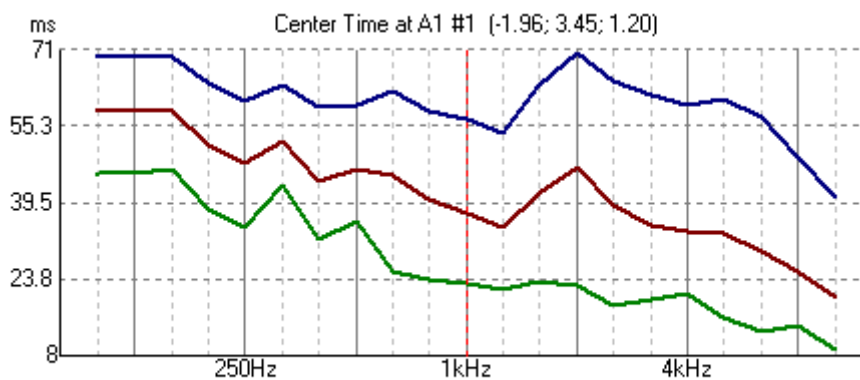
(c) EASE 4.4 / CDM / 19.05.2022 22:35:10 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Stärkemaß G ohne Lautsprecher – Vortrag Variante 2

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 18:59:26 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

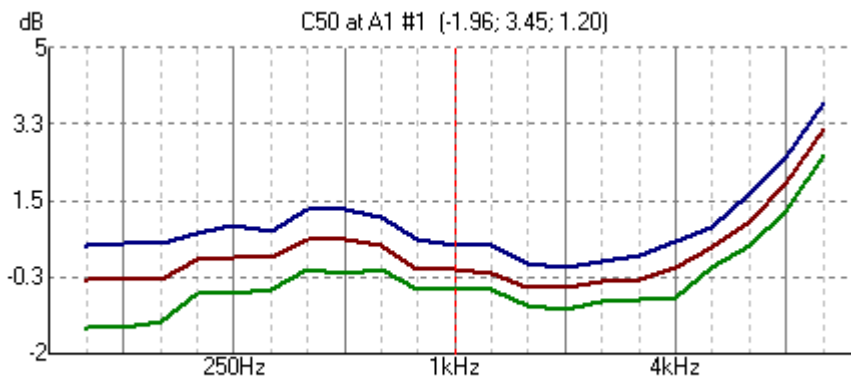
Schwerpunktzeit t_s ohne Lautsprecher – Vortrag Variante 2

(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 14:57:27 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Schwerpunktzeit t_s mit Lautsprechern – Vortrag Variante 2

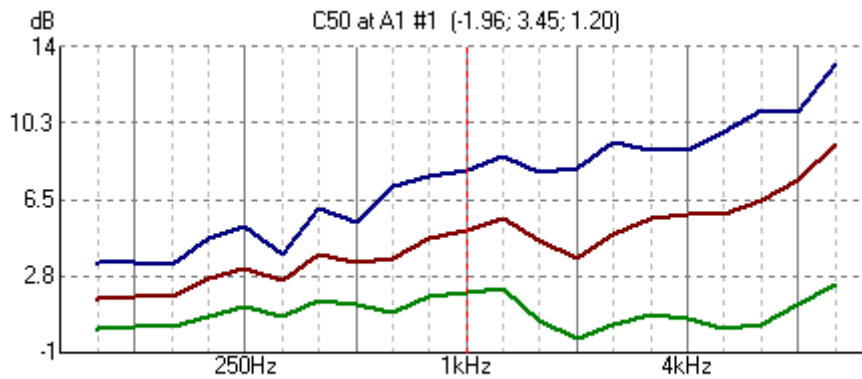
(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 14:58:18 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50} ohne Lautsprecher – Vortrag Variante 2



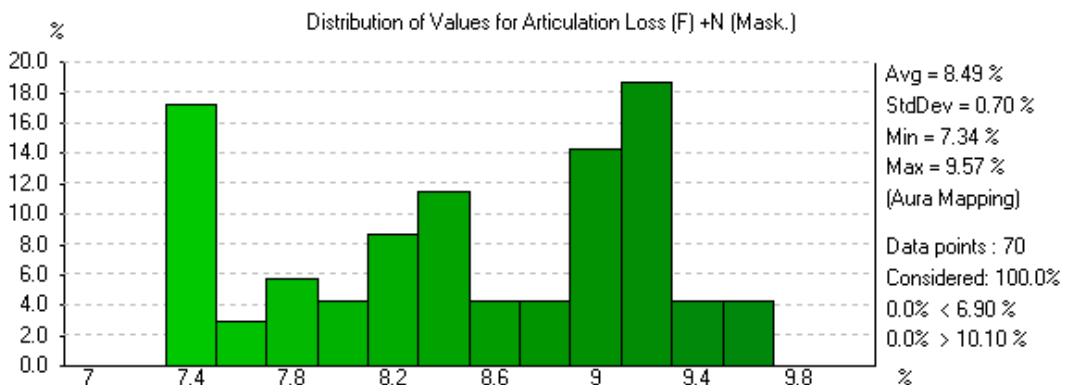
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 19:04:24 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50} mit Lautsprechern – Vortrag Variante 2



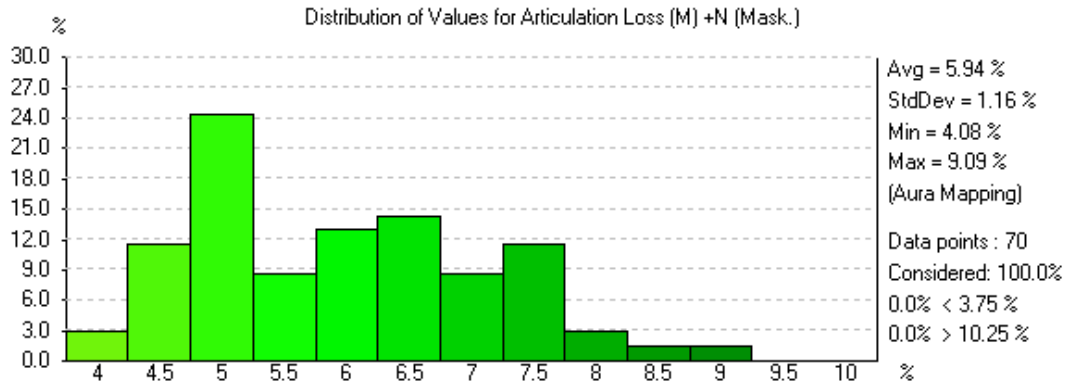
(c) EASE 4.4 / COM / 13.05.2022 20:13:41 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Artikulationsverlust AL_{cons} ohne Lautsprecher – Vortrag Variante 2



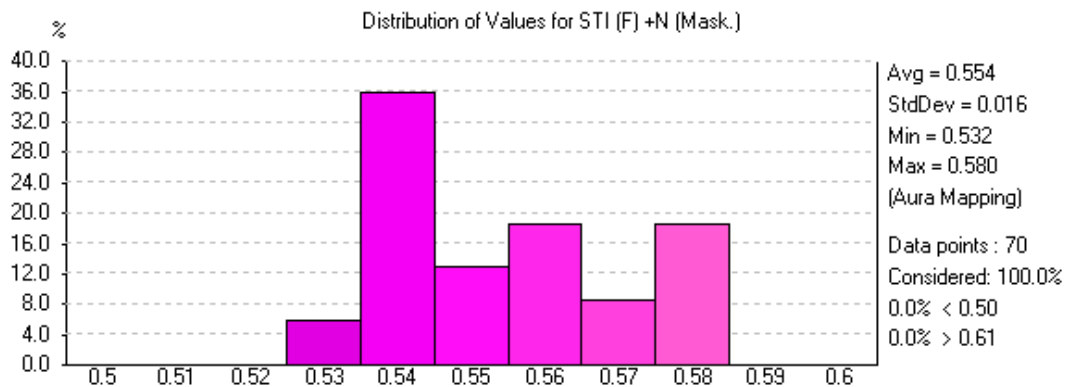
(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:31:12 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Artikulationsverlust AL_{cons} mit Lautsprechern – Vortrag Variante 2



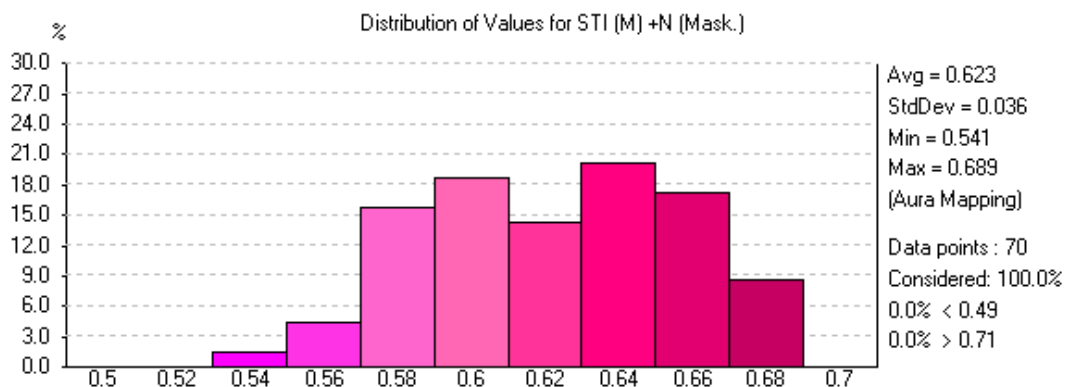
(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:12:26 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Sprachübertragungsindex STI ohne Lautsprecher – Vortrag Variante 2

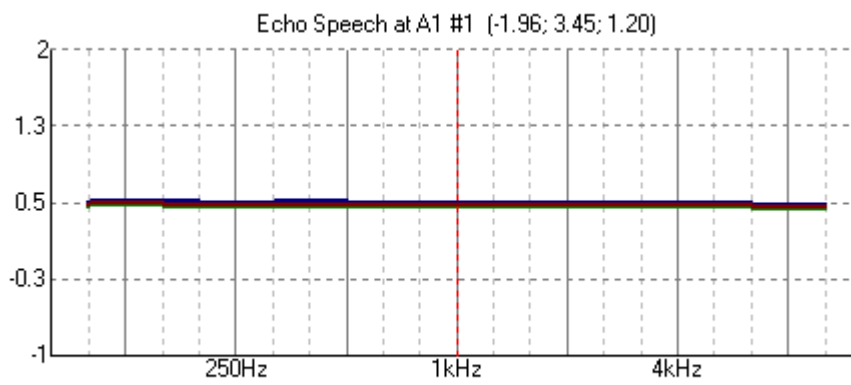


(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:30:04 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

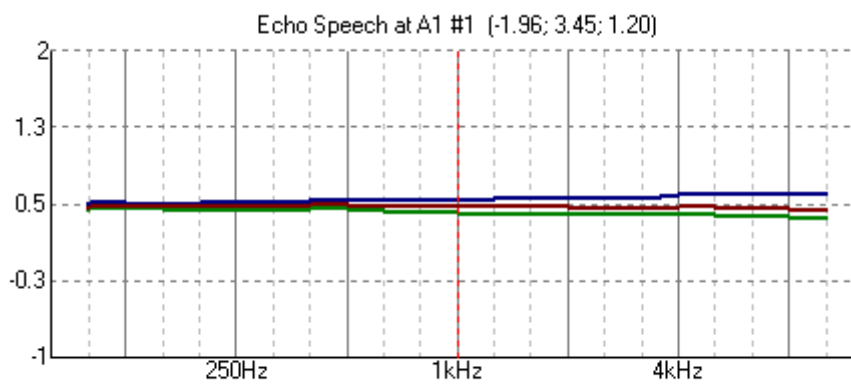
Sprachübertragungsindex STI mit Lautsprechern – Vortrag Variante 2



(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:14:03 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium *EK* ohne Lautsprecher – Vortrag Variante 2

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:24:25 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium *EK* mit Lautsprechern – Vortrag Variante 2

(c) EASE 4.4 / COM / 13.05.2022 20:15:42 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

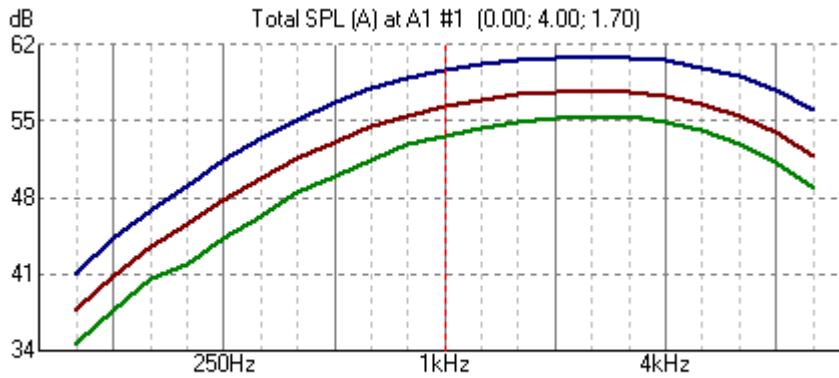
Anlage 8: AURA-Simulation Führung Variante 1, Anordnung 1

Legende Diagramme:

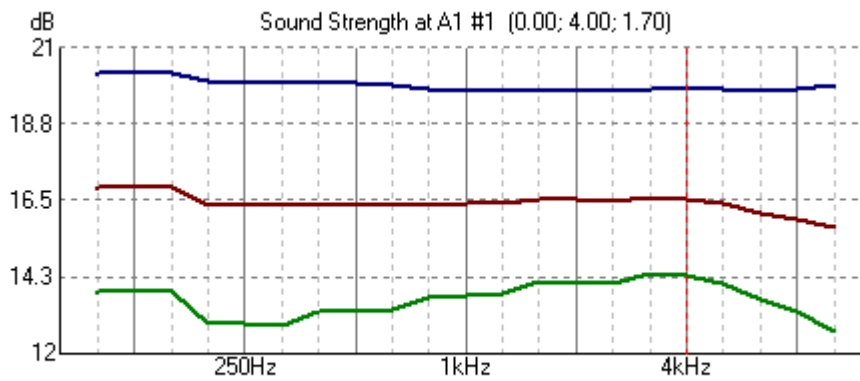
Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

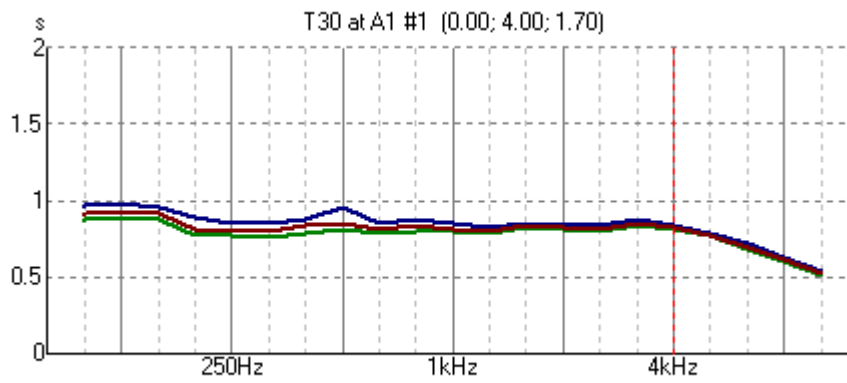
Grün: Minimum

Schalldruckpegel A-bewertet L_p – Führung Variante 1, Anordnung 1

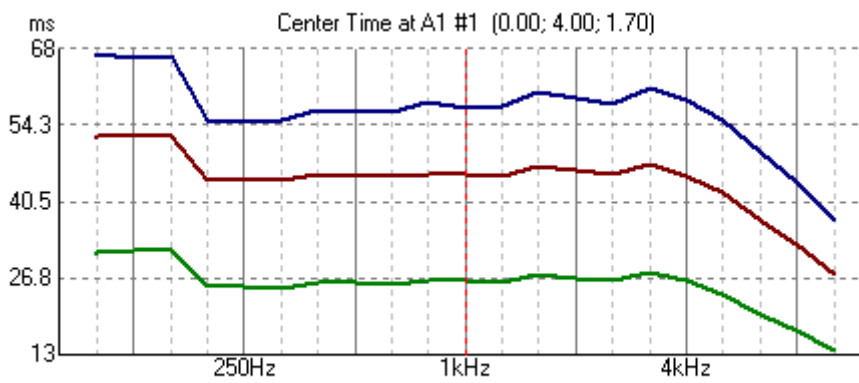
(c) EASE 4.4 / COM / 19.05.2022 23:15:06 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Stärkemaß G – Führung Variante 1, Anordnung 1

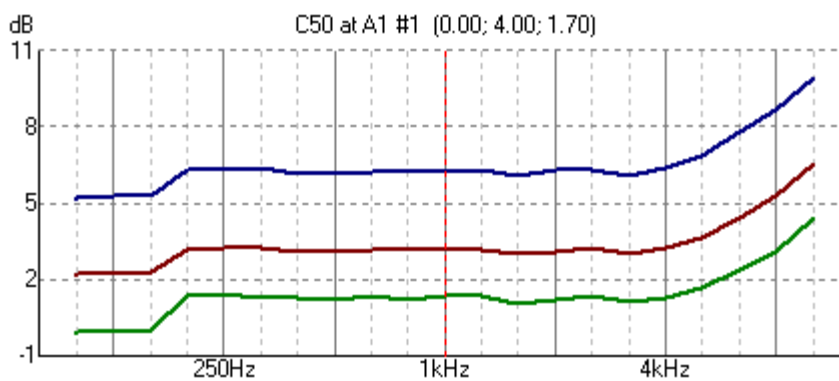
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:00:26 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Nachhallzeit T_{30} – Führung Variante 1, Anordnung 1

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:01:19 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

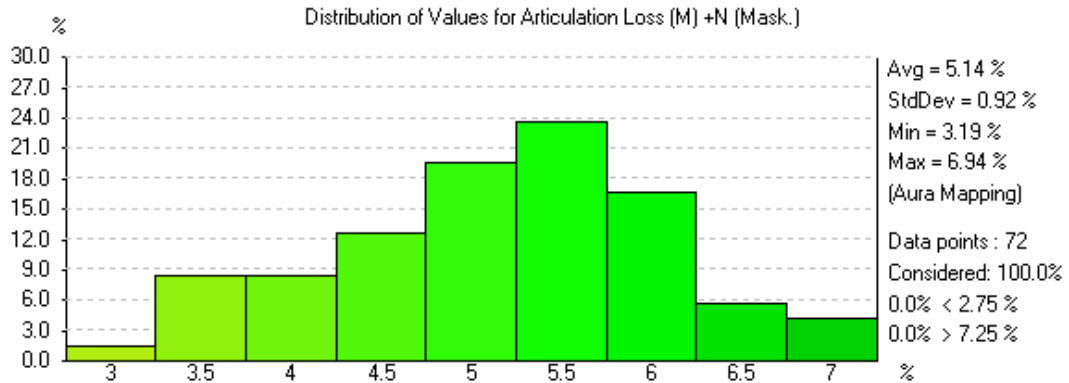
Schwerpunktzeit t_s – Führung Variante 1, Anordnung 1

(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 15:01:49 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50} – Führung Variante 1, Anordnung 1

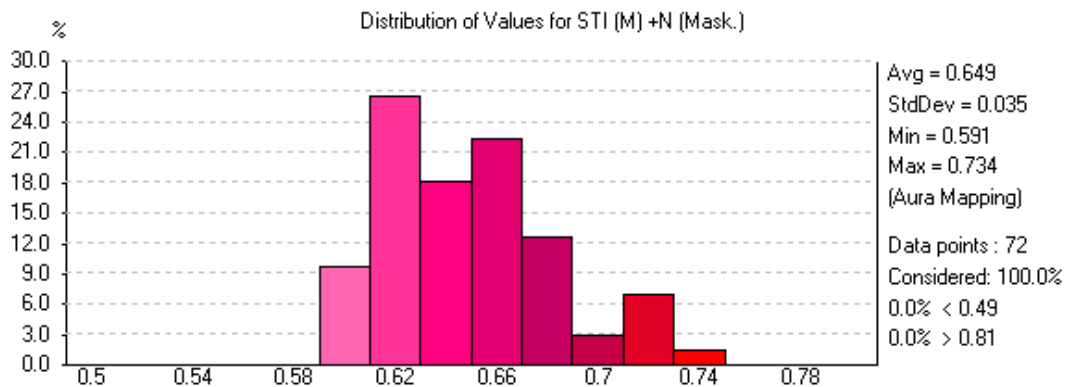
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:04:33 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Artikulationsverlust AL_{cons} – Führung Variante 1, Anordnung 1



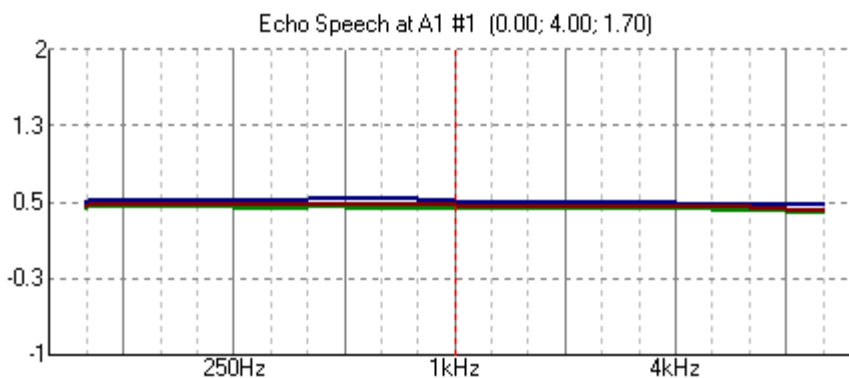
(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:15:46 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Sprachübertragungsindex STI – Führung Variante 1, Anordnung 1



(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:16:11 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium EK – Führung Variante 1, Anordnung 1



(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:23:56 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

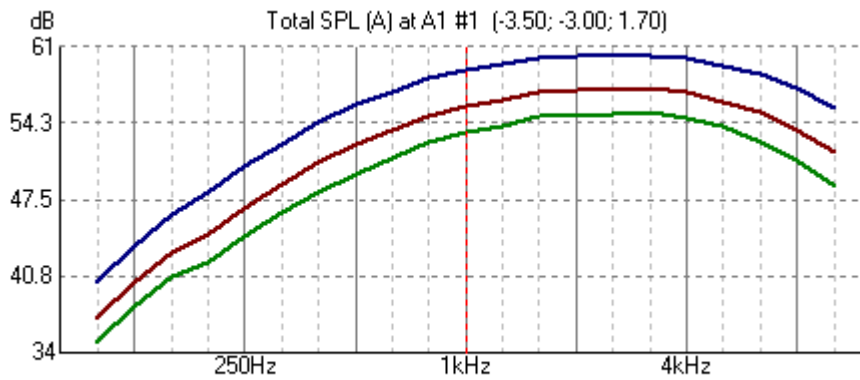
Anlage 9: AURA-Simulation Führung Variante 1, Anordnung 2

Legende Diagramme:

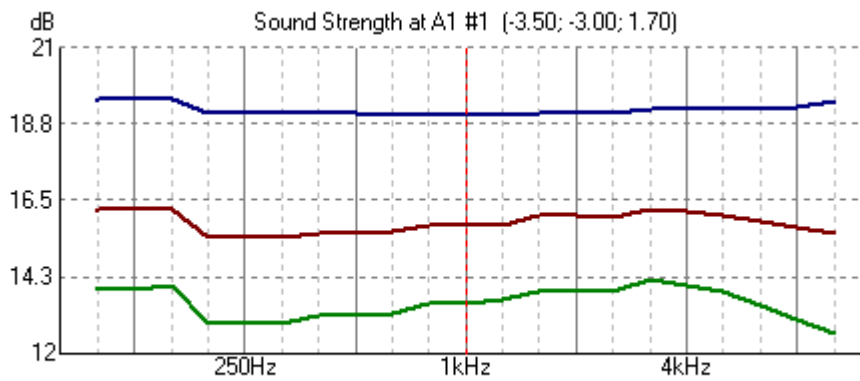
Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

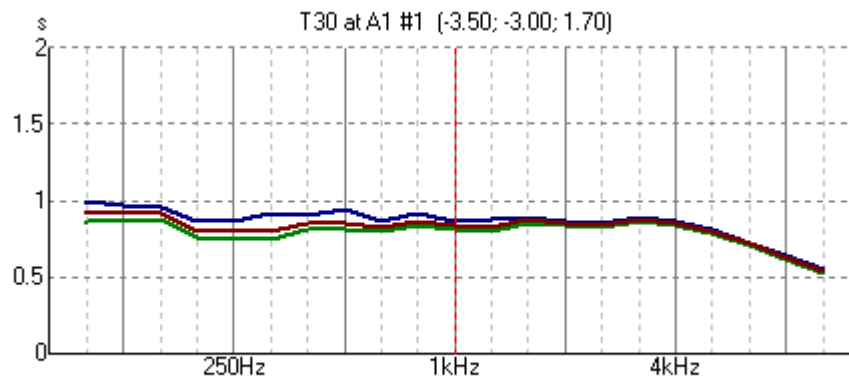
Grün: Minimum

Schalldruckpegel A-bewertet L_p – Führung Variante 1, Anordnung 2

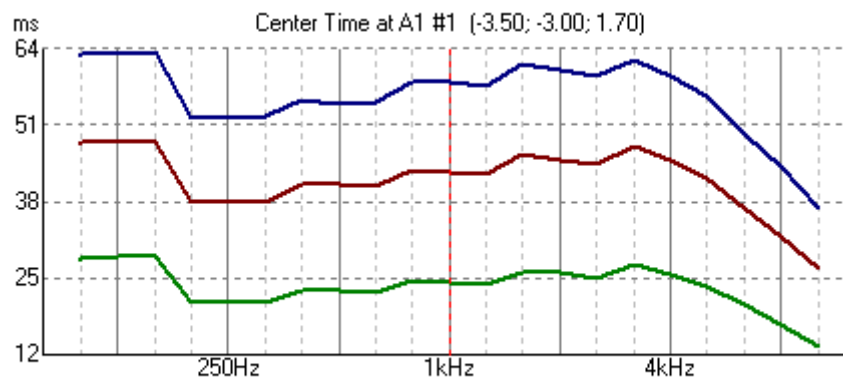
(c) EASE 4.4 / COM / 19.05.2022 23:15:25 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Stärkemaß G – Führung Variante 1, Anordnung 2

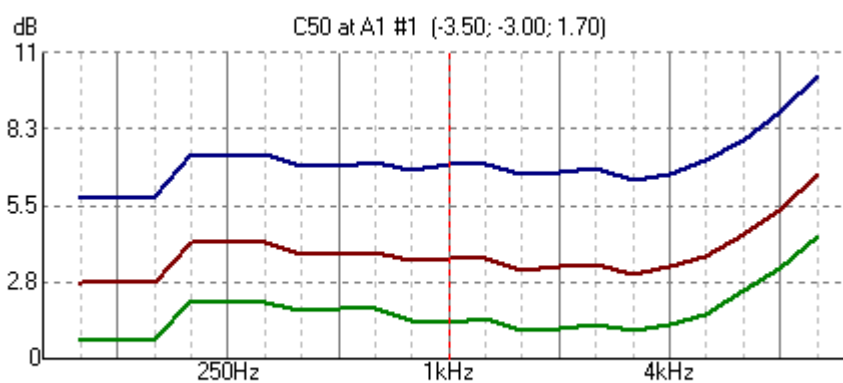
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:13:04 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Nachhallzeit T_{30} – Führung Variante 1, Anordnung 2

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:13:54 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

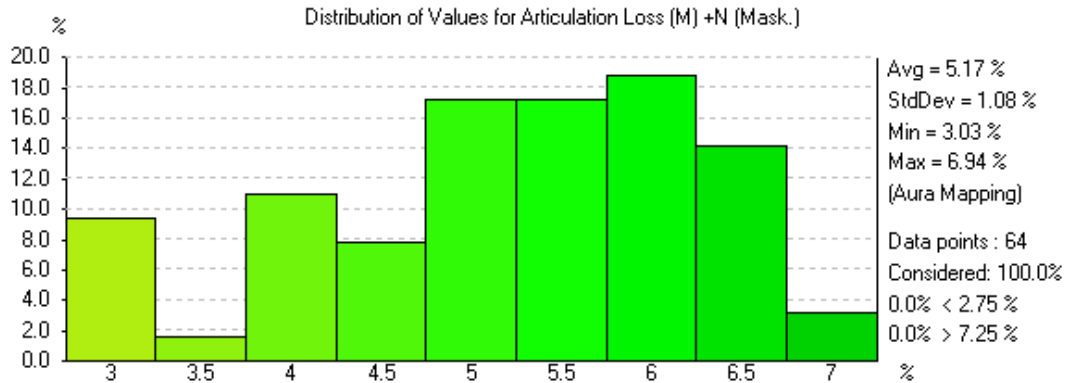
Schwerpunktzeit t_s – Führung Variante 1, Anordnung 2

(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 15:03:32 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50} – Führung Variante 1, Anordnung 2

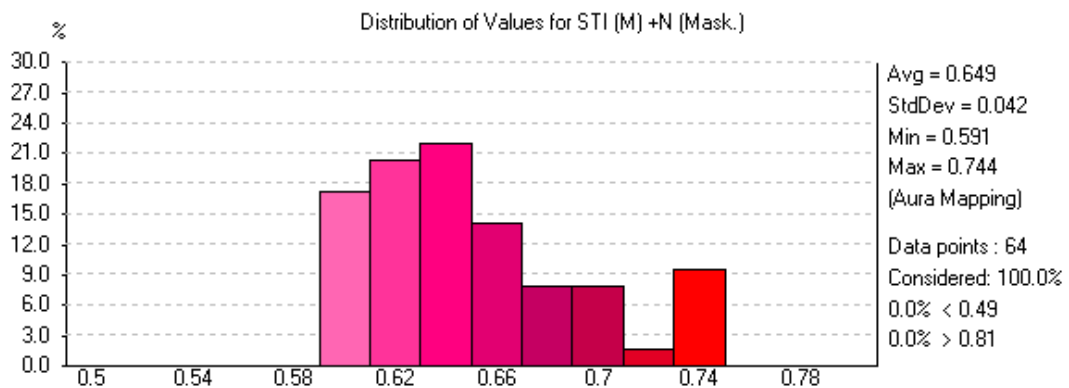
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:16:07 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Artikulationsverlust AL_{cons} – Führung Variante 1, Anordnung 2



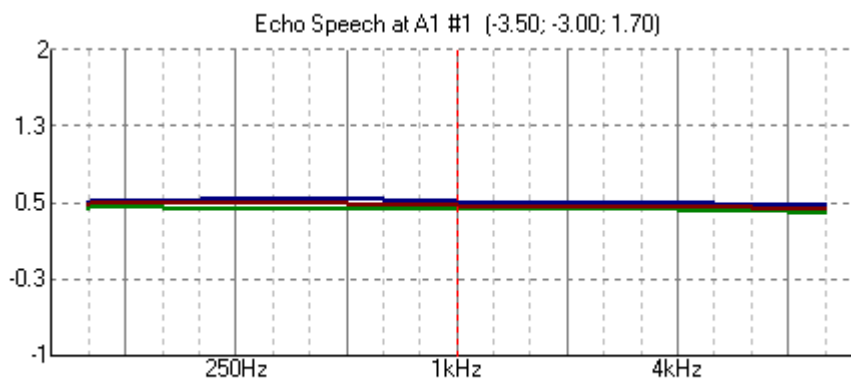
(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:16:53 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Sprachübertragungsindex STI – Führung Variante 1, Anordnung 2



(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:17:16 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium EK – Führung Variante 1, Anordnung 2



(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:23:15 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

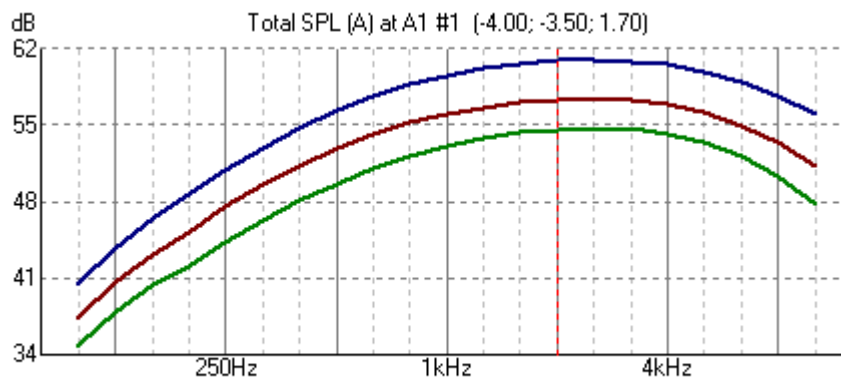
Anlage 10: AURA-Simulation Führung Variante 1, Anordnung 3

Legende Diagramme:

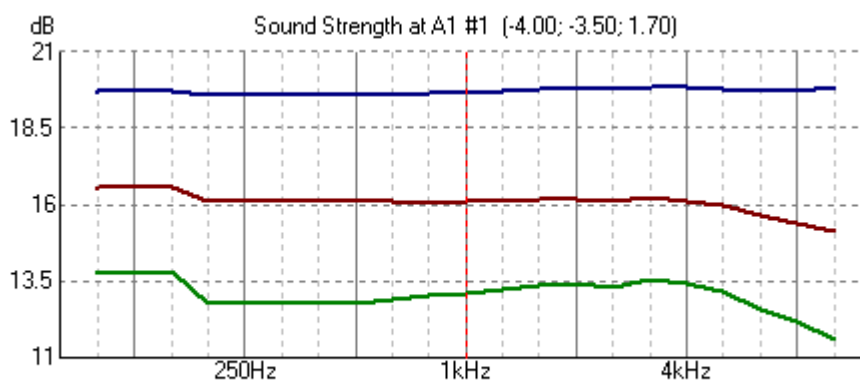
Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

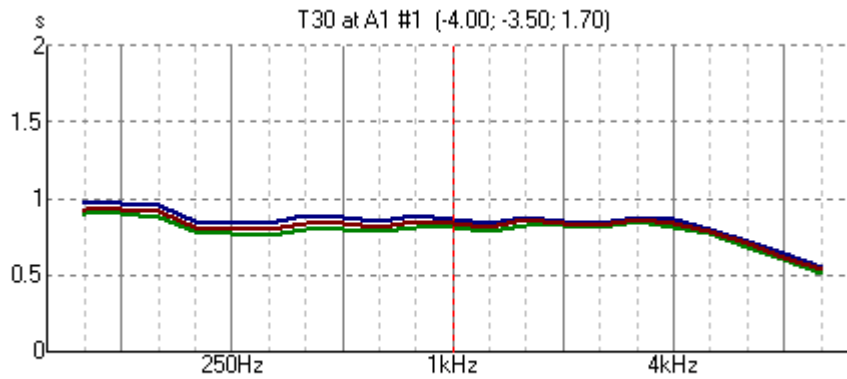
Grün: Minimum

Schalldruckpegel A-bewertet L_p – Führung Variante 1, Anordnung 3

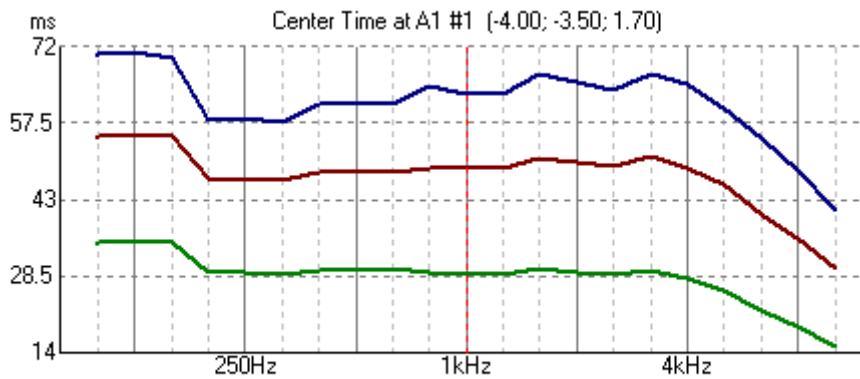
(c) EASE 4.4 / COM / 19.05.2022 23:15:53 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Stärkemaß G – Führung Variante 1, Anordnung 3

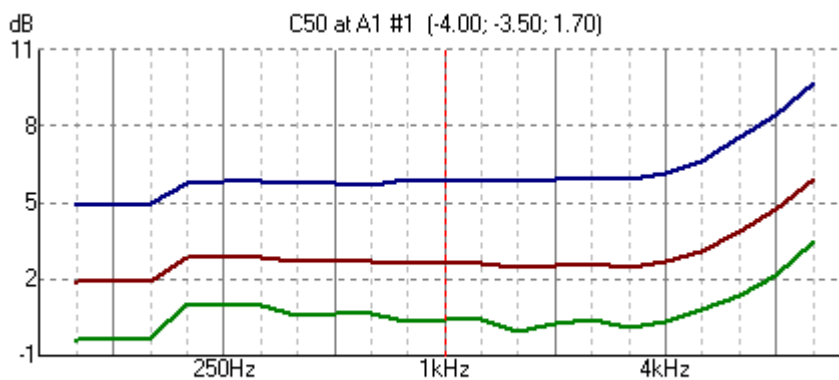
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:19:52 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Nachhallzeit T_{30} – Führung Variante 1, Anordnung 3

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:18:59 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

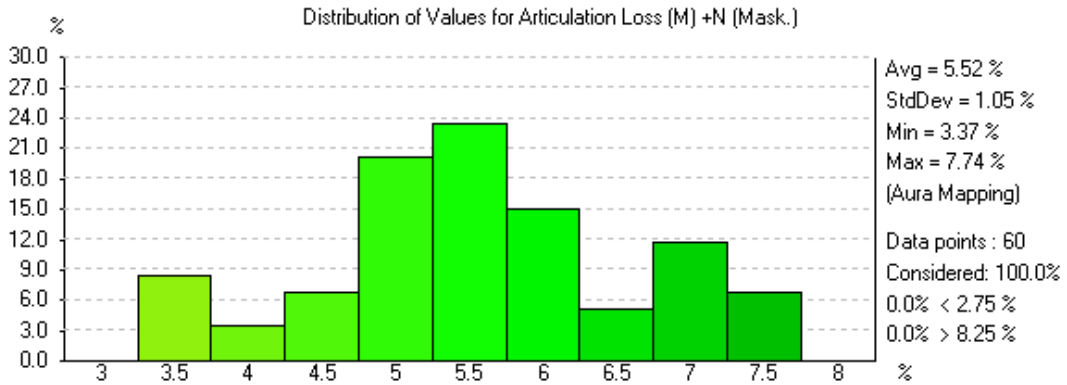
Schwerpunktzeit t_s – Führung Variante 1, Anordnung 3

(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 15:04:19 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50} – Führung Variante 1, Anordnung 3

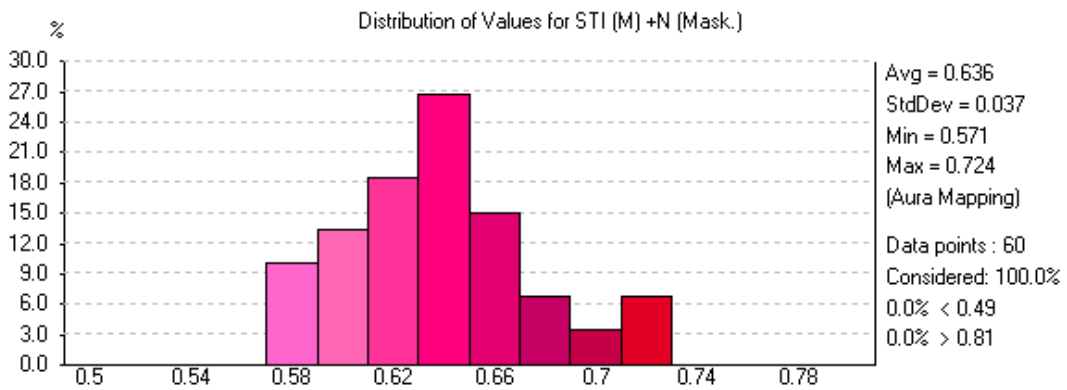
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:21:34 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Artikulationsverlust AL_{cons} – Führung Variante 1, Anordnung 3



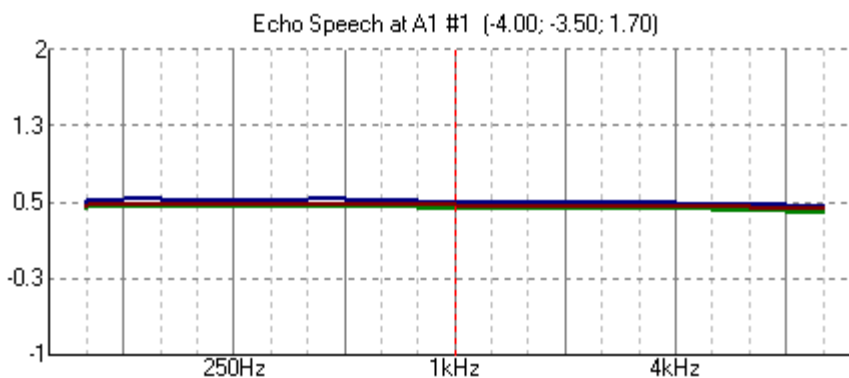
(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:17:51 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Sprachübertragungsindex STI – Führung Variante 1, Anordnung 3



(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:18:16 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium EK – Führung Variante 1, Anordnung 3



(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:22:45 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Anlage 11: AURA-Simulation Führung Variante 1, Anordnung 4

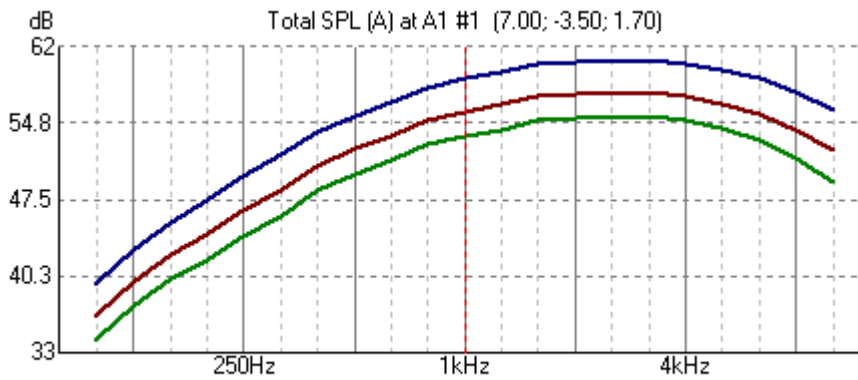
Legende Diagramme:

Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

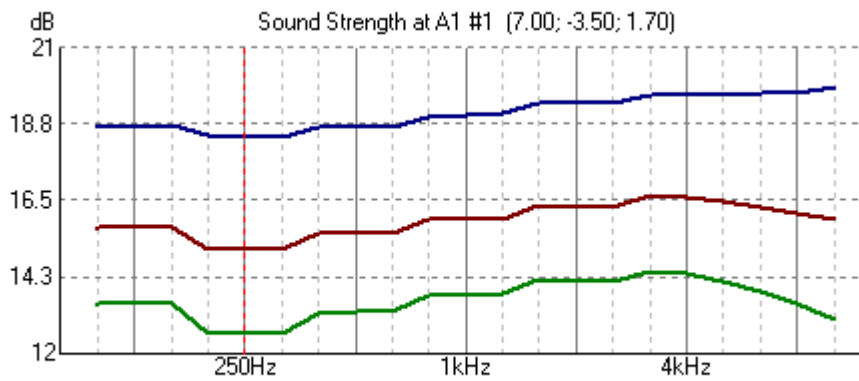
Grün: Minimum

Schalldruckpegel A-bewertet L_p – Führung Variante 1, Anordnung 4

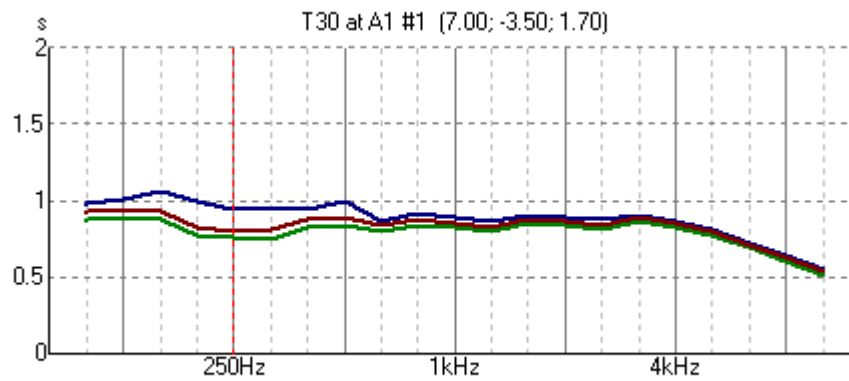


(c) EASE 4.4 / COM / 20.05.2022 01:11:11 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

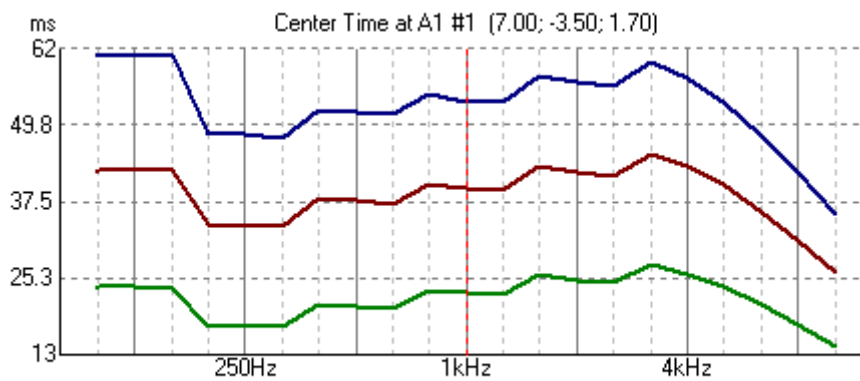
Stärkemaß G – Führung Variante 1, Anordnung 4



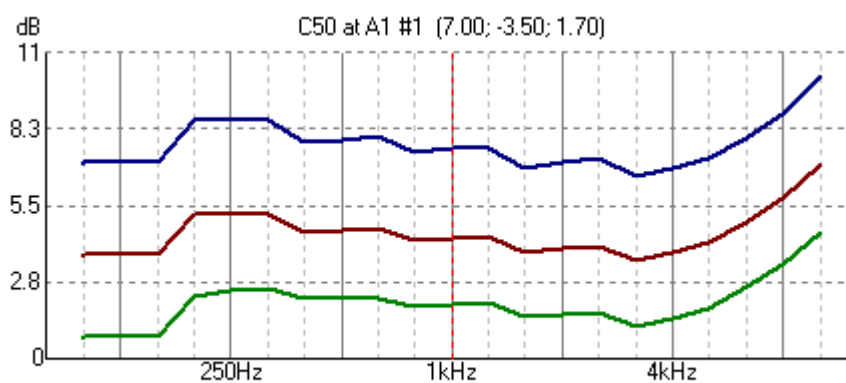
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:28:29 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Nachhallzeit T_{30} – Führung Variante 1, Anordnung 4

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:27:43 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

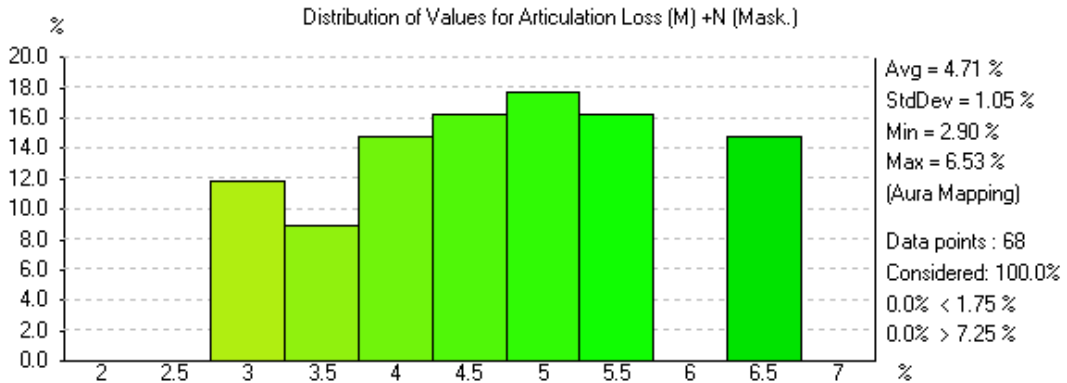
Schwerpunktzeit t_s – Führung Variante 1, Anordnung 4

(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 15:05:11 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50} – Führung Variante 1, Anordnung 4

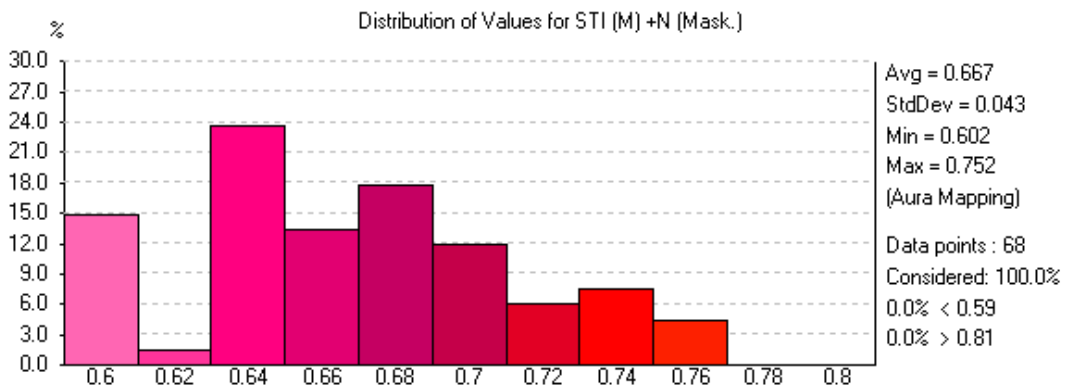
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:30:24 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Artikulationsverlust AL_{cons} – Führung Variante 1, Anordnung 4



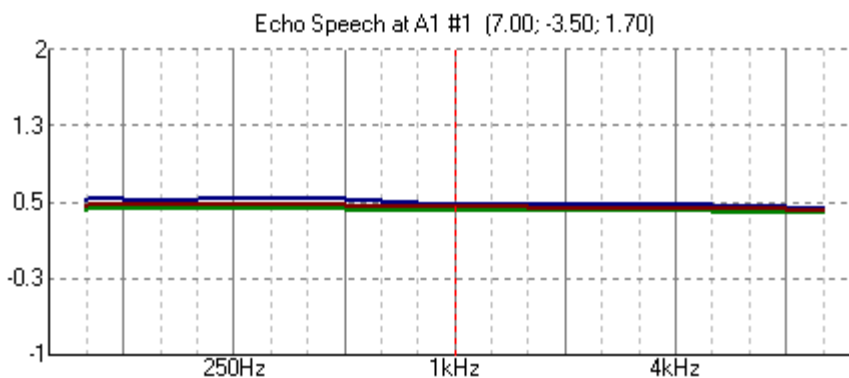
(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:19:11 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Sprachübertragungsindex STI – Führung Variante 1, Anordnung 4



(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:19:37 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium EK – Führung Variante 1, Anordnung 4



(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:47:49 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

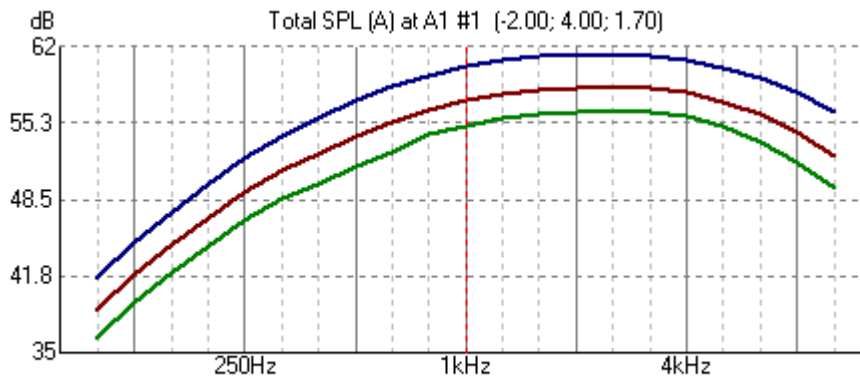
Anlage 12: AURA-Simulation Führung Variante 2, Anordnung 1

Legende Diagramme:

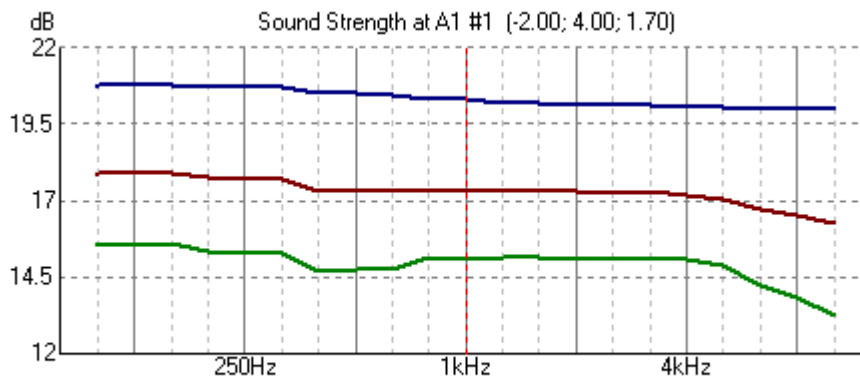
Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

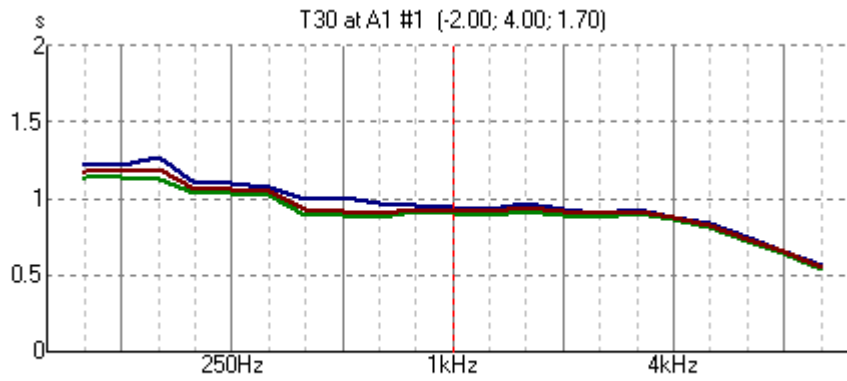
Grün: Minimum

Schalldruckpegel A-bewertet L_p – Führung Variante 2, Anordnung 1

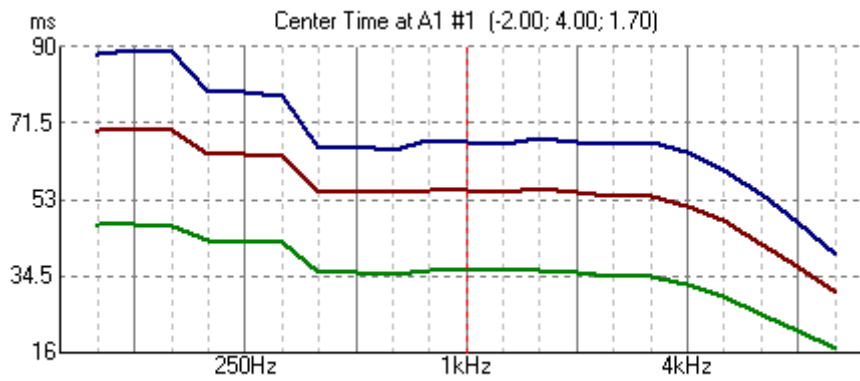
(c) EASE 4.4 / COM / 20.05.2022 00:26:10 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Stärkemaß G – Führung Variante 2, Anordnung 1

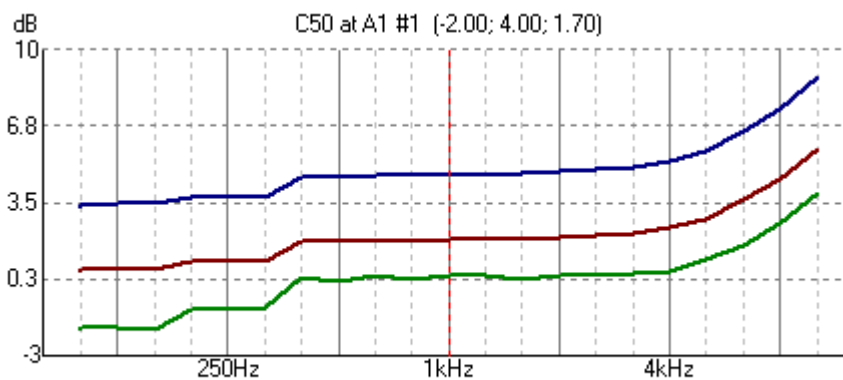
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:33:35 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Nachhallzeit T_{30} – Führung Variante 2, Anordnung 1

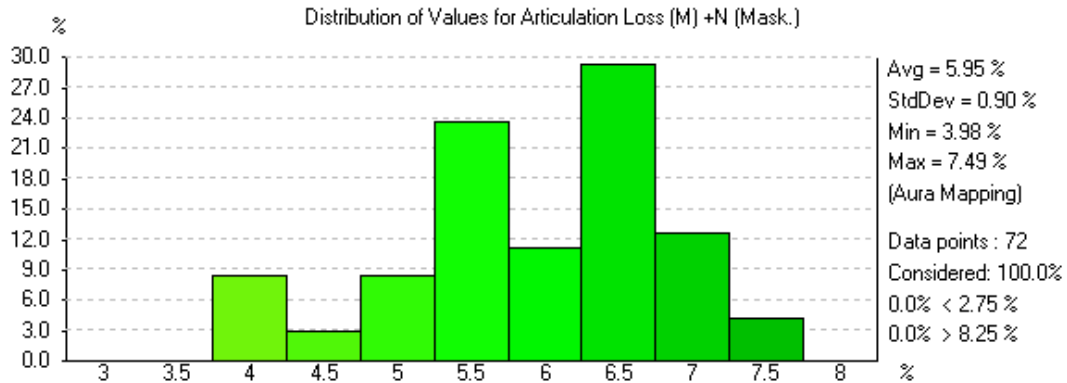
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:34:58 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Schwerpunktzeit t_s – Führung Variante 2, Anordnung 1

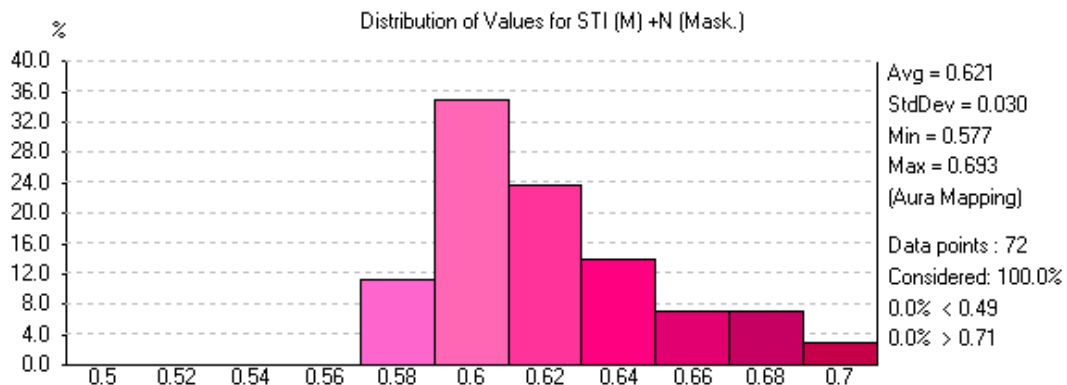
(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 15:06:12 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50} – Führung Variante 2, Anordnung 1

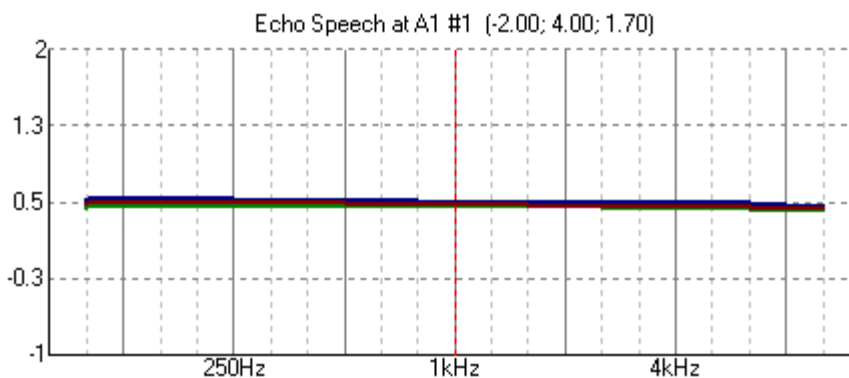
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:36:51 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Artikulationsverlust AL_{cons} – Führung Variante 2, Anordnung 1

(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:20:15 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Sprachübertragungsindex STI – Führung Variante 2, Anordnung 1

(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:20:44 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium EK – Führung Variante 2, Anordnung 1

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:48:38 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

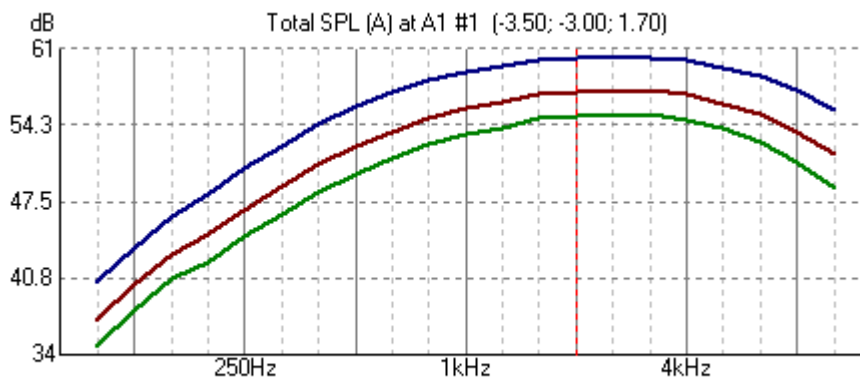
Anlage 13: AURA-Simulation Führung Variante 2, Anordnung 2

Legende Diagramme:

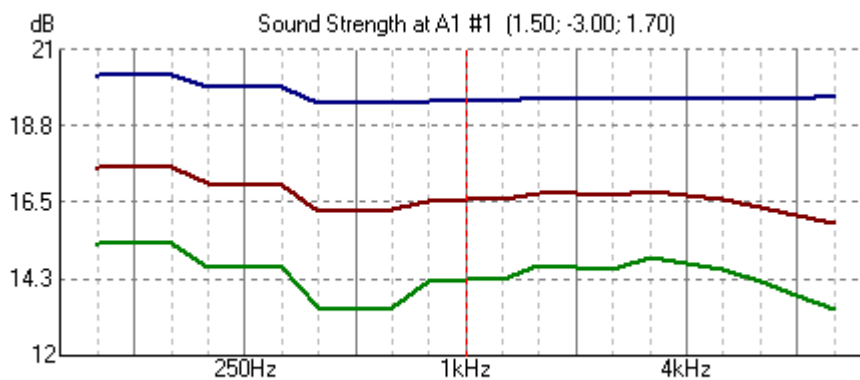
Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

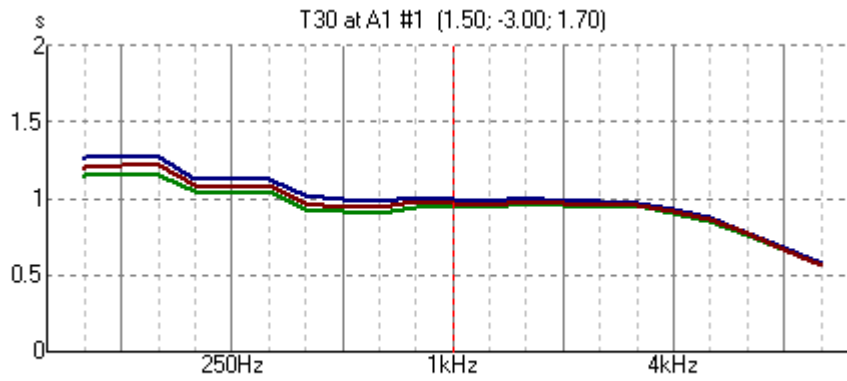
Grün: Minimum

Schalldruckpegel A-bewertet L_p – Führung Variante 2, Anordnung 2

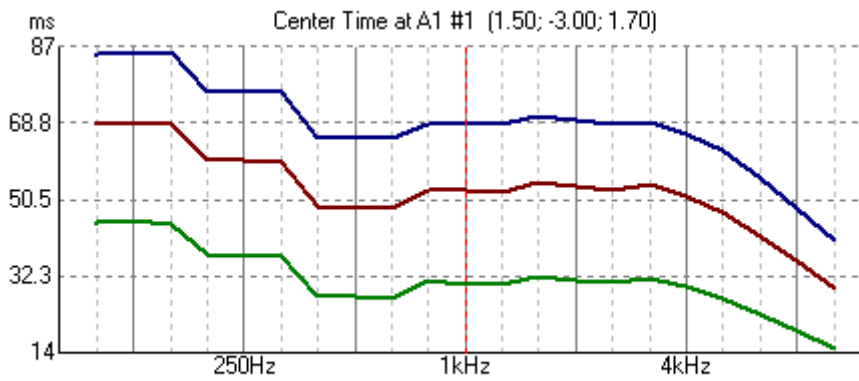
(c) EASE 4.4 / COM / 20.05.2022 00:43:46 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Stärkemaß G – Führung Variante 2, Anordnung 2

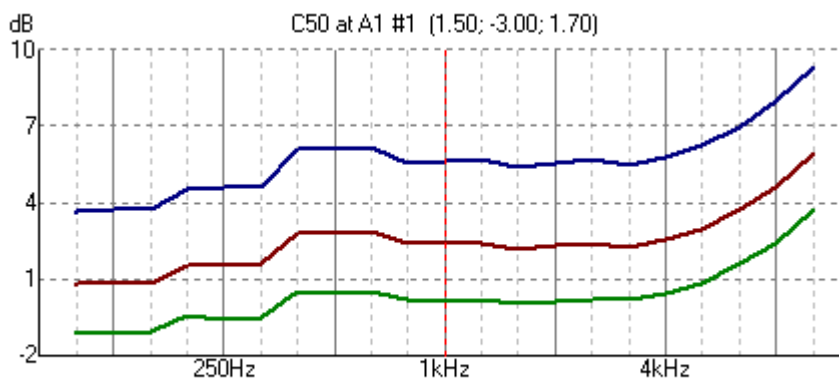
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:39:21 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Nachhallzeit T_{30} – Führung Variante 2, Anordnung 2

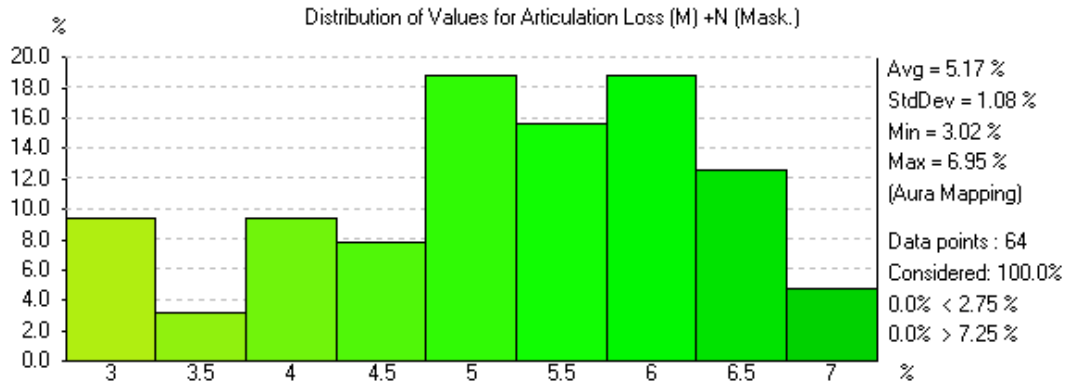
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:40:09 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Schwerpunktzeit t_s – Führung Variante 2, Anordnung 2

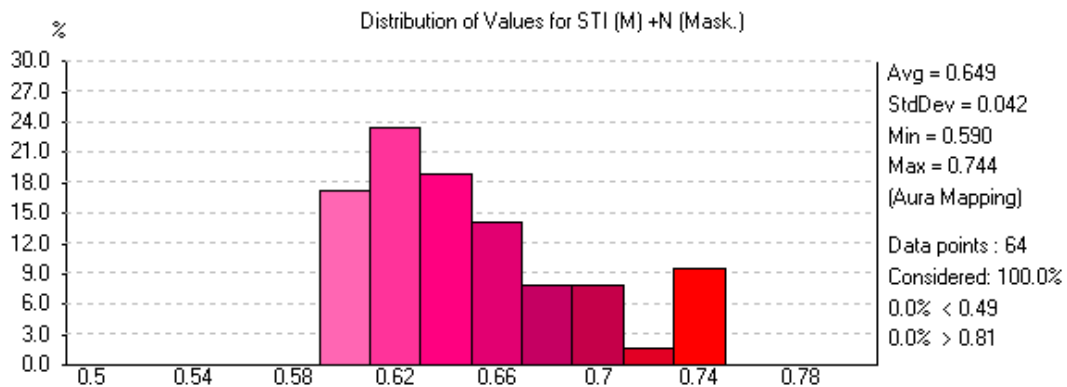
(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 15:07:27 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50} – Führung Variante 2, Anordnung 2

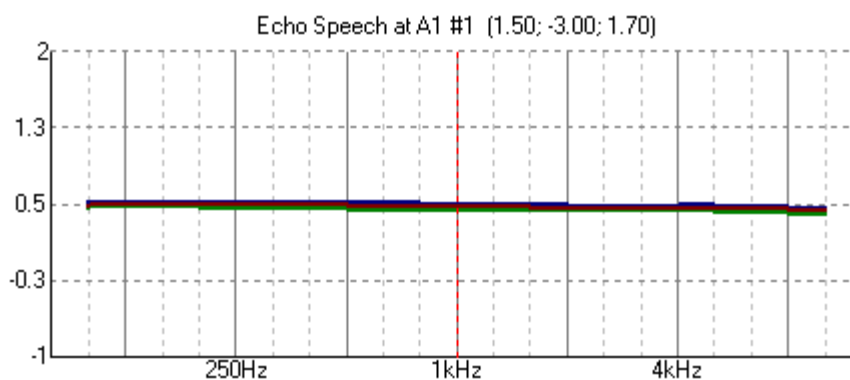
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:41:48 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Artikulationsverlust AL_{cons} – Führung Variante 2, Anordnung 2

(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:21:42 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Sprachübertragungsindex STI – Führung Variante 2, Anordnung 2

(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:21:22 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium EK – Führung Variante 2, Anordnung 2

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:49:06 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

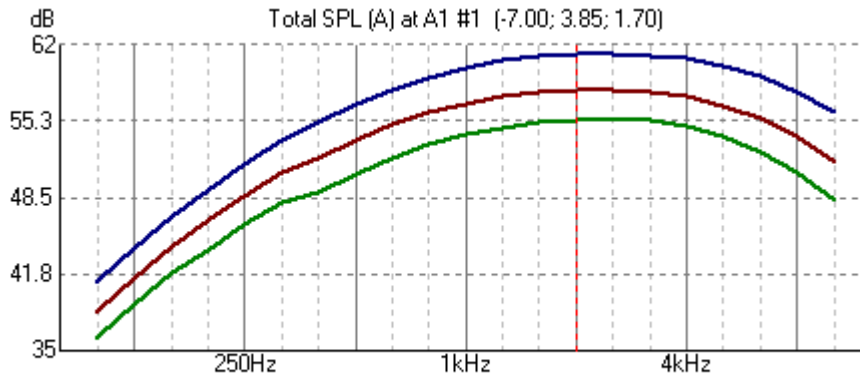
Anlage 14: AURA-Simulation Führung Variante 2, Anordnung 3

Legende Diagramme:

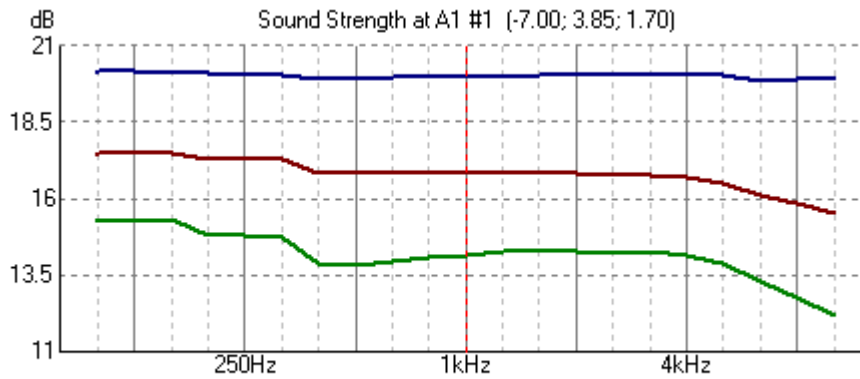
Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

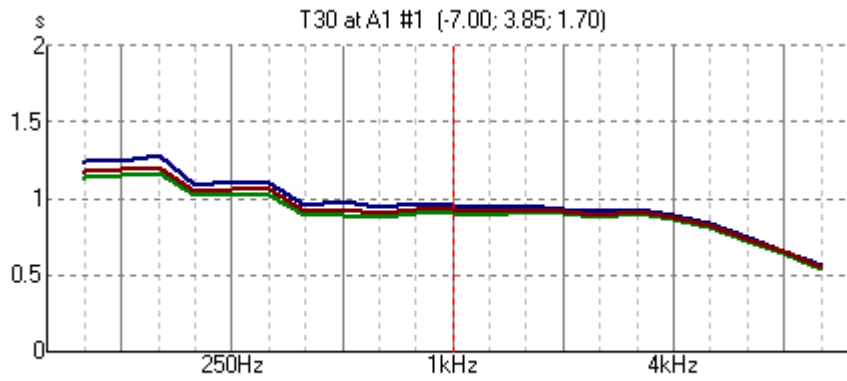
Grün: Minimum

Schalldruckpegel A-bewertet L_p – Führung Variante 2, Anordnung 3

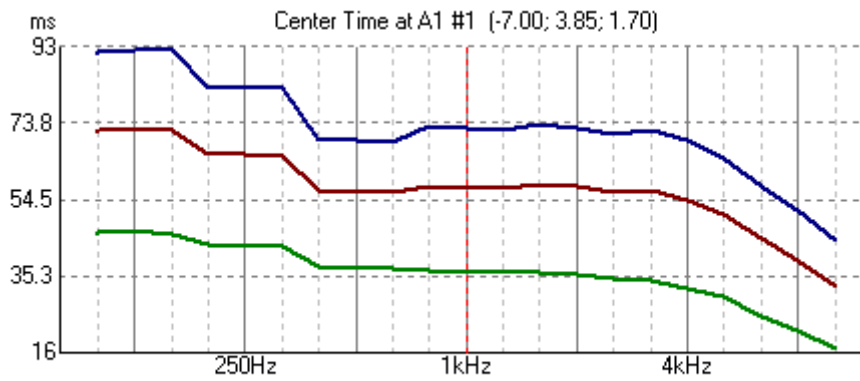
(c) EASE 4.4 / COM / 20.05.2022 00:43:12 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Stärkemaß G – Führung Variante 2, Anordnung 3

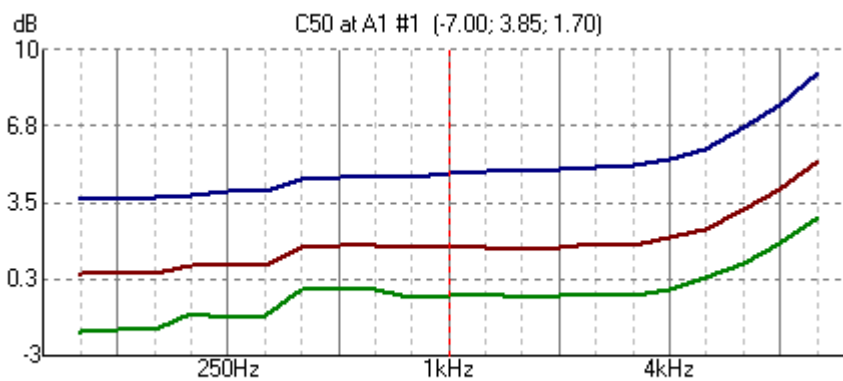
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:44:34 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Nachhallzeit T_{30} – Führung Variante 2, Anordnung 3

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:45:19 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

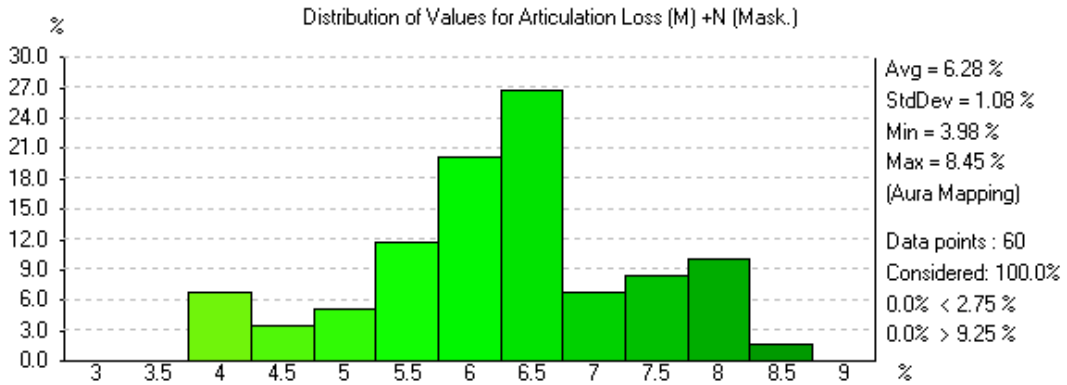
Schwerpunktzeit t_s – Führung Variante 2, Anordnung 3

(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 15:08:28 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50} – Führung Variante 2, Anordnung 3

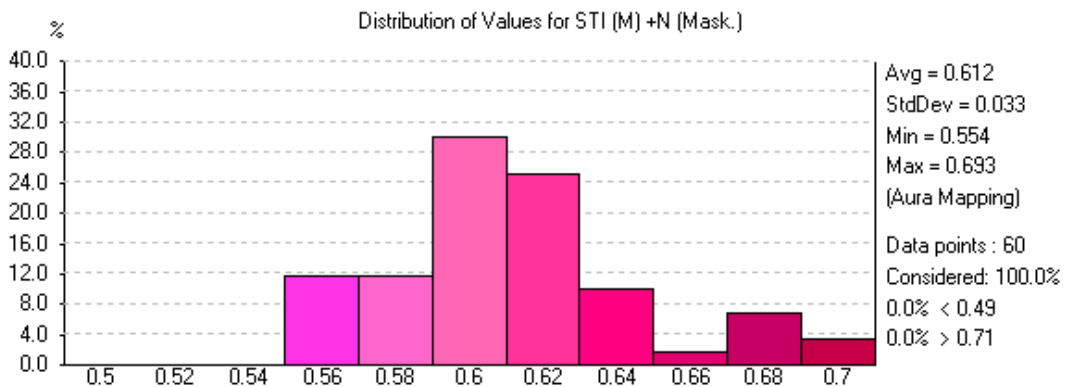
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:50:56 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Artikulationsverlust AL_{cons} – Führung Variante 2, Anordnung 3



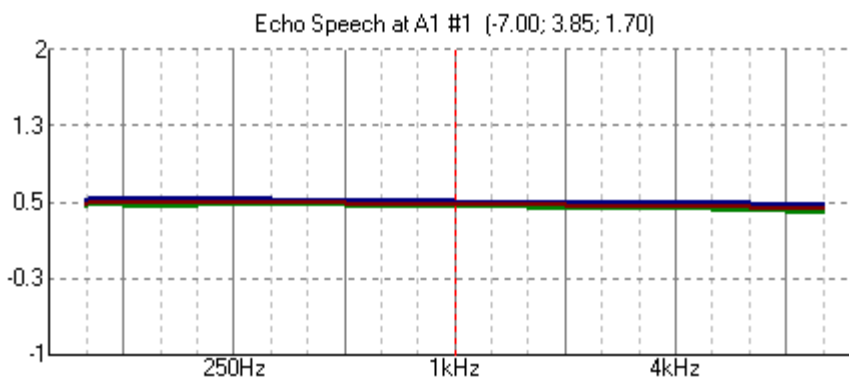
(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:22:16 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Sprachübertragungsindex STI – Führung Variante 2, Anordnung 3



(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:22:29 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium EK – Führung Variante 2, Anordnung 3



(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:49:35 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

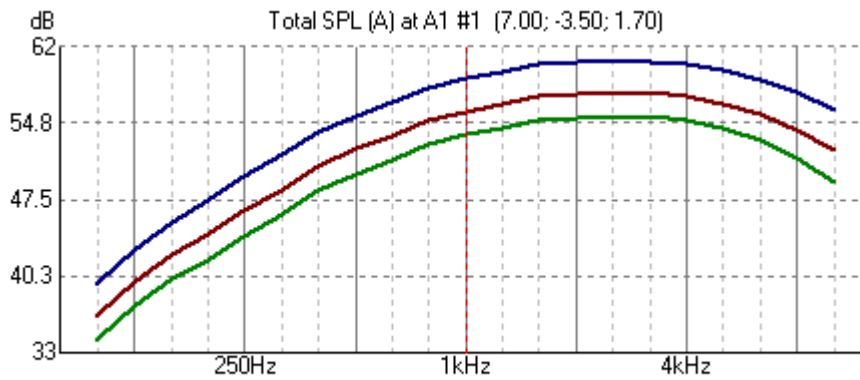
Anlage 15: AURA-Simulation Führung Variante 2, Anordnung 4

Legende Diagramme:

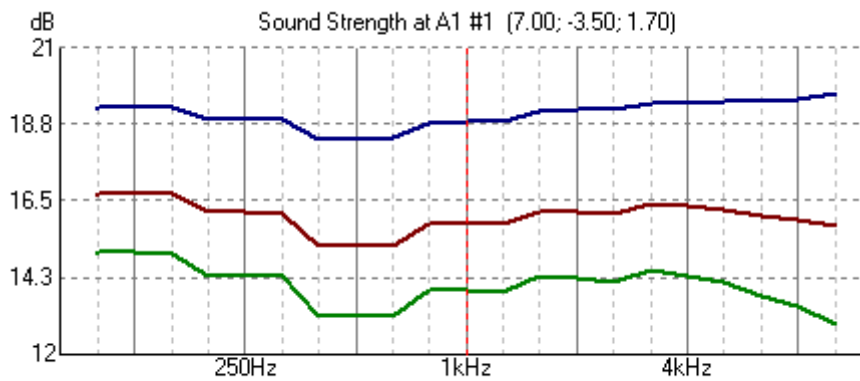
Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

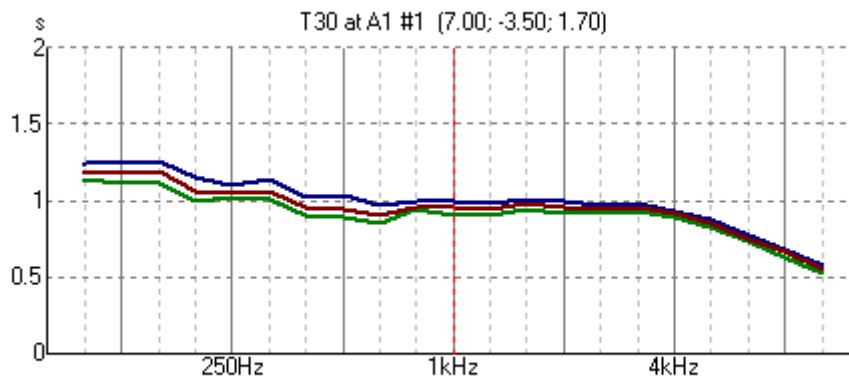
Grün: Minimum

Schalldruckpegel A-bewertet L_p – Führung Variante 2, Anordnung 4

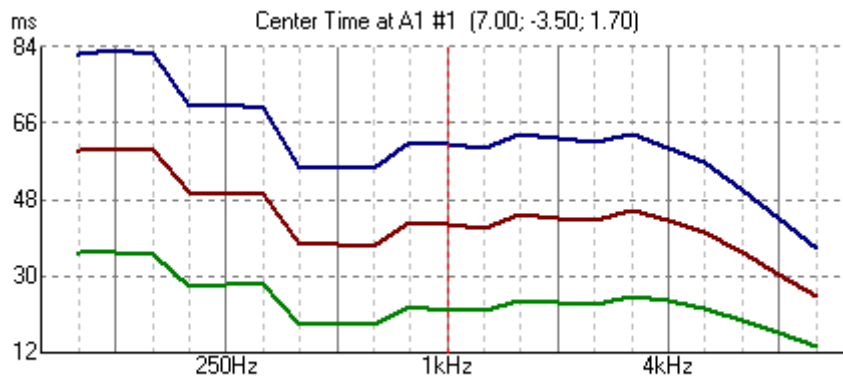
(c) EASE 4.4 / COM / 20.05.2022 00:50:10 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Stärkemaß G – Führung Variante 2, Anordnung 4

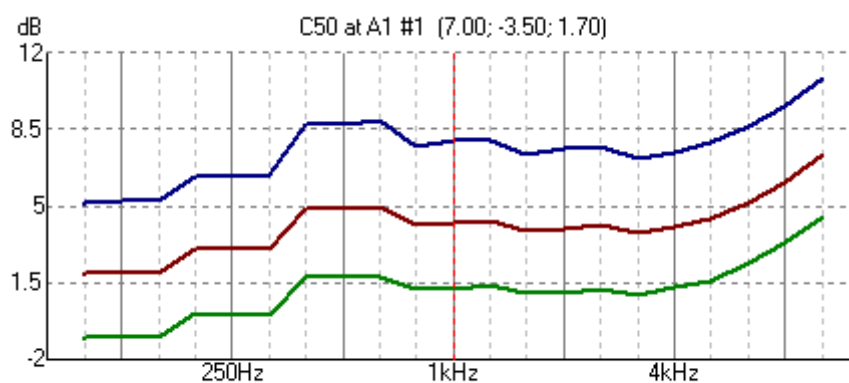
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:53:32 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Nachhallzeit T_{30} – Führung Variante 2, Anordnung 4

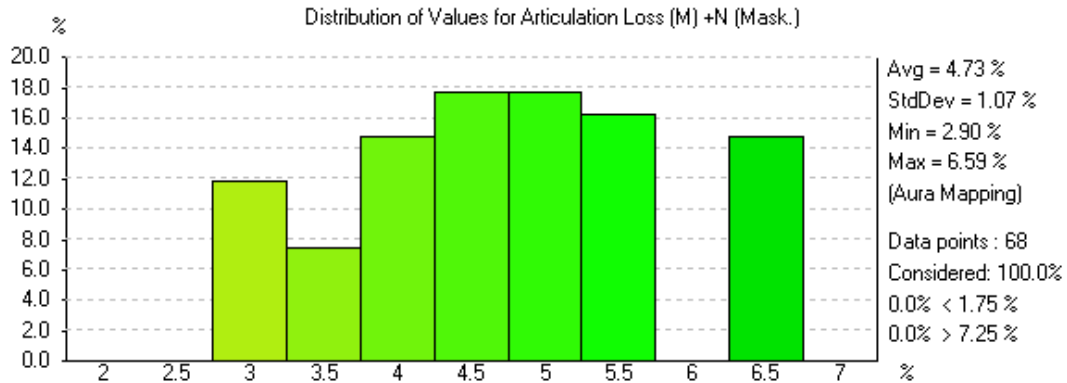
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:54:31 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Schwerpunktzeit t_s – Führung Variante 2, Anordnung 4

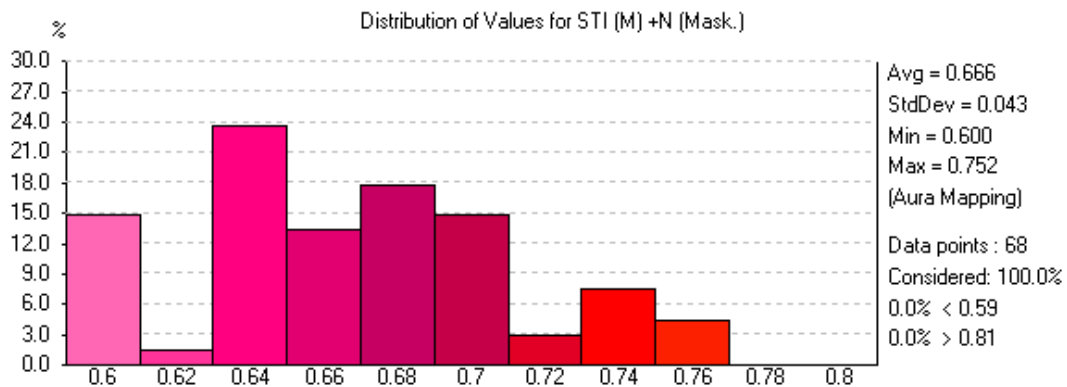
(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 19:31:46 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50} – Führung Variante 2, Anordnung 4

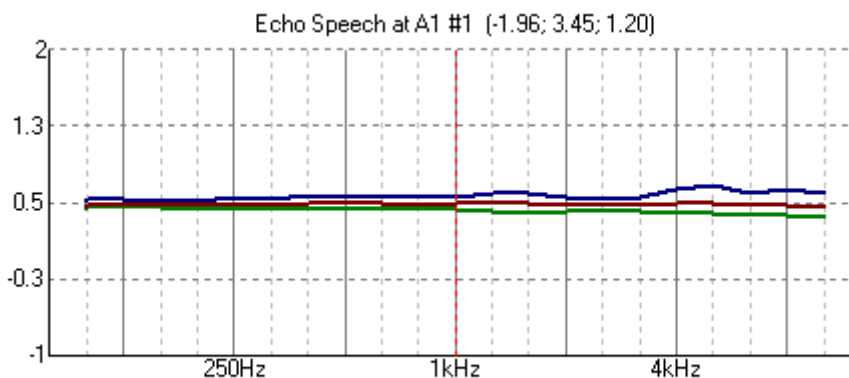
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:56:07 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Artikulationsverlust AL_{cons} – Führung Variante 2, Anordnung 4

(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:23:15 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Sprachübertragungsindex STI – Führung Variante 2, Anordnung 4

(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:23:02 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium EK – Führung Variante 2, Anordnung 4

(c) EASE 4.4 / COM / 12.05.2022 20:52:35 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

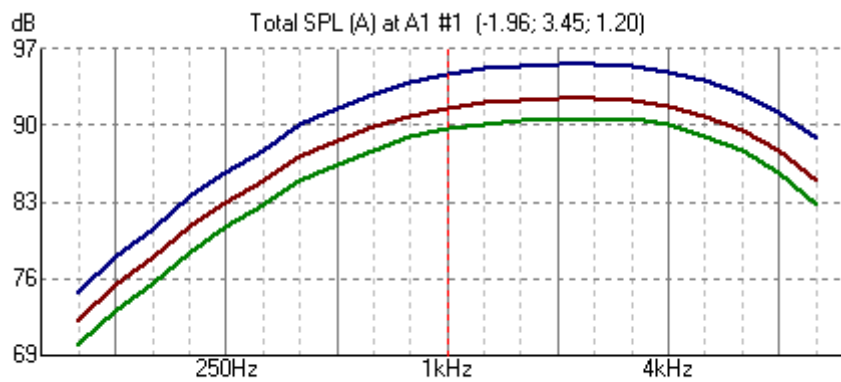
Anlage 16: AURA-Simulation Unsicherheitsabschätzung Konzert

Legende Diagramme:

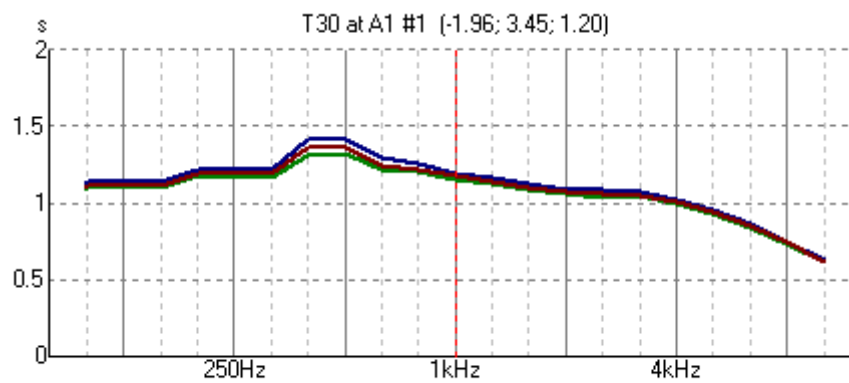
Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

Grün: Minimum

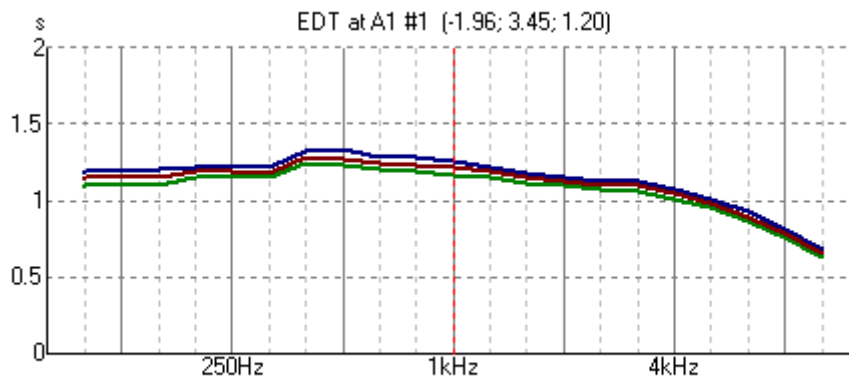
Schalldruckpegel A-bewertet L_p – Unsicherheit Konzert

(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 19:54:54 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Nachhallzeit T_{30} – Unsicherheit Konzert

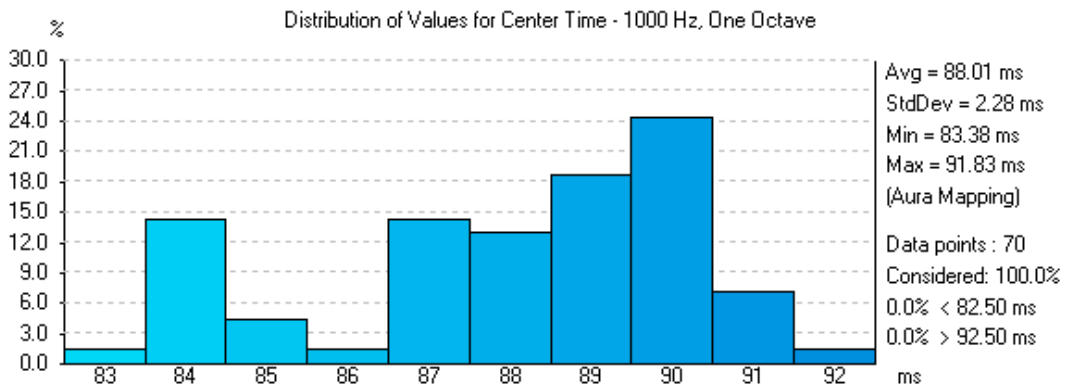
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 20:59:42 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Frühe Nachhallzeit EDT – Unsicherheit Konzert



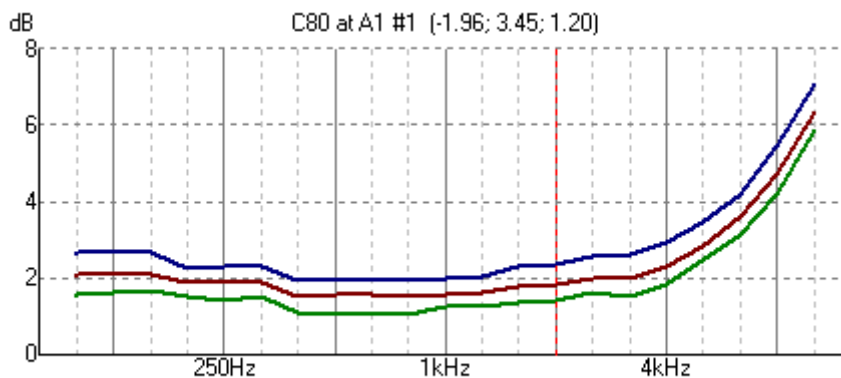
(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 19:55:43 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Schwerpunktzeit t_s bei 1000 Hz – Unsicherheit Konzert

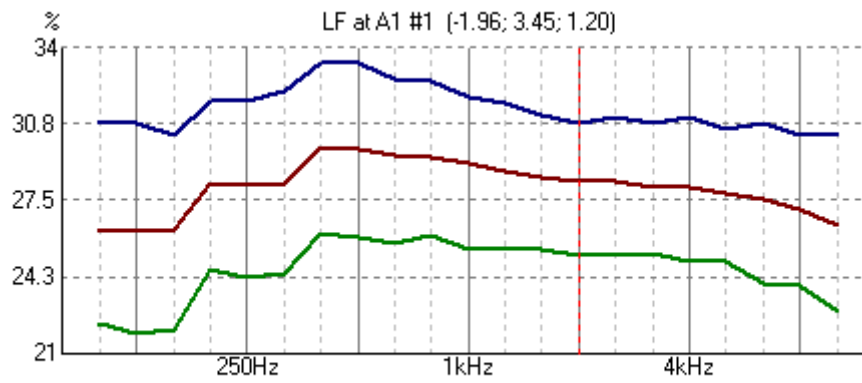


(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 21:49:12 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

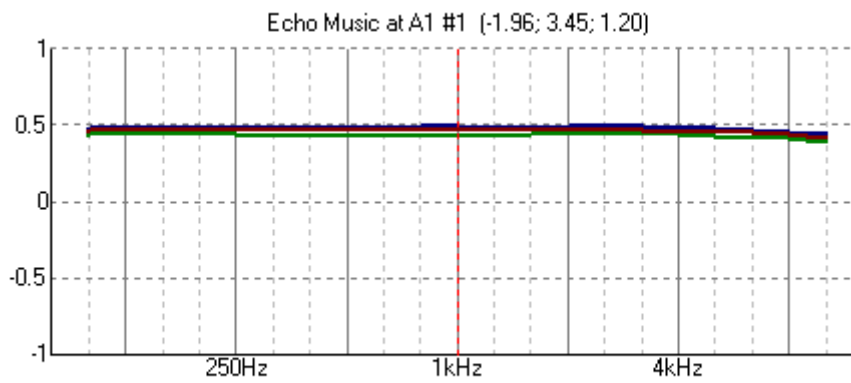
Klarheitsmaß für Musik C_{80} – Unsicherheit Konzert



(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 21:00:59 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Seitenschallgrad LF – Unsicherheit Konzert

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 21:02:16 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium EK – Unsicherheit Konzert

(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 19:58:03 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

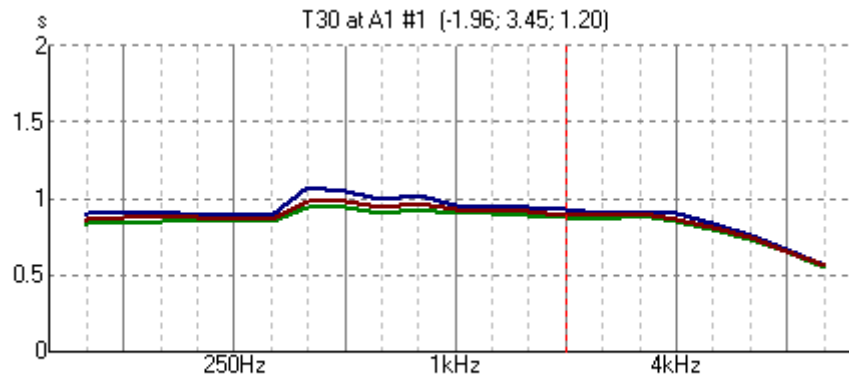
Anlage 17: AURA-Simulation Unsicherheitsabschätzung Vortrag

Legende Diagramme:

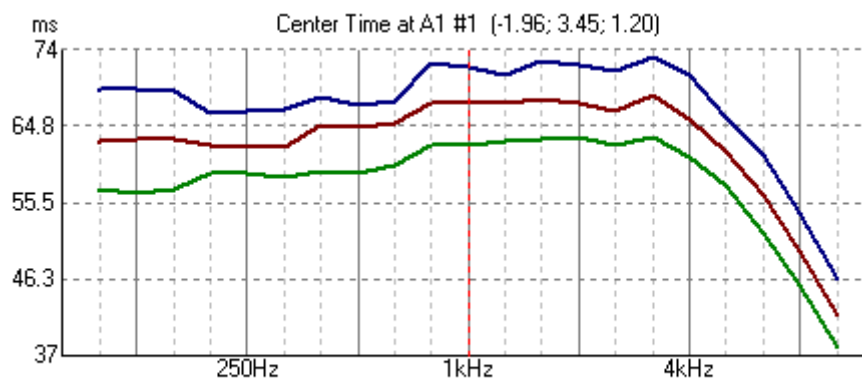
Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

Grün: Minimum

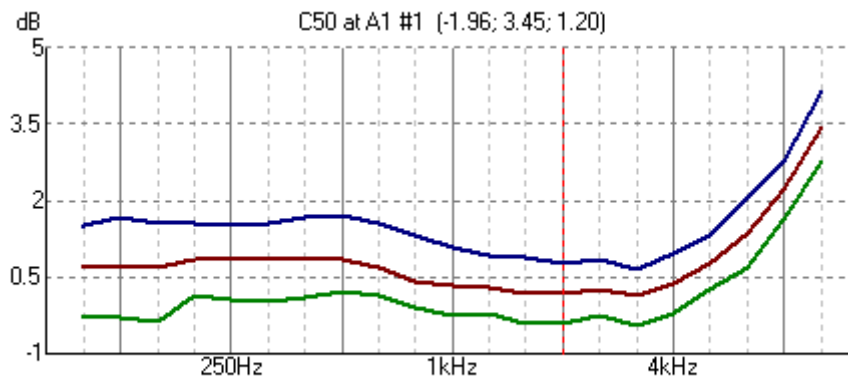
Nachhallzeit T_{30} – Unsicherheit Vortrag

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 21:05:12 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Schwerpunktzeit t_s – Unsicherheit Vortrag

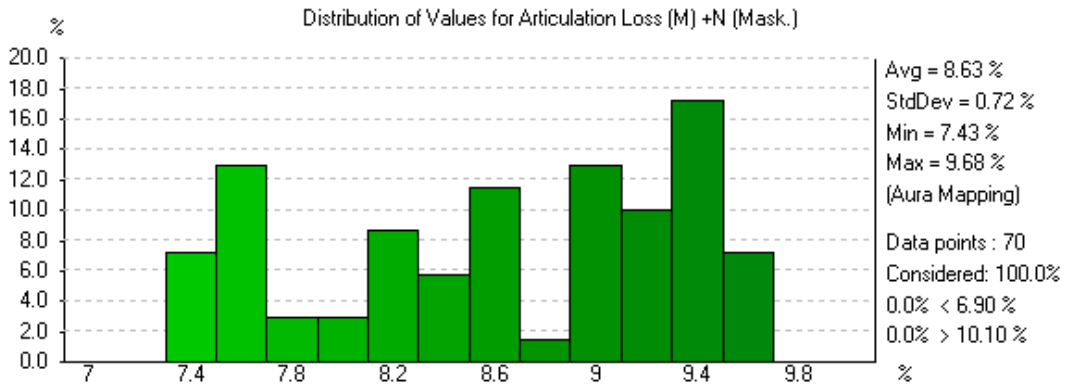
(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 20:05:43 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50} – Unsicherheit Vortrag



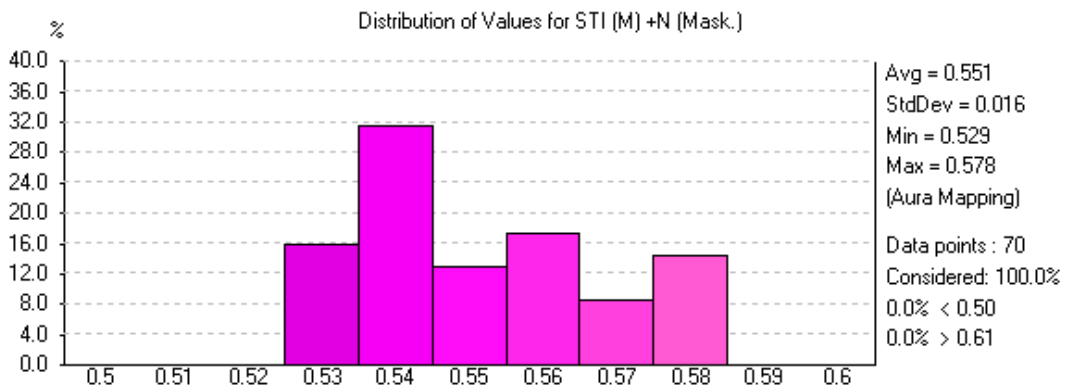
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 21:07:33 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Artikulationsverlust AL_{cons} – Unsicherheit Vortrag

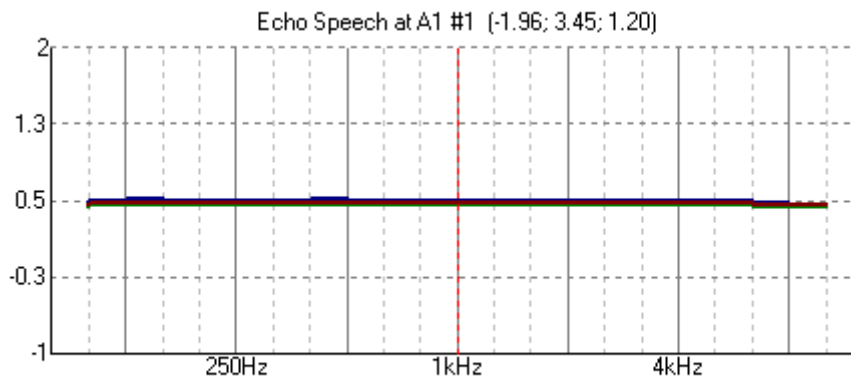


(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:25:27 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Sprachübertragungs-Index STI – Unsicherheit Vortrag



(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:25:59 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium *EK* – Unsicherheit Vortrag

(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 20:08:11 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

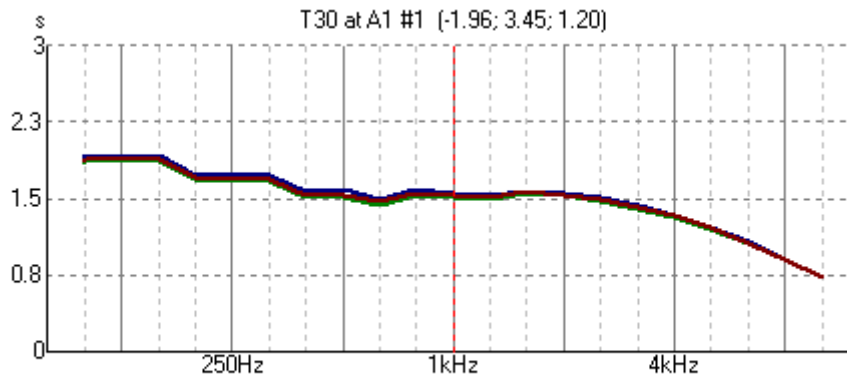
Anlage 18: AURA-Simulation ohne Besetzung Konzert

Legende Diagramme:

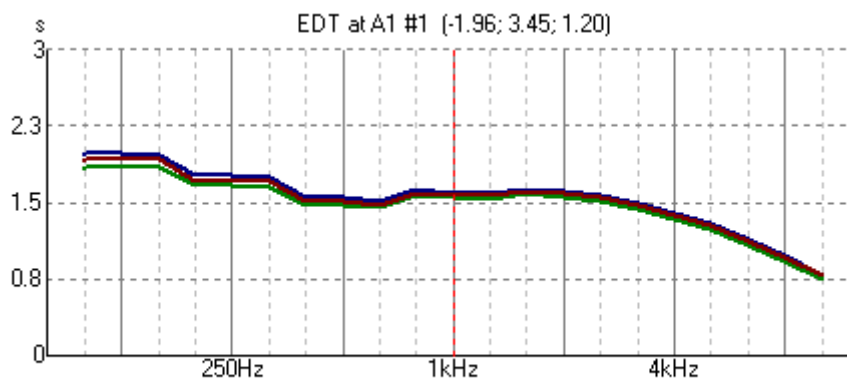
Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

Grün: Minimum

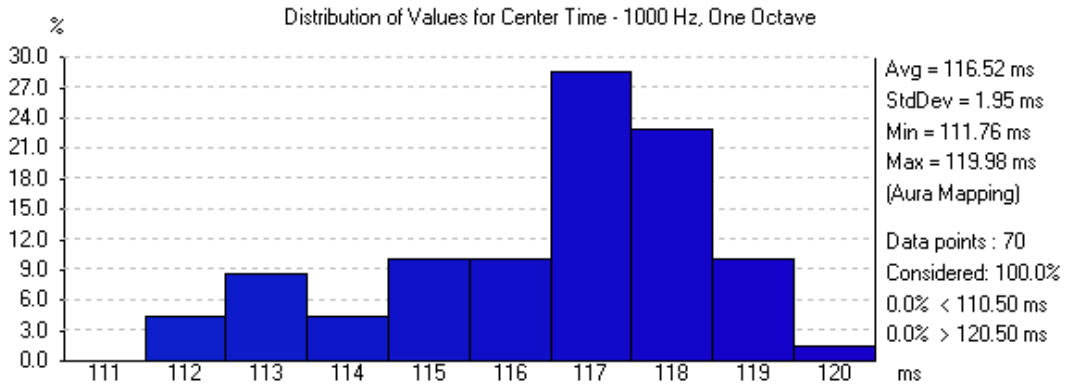
Nachhallzeit T_{30} – ohne Besetzung Konzert

(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 21:17:21 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Frühe Nachhallzeit EDT – ohne Besetzung Konzert

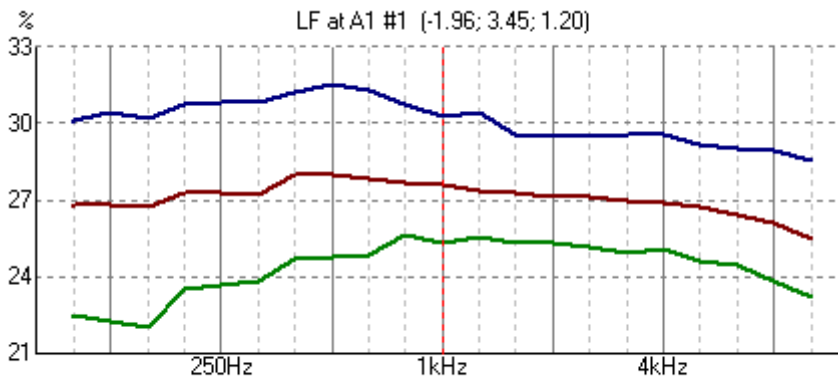
(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 20:19:39 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Schwerpunktzeit t_s bei 1000 Hz – ohne Besetzung Konzert



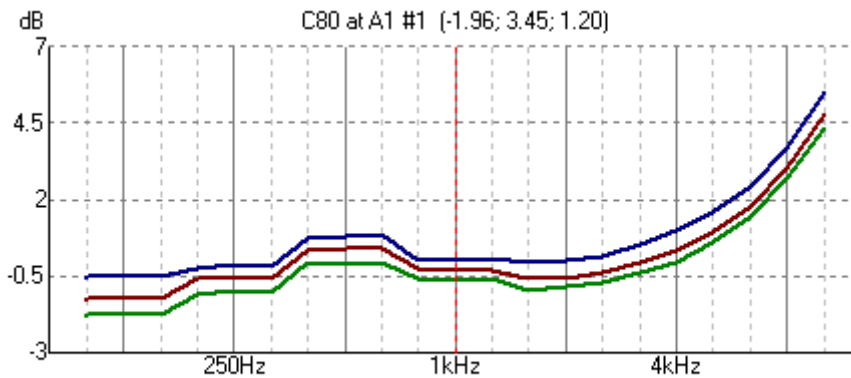
(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 21:50:29 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Seitenschallgrad LF – ohne Besetzung Konzert

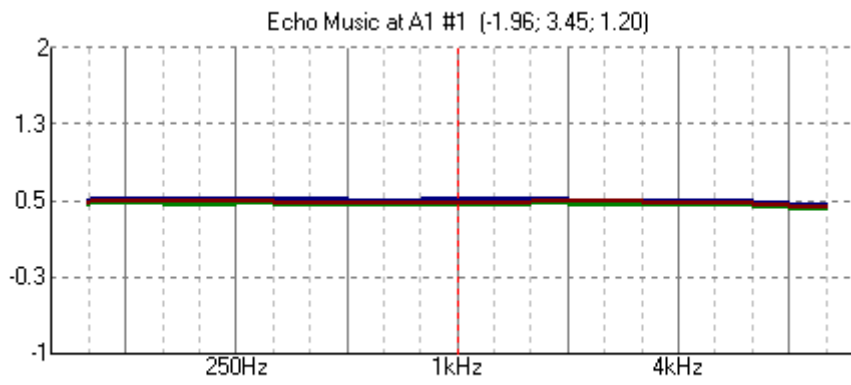


(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 21:20:53 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Klarheitsmaß für Musik C_{80} – ohne Besetzung Konzert



(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 21:19:51 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium EK – ohne Besetzung Konzert

(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 20:21:16 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Anlage 19: AURA-Simulation ohne Besetzung Vortrag

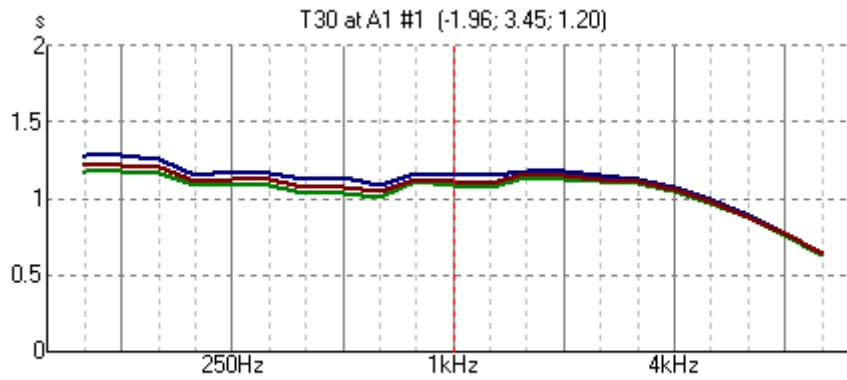
Legende Diagramme:

Blau: Maximum

Rot: Mittelwert

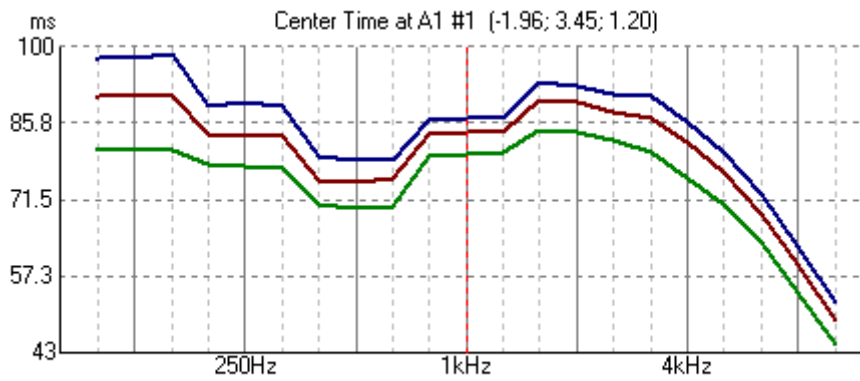
Grün: Minimum

Nachhallzeit T_{30} – ohne Besetzung Vortrag



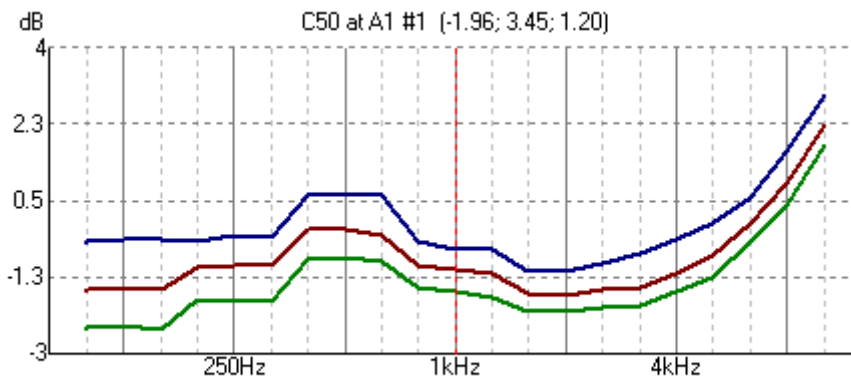
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 21:22:39 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Schwerpunktzeit t_s – ohne Besetzung Vortrag



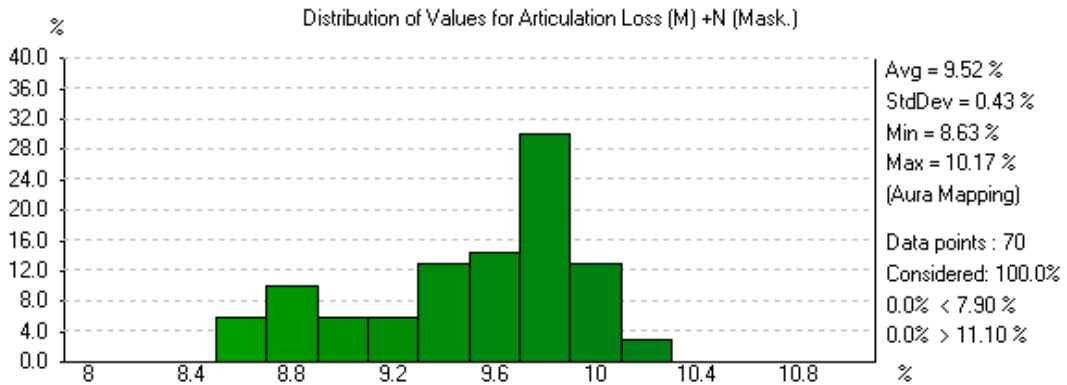
(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 20:27:07 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50} – ohne Besetzung Vortrag



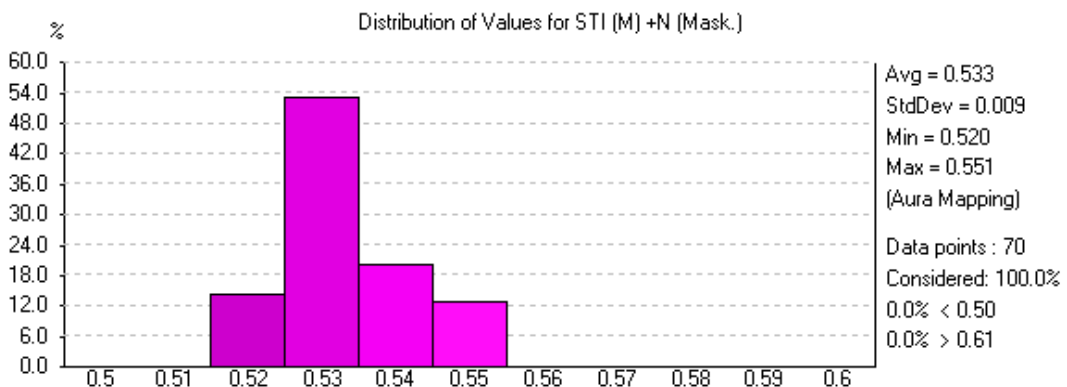
(c) EASE 4.4 / COM / 05.05.2022 21:24:22 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Artikulationsverlust AL_{cons} – ohne Besetzung Vortrag

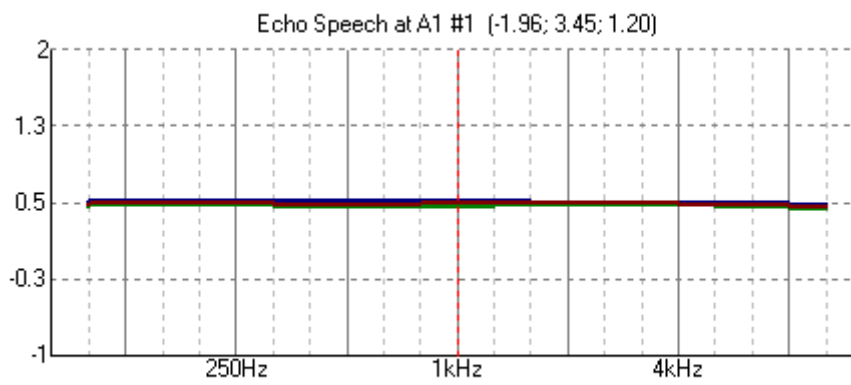


(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:27:17 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Sprachübertragungs-Index STI – ohne Besetzung Vortrag



(c) EASE 4.4 / COM / 24.05.2022 18:26:42 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Echokriterium EK – ohne Besetzung Vortrag

(c) EASE 4.4 / COM / 16.05.2022 20:27:42 / Möhler + Partner Ingenieure AG Hr. Schreier

Eigenständigkeitserklärung

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

Ort, Datum

Vorname Nachname