

Entwicklung eines mobilen und variablen Akustikstellwandsystems

Toningenieursprojekt

Durchgeführt und dokumentiert von

Alexander Ulz, BSc

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation

Vorstand: *Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot Kubin*

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr. techn. Franz Graf



Inhaltsverzeichnis:

1.	Einleitung.....	1
2.	Pflichtenheft.....	2
3.	Theorie und Grundlagen	3
3.1.	Literaturrecherche und Geschichte.....	3
3.2.	Schallführung bei musikalischen Darbietungen	3
3.2.1.	Abstrahlcharakteristik von Musikinstrumenten	4
3.2.2.	Interaktion von Musikinstrumenten mit dem Raum	5
3.3.	Schallreflexion an glatten schallharten Oberflächen	7
3.4.	Schaffen eines künstlichen Raums durch Einsatz von Akustikwänden oder Orchestermuscheln	7
3.5.	Bestehende Systeme	8
3.5.1.	Concert Shell mit diffus streuenden Stellwandelementen	8
3.5.2.	Verschiedene Formen von Orchestermuscheln.....	10
3.6.	Anforderungen an das Akustikstellwandsystem	13
3.6.1.	Akustische Anforderungen.....	13
3.6.2.	Anpassung an eine bestehende Bühnenunterkonstruktion	14
3.6.3.	Auf- und Abbau und Transportierbarkeit.....	14
3.6.4.	Stabilität und Statik	15
3.6.5.	Langlebigkeit	15
3.6.6.	Optische Kriterien.....	15
3.6.7.	Weitere Anforderungen	16
3.6.8.	Erweiterbarkeit und Möglichkeiten zur Adaptierung	16
4.	Realisierung.....	18
4.1.	Erste Überlegungen zum Design und Aufbau.....	18
4.2.	Projektpartner aus Industrie und Wirtschaft	24
4.3.	Auswahl der Materialien	25
4.4.	Entwürfe für die verschiedenen Aufbauvarianten	26
4.5.	Konstruktionspläne.....	27
4.6.	Rahmen- und Stellfußkonstruktionen und Verschraubungen	29
4.7.	CAD Pläne	34

4.8.	Einsatz im Gesamtsystem bestehend aus Bühnenunterbau und Überdachung.....	37
4.9.	Namensgebung und Design von Logo und Handbuch	37
4.9.1.	Namensgebung.....	38
4.9.2.	Logoentwurf	38
4.9.3.	Handbuchdesign.....	39
4.10.	Der produzierte Prototyp.....	40
5.	Simulationen mit EASE	44
5.1.	EASE im Überblick.....	44
5.2.	Vorgehensweise bei den Simulationen	45
5.2.1.	Entwurf der CAD-Modelle	45
5.2.2.	Vier Varianten	46
5.2.3.	Audience Areas.....	49
5.2.4.	Sesselpositionen.....	50
5.2.5.	Lautsprecherdefinition	50
5.2.6.	Raumeigenschaften.....	51
5.3.	Simulationsergebnisse für verschiedene Aufbauvarianten.....	54
5.3.1.	Gewählte Parameter	54
5.3.2.	Vergleich der Ergebnisse	55
5.3.3.	Kommentar zu den Simulationsergebnissen	65
6.	Messungen am Prototyp	66
6.1.	Messumgebung und Bedingungen	66
6.2.	Messequipment.....	67
6.3.	Messablauf.....	68
6.3.1.	Kurzzusammenfassung des Messablaufs	68
6.3.2.	Messstellenplan.....	69
6.3.3.	Eckdaten zur Messung (Tabelle 3)	71
6.3.4.	Fotos zu den Messungen.....	71
6.4.	Ergebnisse der Messungen (Auszug).....	75
6.5.	Vergleich mit den Ergebnissen der Simulationen	87
6.6.	Subjektiver Eindruck.....	87
6.7.	Zusammenfassung der Messergebnisse.....	88
7.	Praxis und Resümee	90

7.1.	Erfahrungen aus den ersten Aufbauten	90
7.2.	Transportmöglichkeiten	91
7.3.	Notwendige Verbesserungen	92
7.3.1.	Höhenverstellbare Stellfüße	92
7.3.2.	Verbesserung der Verschraubungen inklusive Gummiauflagen.....	93
7.3.3.	Einheitliches Beschriftungssystem der Polycarbonatscheiben.....	94
8.	Ausblick	95
8.1.	Verleih und Vertrieb	95
8.1.1.	Individuelle Gestaltung und Produktion auf Kundenwunsch	95
8.2.	Verlade- und Transportsystem	96
8.3.	Gesamtsystem bestehend aus Bühnenunterkonstruktion und Überdachung	97
9.	Literaturverzeichnis.....	98
10.	Anhang 1 - Handbuch	100
10.1.	Aufbau des Handbuchs	100
11.	Anhang 2 – Zusammenfassung Projektdetails	102
11.1.	Materialeigenschaften	102
11.1.1.	Rahmen aus Stahl (vollverzinkt und pulverbeschichtet nach Standardfarbkarte RAL 9006).....	102
11.1.2.	Wandteile aus Polycarbonat.....	103
11.2.	Kostenaufstellung	103
12.	Anhang 3.....	104
12.1.	Projektpartner.....	104
12.2.	Danksagungen.....	106
12.3.	Erklärung	107

Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1: Hauptabstrahlrichtungen der Violoncelli in der Vertikalebene [Höldrich, 2011].....	4
Abb. 2: Hauptabstrahlrichtung von Trompeten in der Vertikalebene [Höldrich, 2011].....	5
Abb. 3: Raumimpulsantwort [www.wikipedia.org]	6
Abb. 4: Schallrückwurf parallel [Graber et al., RA, 2009]	8
Abb. 5: Schallrückwurf konzentriert [Graber et al., RA, 2009]	8
Abb. 6: Concert Shell Wandelemente Vorderansicht [Eade et al., 1981].....	9
Abb. 7: Concert Shell konvexe Oberflächenstruktur [Eade et al., 1981]	9
Abb. 8: Concert Shell Einzelstellwandteil mit Aufsteckwand [Eade et al., 1981]	9
Abb. 9: Concert Shell Rahmen- und Stellfußkonstruktion [Eade et al., 1981].....	9
Abb. 10: Concert Shell Anordnungsvarianten [Eade et al., 1981]	9
Abb. 11: Band Shell in Dallas [www.blogspot.com]	10
Abb. 12: Pritzker Pavilion Chicago [www.electrovoice.com]	11
Abb. 13: Mobile Konzertmuschel AIR [www.show4you.net].....	11
Abb. 14: Music Bowl Sidney [www.wikipedia.org]	11
Abb. 15: Orchestermuschel in Sassnitz auf Rügen [www.cbdx.de]	12
Abb. 16: Orchestermuschel Festspielhaus Bregenz [www.theomader.at].....	12
Abb. 17: Orchestermuschel Wiener Staatsoper [www.irresberger.com]	12
Abb. 18: Skizze Aufstellung mit Bühne Grundriss	19
Abb. 19: Skizze Stellwände senkrecht	20
Abb. 20: Skizze Aufsteckwände a 45°	22
Abb. 21: Skizze Aufsteckwände b 45°	22
Abb. 22: Skizze Aufsteckwände c 45°	22
Abb. 23: Skizze Aufsteckwände d 45°	22
Abb. 24: Skizze Aufsteckwände a 30°	23
Abb. 25: Skizze Aufsteckwände b 30°	23
Abb. 26: Skizze Aufsteckwände c 30°	23
Abb. 27: Skizze Aufsteckwände d 30°	23
Abb. 28: RAL 9006 [www.sunflex.de]	25
Abb. 29: Polycarbonatglas [www.findeis.de]	26
Abb. 30: Anordnung Grundriss [Kiefer]	28
Abb. 31: Wandteile mit Rahmen [Kiefer]	28
Abb. 32: Vertikalschnitte 45° und 30° [Kiefer]	29
Abb. 33: Steher 45° [Kiefer].....	30
Abb. 34: Steher 30° [Kiefer].....	31
Abb. 35: Details Befestigung Aufsteckwände mit Winkelstücken [Kiefer]	32
Abb. 36: Details Fuß gerade [Kiefer]	32
Abb. 37: Details Fuß 30° und 45° [Kiefer].....	33
Abb. 38: Details Verschraubung [Kiefer]	33
Abb. 39: Details Gewichtsangaben [Kiefer].....	34
Abb. 40: CAD Variante 45° hinten oben [Kiefer]	35

Abb. 41: CAD Variante 45° vorne unten [Kiefer]	35
Abb. 42: CAD Variante 45° schräg vorne oben [Kiefer]	35
Abb. 43: CAD Variante 30° hinten oben [Kiefer]	36
Abb. 44: CAD Variante 45° vorne unten [Kiefer]	36
Abb. 45: CAD Variante 30° schräg vorne oben [Kiefer]	36
Abb. 46: Logo-Entwurf schwarz	38
Abb. 47: Logo Entwurf schwarz mit (c)	38
Abb. 48: Logo Entwurf Kontur rot	38
Abb. 49: Logo Entwurf Kontur rot mit (c)	38
Abb. 50: Logo Background Kreide	39
Abb. 51: Logo Background Kreide mit (c)	39
Abb. 52: Logo Background Shine	39
Abb. 53: Logo Background Shine mit (c)	39
Abb. 54: Prototyp vorne	40
Abb. 55: Prototyp hinten	41
Abb. 56: Prototyp vorne Nahansicht	41
Abb. 57: Rändelschraube (li) und Schraubflasche (re)	42
Abb. 58: Knebelschrauben	42
Abb. 59: Winkelteil B 45°	43
Abb. 60: Einbau Winkelstück	43
Abb. 61: EASE 4.3 Startfenster [Ahnert, 2009]	44
Abb. 62: EASE-Model ohne Stellwände	47
Abb. 63: EASE-Model Stellwände senkrecht	47
Abb. 64: EASE-Model Aufsteckwände 30°	48
Abb. 65: EASE-Model Aufsteckwände 45°	48
Abb. 66: Eyes-Modell Aufsteckwände 45° View 1	49
Abb. 67: Eyes-Modell Aufsteckwände 45° View 2	49
Abb. 68: Nachhallzeit nach Eyring ohne Stellwände	52
Abb. 69: Nachhallzeit nach Eyring Stellwände senkrecht	52
Abb. 70: Nachhallzeit nach Eyring Aufsteckwände 30°	53
Abb. 71: Nachhallzeit nach Eyring Aufsteckwände 45°	53
Abb. 72: SPL_{tot} bei 1 kHz für LSP 1 ohne Muschel	55
Abb. 73: SPL_{tot} bei 1 kHz für LSP 1 Stellwände senkrecht	55
Abb. 74: SPL_{tot} bei 1 kHz für LSP 1 Aufsteckwände 30°	55
Abb. 75: SPL_{tot} bei 1 kHz für LSP 1 Aufsteckwände 45°	55
Abb. 76: SPL_{tot} bei 1 kHz für LSP 2 ohne Muschel	56
Abb. 77: SPL_{tot} bei 1 kHz für LSP 2 Stellwände senkrecht	56
Abb. 78: SPL_{tot} bei 1 kHz für LSP 2 Aufsteckwände 30°	56
Abb. 79: SPL_{tot} bei 1 kHz für LSP 2 Aufsteckwände 45°	56
Abb. 80: SPL_{tot} bei 1 kHz für LSP 3 ohne Muschel	56
Abb. 81: SPL_{tot} bei 1 kHz für LSP 3 Stellwände senkrecht	56
Abb. 82: SPL_{tot} bei 1 kHz für LSP 3 Aufsteckwände 30°	56

Abb. 83: SPL _{tot} bei 1 kHz für LSP 3 Aufsteckwände 45°	56
Abb. 84: SPL _{tot} bei 1 kHz über Audience Areas ohne Muschel	58
Abb. 85: SPL _{tot} bei 1 kHz über Audience Areas Stellwände senkrecht.....	58
Abb. 86: SPL _{tot} bei 1 kHz über Audience Areas Aufsteckwände 30°	59
Abb. 87: SPL _{tot} bei 1 kHz über Audience Areas Aufsteckwände 45°	59
Abb. 88: C ₈₀ über Audience Areas ohne Muschel	60
Abb. 89: C ₈₀ über Audience Areas Stellwände senkrecht	61
Abb. 90: C ₈₀ über Audience Areas Aufsteckwände 30°	61
Abb. 91: C ₈₀ über Audience Areas Aufsteckwände 45°	62
Abb. 92: C ₅₀ über Audience Areas ohne Muschel	63
Abb. 93: C ₅₀ über Audience Areas Stellwände senkrecht	63
Abb. 94: C ₅₀ über Audience Areas Aufsteckwände 30°	64
Abb. 95: C ₅₀ über Audience Areas Aufsteckwände 45°	64
Abb. 96: Dodekaeder Messlautsprecher	67
Abb. 97: Lautsprecher-Verstärker	67
Abb. 98: ICP-Messmikrofon.....	67
Abb. 99: Messlaptop mit WinMLS.....	68
Abb. 100: RME Soundkarte	68
Abb. 101: Lautsprecher- und Mikrofonpositionsplan	70
Abb. 102: Positionsmarkierung für Lautsprecher (links) und Mikrofon (rechts).....	71
Abb. 103: Lautsprecher und Mikrofone	72
Abb. 104: Akustikstellwände mit Messaufbau.....	72
Abb. 105: Dodekaederlautsprecher mit Stativ.....	73
Abb. 106: Mikrofone im Messraum	73
Abb. 107: Detailansicht Aufsteckrahmen mit Winkelstück 45°	74
Abb. 108: Detailansicht Aufsteckwände 45°	74
Abb. 109: Detailansicht Stellfüße mit Höhenverstellmöglichkeit	74
Abb. 110: Detailansicht Winkelstück 45°	75
Abb. 111: Verschiedene Steherteile.....	75
Abb. 112: Screenshot mit Messkonfiguration "Room Acoustics".....	76
Abb. 113: Screenshot mit Messkonfiguration "Leq".....	77
Abb. 114: RT-60 Ohne Stellwände MIC 1-6.....	78
Abb. 115: RT-60 Ohne Stellwände MIC 7-12.....	78
Abb. 116: RT-60 Stellwände senkrecht MIC 1-6.....	78
Abb. 117: RT-60 Stellwände senkrecht MIC 7-12.....	78
Abb. 118: RT-60 Aufsteckwände 45° MIC 1-6	78
Abb. 119: RT-60 Aufsteckwände 45° MIC 7-12	78
Abb. 120: RT-60 Ohne Stellwände MIC 13-18.....	79
Abb. 121: RT-60 Stellwände senkrecht MIC 13-18.....	79
Abb. 122: RT-60 Aufsteckwände 45° MIC 13-18	79
Abb. 123: SPL _{total} für drei Messungen bei MIC 7	84
Abb. 124: SPL _{total} für drei Messungen bei MIC 16.....	84

Abb. 125: C ₈₀ Ohne Stellwände MIC 1-6	85
Abb. 126: C ₈₀ Ohne Stellwände MIC 7-12	85
Abb. 127: C ₈₀ Stellwände senkrecht MIC 1-6	85
Abb. 128: C ₈₀ Stellwände senkrecht MIC 7-12	85
Abb. 129: C ₈₀ Aufsteckwände 45° MIC 1-6.....	85
Abb. 130: C ₈₀ Aufsteckwände 45° MIC 7-12.....	85
Abb. 131: C ₈₀ Ohne Stellwände MIC 13-18	86
Abb. 132: C ₈₀ Stellwände senkrecht MIC 13-18	86
Abb. 133: C ₈₀ Aufsteckwände 45° MIC 13-18.....	86
Abb. 134: Stellfuß mit Höhenverstellungsschrauben	92
Abb. 135: Schraubflasche mit Gummiauflage	93
Abb. 136: Materialdatenblatt Stahlrahmen [Kiefer]	102
Abb. 137: Logo SKF [www.kammermusik.co.at]	104
Abb. 138: Logo Kiefer Technic [Kiefer]	104
Abb. 139: Logo AVLCF [www.avlcf.com]	104
Abb. 140: Logo AVL [www.avl.com]	105

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mikrofonpositionen mit Koordinaten	70
Tabelle 2: Lautsprecherpositionen mit Koordinaten	70
Tabelle 3: Eckdaten zur Messung	71
Tabelle 4: RT-60 @ 1 kHz am Referenzpunkt (MIC 7)	79
Tabelle 5: SPL _{total} an sechs Mikrofonpositionen ohne Stellwände.....	80
Tabelle 6: SPL _{total} an sechs Mikrofonpositionen Stellwände senkrecht.....	81
Tabelle 7: SPL _{total} an sechs Mikrofonpositionen Aufsteckwände 45°	82
Tabelle 8: SPL _{total} an zwei Mikrofonpositionen für drei Aufbauvarianten	83

Kurzbeschreibung und Motivation

Musikalische Darbietungen im Freien oder in sehr großen Räumen wie Höfen oder Kirchen stellen oft besondere akustische Herausforderungen - sowohl für die agierenden KünstlerInnen als auch für die ZuhörerInnen - dar. Der „fehlende Raum“ um die KünstlerInnen führt zu schlechter Hörsamkeit auf der Bühne und zu Schwierigkeiten im Zusammenspiel, was natürlich eine Verminderung der Qualität einer musikalischen Darbietung mit sich bringen kann. Aber auch für die ZuhörerInnen sind derartige akustische Situationen nachteilig, da das menschliche Ohr an ein Hören in bestimmten Räumen gewöhnt ist und die Form des Eintreffens der Schallereignisse bei den ZuhörerInnen somit entscheidend ist. Diese Faktoren haben vor allem bei unverstärkter Musik in kleineren Besetzungen wie zum Beispiel bei Kammermusikkonzerten einen entscheidenden Einfluss.

Eben aus diesem Zusammenhang entstand die Idee zu diesem Projekt. Die Konzerte des Steirischen Kammermusikfestivals finden in vielen verschiedenen Lokalisationen statt, darunter sind zahlreiche Open-Air-Konzerte auf freiem Feld oder in diversen Höfen und auch Konzerte in großen Kirchen mit sehr langen Nachhallzeiten. Gespräche mit KünstlerInnen und eigene Hörerfahrungen als Zuhörer machten für mich die Notwendigkeit der Verwendung eines Akustikstellwandsystems/Orchestermuschelsystems deutlich. Da kein bestehendes System die speziellen Anforderungen für diese Anwendung erfüllen konnten, wurde ein solches System geplant, entworfen und realisiert. Diese Arbeit dokumentiert diese Vorgänge von der Anfangsidee bis hin zu Simulationen und Messungen an den fertigen Akustikstellwänden. Das entwickelte Akustikstellwandsystem besteht aus einer Rahmen- und Steherkonstruktion aus Stahl und aus schallharten Polycarbonatplatten. Durch die Modulbauweise ist ein einfaches und schnelles Auf- und Abbauen in verschiedenen auf die jeweilige Aufführungs- und Bühnensituation angepassten Konfigurationen möglich. Die Arbeiten im Zuge dieses Toningenieurprojekts dienen als Basis für die Weiterentwicklung des Akustikstellwandsystems bis zum regelmäßigen praktischen Einsatz und der Möglichkeit einer Produktion in Kleinserie.

Abstract and Motivation

Musical performances in open air situations or in big rooms like yards or churches are often quite great acoustical challenges for the acting artists as well as for the listeners in the audience. The quality of musical performances could easily be deteriorated, because artists on stage have problems to listen to each other which leads to difficulties in the interaction. Furthermore, the audience can face some problems in such acoustical situations, because the human ear is used to listen to music in certain rooms. These facts are especially crucial for unplugged music in smaller ensembles like in chamber music concerts.

The idea for this project arose in the context of the Styrian Festival of Chamber Music. Some of the festival concerts take place in different open-air situations or in yards and also in

churches with quite huge reverberation times. Conversations with acting artists and my own experience as listener of these concerts showed me, that the use of a certain system of acoustic partition walls or a kind of concert shell would bring a big advantage for the musicians on stage and could also increase the acoustical quality for the listeners a lot. Because of the reason that no appropriate configuration for these special requirements was available, I started to plan and realize such a system. This work is the documentary regarding this project starting with the idea up to the simulations and measurements regarding the implemented orchestra shell. The invented orchestra shell consists of a steel frame construction and of acoustically high reflexive Polycarbonat partition walls. Based on the module construction a simple and fast assembly and disassembly in different setups is possible. This audio engineer project forms a base for further investigations on the orchestra shell and for the future goal of a regular use in concert situations and the possibility of a small series production.

1. Einleitung

Die Idee der Verwendung von Orchestermuscheln und von akustischen Stellwandsystemen ist keineswegs neu. Sowohl für Konzerte in geschlossenen Räumen als auch für musikalische Darbietungen unter freiem Himmel werden solche Systeme weltweit seit langer Zeit vielfach eingesetzt.

Dabei kommen je nach Anwendungszweck unterschiedliche Formen und Größen und auch verschiedene Materialien zur Anwendung. In Abschnitt 3.5 werden einige dieser in Verwendung befindlicher Systeme beschrieben. Auch wenn die verwendeten Ausführungen meist sehr unterschiedlich sind, um eben genau dem jeweiligen Verwendungszweck gerecht zu werden, so haben sich doch fast alle Eines gemeinsam. Sie sind meist sehr unhandlich und schwer, sodass ein schneller und unkomplizierter Auf- und Abbau von wenigen Personen praktisch nicht machbar ist. Zusätzlich sind sehr wenige dieser Systeme mobil und wetterfest und die meisten Varianten haben auch eine wenig ansprechende Optik.

Um also alle diese Kriterien für den Einsatz eines Akustikstellwandsystems gewährleisten zu können, musste daher ein vollkommen neues und speziell für diesen Anwendungszweck ausgelegtes System entworfen werden.

Die wichtigsten Grundanforderungen für die Gestaltung des mobilen Akustikstellwand-/Orchestermuschelsystems sind im Folgenden aufgelistet.

- Möglichkeit zur Adaptierung entsprechend der Situation auf der Bühne und den räumlichen Gegebenheiten.
- Möglichkeit zum schnellen Auf- und Abbau durchgeführt von zwei bis drei Personen.
- Aufbaumöglichkeit des Systems sowohl in Verbindung mit einem entsprechenden Bühnenunterbau als auch mit einem eigenen Ständersystem auf beliebigem Untergrund.
- Möglichst geringe Störung des Blickfeldes der Zuschauer, das heißt, dass die Elemente weitgehend „unsichtbar“ sein sollten.
- Beständigkeit der verwendeten Materialien gegen Wind und Feuchtigkeit.
- Beständigkeit der verwendeten Materialien gegen mechanische Belastungen, um eine möglichst lange Haltbarkeit zu garantieren.

Eine genauere Beschreibung und auch die Erklärung zur entsprechenden Umsetzung der angeführten Anforderungen in die Praxis folgen in Abschnitt 3.6 bzw. in Abschnitt 4.

2. Pflichtenheft

Die folgende Auflistung fasst wichtige Arbeitsschritte zusammen, die zur Durchführung des Projektes notwendig waren.

- Entwurf von ersten Aufbauvarianten für die Akustikstellwände inklusive der dazugehörigen Aufsteckteile für die Funktion als Orchestermuschel. Dabei soll auf die im vorigen Kapitel schon kurz aufgelisteten Anforderungen Rücksicht genommen werden.
- Auswahl des am besten geeigneten Entwurfs und Bau eines maßstabgerechten kleinen Modells zum Zweck der besseren Anschaulichkeit
- Auswahl von Materialien für Rahmen bzw. Wand- und Aufsteckelemente mit den gewünschten Eigenschaften
- Besprechungen mit potentiellen Sponsoren und Industriepartnern über die Finanzierung
- Besprechungen und Planerstellung mit den Verantwortlichen der Firma Kiefer Technic
- Einholung von Angeboten für verschiedene Materialien für die Wandelemente in Zusammenarbeit mit der AVL Cultural Foundation und dem AVL Supply Chain Management
- Angebotsauswahl und Materialbestellung
- Überlegungen zur Benennung des Produkts
- Designüberlegungen zum Handbuch
- Produktionsauftrag an die Firma Kiefer
- Erstellung von Plänen in einem CAD – Programm
- Durchführung akustischer Simulationen mit EASE entsprechend den verschiedenen Aufbauvarianten und verschiedenen gängigen Aufführungssituationen
- Montage des Prototypen
- Durchführung von Messungen am Prototyp im akustischen Rollenprüfstand der AVL in Graz
- Erstellung eines Handbuchs zum fertigen System, welches Anleitungen zum Aufbau der verschiedenen Varianten und Erklärungen der Funktionen bietet
- Nach offiziellem Projektende:
 - o Gestaltung eines Webauftritts zur Werbung und eventuell zum Verleih oder Verkauf des Systems
 - o Test in der Praxis beim Steirischen Kammermusikfestival 2014; auch in Zusammenarbeit mit der Bühnenunterkonstruktion und eventuell einer Bühnenüberdachung
 - o Einholen von Sachverständigengutachten über die Stabilität der Akustikstellwände
 - o Durchführung nachträglicher Verbesserungen, welche sich aus dem Einsatz in der Praxis als notwendig ergeben

3. Theorie und Grundlagen

3.1. Literaturrecherche und Geschichte

Die Suche nach Literatur zu Begriffen wie Orchester- oder Konzertmuschel oder Akustikwänden usw., welche in direktem Zusammenhang mit dem Thema stehen könnten, ergab sowohl in Deutsch als auch in Englisch nur sehr wenige brauchbare Treffer.

Erwähnenswert sind dabei nur einige Veröffentlichungen aus Amerika, welche sich allesamt mit der Entwicklung einer sogenannten Concert Shell mit diffus reflektierenden Oberflächen beschäftigen. Ausschnitte aus den entsprechenden Patentschriften (*[Eade et al., 1981 und Eade et al., 1982]*) befinden sich in Abschnitt 3.5.1.

Weitere verwendete Literatur befasst sich mit den Themen Instrumentenakustik (*[Höldrich, 2011]*), Raumakustik und geometrischer Schallreflexion an schallharten Oberflächen (*[Graber et al., RA, 2011]*) sowie mit Anleitungen zur Verwendung von EASE. Dazu kommen noch unzählige Quellen für Abbildungen.

Kurz seien hier auch noch einige Worte zur Geschichte des Einsatzes von Konzert- oder Orchestermuscheln und schallhart reflektierenden Flächen und Wänden im Zusammenhang mit künstlerischen Darbietungen erwähnt. Das Prinzip einer optimierten Schallführung zum Publikumsbereich wurde schon in Amphitheatern vor vielen Jahrhunderten genutzt. Dabei waren hinter den Künstlern auf der Bühne Steinwände und später auch muschelähnliche Flächen angeordnet, sodass die Darbietungen ohne jegliche Verstärkung in den oft tausende Plätze fassenden Amphitheatern überall gut gehört werden konnten.

Die Funktion und das Prinzip dieser Konstruktionen haben sich bis heute nicht wesentlich geändert. Zwar wurden über die Jahrhunderte natürlich verschiedene Materialien verändert und das Aussehen folgte verschiedenen architektonischen Einflüssen, jedoch finden sich in vielen dieser Konstruktionen starke Ähnlichkeiten.

Somit ist die in dieser Arbeit beschriebene Entwicklung keine völlige Neuentwicklung, sondern beruht auf jahrhundertealten Prinzipien. Jedoch ist sie an die ganz speziellen Anforderungen und die Möglichkeiten, die sich durch moderne Materialien und Produktionstechniken bieten, angepasst.

3.2. Schallführung bei musikalischen Darbietungen

Die nächsten beiden Abschnitte geben einen kurzen Überblick darüber, welchen Einfluss die räumliche Situation und die damit verbundene Raumakustik – dabei wird bewusst auch die Akustik im Freien als Raumakustik bezeichnet – auf das Klangverhalten akustischer Musikinstrumente hat. Dabei soll deutlich gemacht werden, dass die Form der Führung der Schallenergie an das Ohr der agierenden Musiker und Musikerinnen und des Publikums eine wesentliche Rolle zur Gewährleistung guter Klangqualität spielt.

3.2.1. Abstrahlcharakteristik von Musikinstrumenten

Allen akustischen Musikinstrumenten ist gemeinsam, dass sie ihre Schallenergie in spezielle Richtungen abstrahlen. Die Form dieser Abstrahlcharakteristiken hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab. Natürlich spielt die Bauform des jeweiligen Instruments eine wesentliche Rolle, jedoch haben auch die Spieldynamik und besonders die Frequenz der gespielten Töne einen sehr großen Einfluss darauf, in welche Richtung wie viel Schallleistung abgestrahlt wird.

Somit hängt die Klangfarbe eines Musikinstruments stark von der Richtung ab, in der man sich zum Instrument befindet. Und besonders im Freien oder in hallarmen Umgebungen kommen diese Faktoren stark zu tragen. Das Beachten dieser Richtcharakteristiken hat große Bedeutung für Sitzordnungen in Orchestern und auch für die Positionierung von Mikrofonen und natürlich für das Klangbild, welches am Ohr der ZuhörerInnen ankommt. Somit hört auch der/die Musiker/in das Instrument ganz anders als das Publikum. [vgl. Höldrich, 2011, S. 41]

Folgende Abbildungen zeigen beispielhaft die Hauptabstrahlrichtungen der Violoncelli (Abb. 1) und der Trompeten (Abb. 2) jeweils in der Vertikalebene. Ähnlich markante Veränderungen des Abstrahlverhaltens abhängig von der Frequenz können auch in der Horizontalebene angenommen werden.

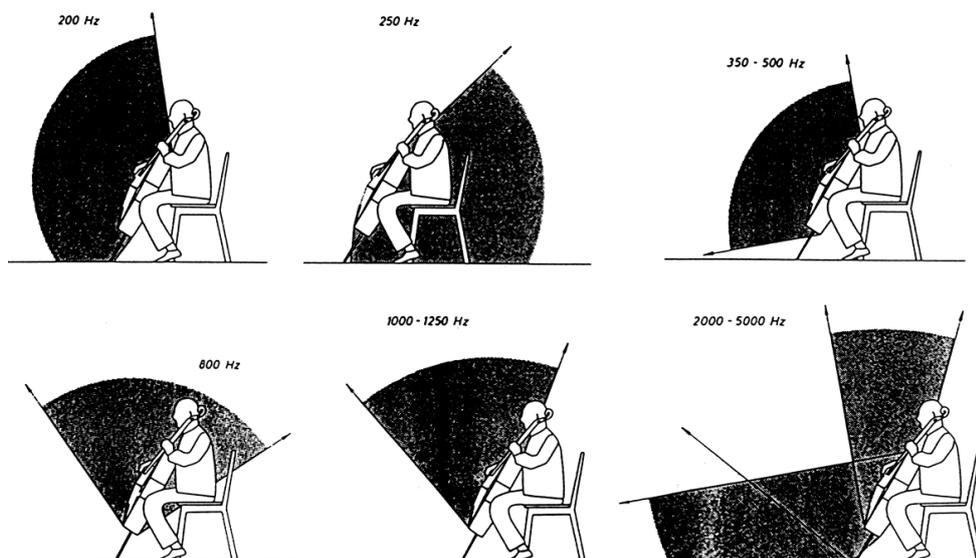


Abb. 1: Hauptabstrahlrichtungen der Violoncelli in der Vertikalebene [Höldrich, 2011]

Theorie und Grundlagen

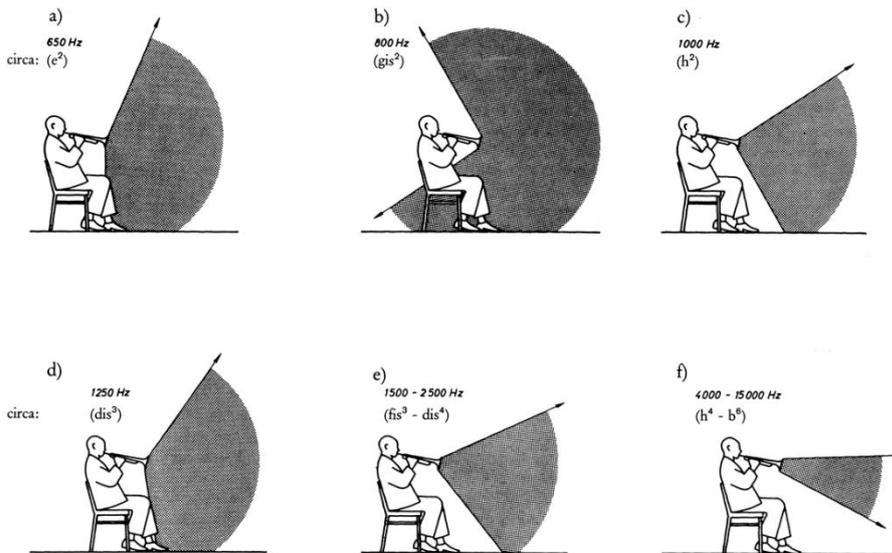


Abb. 2: Hauptabstrahlrichtung von Trompeten in der Vertikalebene [Höldrach, 2011]

Aus beiden Abbildungen ist erkennbar, dass in bestimmten Frequenzbereichen sehr viel Schallleistung in Bereiche abgestrahlt wird, wo diese auf direktem Wege weder beim Musiker oder der Musikerin noch beim Publikum ankommt. Werden Musikinstrumente nun im Freien oder in sehr großen Räumen gespielt, so geht dieser Anteil der Schallleistung quasi verloren, weil er nicht von Wänden, Decken oder anderen Grenzflächen reflektiert wird.

Dies ist für den Musiker oder die Musikerin problematisch, da das eigene Instrument unter Umständen nur schlecht gehört werden kann und es macht vor allem das Zusammenspiel innerhalb des Orchesters unangenehm, wenn kein gutes „Zusammenhören“ möglich ist.

Aber auch beim Publikum ergeben sich deutliche Nachteile im Hörempfinden. Dies kann zu gering empfundenen Lautstärken, ungewohnten Klangfarben und auch zu Störungen des Balanceempfindens des Orchesterklangs führen. Somit kann die dargebrachte Qualität der Aufführung nicht an den Ohren des Publikums ankommen.

3.2.2. Interaktion von Musikinstrumenten mit dem Raum

Das menschliche Gehör ist daran gewöhnt, musikalische Darbietungen in bestimmten Räumen als ideal zu empfinden. Nicht umsonst werden Konzertsäle für Orchesterkonzerte anders ausgelegt als solche für Jazzdarbietungen und Chorproberäume weisen andere raumakustische Eigenschaften auf als Klavierübungszimmer.

Wichtig dabei ist aber, dass eigentlich alle akustischen Musikinstrumente auf die Interaktion mit einem Raum angewiesen sind, um eine optimale Klangentfaltung zu ermöglichen. Dies liegt daran, dass vor allem die frühen Anteile der akustischen Raumantwort für unser Gehör sehr nützlich sind, um das Klangbild zu schärfen und zu verbessern. Diese frühen Reflexionen tragen wesentlich zur Erhöhung der Lautstärke, der Ortungsschärfe und des musikalischen Klarheitsmaßes bei, während der diffuse Nachhall nur mehr zum Raumeindruck beiträgt, aber keine Klangverbesserung an sich bringt. [Graber et al., RA, 2009, S. 114 ff.]

Abb. 3 zeigt einen typischen Verlauf einer Raumimpulsantwort mit der zeitlichen Einteilung in Direktschallanteil, erste oder frühe Reflexionen und diffusen Nachhall.

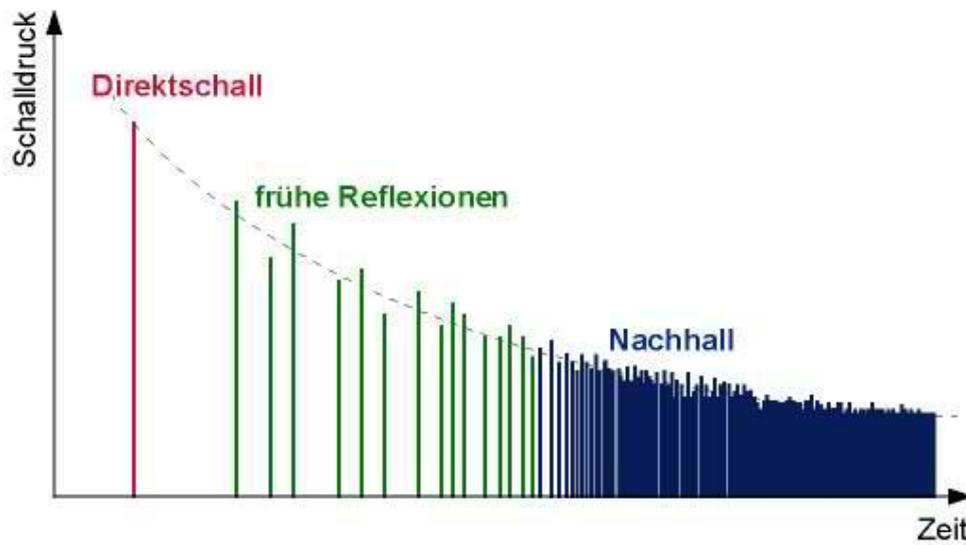


Abb. 3: Raumimpulsantwort [www.wikipedia.org]

Finden Darbietungen nun in sehr großen Räumen oder gar im Freien statt, so kommen diese wichtigen frühen Reflexionen sehr spät und auch sehr schwach am Ohr an oder fallen im Freien im schlimmsten Fall sogar ganz weg. Die gesamte Schallleistung, welche sonst in den frühen Reflexionen und natürlich auch im diffusen Nachhall steckt, geht somit also in die Umgebung verloren.

Dies führt dazu, dass Instrumente kraftlos und dünn klingen können, was sowohl beim Publikum für einen ungewohnten Klang sorgt, aber es auch den Musikern und Musikerinnen schwer macht, den Klang des eigenen Instruments richtig einzuschätzen. Im Zusammenspiel innerhalb des Orchesters ergibt sich die Schwierigkeit, dass selbst ein nur wenige Meter entfernt gespieltes Instrument unter Umständen sehr schlecht bis gar nicht gehört werden kann.

Vor allem klassische Musiker und Musikerinnen gaben in den letzten Jahren nach Konzerten des Steirischen Kammermusikfestivals im Freien häufig an, dass sie sich bei ihren Darbietungen unwohl fühlten und sich im Zusammenspiel und beim Klang des eigenen Instruments unsicher waren. Einige meinten auch, dass es unter solchen Bedingungen daher nur schwer möglich sei, bestmögliche musikalische Leistungen abzurufen.

3.3. Schallreflexion an glatten schallharten Oberflächen

[vgl. Graber et al., RA, 2009, S.78]

Wenn man in der Akustik von glatten Oberflächen spricht, so sind die Strukturabmessungen dieser Oberflächen immer im Bezug zur Wellenlänge zu betrachten. Damit die Gesetze der regulären geometrischen Raumakustik gelten, müssen die reflektierenden Flächen groß im Verhältnis zur Wellenlänge sein.

Liegen diese Voraussetzungen vor und betrachtet man einen einzelnen Schallstrahl, welcher auf die schallharte Oberfläche trifft, so gelten dieselben Reflexionsgesetze wie in der Optik.

- Einfallender Strahl, Einfallslot und reflektierter Strahl liegen in einer Ebene
- Einfallswinkel = Reflexionswinkel

Da nun die kleinsten Abmessungen der Einzelteile des Akustikstellwandsystems im Bereich von ca. einem Meter liegen, kann für den Großteil des musikalisch relevanten Frequenzbereichs von geometrischen Reflexionen ausgegangen werden.

3.4. Schaffen eines künstlichen Raums durch Einsatz von Akustikwänden oder Orchestermuscheln

Der Einsatz von verschiedenen Arten schallreflektierender Wände oder muschelähnlichen Bauteilen ist ein seit Jahrhunderten häufig verwendetes Mittel, um bei künstlerischen Darbietungen besonders im Freien aber auch in großen Räumen im Bühnenbereich eine Art künstlichen Raum zu schaffen.

Schon in alten Amphitheatern im antiken Rom oder Griechenland wurden schallharte Wände hinter der Bühne verwendet, um die Sprecher und Sprecherinnen für das Publikum besser hörbar zu machen. Die Funktion und auch die Form solcher Wände und auch von Orchestermuscheln hat sich bis heute nicht wesentlich verändert.

Durch die schallharten Flächen im hinteren und seitlichen Bühnenbereich bzw. in manchen Fällen auch oberhalb der Bühne kommt es auf Grund der fast vollständigen Reflexion der Schallenergie in diesen Bereichen zu Schallrückwürfen, wodurch diese Energie in Richtung des Publikums gelangt. Je nach Form der Begrenzungsflächen kann es auch zu einer Art von Brennpunktbildung auf der Bühne kommen.

Die beiden folgenden Abbildungen (Abb. 4 und Abb. 5) zeigen Beispiele von Schallrückwurfgeometrien, deren Formen von den jeweils verschiedenen Geometrien der reflektierenden Wandflächen abhängig sind. Bei beiden Abbildungen befindet sich an der Stelle S ein punktförmiger Kugelstrahler als Schallquelle. [Graber et al., RA, 2009, S. 95]

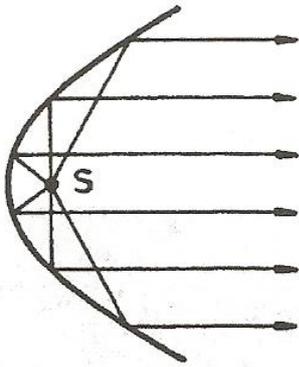


Abb. 4: Schallrückwurf parallel [Graber et al., RA, 2009]

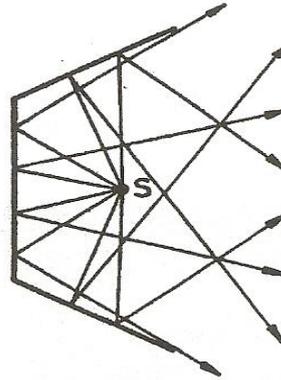


Abb. 5: Schallrückwurf konzentriert [Graber et al., RA, 2009]

3.5. Bestehende Systeme

3.5.1. Concert Shell mit diffus streuenden Stellwandelementen

[vgl. Eade et al., 1981 und Eade et al., 1982]

In den US-Patentschriften 4.279.145 und Des. 267.315 wird ein Konzertmuschelsystem beschrieben, das in den Ansprüchen und in der Ausführung ähnlich zu dem in dieser Arbeit behandelten System ist. Daher soll dieses in den USA patentierte System hier kurz beschrieben und einige aus den Patentschriften entnommene Abbildungen angeführt werden.

Die vorgestellte Concert Shell wird beschrieben als transportables System mit geringem Gewicht, das sowohl im Innenraum als auch im Freien verwendet werden kann, um die akustische Situation von künstlerischen Darbietungen zu verbessern.

Der Aufbau besteht aus einem Modulsystem aus Rahmensystem und Stellfüßen aus Metall sowie aus senkrechten Stellwänden und in einem bestimmten Winkel anbringbaren Aufsteckwänden. Die Gesamtanordnung wird in etwa in einer Halbkreisform aufgebaut und bildet somit eine Art Muschel. Das für die Wandsektionen verwendete Material ist Acrylglas und die Oberflächenstruktur entspricht einer „akustisch optimierten Form“. Wie die folgenden Abbildungen zeigen, sind diese optimierten Formen lediglich konvexe Vorsätze verschiedener Größe vor den ebenen Wandteilen. Diese dienen vermutlich dazu, eine leicht diffuse Reflexion von den Wänden zu erzeugen, um eine starke Konzentration der reflektierten Schallenergie auf der Bühne zu vermeiden.

Folgende Abbildungen (Abb. 6 bis Abb. 10) sind aus den Patentschriften entnommen und dienen dazu, das beschriebene System anschaulich zu machen.

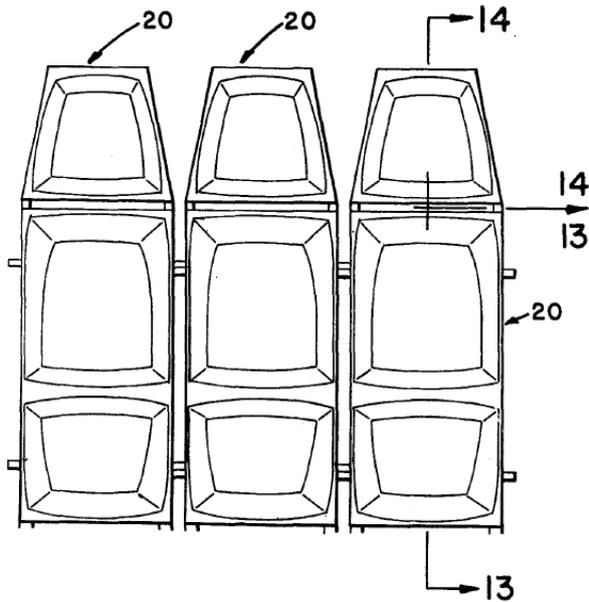


Abb. 6: Concert Shell Wandelemente Vorderansicht
[Eade et al., 1981]



Abb. 7: Concert Shell konvexe Oberflächenstruktur
[Eade et al., 1981]

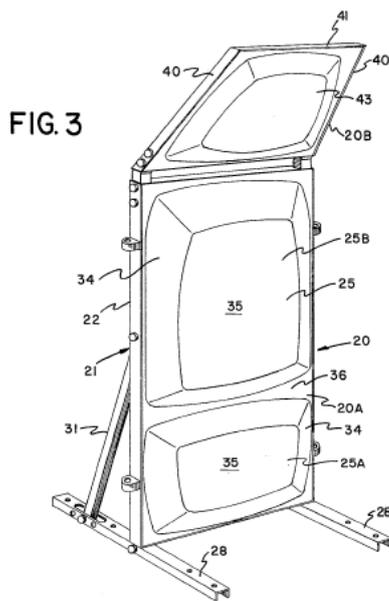


Abb. 8: Concert Shell Einzelstellwandteil mit Aufsteckwand
[Eade et al., 1981]

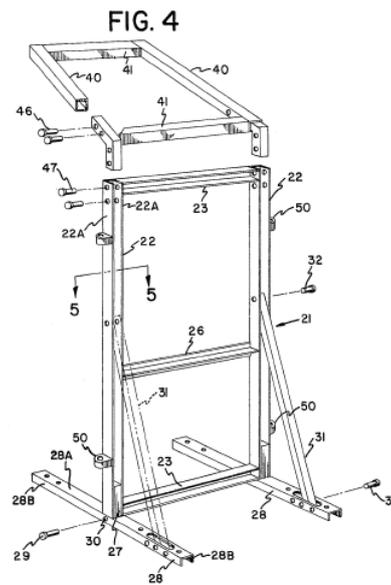


Abb. 9: Concert Shell Rahmen- und Stellfußkonstruktion
[Eade et al., 1981]

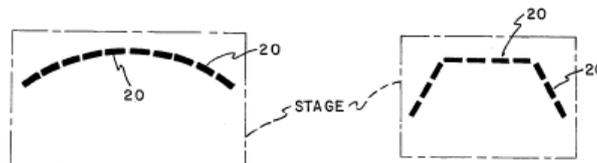


Abb. 10: Concert Shell Anordnungsvarianten [Eade et al., 1981]

3.5.1.1. Nachteile dieses Systems

Das Concert Shell System nach US-Patent weist im Großen und Ganzen doch recht viele Gemeinsamkeiten mit dem in dieser Arbeit behandelten Akustikstellwandssystem auf.

Beispielsweise sind die Form der Einzelteile sowie die Auswahl der Materialien (Metallrahmen und Acrylglas) ähnlich.

Jedoch ergeben sich bei dieser Konstruktion auch Nachteile. Einige davon, welche besonders bei dem vorgegebenen Einsatzgebiet ins Gewicht fallen würden, sind hier aufgelistet.

Durch das fixe Rahmensystem ist eine feste Verbindung zu einem Gesamtsystem mit einer Bühnenunterkonstruktion schwierig. Zwar können die Stellfüße am Boden verschraubt werden, jedoch ist eine platzsparende Verankerung im Bühnenboden ohne die Verwendung der Stellfüße nicht möglich.

Die konvexe Form der Wandelemente mag zwar akustisch gewisse Vorteile aufweisen, jedoch ist ein platzsparender Transport nur schwer möglich. Daneben sind diese Wandelemente auf Grund der außergewöhnlichen Form vermutlich Spezialanfertigungen und damit sehr teuer in der Anschaffung und auch nur schwer ersetzbar. Daneben ist Standard-Acrylglas sehr empfindlich gegenüber Beschädigungen der Oberfläche durch Schläge oder Kratzer.

3.5.2. Verschiedene Formen von Orchestermuscheln

Weltweit werden vor allem von Orchestermuscheln viele verschiedene Ausführungen verwendet, die besonders im Freien ihren Einsatz finden. Die Orchestermuscheln erfüllen dabei neben den akustischen Verbesserungen noch zusätzlich den Zweck des Schutzes der Künstler und Künstlerinnen auf der Bühne gegen Wind und Wetter.

Die folgenden Abbildungen (Abb. 11 bis Abb. 15) zeigen eine kleine Auswahl von Orchestermuscheln, welche weltweit bei diversen künstlerischen Darbietungen im Freien im Einsatz sind.



Abb. 11: Band Shell in Dallas [www.blogspot.com]



Abb. 12: Pritzker Pavilion Chicago [www.electrovoice.com]



Abb. 13: Mobile Konzertmuschel AIR [www.show4you.net]



Abb. 14: Music Bowl Sidney [www.wikipedia.org]



Abb. 15: Orchestermuschel in Sassnitz auf Rügen [www.cbdx.de]

Aber auch in großen und geschlossenen Räumen wie Opernhäusern oder Theatern wird gerne auf das Prinzip von reflektierenden Akustikstellwänden oder Orchestermuscheln zurückgegriffen. Dies geschieht besonders häufig bei kleineren Orchestern oder Ensembles, um zu verhindern, dass in den oft großen und stark absorbierenden Bereichen hinter der Bühne zu viel Schalleistung „verloren“ geht. Die folgenden Abbildungen zeigen einige Beispiele hierfür.



Abb. 16: Orchestermuschel Festspielhaus Bregenz [www.theomader.at]



Abb. 17: Orchestermuschel Wiener Staatsoper [www.irresberger.com]

Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass die verschiedenen Formen von stark reflektierenden Akustikwänden und Orchestermuscheln den gemeinsamen Zweck haben, einen meist halb offenen Raum zu schaffen, welcher zur Lenkung der Schallenergie in Richtung des Publikums und zur Verbesserung des Zusammenspiels im Bühnenbereich dient.

3.5.2.1. Nachteile dieser Systeme

Abgesehen von der in Abb. 13 gezeigten aufblasbaren Konzertmuschel sind alle in diesem Abschnitt vorgestellten Orchestermuscheln fest an einem bestimmten Ort aufgebaut. Sie bieten teilweise Platz selbst für große Orchester, sind mit verschiedenen technischen Elementen wie Beleuchtung und Tonanlage für große Veranstaltungen ausgerichtet und bieten auch Schutz gegen Wind und Regen.

Diese Eigenschaften sind für den jeweiligen Einsatz der Orchestermuscheln gut und notwendig. Doch die vorgestellten Systeme sind (abgesehen von der Konzertmuschel AIR) allesamt nicht transportabel und auch in ihrer Form und Größe nicht veränderbar oder erweiterbar.

Die mit Luft gefüllte Konzertmuschel würde zwar gewisse Forderungen wie die einfache Transportierbarkeit, den schnellen Aufbau und ein relativ geringe Gewicht erfüllen, jedoch wird diese weder Stabilität bei Wind bieten noch entspricht sie den optischen Anforderungen, die für dieses Projekt notwendig sind.

3.6. Anforderungen an das Akustikstellwandssystem

3.6.1. Akustische Anforderungen

Die wichtigste Anforderung aus akustischer Sicht ist, dass möglichst viel Schallenergie, die in den Raum hinter, über und seitlich der Künstler und Künstlerinnen abgestrahlt wird, zurück auf die Bühne bzw. in weiterer Folge zum Publikum reflektiert wird.

Daraus ergeben sich bestimmte Forderungen für das Design. Erstens sollen die Akustikstellwände genau in den oben genannten Raumrichtungen platziert werden, um eine ungehinderte Schallausbreitung dorthin zu verhindern. Daraus ergibt sich die Form der Aufstellung, auf welche in den Abschnitten 4.1 und 4.4 noch genauer eingegangen wird.

Zweitens soll möglichst die gesamte auf die Akustikstellwände auftreffende Energie in einem breiten Frequenzbereich vollständig reflektiert werden. Daher sind für den Aufbau Materialien zu verwenden, welche im interessierenden Frequenzbereich schallhart sind.

Eine weitere wichtige Forderung ist, dass die Gesamtkonstruktion des Akustikstellwandsystems möglichst keine Resonanzneigung aufweist, sodass sie durch die Anregung mit der von Musikinstrumenten abgestrahlten Schallenergie in Schwingung versetzt werden und dadurch einen negativen Einfluss auf das Klangbild nehmen könnte. Aus diesem Grund sind sehr steife Materialien zu wählen, da diese sehr schmal ausgebildete

Eigenresonanzbereiche aufweisen und daher weniger Gefahr besteht, dass diese Resonanzen angeregt werden können.

3.6.2. Anpassung an eine bestehende Bühnenunterkonstruktion

Da beim Steirischen Kammermusikfestival eine mobile Bühnenunterkonstruktion im Einsatz ist und es in vielen Fällen nötig sein wird, das Akustikstellwandsystem zusammen mit dieser Bühne zu verwenden, muss dieses in Form und Größe möglichst gut an die Bühne angepasst werden.

Dabei ist sowohl wichtig, dass der vorhandene Platz für die künstlerischen Darbietungen auf der Bühne nicht wesentlich durch die Stellwände eingeschränkt wird, es ist aber auch wichtig, dass die seitlichen und rückwärtigen Teile der Bühne möglichst gut eingefasst sind, um den akustischen Anforderungen gerecht zu werden.

Die bestehende Bühnenunterkonstruktion ist in der üblichen Aufbauvariante sechs Meter breit und 4 Meter tief. Die Stellwände sollen möglichst nahe an der hinteren Kante angebracht werden und an den Seiten nach vorne laufen, aber auf beiden Seiten der Bühne einen Auf- und Abgang ermöglichen.

Die Rahmenkonstruktion für die Akustikstellwände soll so ausgelegt werden, dass eine feste Verankerung in einem entsprechend neu geplanten Bühnenbodensystem möglich sein wird.

3.6.3. Auf- und Abbau und Transportierbarkeit

Wichtig für den Aufbau und Abbau des Akustikstellwandensystems ist, dass dieser von nur zwei Personen in etwa einer halben Stunde ohne Zuhilfenahme spezieller Hilfsmittel erledigt werden kann.

Daher ist es wichtig, dass die verwendeten Teile weder zu groß noch zu schwer ausgelegt sind. Daneben soll der Aufbau auch möglichst einfach und selbsterklärend von Statten gehen können, sodass die Durchführung von Laien erfolgen kann. Aus diesem Grund wird ein kleines Handbuch mit gängigen Aufbauvarianten und Anleitungen beigelegt werden.

Um diesen Forderungen Rechnung zu tragen, wird das Akustikstellwandensystem als Modulsystem ausgelegt, so dass der Auf- und Abbau in genau vorgegeben Reihenfolgen ablaufen kann. Entsprechende Montage- und Transporthilfen sind im Gesamtsystem integriert.

Der Transport des Akustikstellwandensystems soll auf einem einzelnen leichten Anhänger möglich sein, sodass alle Teile inklusive der Betriebsanleitung und eventuell kleinen Ersatzteilen an einem Ort beisammen sind, da dies den Einsatz wesentlich vereinfacht. Ein entsprechendes Transportsystem mit einem leichten Anhänger, welches das Transportgut gegen Verrutschen sichert und auch Beschädigungen vorbeugt, wird parallel zu dieser Projektarbeit entworfen.

3.6.4. Stabilität und Statik

Da beim Einsatz des Akustikstellwandsystems immer Menschen beteiligt sind, müssen gewisse Anforderungen für die Sicherheit erfüllt werden. Dies gilt sowohl für den Auf- und Abbau als auch für den Einsatz während künstlerischer Darbietungen.

Vor allem im Freien kann Wind oder unebener Untergrund zu Gefahrensituationen führen. Die gesamte Konstruktion ist so auszulegen, dass in geschlossenen Räumen oder bei windstillen Bedingungen auf ebenem Untergrund ein sicherer Stand gewährleistet ist. Ein stabiles Stellfußsystem sowie ein fester Verbund der Einzelteile miteinander sind daher nötig.

Nach Fertigstellung des Prototyps sind Gutachten von Sachverständigen über die Stabilität und Sicherheit einzuholen, um die Grenzwerte für den Einsatz des Akustikstellwandsystems bei Wind und Wetter genau festzulegen und auch eine rechtliche Absicherung zu haben, sodass Mensch und Material keiner Gefährdung ausgesetzt werden.

Der Aufbau und Einsatz auf sehr unebenen Untergründen oder bei Schiefstand der Bühnenunterkonstruktion wird zu unterlassen sein, um die Standfestigkeit nicht zu gefährden.

3.6.5. Langlebigkeit

Eine sehr wichtige Forderung an das Akustikstellwandsystem ist dessen Robustheit und Langlebigkeit. Da die Anschaffungskosten für ein solches System in der Praxis recht hoch sind, ist es natürlich wünschenswert, dass es für eine möglichst lange Einsatzdauer ausgelegt ist. Das heißt, dass die volle Funktionstüchtigkeit aber auch eine ansprechende Optik über lange Zeit erhalten bleiben soll.

Diese Forderungen sind sowohl bei der Auslegung der Stärke und somit Robustheit von Rahmen und Wandelementen zu beachten, was ohnehin mit den Forderungen in Abschnitt 3.6.4 zusammenfällt, als auch bei der Auswahl der Materialien.

Wichtig für die Rahmenteile ist, dass diese aus einem Material gefertigt sind, welches bruchfest, formstabil und vor allem rostfrei ist. Die Oberflächen sollen außerdem derart beschaffen sein, dass eine schöne Optik über lange Zeit garantiert werden kann.

Selbiges gilt natürlich auch für die Wandelemente. Diese sollen robust gegen Kratzer sein und außerdem eine hohe Schlagfestigkeit aufweisen.

Zur Erfüllung dieser Kriterien stehen einige Materialien zur Verfügung, welche verschiedene Vor- und Nachteile aufweisen. In Abschnitt 4.3 wird darauf allerdings noch einmal genauer eingegangen und die Gründe für die Materialauswahl werden beschrieben.

3.6.6. Optische Kriterien

Als wichtigste optische Vorgabe seitens des Steirischen Kammermusikfestivals war gegeben, dass die Akustikstellwände quasi „unsichtbar“ sein sollten. Da viele Konzerte in historisch

und architektonisch wertvollen Umgebungen wie Kirchen oder Schlosshöfen stattfinden, soll für das Publikum keine allzu große Sichteinschränkung geschaffen werden.

Diesen Anforderungen wird dadurch Rechnung getragen, dass die Wände hoch transparent ausgelegt werden und die Rahmen mit einer matten Pulverschicht beschichtet werden. Somit bleibt das Akustikstellwandsystem in erster Linie akustisches Element.

Allerdings sollte es trotzdem die Möglichkeit geben, durch den Einsatz der Akustikstellwände auch optische Akzente zu setzen. Ideen dazu wären zum Beispiel Hinterleuchtungen mit LED-Scheinwerfern oder das Integrieren von Projektionsflächen für Bilder oder Videos. Außerdem sollte es möglich sein, auf Wunsch Logos oder Schriftzüge zum Beispiel durch Sandstrahlen oder Aufkleben an den Wänden anzubringen.

Diesen Forderungen wird wiederum durch entsprechende Materialauswahl Rechnung getragen (siehe Abschnitt 4.3).

3.6.7. Weitere Anforderungen

Die in den vorigen Abschnitten beschriebenen Anforderungen decken nur die wichtigsten Kriterien für den Einsatz ab. Zusätzlich sind noch einige weitere Anforderungen zu beachten, welche sich vor allem während des Einsatzes in der Praxis ergeben werden.

Sehr wichtig ist zum Beispiel, dass eine einfache Reinigung mit gängigen Reinigungsmitteln und Geräten möglich ist. Mikrofasertücher, Glasreiniger und Abzieher für die Wandelemente sowie eventuell Polituren für die Wandelemente und die Metallrahmen sollten für die Reinigung ausreichend sein, um eine schöne Optik aufrechterhalten zu können.

Ein weiterer Faktor ist die einfache Austauschbarkeit von eventuell beschädigten Teilen und die rasche und einfache Beschaffung von Ersatzteilen. Diese Forderungen implizieren den Einsatz von einfach zu beschaffenden Materialien in einfachen Abmessungen und Schnittformen sowie das Beziehen dieser Teile von möglichst wenigen Produktions- und Handelsbetrieben.

Die Kontaktdaten dieser Produktionspartner mit den jeweils zuständigen Ansprechpartnern werden daher auch im Handbuch vermerkt sein, sodass eine rasche und unkomplizierte Anforderung von Ersatzteilen möglich wird.

3.6.8. Erweiterbarkeit und Möglichkeiten zur Adaptierung

Der im Zuge dieser Arbeit hergestellte und aufgebaute Prototyp bietet zwar einige verschiedene Aufbauvarianten, jedoch sind diese besonders auf den Einsatz beim Steirischen Kammermusikfestival ausgelegt. Das heißt, dass bestimmte Vorgaben wie etwa eine Anpassung an die Größe einer bestehenden Bühne berücksichtigt wurden.

Damit aber der Einsatz für verschiedene Events und Nutzer möglich wird, sollte es einfache Möglichkeiten zum Aufbau in verschiedenen Varianten und Größe geben. Die Anzahl der Stellteile sowie Winkel und Größe der Aufsteckwände sollen an jeden Kundenwunsch

Theorie und Grundlagen

individuell adaptiert werden. Auch eine Erweiterbarkeit um gleiche oder andere Teile soll möglich sein. Fix dabei bleibt allerdings der Aufbau als Modulsystem bestehend aus den Rahmenteilen, den Stellwände und den Aufsteckwänden.

Durch die entsprechende Konstruktion der Stellfüße ist sowohl ein Einsatz auf ebenen Böden oder einer Bühne ohne eine zusätzliche Befestigung möglich als auch die Verbindung zu einer entsprechenden Bühnenunterkonstruktion mit speziell angepassten Befestigungsmöglichkeiten.

4. Realisierung

Die Grundidee zum Entwurf von Akustikstellwänden und somit für die Durchführung dieses Projekts entstand während der Mitarbeit bei den Konzerten des Steirischen Kammermusikfestivals. Oftmals gab es nach Konzerten im Freien oder zum Beispiel in Kirchen die Rückmeldung von Musikern, dass das Zusammenspiel auf Grund der schlechten akustischen Voraussetzung schwierig sei und auch das Hörempfinden im Publikumsbereich war teilweise recht unbefriedigend. Als Abhilfe wurde beim Festival zwar ein Stellwandsystem verwendet, jedoch ist dieses schon reichlich in die Jahre gekommen und auch schon mehrfach beschädigt worden. Außerdem ist dieses bestehende System in keiner Weise akustisch optimiert noch bietet es genügend Standfestigkeit bei Wind und Wetter. Aus diesen Gründen wurde der Plan geboren, ein neues und wesentlich besseres System zu entwickeln, das speziell auf diesen Zweck ausgerichtet ist und zusätzlich zu den akustischen Verbesserungen vor allem bezüglich Stabilität und Langlebigkeit sowie beim Handling deutliche Vorteile bringt.

4.1. Erste Überlegungen zum Design und Aufbau

Die ersten Überlegungen zum Design und Aufbau waren vor allem durch die praktischen Anforderungen bestimmt. Den schon in der Einleitung (Kapitel 1) und auch im Abschnitt 3.6 festgelegten Kriterien sollte so weitestgehend Rechnung getragen werden.

Aus den Abmessungen des bereits in Verwendung stehenden Bühnensystems ergaben sich die ungefähren Maße des Akustikstellwandensystems, da dieses die Bühnenrückseite und die Seiten möglichst gut einfassen sollten, jedoch wenig Platzeinschränkung passieren sollte und rechts und links Platz für Auf- und Abgänge zur Bühne freibleiben mussten. Klar war auch, dass die Muschelform die akustisch beste Variante darstellen würde, um die Schallenergie bestmöglich in Richtung Bühne und Publikum zu reflektieren. Aus den Abmessungen der Bühne und der Muschelform ergab sich folgende Aufstellvariante für die senkrechten Teile. Diese wird in Verwendung zusammen mit der Bühne die gängigste Aufbauvariante darstellen. Die folgende Abbildung (Abb. 18) zeigt einen Entwurf für diese Aufstellvariante im Grundriss.

Realisierung

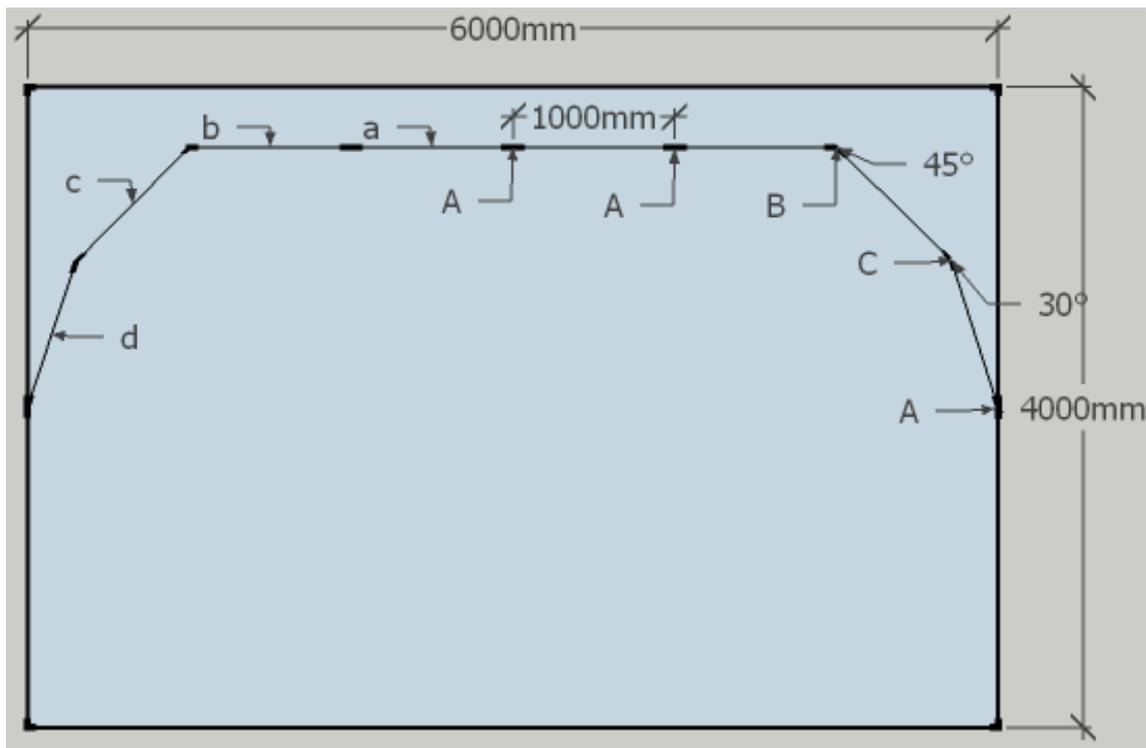


Abb. 18: Skizze Aufstellung mit Bühne Grundriss

Wie in Abb. 18 zu erkennen ist, betragen die Abmessungen der Bühnen sechs mal vier Meter (Breite mal Tiefe), die Höhe der Bühnenelemente beträgt einen halben Meter. Im vorderen Bereich ist an den Seiten jeweils Platz für einen Aufgang von ca. einem Meter Breite vorzusehen. Dieser Aufgang wird je nach örtlicher Gegebenheit entweder links oder rechts oder auch auf beiden Seiten platziert.

Zu beachten ist, dass die nutzbare Fläche auf der Bühne durch den Einsatz der Akustikstellwände möglichst wenig eingeschränkt werden soll. Trotzdem sollte eine große reflektierende Wandfläche erreicht werden, die auch den Großteil der Bühnenrückseite und einen Teil der Seiten rechts und links abdeckt. Aus diesen Überlegungen und den akustischen Vorteilen der Muschelform ergab sich der oben gezeigte Grundriss für die größtmögliche Aufstellungsvariante auf der Bühne.

Insgesamt sind dabei acht senkrechte Stellwandteile (a, b, c, d - je zweimal) im Einsatz, die jeweils eine Breite von einem Meter aufweisen. Vier Elemente (jeweils zweimal a und b) davon werden in einem Abstand von ca. 30 cm parallel zur hinteren Bühnenkante aufgestellt, sodass bei Verwendung der Stellfüße genügend Platz für eine sichere Aufstellung bleibt. Für den späteren Einsatz mit der entsprechenden Unterbühne mit Befestigungsmöglichkeiten für die Rahmenteile im Bühnenboden kann die Aufstellung auch direkt an der hinteren Bühnenkante erfolgen.

Durch die Aufstellung der jeweils beiden äußeren Stellwandteile (c und d jeweils rechts und links) in den entsprechenden Winkeln ist die maximale Ausnützung der Bühnenfläche

Realisierung

möglich. Die Teile c sind gegenüber den Teilen b um einen Winkel von 45° gedreht angeordnet und die Teile d in einem Winkel von 30° gegenüber den c-Teilen.

Die Großbuchstaben A, B und C in der Skizze zeigen an, dass drei verschiedene Ständerteile zur Befestigung der Wandelemente nötig sind.

Um die Muschelform aber nicht nur in der senkrechten Ebene zu realisieren, sondern zusätzlich auch noch im oberen Bereich der Wände weiterzuführen, wurde der Einsatz von zusätzlichen Aufsteckteilen beschlossen, welche in einem bestimmten Winkel anzubringen sind und deren Abmessungen so ausgelegt sind, dass sie mit den jeweils angrenzenden Aufsteckteilen nahtlos aneinander grenzen. Diese Aufsteckteile sind für den Prototyp vorerst mit jeweils einmal 45° und einmal 30° aus der Senkrechten entworfen. Aufsteckwände müssen aber nicht zwingend verwendet werden. Das System steht auch ohne sie stabil, jedoch bringen die Aufsteckteile natürlich akustisch noch eine deutliche Verbesserung.

Folgende Abbildungen wurden als Grundlage für die Planung des Rahmensystems und für die Materialbestellung des Polycarbonatglases verwendet. Insgesamt ergeben sich - jeweils in der größtmöglichen Aufstellungsvariante – drei verschiedene Aufbauvarianten.

Die Basis bilden dabei jeweils die acht senkrechten Stellwände, welche wie in Abb. 18 gezeigt angeordnet werden. Die Abmessungen eines dieser Elemente sind in der folgenden Skizze (Abb. 19) zu sehen. Die senkrechten Stellwände können auch ohne Aufsteckwände verwendet werden und bilden so eine senkrechte schallharte Fläche.

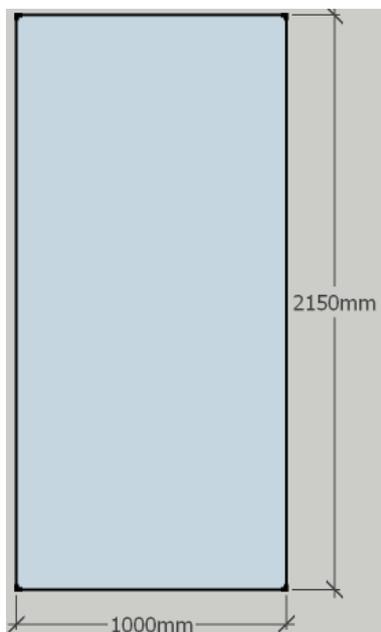


Abb. 19: Skizze Stellwände senkrecht

Die Breite der senkrechten Stellwände beträgt (wie bei allen anderen Wandteilen ebenfalls) 1000 mm und die Höhe 2150 mm, die Materialstärke beträgt 10 mm. Die Höhe steigt bei Verwendung des Stellfuß- und Rahmensystems auf 2300 mm und ist bewusst so gewählt.

Realisierung

Um eine möglichst große Reflexionsfläche zu bieten und nebenbei bei Verwendung der Aufsteckwände keine Behinderungen für KünstlerInnen auf der Bühne darzustellen, wäre eine sehr große Höhe natürlich optimal. Jedoch muss darauf Rücksicht genommen werden, dass das Anbringen der Aufsteckwände mit einer einfachen kleinen Stehleiter möglich bleibt und dass das System niedrig genug bleibt, um in Räumen problemlos verwendet zu werden, ohne an Decken, Lampen oder ähnlichem anzustoßen.

Der Bodenabstand von 150 mm bei Verwendung der Rahmen mit den Stellfüßen ist sinnvoll, da es somit möglich ist, unterhalb der Wände Kabel für die Bühnentechnik durchzuführen und/oder Beleuchtungssysteme unter den Akustikstellwänden zu platzieren.

Wie schon erwähnt, gibt es die Möglichkeit zusätzlich zu den senkrechten Stellwänden Aufsteckwände zu verwenden, welche eine Muschelform andeuten und im oberen Bereich der Wände zusätzliche Reflexionsflächen bieten. Für die zwei Varianten mit Neigungswinkeln von 45° bzw. 30° aus der Senkrechten sind eigene Aufsteckwandteile zuzuschneiden. Diese unterscheiden sich für die beiden Winkelvarianten, da sich jeweils geschlossene Flächen bilden sollten und die Zuschnitte damit verschieden sind. Die Grundabmessungen mit einer Breite von 1000 mm, einer Höhe von 750 mm und der Materialstärke von 10 mm unterscheiden sich nicht, aber die Zuschnittwinkel der Aufsteckwandteile sind unterschiedlich.

Diese können jedoch ganz einfach aus den bekannten Winkeln aus dem Grundriss und den gewünschten Neigungswinkeln nach den einfachen Gesetzen der Trigonometrie (Winkelfunktionen) berechnet werden.

Nachstehende Skizzen zeigen die Zuschnittformen der Aufsteckwandteile für die beiden Varianten mit 45° (Abb. 20 bis Abb. 23) und 30° (Abb. 24 bis Abb. 27). Die Bezeichnungen a, b, c und d geben die Position der Aufsteckwände analog zu jenen in Abb. 18 an. Alle Aufsteckwandteile sind je zweimal für den Aufbau notwendig.

Aufsteckwände für 45° Neigungswinkel:

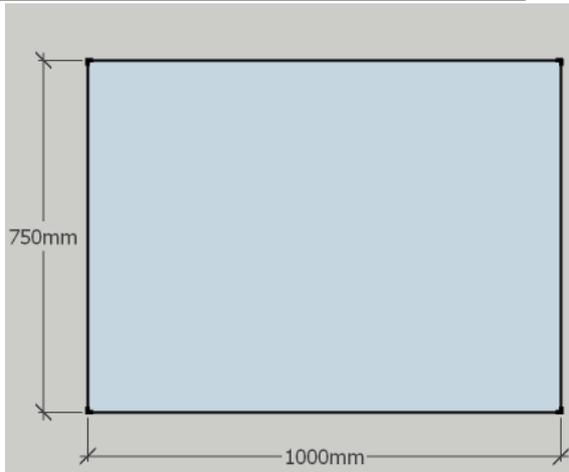


Abb. 20: Skizze Aufsteckwände a 45°

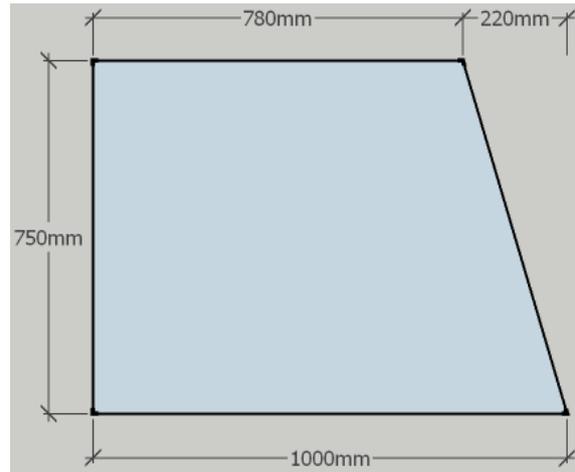


Abb. 21: Skizze Aufsteckwände b 45°

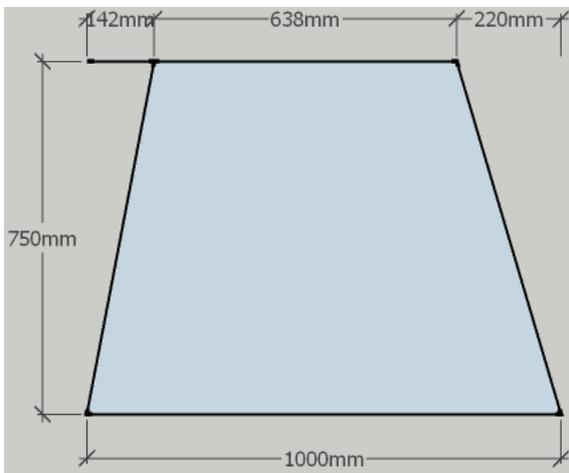


Abb. 22: Skizze Aufsteckwände c 45°

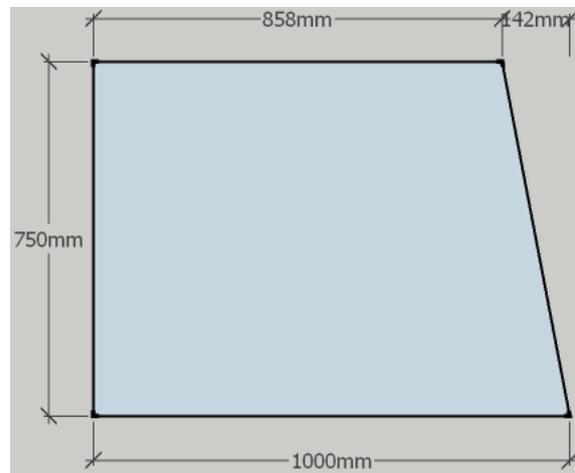


Abb. 23: Skizze Aufsteckwände d 45°

Bei Verwendung der Aufsteckwände unter einem Winkel von 45° ergibt sich zusammen mit den senkrechten Stellwänden eine Höhe bis zur Oberkante von 2680 mm, die durch einen zusätzlichen Bodenabstand von 150 mm bei Verwendung des Stellfuß- und Rahmensystems schlussendlich 2830 mm beträgt.

Aufsteckwände für 30° Neigungswinkel:

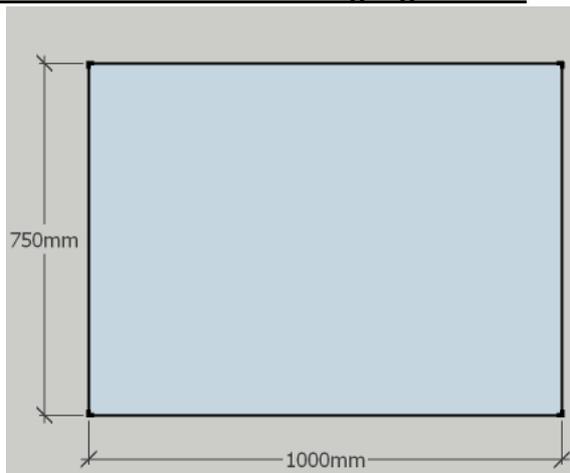


Abb. 24: Skizze Aufsteckwände a 30°

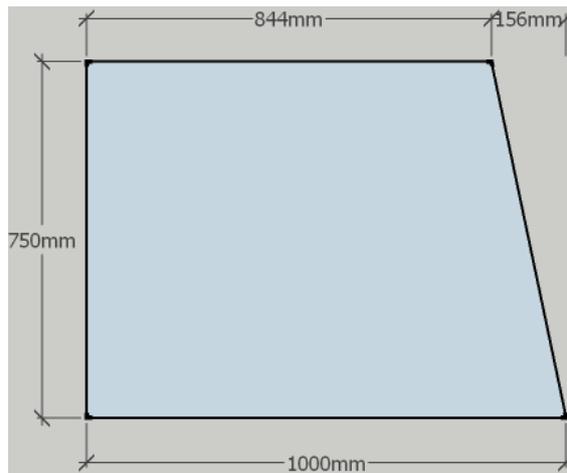


Abb. 25: Skizze Aufsteckwände b 30°

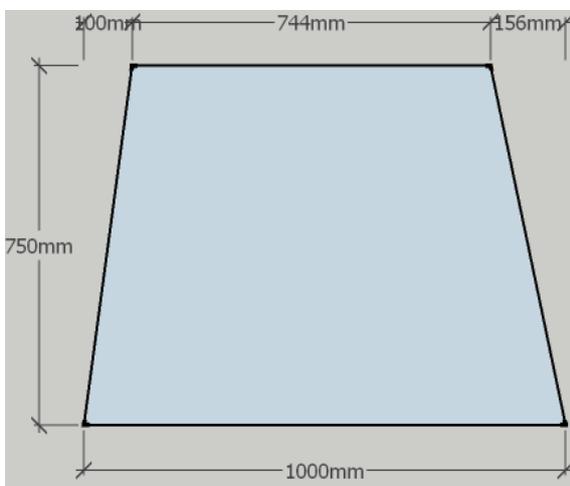


Abb. 26: Skizze Aufsteckwände c 30°

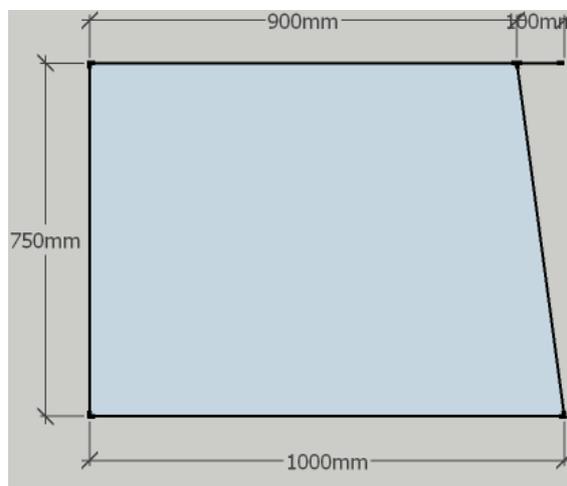


Abb. 27: Skizze Aufsteckwände d 30°

Bei Verwendung der Aufsteckwände unter einem Winkel von 30° ergibt sich zusammen mit den senkrechten Stellwänden eine Höhe bis zur Oberkante von 2800 mm, die durch einen zusätzlichen Bodenabstand von 150 mm bei Verwendung des Stellfuß- und Rahmensystems schlussendlich 2950 mm beträgt.

Bei genauer Betrachtung der obigen Skizzen ist zu erkennen, dass die Aufsteckwände a für beide Varianten genau gleich sind. Dies liegt daran, dass sie an den beiden mittleren Stellwänden angebracht werden, welche parallel zur Bühnenkante stehen und daher keinen Winkel zu den benachbarten Wänden aufweisen. Daher sind die Aufsteckteile sowohl für 45° als auch für 30° Neigungswinkel gleich und müssen daher insgesamt nur zweimal produziert werden.

Insgesamt sind für die drei Varianten im Vollausbau somit 22 Wandteile notwendig (8 senkrecht + 14 Aufsteckteile). Informationen zu den verwendeten Materialien und Daten zum Gesamtgewicht der Konstruktionen finden sich in den Abschnitten 4.3 bzw. 4.6.

Enorm wichtig sind natürlich die Überlegungen zu Stabilität und Standfestigkeit des Akustikstellwandsystems sowohl bei Auf- und Abbau als auch beim Einsatz während

Realisierung

künstlerischer Darbietungen. Eine entsprechende feste und stabile Verbindung der Einzelteile miteinander sowie eine gute Befestigungsmöglichkeit auf der Bühne und eine stabile Standfußkonstruktion für einen sicheren Stand auf anderen Untergründen ist somit notwendig. Diese Aufgaben wurden allerdings an Fachleute abgegeben, um die Sicherheit auf alle Fälle zu gewährleisten. Die daraus resultierenden Konstruktionen sind in Abschnitt 4.5 angeführt.

Grundlegende Überlegungen waren auch bezüglich eines möglichst einfachen Auf- und Abbaus und sinnvoller Transportmöglichkeiten anzustellen. Es sollte garantiert werden, dass das neu entwickelte System von nur zwei Personen in einer halben Stunde aufgebaut werden kann und eine kompakte Transportmöglichkeit besteht. Der Realisierung in Form eines Modulsystems bestehend aus einfachen und möglichst leichten aber trotzdem stabilen Einzelteilen war hier die beste Variante. Diese Vorgaben wurden ebenfalls an Fachleute weitergegeben, welche sich genaue Konstruktionspläne dazu überlegten und sogar bestimmte Montagehilfen für die Praxis integrierten. Näheres dazu findet sich ebenfalls in Abschnitt 4.5.

4.2. Projektpartner aus Industrie und Wirtschaft

Nach den ersten Überlegungen zu Design und Aufbau wurde auch klar, dass zur Durchführung des Projekts einige Partner aus der Wirtschaft und Industrie nötig sein würden. Neben dem Steirischen Kammermusikfestival unter der Leitung von Holger Hütter, das quasi als Auftraggeber und Kunde für das Projekt auftritt, waren und sind noch einige andere Unternehmen und Personen notwendig

Als Finanzierungs- und Vermarktungspartner sowie als Projektpartner zur Unterstützung bei der Herstellung von Kontakten in die Industrie konnte die AVL Cultural Foundation unter der Leitung von Kathryn List gewonnen werden. Über die AVL Cultural Foundation wurde auch der Kontakt zum AVL Supply Chain Management und dessen Leiter Dr. Christian Haring hergestellt, über das die Einholung von Angeboten und die Bestellung der Wandelemente bei der Firma Hostra GmbH abgewickelt wurde.

Die Firma Kiefer Technic in Bad Gleichenberg unter der Leitung von Astrid Kiefer beteiligte sich als wichtiger Projektpartner für die Planung und die Herstellung der Rahmen- und Ständerteile sowie als Berater in Sachen Statik und Sicherheit und übernahm außerdem die komplette Endmontage für den Prototyp. Mitwirkend waren dabei Projektleiter Manfred Suppan, Produktions- und Montageleiter Mario Käfer sowie der technische Produktentwickler Ing. Michael Rauch. Sollte die Herstellung in einer Kleinserie Realität werden, wird die Firma Kiefer als Produktionspartner die Rahmenproduktion weiterbetreiben.

Um nach der Fertigstellung des Prototyps die akustische Wirkung auch an Hand von objektiven Messergebnissen festmachen zu können, war die Messung in einer dafür

geeigneten Umgebung nötig. Dazu konnte die Akustikabteilung der AVL Graz unter der Leitung von DI (FH) Bernhard Graf als Projektpartner gewonnen werden, sodass die Messungen am Akustikrollenprüfstand der AVL durchgeführt werden konnten.

Um einerseits das Projekt als Toningenieursprojekt einreichen zu können und andererseits zur Unterstützung bei der Durchführung von akustischen Simulationen mit EASE stand DI Dr. Franz Graf von der Technischen Universität Graz als Betreuer und Berater während der Projektlaufzeit zur Seite.

4.3. Auswahl der Materialien

Aufgrund des einfachen Aufbaus des Akustikstellwandsystems ist der Einsatz von nur zwei verschiedenen Materialien notwendig. Zum einen sind die Rahmen- und Stellfußteile sowie etwaige zur Verschraubung und Befestigung notwendige Teile aus einem Metall zu fertigen und zum anderen ist für senkrechten sowie die aufsteckbaren Wandteile ein möglichst leichter und hoch transparenter Kunststoff zu wählen.

Für die Fertigung der Rahmen- und Stellfüßelemente sowie für Verschraubungen wurde von der Firma Kiefer verzinkter Stahl mit einer Pulverbeschichtung vorgeschlagen. Dieser ist wesentlich billiger als zum Beispiel Edelstahl oder Aluminium und ist einfach zu verarbeiten bzw. zu reparieren, falls Schäden entstehen sollten. Gegenüber leichteren Metallen wie zum Beispiel Aluminium bietet sich außerdem ein Vorteil in Stabilität und Robustheit der Oberfläche. Durch das Verzinken des Stahls wird auch Rostfreiheit (natürlich nur bis zu einem gewissen Grad an Belastung) garantiert und die zusätzliche mattweiße Beschichtung (Farbton RAL 9006 – Weißaluminium → vgl. Abb. 28) bietet weiteren Schutz für die Oberflächen, kann bei Beschädigung leicht ausgebessert werden und lässt die Rahmen optisch relativ unauffällig wirken. Die genauen Materialkenndaten des verwendeten Stahls sind im Anhang 2 Abschnitt 11.1.1 nachzulesen.



Abb. 28: RAL 9006 [www.sunflex.de]

Als Material für die Wandelemente ist ein Kunststoff zu wählen, welcher einerseits leicht aber trotzdem robust gegenüber Beschädigungen durch Kratzer und Schläge ist, um eine schöne Oberfläche für lange Zeit zu erhalten. Wichtig ist bei der Materialwahl für die Herstellung des Prototyps aus den in Abschnitt 3.6.6 angeführten Gründen, dass die Wandelemente hoch transparent ausgelegt sind und somit quasi „unsichtbar“ bleiben.

Für die Herstellung weiterer Akustikstellwandsysteme sollen aber auch andere Möglichkeiten offengehalten werden, um die Akustikwände je nach Kundenwunsch auch optisch in Szene setzen zu können. Hinterleuchtungen oder Lichtleitung durch die Elemente

Realisierung

sowie die Integration von Projektionsflächen oder das Eingießen oder Einsetzen von Logos oder Schriftzügen sind nur jene Ideen, welche hier genannt werden. Durch Einsatz des „richtigen“ Materials kann hier verschiedenen Kundenwünschen sehr flexibel entsprochen werden.

Um all diese Anforderungen zu erfüllen, gibt es eigentlich nur zwei verschiedene Materialien zur Auswahl. Zum einen Standard-Acrylglas und zum anderen Polycarbonatglas. Diese Materialien sind in ihren Grundeigenschaften sehr ähnlich. Beide weisen dasselbe spezifische Gewicht auf. Die Möglichkeiten zur Ausführung in unterschiedlichen Farben, Oberflächenstrukturen oder als Lichtleit- oder Projektionsflächen ist bei beiden Materialien gegeben. Beide Materialien sind hochtransparent (d.h. glasklar) erhältlich.

Zwar bietet Acrylglas in der Anschaffung einen nicht unwesentlichen Kostenvorteil, jedoch ist die Oberfläche von Polycarbonat deutlich kratzfester und schlagfester. Um also die Langlebigkeit sicherzustellen, wurde Polycarbonat als Material gewählt. Dieses wurde über die Firma Hostra GmbH in den jeweiligen Zuschnittformen bezogen und die sägerauen Kanten wurden im Nachhinein entgratet und mit Phasen versehen, um die Verletzungsgefahr beim Hantieren zu verringern. Abb. 29 zeigt beispielhaft Schnittteile aus Polycarbonatglas.



Abb. 29: Polycarbonatglas [www.findeis.de]

Die Materialkenndaten von Polycarbonat sind im Anhang 2 Abschnitt 11.1.2 nachzulesen. Um den Vergleich mit den Kenndaten von Standard-Acrylglas herzustellen, sind verschiedene Datenbanken im Internet zu finden oder es kann bei Herstellern und Händlern wie zum Beispiel bei Hostra GmbH direkt darum angefragt werden.

Als Materialstärke für das Polycarbonatglas wurde 10 mm gewählt. Zwar werden die Wandteile bei einem spezifischen Gewicht von $1,19 \text{ g/cm}^3$ schon recht schwer, andererseits ist aber eine hohe Belastbarkeit und Stabilität sowie eine geringe Schwingneigung aufgrund der hohen Festigkeit garantiert.

4.4. Entwürfe für die verschiedenen Aufbauvarianten

Die schon in Abschnitt 4.1 abgebildeten Entwurfszeichnungen für drei verschiedene Aufbauvarianten wurden in dieser Form an die Firma Kiefer weitergegeben und dort in Konstruktionspläne umgesetzt. Alle drei Aufbauvarianten werden im Vollaufbau im gleichen

Realisierung

Grundriss aufgestellt. Der Unterschied besteht in der Verwendung der Aufsteckwände in verschiedenen Winkeln. Folgende drei Aufbauvarianten bietet der Prototyp:

- Aufbau ohne zusätzliche Aufsteckwände nur mit den senkrechten Stellwänden
- Aufbau als Konzertmuschel mit den Aufsteckwänden mit einer Neigung von 30° aus der Senkrechten
- Aufbau als Konzertmuschel mit den Aufsteckwänden mit einer Neigung von 45° aus der Senkrechten

Natürlich müssen in der Praxis nicht immer alle Stellwandteile im oben gezeigten Grundriss aufgestellt werden. Es ist zum Beispiel möglich, eines oder mehrere der Mittelteile wegzulassen oder zusätzliche baugleiche Teile einzufügen, auch das Verzichtens auf die Randteile stellt kein Problem dar. Auch Bauteile für gänzlich andere Aufbauvarianten können auf Kundenwunsch basierend auf der simplen Grundstruktur einfach und schnell berechnet und produziert werden.

Jedoch wurden die bei Kiefer gefertigten Konstruktionspläne (siehe Abschnitt 4.5) für die Produktion des Prototyps auf Basis der in Abschnitt 4.1 gezeigten Entwurfszeichnungen erstellt.

4.5. Konstruktionspläne

Basierend auf den Skizzen zum Design und Aufbau (siehe Abschnitt 4.1) wurden von der Firma Kiefer Konstruktionspläne für die Gesamtkonstruktion bestehend aus den Wandteilen und einem Rahmen- sowie Stellfußsystem angefertigt (Abb. 30, Abb. 31 und Abb. 32).

Die Konstruktionspläne entsprechen dabei genau den festgelegten Anforderungen hinsichtlich der Bauformen, das heißt, dass die Aufstellung im Grundriss und die Form der Aufsteckteile für zwei verschiedene Winkel (45° und 30° aus der Senkrechten) berücksichtigt wurden.

Entsprechend der Vorgaben wurde ein Rahmen- und Stellfußsystem entworfen, das sowohl hinsichtlich Fertigung, Auf- und Abbau und Stabilität optimiert ist. Details zur Ausführung der Rahmen- und Stellfußteile befinden sich im nächsten Abschnitt 4.6.

Abb. 30 zeigt einen Grundrissplan nach der Vorgabe aus Abb. 18 mit den dazu entwickelten Stehertypen A, B und C und den Y-förmigen Stellfüßen für einen sicheren Stand.

Realisierung

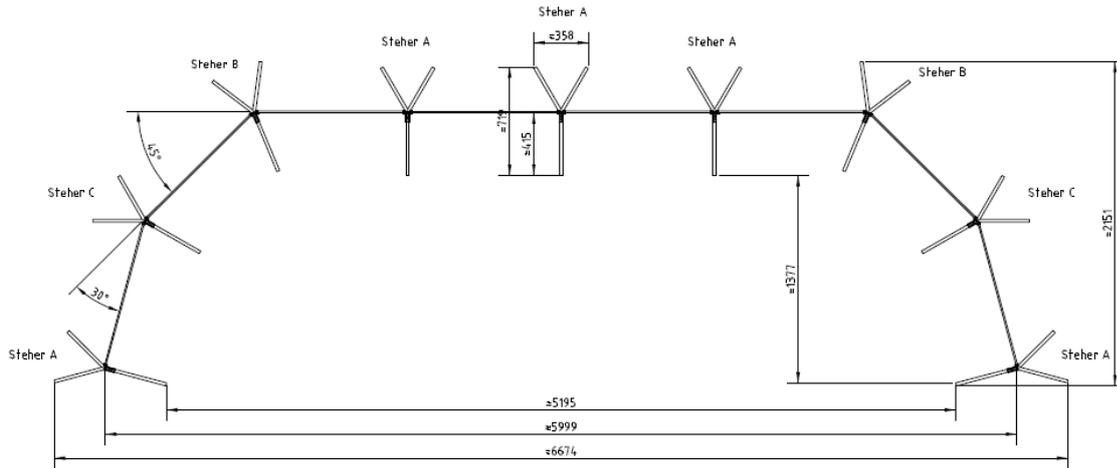


Abb. 30: Anordnung Grundriss [Kiefer]

Abb. 31 zeigt eine Darstellung aller Wandteile für die verschiedenen Aufbauvarianten mit Aufsteckteilen. Unten dargestellt sind die acht senkrechten Wandteile mit einer Gesamthöhe von insgesamt 2300 mm, welche die Basiskonstruktion bilden. Diese werden durch neun Steher fixiert, welche auch gleichzeitig die Befestigungsbasis für die Aufsteckteile bilden. In der Mitte und oben in der Abbildung sind die Aufsteckteile für 45° bzw. 30° Neigungswinkel dargestellt. Diese werden wiederum über ein spezielles Rahmensystem an den Stehern der senkrechten Elemente befestigt, sodass die Einzelteile nahtlos aneinander gereiht eine stabile Konstruktion und durchgehend geschlossene Reflexionsfläche darstellen.

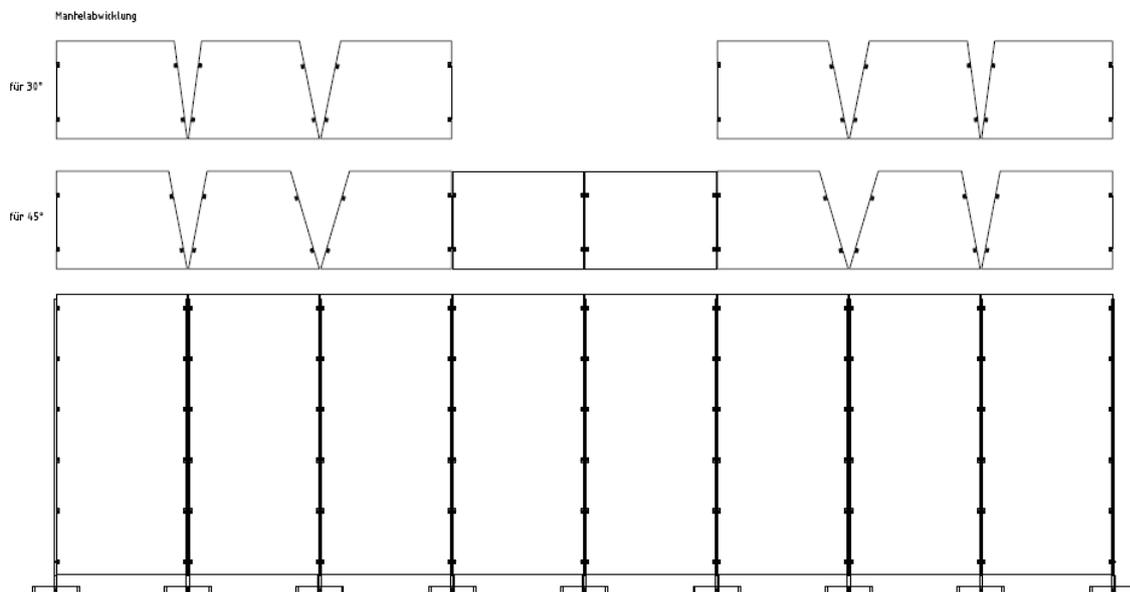


Abb. 31: Wandteile mit Rahmen [Kiefer]

In Abb. 32 sind die Vertikalschnitte (seitliche Betrachtung) der zwei Rahmenteile für die beiden Aufsteckvarianten abgebildet (Variante 1, links: 45°; Variante 2, rechts: 30°). Wie schon in Abschnitt 4.1 erwähnt, beträgt der Abstand der Unterkanten der senkrechten Wandteile zum Boden bei Verwendung der Stellfüße 150 mm (siehe Abb. 32) und auch alle anderen Höhen sowohl für die senkrechten Teile als auch die Gesamthöhen mit den

Realisierung

Aufsteckwänden wurden schon vorher beschrieben. Gut sichtbar in den beiden Vertikalschnitten sind die Winkel für die Aufsteckwände, welche jeweils aus der Senkrechten angegeben werden.

Details zu den Rahmen- und Stellfußkonstruktionen werden im nächsten Abschnitt (4.6) besprochen. Jedoch sind die Abmessungen auch hier schon sichtbar und auf ein Detail soll schon eingegangen werden. Bei der Erstellung der Konstruktionspläne wurde bei Kiefer natürlich auch darauf Rücksicht genommen, welches Gewicht die Rahmen aufnehmen müssen - Gewichtsangaben zu den Wandteilen (in den Abbildungen mit „Plexiglas 10 mm“ benannt) sind in den Vertikalschnitten angegeben. Mit Hilfe dieser Daten wurde ein Konzept für die Befestigung der Wandteile an den Rahmen entwickelt. Dazu wurden ein Verschraubungssystem gewählt (genauere Beschreibung ebenfalls in Abschnitt 4.6). Die Abstände zwischen diesen Befestigungspunkten und damit die Anzahl dieser sind in den Vertikalschnitten durch zusätzliche Pfeile gekennzeichnet.

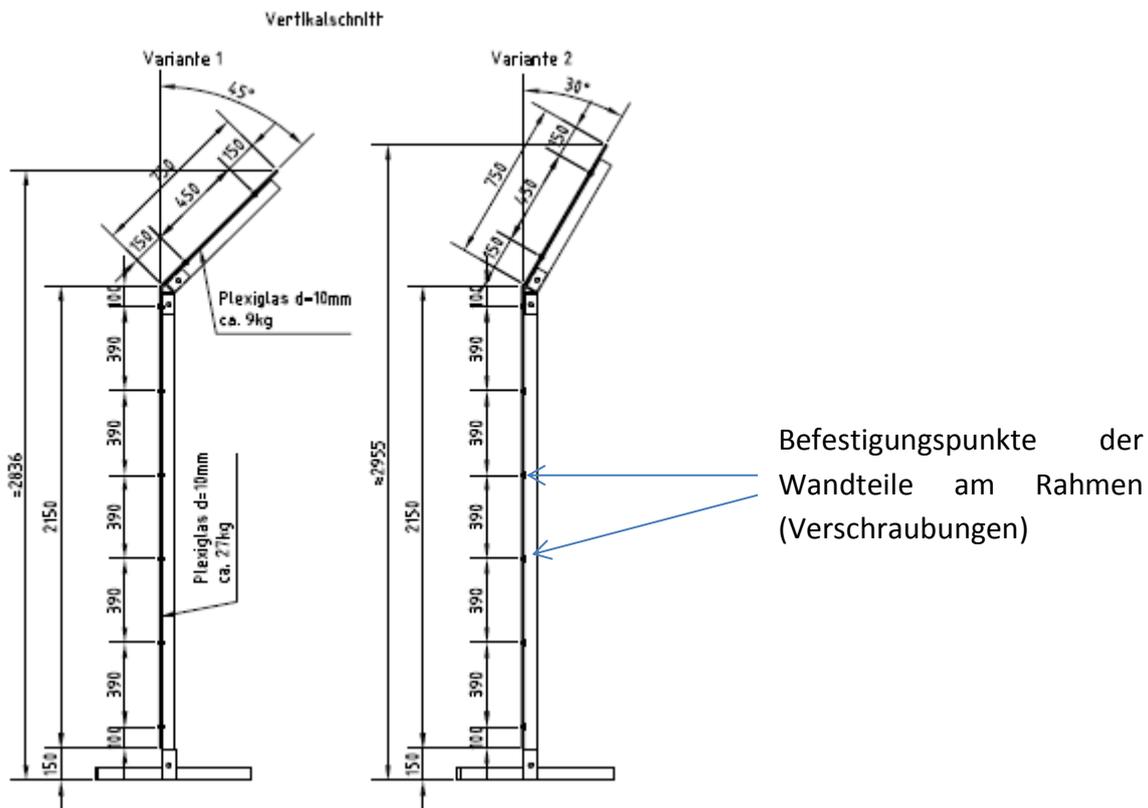


Abb. 32: Vertikalschnitte 45° und 30° [Kiefer]

4.6. Rahmen- und Stellfußkonstruktionen und Verschraubungen

Es gibt einige wichtige Faktoren, welche durch das Rahmen- und Stellfußsystem berücksichtigt werden müssen. Stabilität und Sicherheit, Langlebigkeit und gute Austauschbarkeit von defekten Teilen sowie das Sicherstellen einer möglichst einfachen Handhabung für Auf- und Abbau sind die wesentlichsten davon.

Realisierung

Die Rahmenteile bilden sozusagen das Skelett für das gesamte Akustikstellwandssystem. Die Wandteile werden eben an diesem Skelett befestigt. Dazu passend wird für den Prototyp (noch kein Einsatz im Gesamtsystem mit entsprechender Bühnenkonstruktion) auch das Stellfußsystem eingesetzt, das den sicheren Stand der Gesamtkonstruktion garantieren muss.

Die oben genannten Anforderungen wurden von Firma Kiefer berücksichtigt und mit den durch die Produktion gegebenen Vorgaben kombiniert. Sämtliche für die Stabilität notwendigen Berechnungen wurden bei Kiefer durchgeführt und in den Konstruktionsplänen umgesetzt. Die daraus entstandenen Pläne sind in diesem Abschnitt in den folgenden Abbildungen zu sehen.

Abb. 33 zeigt die Steher für Variante 1 mit 45° Neigungswinkel der Aufsteckwände. Die Steher A, B und C sind für die Positionen entsprechend Abb. 18 notwendig. Für den Aufbau werden Vierkant-Formrohre aus Stahl verwendet, welche zur längeren Haltbarkeit und aus Gründen einer schöneren Optik vollverzinkt und pulverbeschichtet sind (genaue Materialeigenschaften im Anhang 2 (Abschnitt 11.1.1)).

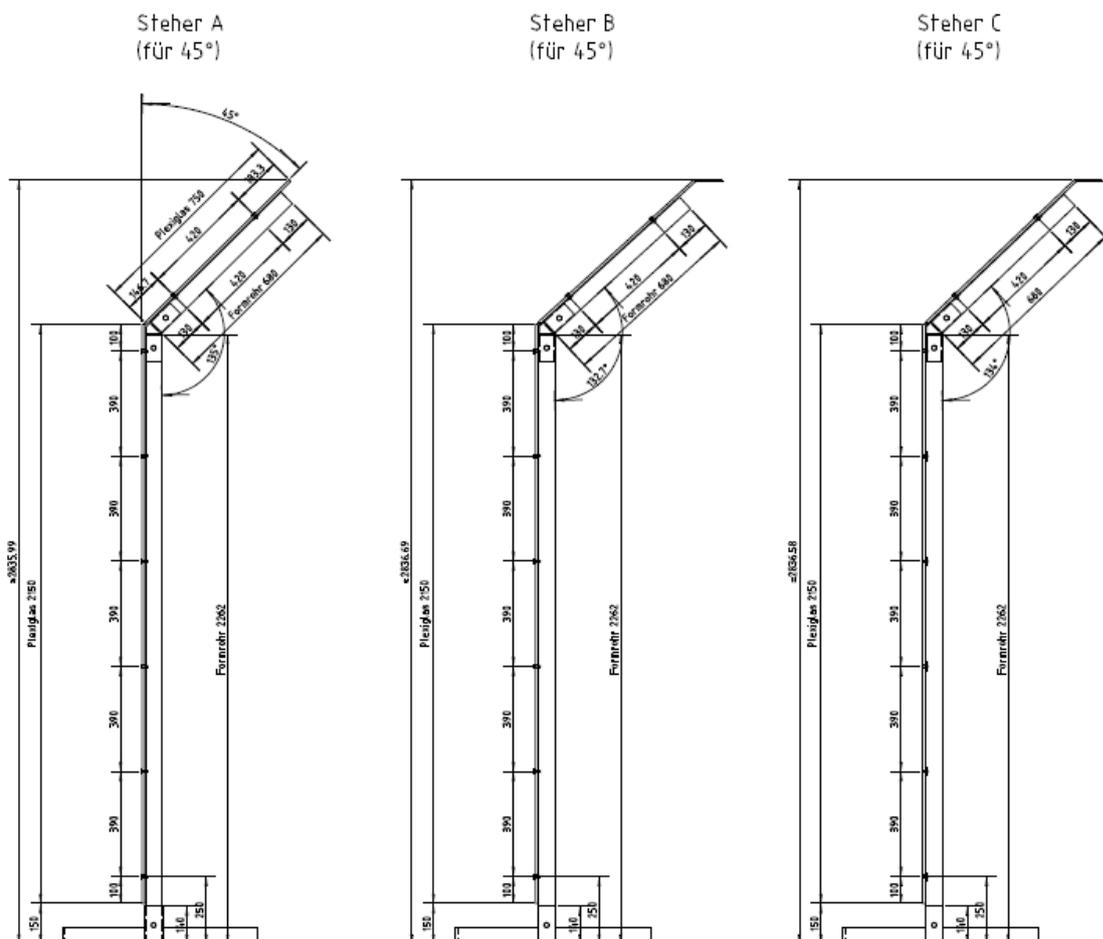


Abb. 33: Steher 45° [Kiefer]

Analog zu den Stehern für Variante 1 gibt es natürlich auch für Variante 2 mit einem Neigungswinkel von 30° ein Stehersystem (Abb. 34). Dieses besteht wiederum aus den

Realisierung

Stehern A, B und C. Dabei werden für die senkrechten Elemente dieselben Teile wie bei Variante 1 verwendet, jedoch sind die Befestigungen für die Aufsteckwände den anderen Winkeln entsprechend adaptiert.

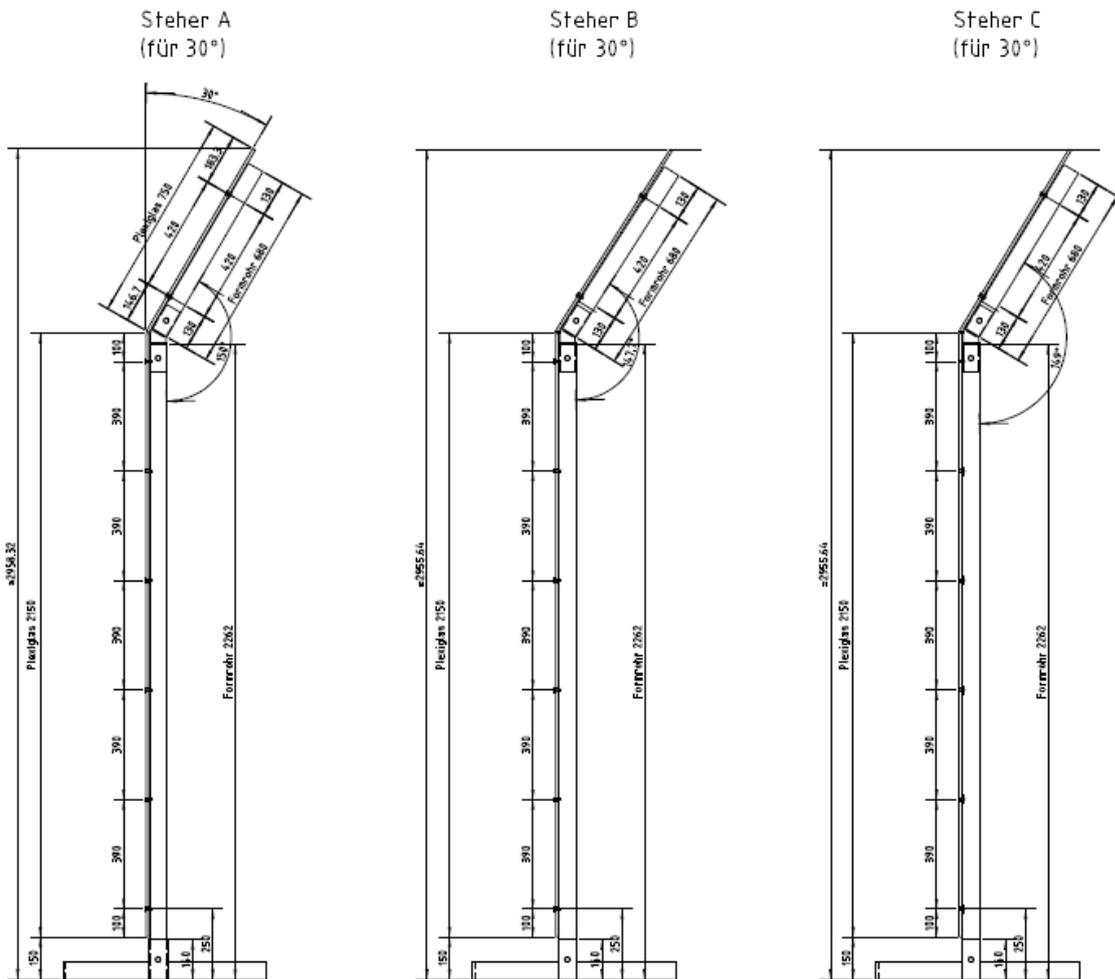


Abb. 34: Steher 30° [Kiefer]

Eine besondere Herausforderung stellt die Befestigung der Aufsteckwände in den beiden unterschiedlichen Neigungswinkeln dar. Dabei muss höchstmögliche Stabilität garantiert sein, aber gleichzeitig muss ein einfacher Auf- und Abbau möglich sein und ein Auskommen ohne zu viele Extrateile für die Rahmen sollte ermöglicht werden.

Die dazu entworfenen Lösungen sind in Abb. 35 im Detail dargestellt. Dabei wird ein System aus Winkel-Einschubteilen mit den gewünschten Neigungswinkel verwendet, welche in die Formrohre der senkrechten Steher und der Aufsteckteile eingesteckt wird. Dabei sind wiederum entsprechend der drei Stehertypen A, B und C verschiedene Teile notwendig. Die Fixierung erfolgt wie überall im Gesamtsystem mit Rändelschrauben.

Realisierung

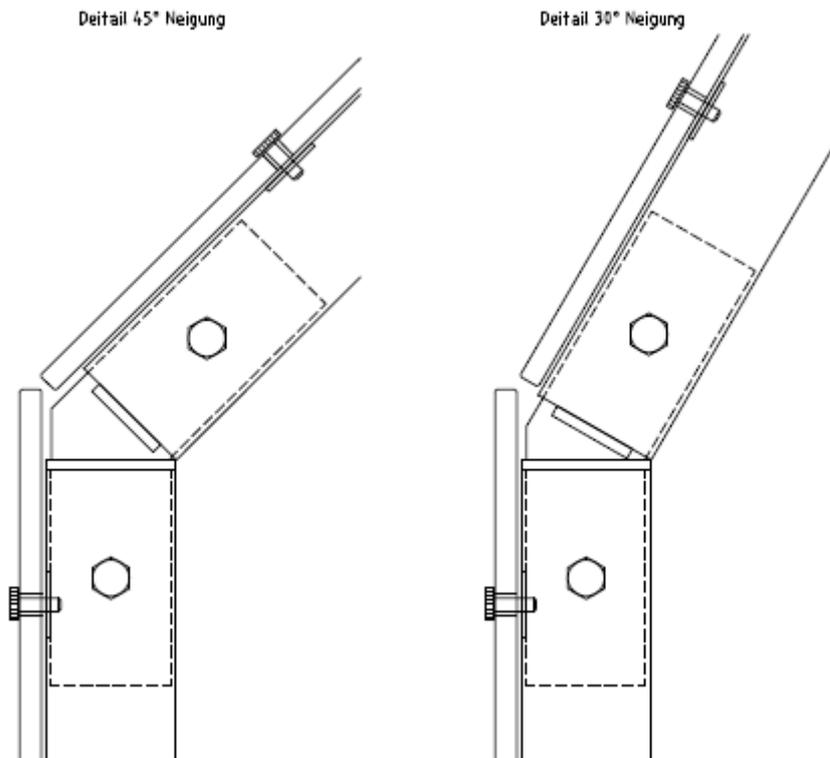


Abb. 35: Details Befestigung Aufsteckwände mit Winkelstücken [Kiefer]

Ein sicherer Stand der Akustikstellwände auf ebenen Boden wird mit Hilfe eines eigens entwickelten Stellfußsystems ermöglicht. Dieses ist wiederum aus verzinktem und beschichtetem Stahl gefertigt und die Details sind in den folgenden Abbildungen zu sehen. Die Ausführung in Y-Form sorgt für einen guten Stand am Untergrund. Die Abmessungen der Fußteile sind aus Abb. 30 ersichtlich und betragen in der Länge 719 mm sowie 358 mm in der Breite an der „offenen“ Y-Seite.

Allen Fußteilen gemeinsam ist, dass die Formrohrprofile der Steher auf aufgeschweißte Steckzapfen aufgesteckt werden. Das Profil der Steherteile ist in den Detailzeichnungen mit X markiert und ist so ausgerichtet, dass es den größten Belastungen, welche von vorne und hinten auf die Akustikstellwände wirken, bestmöglich standhalten kann.

Abb. 36 zeigt einen Stellfuß für die Steherposition A (gerade).

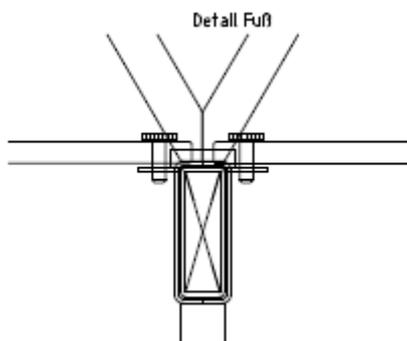


Abb. 36: Details Fuß gerade [Kiefer]

Realisierung

In Abb. 37 sind die Details für die Stellfüße an den Positionen B (45°) sowie C (30°) zu erkennen.

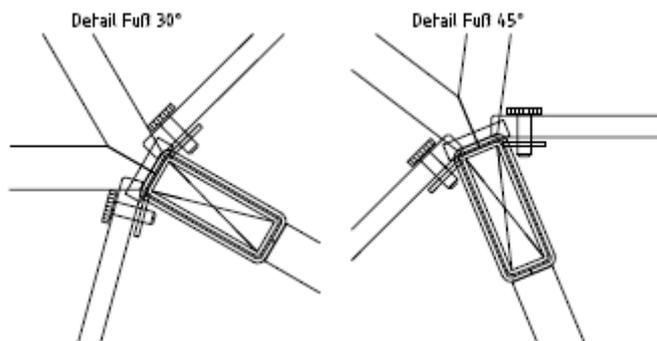


Abb. 37: Details Fuß 30° und 45° [Kiefer]

Die Befestigung der Wandteile an den Rahmenteilen erfolgt überall durch Verschraubung mit Rändelschrauben. Dazu sind in den Wandteilen Ausnehmungen an den entsprechenden Positionen notwendig (siehe Abb. 32 in Abschnitt 4.5). An diesen Positionen werden Stahlteile mit vorgesehenen Gewinden angebracht (Details siehe Abb. 38). An den entsprechenden Stellen der Rahmenteile befinden sich ebenfalls Gewindelöcher, sodass durch Rändelschrauben ganz einfach eine gesicherte Verbindung hergestellt werden kann.

Ein zusätzlicher Vorteil der an den Wandteilen angebrachten Stahlteile für die Verschraubungen ist, dass diese auch als Montagehilfe dienen, da sie ein einfacheres Tragen und Halten der recht schweren und glatten Polycarbonatscheiben ermöglichen.

Detail Verschraubung

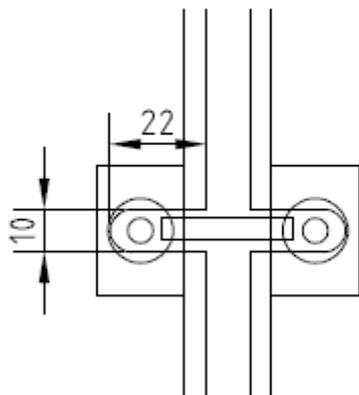


Abb. 38: Details Verschraubung [Kiefer]

Insgesamt ist Materialaufwand für das Gesamtsystem mit allen Polycarbonat- und Stahlteilen für alle Aufbauvarianten recht groß und dementsprechend hoch ist auch das Gesamtgewicht. Detaillierte Gewichtsangaben zu den Bestandteilen wurden von Kiefer berechnet und sind aus Abb. 39 abzulesen. Das zusätzliche Gewicht für Variante 2 kommt durch die eigens notwendigen Polycarbonatteile für die Aufsteckwände bei anderem Winkel zustande.

Realisierung

Stahlkonstruktion: ca. 230kg
Plexiglas Variante 1: ca. 320kg
Zusätzlich Variante 2: ca. 100kg
Gesamt: ca. 650kg

Abb. 39: Details Gewichtsangaben [Kiefer]

Detaillierte Kenndaten zu den verwendeten Materialien befinden sich im Anhang 2 im Abschnitt 11.1, deshalb sind hier überblickmäßig nur die wichtigsten Daten kurz zusammengefasst.

Polycarbonatglas:

- Spezifisches Gewicht: 1,19 g/ cm³
- Materialstärke: 10 mm
- Ausführung glasklar, kratzfest
- Zuschnitt in den jeweiligen Formen

Stahlprofile:

- Material: gekantetes und geschweißtes Stahlblech (Stahl-FR)
- Materialstärke: 2 mm
- Abmessungen der Steherprofile: 60 x 20 mm
- Zusätzlich angeschweißte Steckzapfen
- Grundmaterial verzinkt
- Oberfläche pulverbeschichtet nach RAL-Standardfarbkarte

Verschraubungen:

- Rändelschrauben aus Stahl
- Gewindedurchmesser: 10 mm

4.7. CAD Pläne

Als Vorstufe und Vorlage für die Konstruktionspläne und als Anschauungsobjekte für die Umsetzung der Designvorschläge wurden von der Firma Kiefer CAD Pläne angefertigt.

Mit Hilfe dieser Pläne war es einfach zu erkennen, wie die fertigen Stellwände später aussehen würden und einige kleine Designänderungen konnten auch noch besser eingebunden werden.

Diese CAD Pläne für die verschiedenen Aufbauvarianten wurden von Kiefer freundlicherweise zu Verfügung gestellt und die folgenden Abbildungen (Abb. 40 bis Abb. 45) zeigen einige der Darstellungen aus verschiedenen Blickwinkeln jeweils für den Gesamtaufbau in den Varianten mit 45° bzw. 30° Winkel für die Aufsteckwände

Realisierung

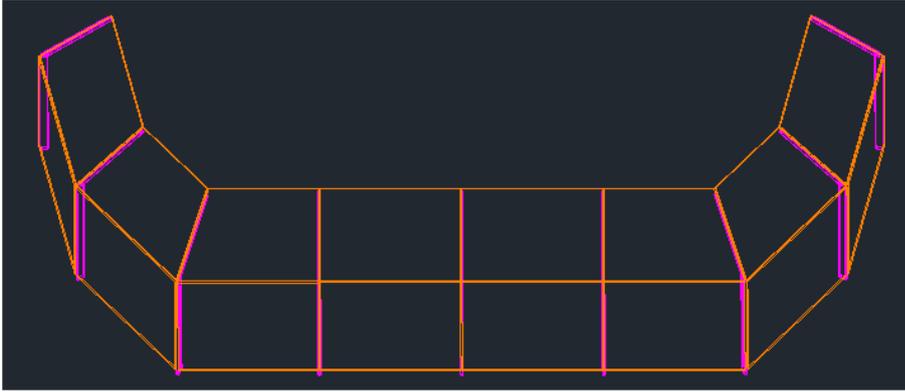


Abb. 40: CAD Variante 45° hinten oben [Kiefer]

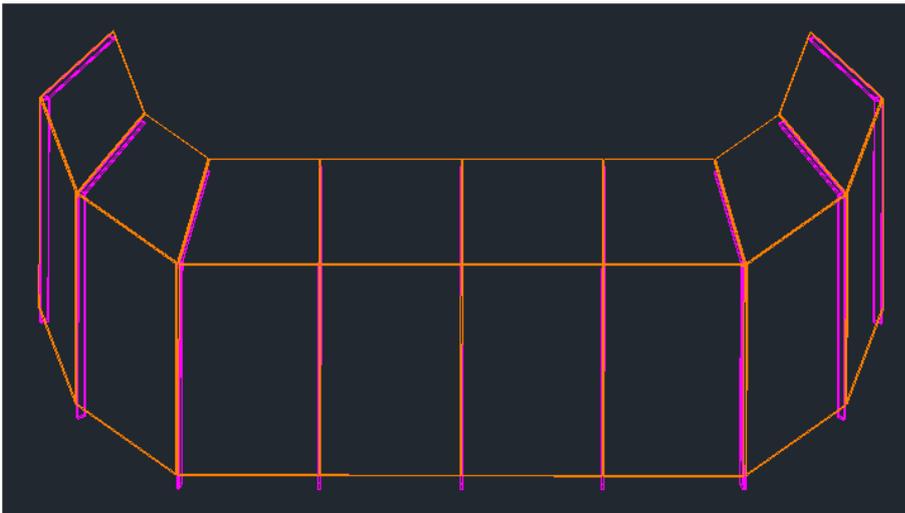


Abb. 41: CAD Variante 45° vorne unten [Kiefer]

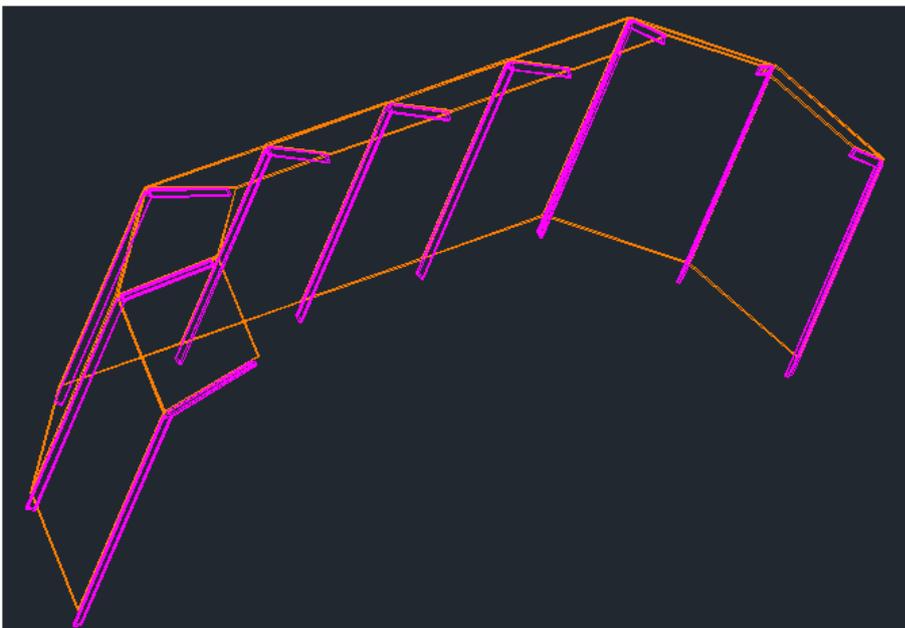


Abb. 42: CAD Variante 45° schräg vorne oben [Kiefer]

Realisierung

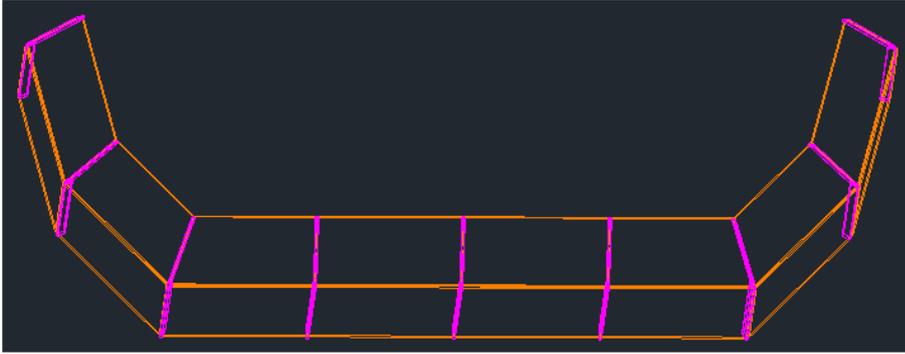


Abb. 43: CAD Variante 30° hinten oben [Kiefer]

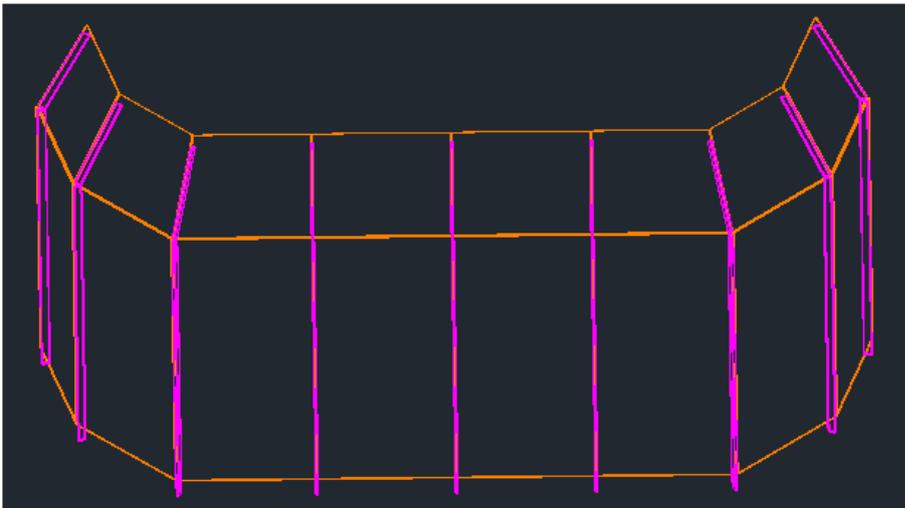


Abb. 44: CAD Variante 45° vorne unten [Kiefer]

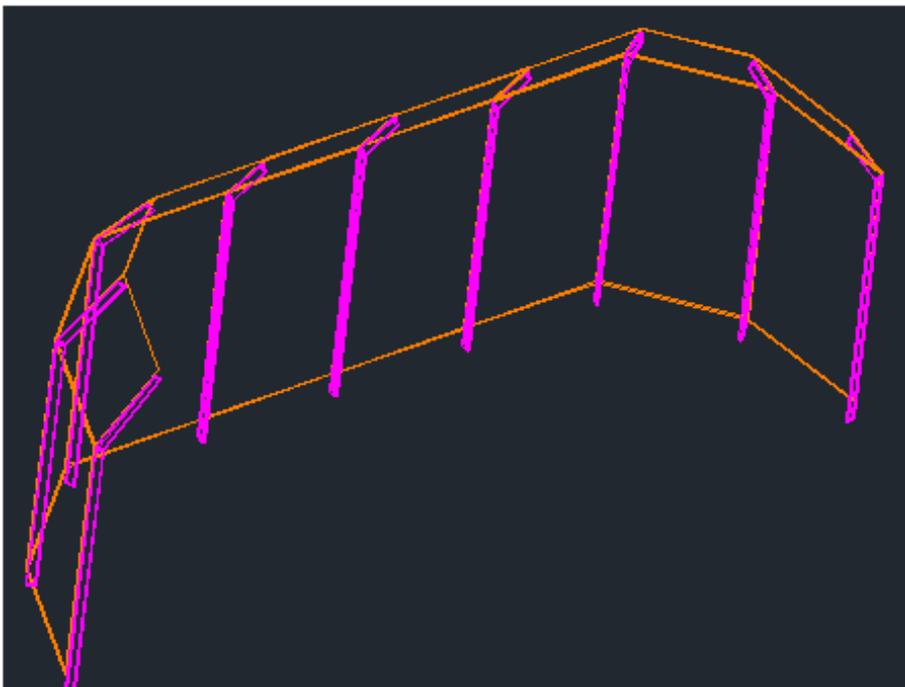


Abb. 45: CAD Variante 30° schräg vorne oben [Kiefer]

4.8. Einsatz im Gesamtsystem bestehend aus Bühnenunterbau und Überdachung

Schon als die Notwendigkeit der Verwendung eines Akustikstellwandsystems für Open-Air-Zwecke beim Steirischen Kammermusikfestival bewusst wurde, war auch klar, dass es später über das Stellwandsystem hinaus ein Gesamtsystem geben sollte, in dem Bühnenkonstruktion, Akustikstellwandsystem und eine leichte Überdachung zusammenwirken.

Die Grundidee dahinter ist, dass alle Komponenten aufeinander abgestimmt sind und somit perfekt zusammen verwendet werden können, falls dies notwendig ist.

Das heißt, dass die Unterkonstruktion der Bühne so ausgelegt werden muss, dass sowohl die Akustikstellwände als auch die Überdachung daran befestigt werden können. Die genauen Ausführungen sind bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht festgelegt, da es sich bisher um eine reine Zukunftsvision handelt. Jedoch wird eine komplette Neukonstruktion von Bühnenelementen notwendig sein, welche höchstwahrscheinlich aus Aluminiumrahmen und Siebdruckplatten bestehen werden und in denen verschiedene Einschubmöglichkeiten zur Befestigung der Rahmen für die Akustikstellwände und für die Steher der Überdachung integriert werden.

Die Bühnenüberdachung ist in der Ausführung mit vier Aluminiumstehern an den vier Ecken der Bühne angedacht, welche mit Hilfe von dünnen Stahlseilen eine in der passenden Form angefertigte und hoch strapazierfähige Plane aufspannen. Diese Konstruktion soll derart gestaltet sein, dass die Überdachung von der Bühnenrückseite zur Vorderseite hin ansteigt. Somit wird die Reflexion der auftreffenden Schallenergie in Richtung des Publikums weiter verbessert. Zusätzlich führt diese Art der Ausführung dazu, dass auf das Dach fallendes Regenwasser nach hinten abrinnt, wo auch ein Ablauf dafür integriert sein wird.

Wie schon erwähnt, sind diese Grundideen bisher gesammelt und sollen in nicht allzu ferner Zukunft realisiert werden. Nach der eingehenden Testphase des Prototyps des Akustikstellwandsystems und der Umsetzung eventueller Verbesserungen wird am Gesamtsystem inklusive Bühnenkonstruktion und Überdachung weitergearbeitet werden.

Dazu wird aber die Zusammenstellung eines eigenen Projektteams, notwendig sein, da wahrscheinlich auch SpezialistInnen für Architektur, Statik und Produktion sowie Sachverständige herangezogen werden müssen. Ein kleiner Ausblick dazu bietet sich noch in Abschnitt 8.3.

4.9. Namensgebung und Design von Logo und Handbuch

Da es nach erfolgreicher Planung und Testung des Prototyps später möglich sein sollte, das entwickelte Akustikstellwandsystem zu verkaufen oder zu verleihen, ist es auch notwendig, einen ansprechenden Namen sowie ein Logo zu finden bzw. zu entwerfen.

Sowohl die Bezeichnung als auch das entworfene Logo sollten Grundlage für alle mit dem Akustikstellwandsystem in Verbindung gebrachten Medien sein. Das heißt, dass sich sowohl das Aussehen des Handbuchs als auch der Webseite zum Vertrieb und Verleih nach dem vorgegebenen Design richtet.

4.9.1. Namensgebung

Hauptziel der Namensgebung ist es, dem Akustikstellwandsystem einen kurzen und aussagekräftigen Namen zu geben, welcher auch schon auf die wichtigsten Eigenschaften hindeutet. Zu beachten ist dabei natürlich auch, ob zu den Namensvorschlägen nicht schon etwaige registrierte Marken- oder Produktnamen existieren, um Markenrechtsverletzungen zu verhindern und die Verwechslungsgefahr mit anderen Produkten zu minimieren. Dazu wurden zu den gesammelten Namensvorschlägen ausführliche Internetrecherchen durchgeführt.

Schlussendlich wurde als Produktname „Acoustaflex“ gewählt. Die Funktionalität als Akustikbauteil und die Flexibilität im Aufbau sollen durch diese Bezeichnung ausgedrückt werden. Der Untertitel „Variables Akustikstellwandsystem“ gibt genauere Auskunft über die Funktion des Produkts.

4.9.2. Logoentwurf

Wie schon oben beschrieben, ist der Entwurf eines Logos wichtig, da sowohl das Design des Handbuchs als auch der Vertriebswebseite ein einheitliches Aussehen haben sollten.

Das Logodesign wurde in einem Grafikprogramm durchgeführt und im Großen und Ganzen ergaben sich vier Vorschläge für die Logos, welche in den Abbildungen Abb. 46 bis Abb. 53 zu sehen sind. Schlussendlich wurden zwei Logos ausgewählt. Bei Verwendung ohne Hintergrund kommt Abb. 47 zum Einsatz, für eine Verwendung mit Hintergrund – wie dies beim Handbuch und auf der Webseite der Fall ist – wurde Abbildung Abb. 53 gewählt.

Die Wahl fiel auch deshalb auf diese beiden Logos, da diese in Schwarz-Weiß bzw. nur in Graustufen gehalten sind und somit eine einheitliche Darstellung mit allen denkbaren Medien sowie der Ausdruck auch mit Schwarz-Weiß-Druckern möglich ist.

Acoustaflex
Variables Akustikstellwandsystem

Abb. 46: Logo-Entwurf schwarz

Acoustaflex
Variables Akustikstellwandsystem

Abb. 48: Logo Entwurf Kontur rot

Acoustaflex
Variables Akustikstellwandsystem
(c) by Alexander Ulz

Abb. 47: Logo Entwurf schwarz mit (c)

Acoustaflex
Variables Akustikstellwandsystem
(c) by Alexander Ulz

Abb. 49: Logo Entwurf Kontur rot mit (c)



Abb. 50: Logo Background Kreide



Abb. 51: Logo Background Kreide mit (c)



Abb. 52: Logo Background Shine



Abb. 53: Logo Background Shine mit (c)

4.9.3. Handbuchdesign

Wie schon mehrmals erwähnt, soll der Auf- und Abbau des Akustikstellwandsystems ohne Hilfe von Spezialisten möglich sein. Um dies zu garantieren, wird mit dem System zusammen ein Handbuch ausgeliefert, in dem in einfacher Form und mit Hilfe von zahlreichen Abbildungen die Verwendung erklärt wird. Dabei sind kurze Beschreibungen über das System im Allgemeinen und Regeln und Vorgaben zur Handhabung zu finden und es werden die für den jeweiligen Einsatzzweck am besten geeigneten Aufbauvarianten beschrieben.

Schlussendlich soll es mit Hilfe des Handbuchs möglich sein, das Akustikstellwandsystem in etwa einer halben Stunde mit nur zwei Personen aufzubauen bzw. in der gleichen Zeit auch wieder abzubauen.

Das Design des Handbuchs richtet sich im Großen und Ganzen an den oben gezeigten Logos. Zahlreiche Fotos und Bilder sollen anschaulich die richtige Handhabung erklären. Um die Wahrscheinlichkeit für die Verwendung des Handbuchs möglichst hoch zu halten, ist dieses kurz und straff gestaltet und Bilder nehmen gegenüber Text den Großteil des Umfangs ein.

Die geplante Webseite für Support und Vertrieb des Acoustaflex Systems soll viele Teile aus dem Handbuch beinhalten und auch im gleichen Design gehalten werden. Eine erste Vorschau auf das Handbuch ist in Anhang 1 (Abschnitt 9) zu finden.

4.10. Der produzierte Prototyp

Wie schon erwähnt, wurden die Polycarbonatglasteile in den entsprechenden Zuschnittformen bestellt und die Rahmenteile von Kiefer Technic dazu gefertigt.

Im August 2013 wurde die erste Variante des Akustikstellwandsystems produziert und erstmals im September 2013 bei Firma Kiefer in Bad Gleichenberg aufgebaut. Dieser Prototyp wird ab dem Sommer 2014 beim Steirischen Kammermusikfestival mit den bis dahin getätigten notwendigen Verbesserungen im Einsatz sein. In diesem Abschnitt sind einige Abbildungen des Prototyps mit kurzen Erklärungen zu sehen.

Die Fotos vom Aufbau zeigen allesamt die Aufbauvariante mit 30° Neigungswinkel im Vollaufbau mit acht senkrechten Wandteilen und acht Aufsteckwänden.

Abb. 54, Abb. 55 und Abb. 56 zeigen das Akustikstellwandsystem von vorne, schräg hinten und in einer näheren Ansicht von vorne. Die Polycarbonatplatten sind zum besseren Schutz der Oberflächen noch mit einer Schutzfolie überzogen.

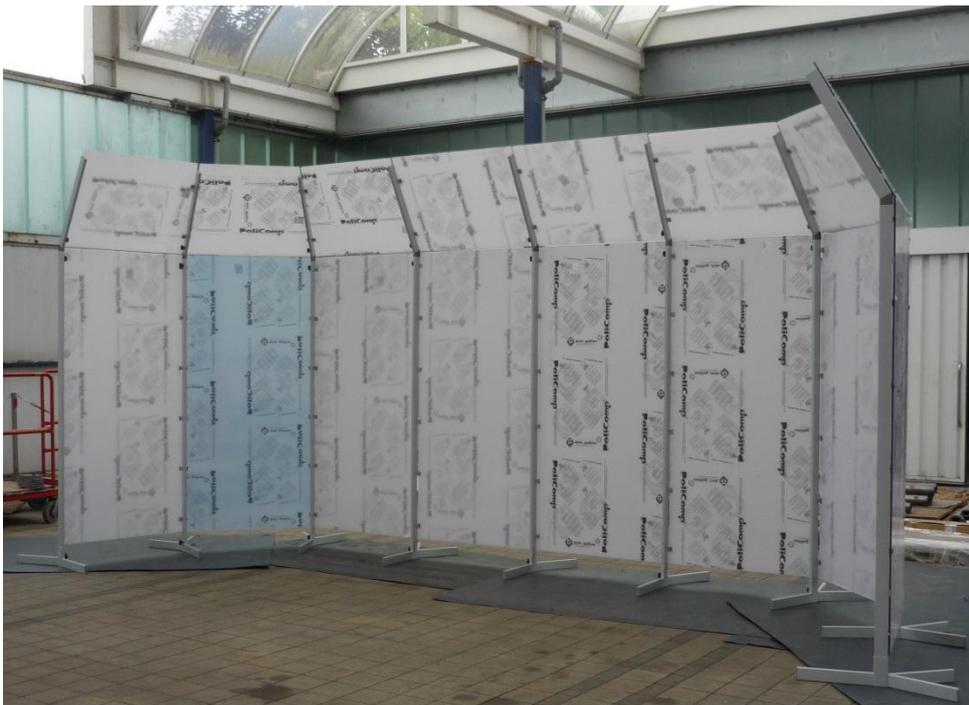


Abb. 54: Prototyp vorne

Realisierung

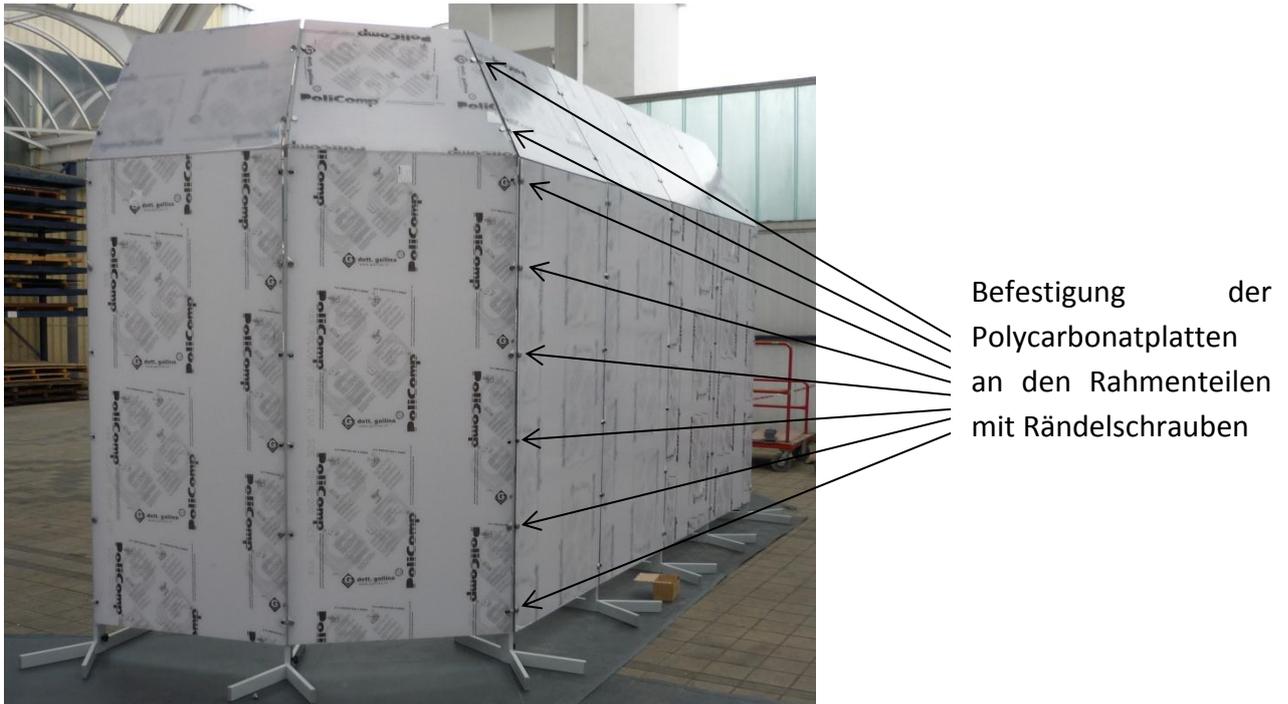


Abb. 55: Prototyp hinten

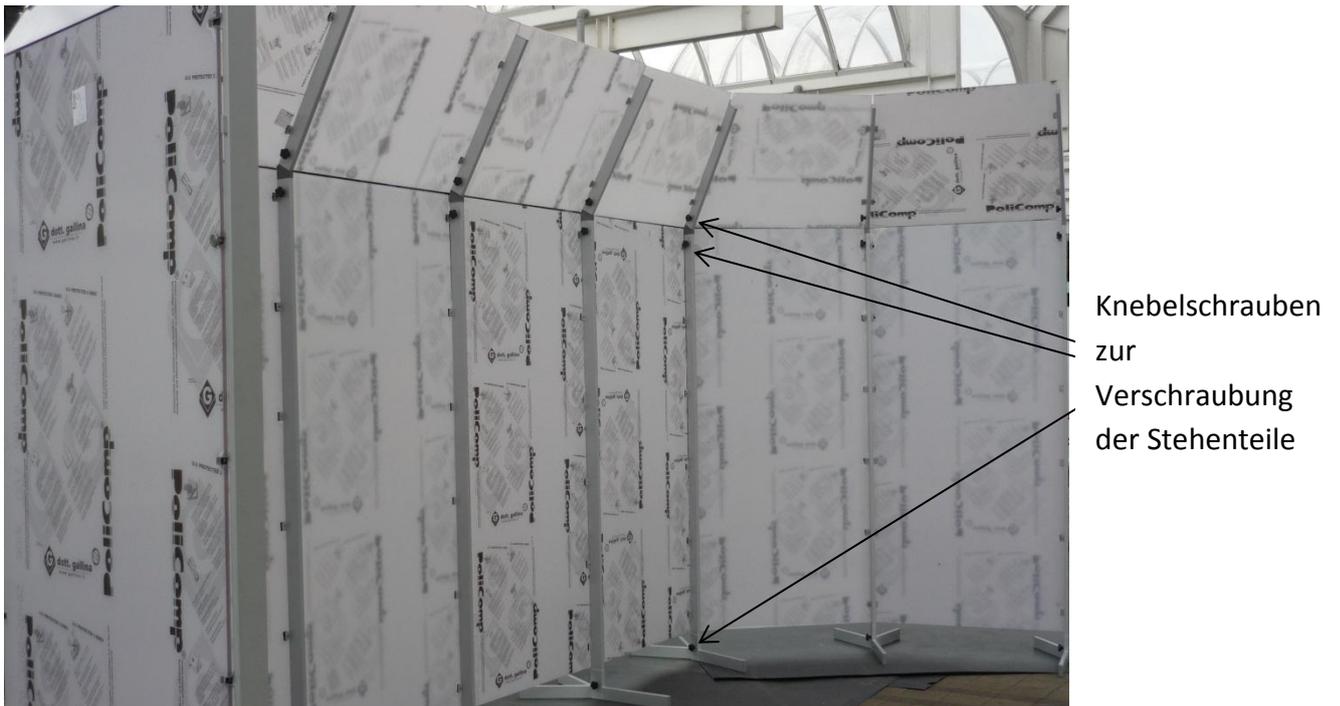


Abb. 56: Prototyp vorne Nahansicht

Der schon in Abschnitt 4 beschriebene Aufbau des Akustikstellwandensystems mit den Elementen aus Polycarbonat und den Rahmen- und Stellfußteilen aus Stahlformrohren ist in den obigen drei Fotos gut zu sehen.

Die Polycarbonatplatten sind mit Bohrungen versehen und werden mit Hilfe von Rändelschrauben (siehe Abb. 57) an den entsprechenden Laschen mit Schraubgewinden an den Rahmenteilern befestigt (siehe Pfeile in Abb. 55). Details hierzu zeigen die folgenden

Realisierung

Abbildungen. In Abb. 57 rechts ist eine der Schraublaschen abgebildet. Um ein Gegeneinanderschlagen von Polycarbonat- und Rahmenteilen zu verhindern, werden auf diese Laschen Gummiauflagen aufgeklebt.



Abb. 57: Rändelschraube (li) und Schraublasche (re)

Die Steher bestehen im Wesentlichen aus vier Einzelteilen, welche einfach zusammengesteckt und danach mit Knebelschrauben (siehe Abb. 58) miteinander verschraubt werden können. Solche Knebelschrauben werden an der Verbindung der y-förmigen Stellfüße zu den Rahmenteilen und auch an den Verbindungen von Rahmenteilen und Winkelteilen für die Aufsteckwände eingesetzt. Pfeile in Abb. 56 weisen auf den Verwendungszweck der Knebelschrauben hin.



Abb. 58: Knebelschrauben

Die senkrechten Steher und die y-förmigen Stellfüße sind für alle Aufbauvarianten unabhängig vom Winkel der Aufsteckwände gleich zu verwenden. Um den Aufwand an Einzelelementen möglichst gering zu halten, was Gewicht und Platz beim Transport und bei der Lagerung spart, werden für den Aufbau mit verschiedenen Aufsteckwinkel nur die Winkelteile zwischen den senkrechten Stehern und den Rahmen für die Aufsteckwände ausgetauscht. Eines dieser Winkelteile (in diesem Fall für die 45°-Variante) ist in Abb. 59 zu sehen. Insgesamt gibt es davon für jeden Winkel der Aufsteckwände jeweils neun Stück. Diese werden ganz einfach in die Formrohre der senkrechten Steher eingesteckt und darauf wird wiederum der entsprechende Rahmenteil für die Aufsteckwände aufgeschoben. Die Befestigung erfolgt mit den schon oben erwähnten Knebelschrauben. Dazu sind natürlich sowohl in den Formrohren als auch in den Winkelteilen Gewinde vorgeschnitten.

Realisierung

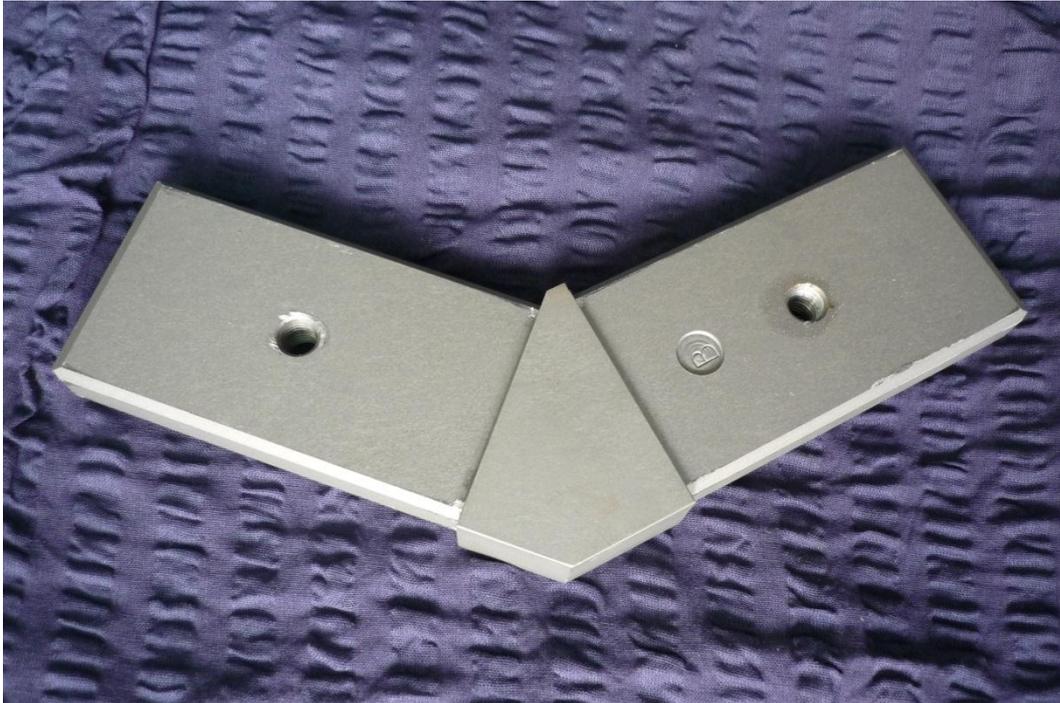


Abb. 59: Winkelteil B 45°

Bei genauerer Betrachtung ist bei dem in Abb. 59 abgebildeten Winkelteil eine eingestanzte Beschriftung mit „B“ zu erkennen. Diese dient dazu, den jeweiligen Winkelteil an die richtige Position zu verbauen. Alle Winkelteile sind mit Buchstaben von „A“ bis „C“ beschriftet, welche den Positionen im Konstruktionsplan (Abb. 30) in Abschnitt 4.5 entsprechen. Beispielhaft ist in der untenstehenden Abbildung (Abb. 60) das Winkelstück an der Position „B“ eingebaut zu sehen.



Abb. 60: Einbau Winkelstück

Solche Beschriftungen finden sich auch auf den senkrechten Stehern und den Aufsteckrahmen. Die Stellfüße sind an allen neun Positionen gleich und müssen somit nicht an einer bestimmten Stelle verbaut werden.

Weitere Details zum Aufbau befinden sich im Handbuch in Abschnitt 9.

Schon beim Aufbau des Prototyps wurden einige notwendige Verbesserungen festgestellt. Diese wurden teilweise schon umgesetzt und sind in Abschnitt 7.3 nachzulesen.

5. Simulationen mit EASE

Für die im Zuge dieses Projekts durchgeführten Simulationen wurde das Softwarepaket EASE in der Version 4.3 verwendet. EASE steht dabei für Elektro-Acoustic Simulation Software for Integrators, Engineers & Acoustical Consultants. [Ahnert, 2013]

5.1. EASE im Überblick

Vor ungefähr 20 Jahren wurde die erste Version von EASE veröffentlicht, welche damals ein einfaches MS-DOS – Programm war. Die Entwicklung der mathematischen und akustischen Algorithmen sowie der grafischen Benutzeroberflächen und Tools zur Simulation, Analyse und Präsentation wurde von AFMG (Acoustic Design Ahnert & Software Design Ahnert) immer weiter betrieben, sodass EASE heute breiten Einsatz im professionellen Bereich der akustischen Simulation und Planung findet. [Ahnert, 2013]

EASE ist allerdings nur der Überbegriff und das Hauptprogramm für ein Paket von unzähligen verschiedenen Programmen. Je nach Kundenwunsch und verständlicherweise auch mit unterschiedlichen Anschaffungskosten verbunden gibt es verschiedene Pakete, welche dementsprechend eine mehr oder weniger große Anzahl an Funktionalitäten beinhalten. Aktuell liegt EASE in der Version 4.3 vor, mit welcher auch die Simulationen zu diesem Projekt durchgeführt wurden. Nachfolgende Abbildung (Abb. 61) zeigt das Startfenster von EASE.



Abb. 61: EASE 4.3 Startfenster [Ahnert, 2009]

Aus der Abbildung erkennbar ist auf der linken Seite die Versionsnummer 4.1. Diese bedeutet allerdings nur, dass das Hauptprogramm in der Version 4.1 vorliegt. Zusammen mit den dazugehörigen Unterprogrammen aus der hier verwendeten Standardversion wird das Programmpaket mit Version 4.3 bezeichnet.

Wie schon erwähnt, können über das Hauptprogramm unzählige Unterprogramme aufgerufen werden, welche den Umfang der Funktionalitäten von EASE bestimmen. In der Standardversion sind dies unter anderem EARS (Basispaket zur Berechnung raumakustischer Parameter und zur Auralisation im simulierten Raum), AURA (Auralisationssoftware mit sehr

umfangreichen Simulations- und Abspielmöglichkeiten), EYES (graphische CAD-Darstellungen und Animationen) und das Speaker Lab (umfangreiche Datenbank an bestehenden Lautsprechersystemen mit deren relevanten Eigenschaften, sowie die Möglichkeit zur Implementierung eigener Lautsprechersystem). Neben diesen Unterprogrammen gibt es noch eine ganze Reihe anderer, welche je nach Anwendungen unterschiedlich oft von Nutzen sein können.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass EASE die Funktionalität eines umfangreichen CAD-Programms bietet und daneben eine enorm umfassende Fülle an Simulationsmöglichkeiten für Anwendungen der Raumakustik und Beschallungstechnik beinhaltet. Neben den hohen Kosten für die Anschaffung der Programmpakete ist auch eine hohe Rechenleistung zur Durchführung der aufwendigen Simulationen in ansprechendem Zeitrahmen notwendig.

5.2. Vorgehensweise bei den Simulationen

Die Basis für alle Simulationen in EASE bilden CAD-Modelle. Diese Modelle werden im EASE Project Model Tool erzeugt und können sehr detailreich gestaltet sein. Das Erzeugen von Flächen und Räumen geschieht in erster Linie über die Definition von Punkten, welche danach zu Flächen verbunden werden können.

Die akustischen Eigenschaften dieser Flächen können entweder mit Hilfe einer umfassenden Materialdatenbank in EASE bestimmt werden, es gibt aber auch die Möglichkeit, Materialdaten zu importieren oder eigene Datensätze in der Datenbank anzulegen.

Zusätzlich zu den akustisch relevanten Eigenschaften können noch viele andere Details definiert werden. So können zum Beispiel Farben von Oberflächen, Beleuchtungskörper und damit verbunden Licht- und Schatteneffekte oder auch verschiedene Heizkörper definiert werden, welche dann in unterschiedlichen Formen von CAD-Darstellungen betrachtet werden können. Diese zusätzlichen Features spielen für die rein akustische Simulation allerdings keine Rolle, daher wurde im Rahmen dieses Projekts größtenteils darauf verzichtet.

5.2.1. Entwurf der CAD-Modelle

Prinzipiell ist es für die Simulationen nicht unbedingt notwendig einen Raum zu definieren. Da aber die Messungen später ebenfalls in einem Raum stattfinden werden und ein Vergleich zwischen Simulation und Messungen durchgeführt werden soll, wurde versucht, diese Umgebung auch in EASE nachzubilden. Die Raumgeometrien für die Simulation entsprechen daher jenen des akustischen Rollenprüfstands bei AVL mit den Nettoabmessungen von Länge x Breite x Höhe = 12 x 14 x 5 m. Dieser Prüfstand wird in Abschnitt 6.1 noch genauer beschrieben. Im Wesentlichen entspricht die Raumakustik des akustischen Rollenprüfstands einem Halbfreifeldraum mit (im interessierenden

Frequenzbereich) zu hundert Prozent absorbierenden Wänden und Decke sowie einem schallharten Boden.

Entsprechend dieser geometrischen Vorgaben wird also in EASE der Raum für die Simulationen durch das Festlegen der Eckpunkte definiert. Für die vier Wände und die Decke wird aus der Materialdatenbank das Material „absorber“ ausgewählt, das über den gesamten simulierten Frequenzbereich einen Absorptionskoeffizient 1 aufweist. Für den Boden wird „concrete“ als Material verwendet, das abgesehen vom sehr hohen Frequenzbereich schallhart wirkt.

Für den Aufbau und die Simulation der Orchestermuschel wird als Material „mirror“ gewählt, das über den gesamten Frequenzbereich einen Absorptionskoeffizient von 0 aufweist, also die gesamte auftreffende Schallenergie reflektiert.

EASE bietet für den Entwurf von Räumen einige sehr hilfreiche Funktionen. So gibt es zum Beispiel die Möglichkeit, ein Symmetrietool zu verwenden. Dieses sorgt dafür, dass gespiegelt an einer Raumsymmetrielinie alle editierten Punkte und Flächen (und für später auch alle Lautsprecher und Sessel) automatisch vom Programm verdoppelt werden. Dies bietet eine enorme Aufwands- und Zeitersparnis, da nur die Hälfte aller Punkte und Flächen händisch eingefügt werden müssen. Die Symmetrielinie läuft in diesem Fall entlang der Raumlänge. Alle Punkte und Flächen werden also nur auf der rechten Seite (Blick in Richtung der Orchestermuschel) eingefügt und automatisch auf der linken Seite eingefügt.

Insgesamt werden vier verschiedene „Aufbauvarianten“ (siehe Abschnitt 5.2.2) simuliert, wobei die Basisvariante einfach den leeren Raum darstellt. Basierend darauf werden drei verschiedene Aufstellvarianten der Akustikstellwände in diesem Raum simuliert.

5.2.2. Vier Varianten

Wie schon erwähnt, werden für die Simulation insgesamt vier verschiedene Aufbauvarianten simuliert. Die folgenden Abbildungen (Abb. 62 bis Abb. 65) zeigen diese Varianten als CAD-Grafiken aus verschiedenen Positionen.

Neben den Akustikstellwänden sind in den Abbildungen auch grün eingerahmte Flächen zu sehen, welche die Audience Areas darstellen, auf die in Abschnitt 5.2.3 noch näher eingegangen wird. Daneben sind noch Symbole für Sessel abgebildet, deren Funktion in Abschnitt 5.2.4 noch genauer erklärt wird.

Ohne Stellwände

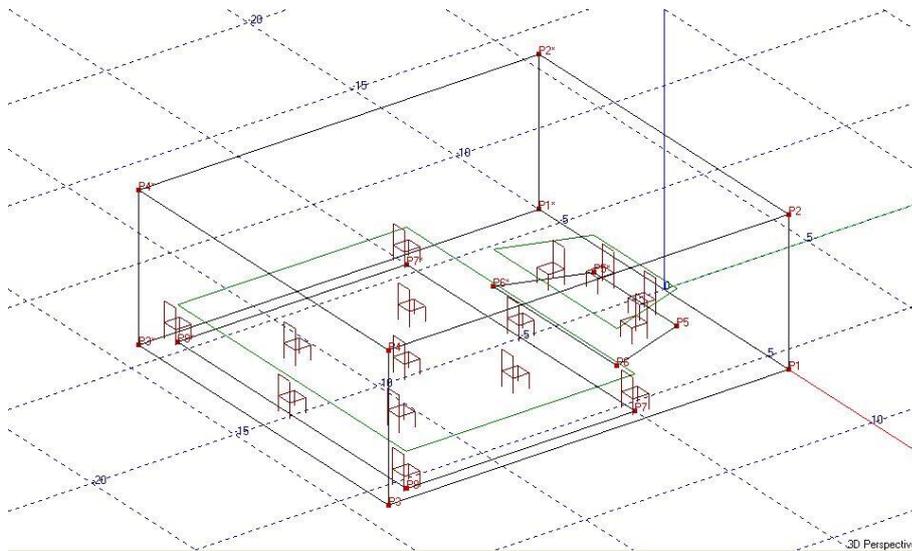


Abb. 62: EASE-Model ohne Stellwände

Senkrechte Stellwände

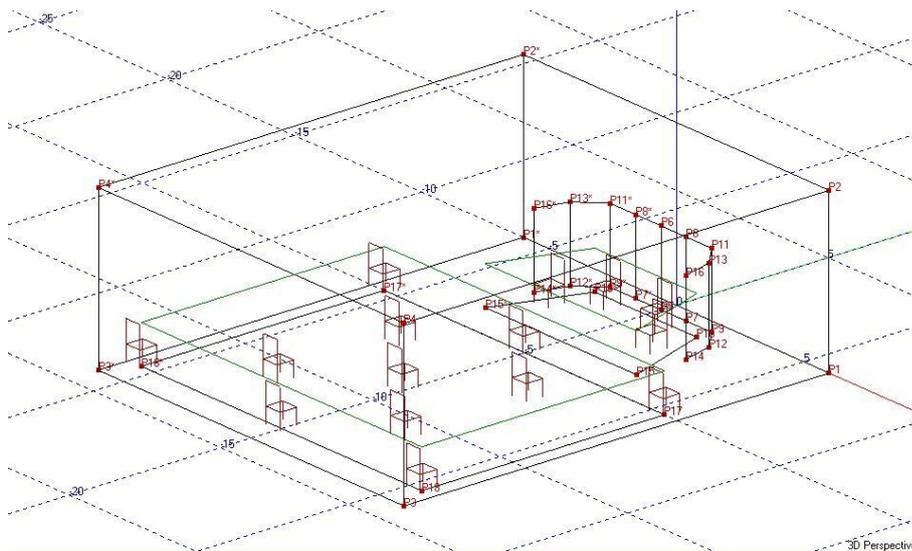


Abb. 63: EASE-Model Stellwände senkrecht

Aufsteckwände mit 30° Neigungswinkel aus der Senkrechten

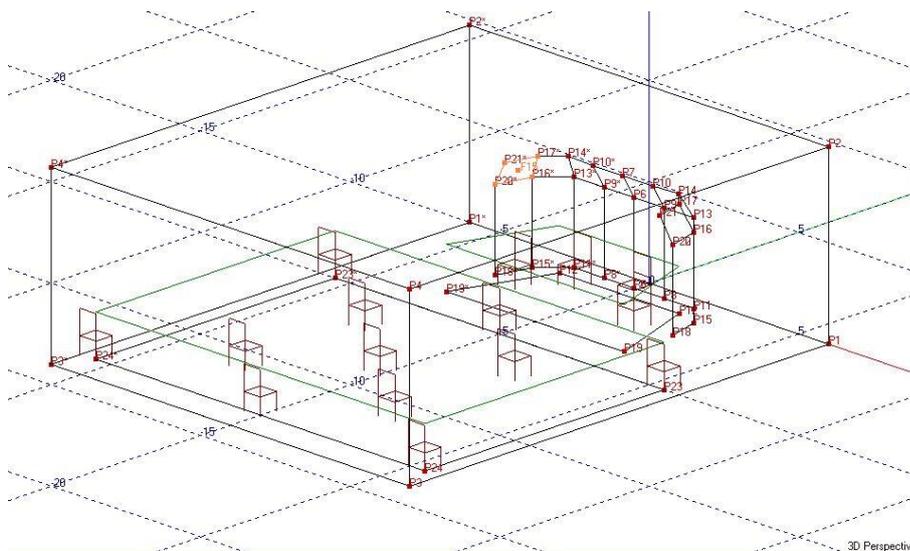


Abb. 64: EASE-Model Aufsteckwände 30°

Aufsteckwände mit 45° Neigungswinkel aus der Senkrechten

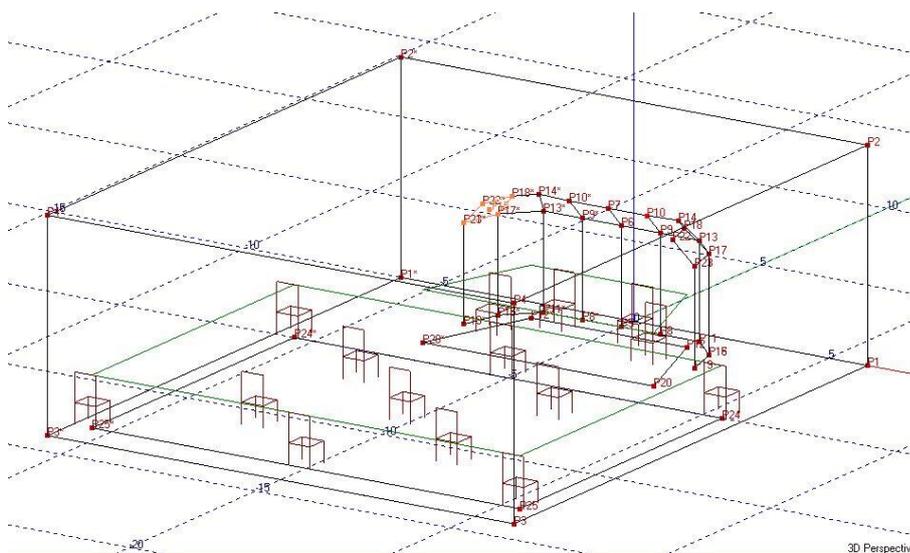


Abb. 65: EASE-Model Aufsteckwände 45°

EASE bietet mit der Funktion “Eyes” auch die Möglichkeit einer vollständigen und ausführlichen graphischen Betrachtung der entworfenen CAD-Modelle. Unter anderem sind dabei eine Betrachtung aus verschiedenen Blickwinkeln sowie ein Wandern durch den Raum möglich. Sämtliche Oberflächen können mit verschiedenen Farben gestaltet werden und es können zum Beispiel Licht- und Schatteneffekte dargestellt werden. Als besonderes Feature ist ein Wandern durch den Raum auf selbst definierten Pfaden möglich, wo in Verbindung mit dem Auralisationstool auch ein Hören des Raumklangs an verschiedenen Positionen im Raum möglich ist. Beispielhaft für die Möglichkeiten des Eyes-Tools zeigen die nächsten beiden Abbildungen (Abb. 66, Abb. 67) in Abschnitt 5.2.3 den Raum aus zwei verschiedenen Ansichten

5.2.3. Audience Areas

Zur Simulation von physikalischen Größen und raumakustischen Parametern ist in EASE die Definition von sogenannten Audience Areas (Publikumsflächen) notwendig. Innerhalb dieser Flächen werden die gewünschten Größen berechnet und es sind auch grafische Darstellungen in unterschiedlichen Formen (Farben, Schattierungen usw.) möglich. Die Flächen selbst haben auf die Akustik im Raum aber keinen Einfluss. Die folgenden beiden Abbildungen (Abb. 66, Abb. 67) zeigen die für diese Simulationen verwendeten zwei Audience Areas aus verschiedenen Blickwinkeln.

Die Fläche A1 stellt den Zuhörerbereich dar und spannt sich mit den Koordinaten (5,5/-5,0), (5,5/-13,0), (-5,5/-13,0) und (-5,5/-5,0) in einer Höhe von 1,2 m (Ohrposition im Sitzen) auf. Als zweite Zuhörerfläche A2 dient ein Bereich auf der Bühne, der den Raum für die KünstlerInnen darstellen soll. Diese Fläche befindet sich ebenfalls in einer Höhe von 1,2 m und hat die Eckpunkte (2,0/-1,0), (3,0/-2,8), (-3,0/-2,8) und (-2,0/-1,0). Diese beiden Flächen sind für alle Simulationen gleich und sind in den nachstehenden Abbildungen grün markiert.

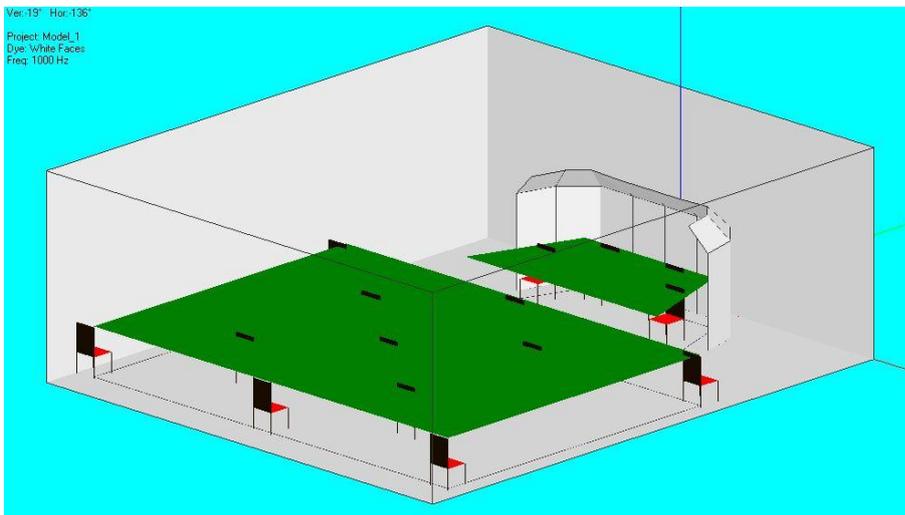


Abb. 66: Eyes-Modell Aufsteckwände 45° View 1

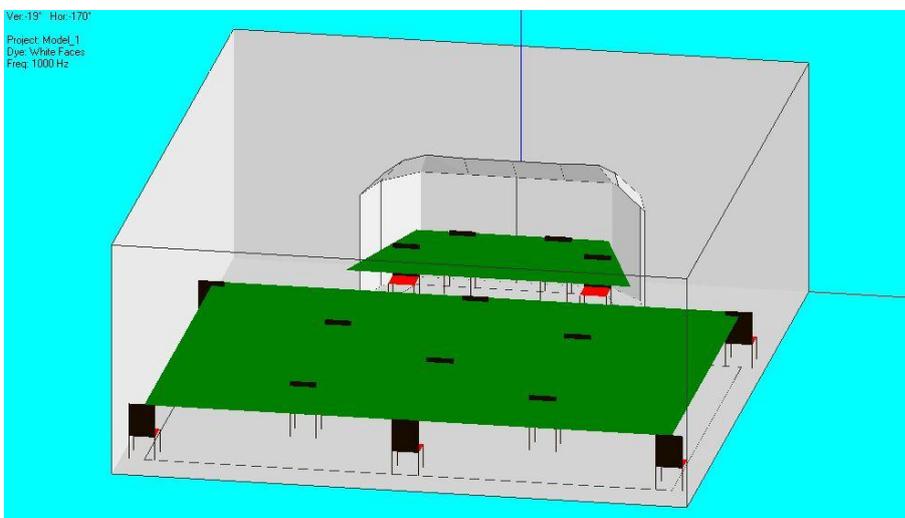


Abb. 67: Eyes-Modell Aufsteckwände 45° View 2

5.2.4. Sesselpositionen

In den Abbildungen der letzten beiden Abschnitte sind einige Stuhlsymbole zu erkennen, welche verteilt über die beiden Audience Areas im Raum positioniert sind. Diese Stühle symbolisieren Positionen im Raum, welche sowohl für die grafischen als auch die akustischen Simulationen spezielle Funktionen erfüllen. Durch die Sesselpositionen ist sozusagen ein schnelles Hüpfen durch den Raum möglich, um entweder einen bestimmten Blickwinkel zu erlangen oder aber auch, um raumakustische Simulationsparameter an diesen Positionen schnell zu vergleichen oder mit dem Auralisationstool den Raum an einer bestimmten Sitzposition Probe zu hören.

Die Sessel sind allerdings nur Symbole, welche auf die akustischen Simulationen keinerlei Einfluss haben. Für die Auswertungen der Simulationen in Abschnitt 5.3 wird allerdings nur eine einzige Sesselposition – nämlich jene in der Mitte der Zuhörerfläche (0,0/-9,0/1,2) – betrachtet und verglichen. Diese Position ist auch für die Messungen an den Akustikstellwänden als Referenzposition zu betrachten.

5.2.5. Lautsprecherdefinition

Um die Beeinflussung eines Schallfeldes durch die verschiedenen Aufstellvarianten des Akustikstellwandsystems in einer Simulation deutlich zu machen, ist zuallererst einmal die Erzeugung dieses Schallfeldes in einer bestimmten Form notwendig.

EASE bietet dazu eine sehr umfassende Lautsprecherdatenbank mit Modellen verschiedenster Hersteller und zusätzlich gibt es auch die Möglichkeit, neue Lautsprecherdaten in die Datenbank zu laden oder selber Lautsprecher mit den entsprechenden Charakteristika anzulegen. Da das Acoustaflex-System aber in erster Linie für die Verwendung mit akustischen Instrumenten aus dem klassischen Genre konzipiert ist, ist eine Simulation mit diversen Lautsprechertypen wenig sinnvoll, da ein Nachbilden von Abstrahleigenschaften o. Ä. nur schwer möglich ist.

Daher sind die für die Simulationen verwendeten Lautsprecher Kugelstrahler („Sphere“ in EASE), welche über einen sehr breiten Frequenzbereich (100 Hz bis 10 kHz) in alle Richtungen gleich viel Schallenergie abgeben. Als Anregungssignal wird rosa Breitbandrauschen mit einem Schalldruckpegel von 97 dB in 1 m Abstand zur Quelle verwendet. Für die Messungen am Prototyp wird ebenfalls ein kugelförmig abstrahlender Lautsprecher verwendet, um die Vergleichbarkeit zur Simulation zu garantieren (siehe Abschnitt 6.2).

Dieser Lautsprecher wird an insgesamt drei verschiedenen Positionen im Bühnenbereich positioniert, welche vor allem auf die Höhe bezogen gut den Positionen bei einem kleinen klassischen Ensemble auf der Bühne entsprechen könnten. Zwei Positionen befinden sich dabei außerhalb der Mitte der Bühne und ergeben so eine unsymmetrische Verteilung der Schallenergie. Diese liegen bei (2,5/-3,0/1,2) und (2,0/-2,0/1,7). Die Höhen sind dabei bewusst in Instrumentenhöhe eines sitzend (1,2 m) bzw. stehend (1,7 m) gespielten Streichinstruments (Violine oder Viola) gewählt. Die dritte Instrumentenposition liegt genau

auf der Symmetrieachse des Raums bzw. des Akustikstellwandsystems bei (0,0/-3,0/1,2), also wiederum auf 1,2 m Höhe.

Für die Simulationen wird immer nur ein einzelner Lautsprecher betrieben, um die Wirkung der Akustikstellwände auf dessen Schallfeld isoliert betrachten zu können. Außerdem steht für die Messungen auch nur ein einzelner Dodekaeder-Lautsprecher zur Verfügung.

5.2.6. Raumeigenschaften

Zur groben ersten Beschreibung der Raumeigenschaften anhand der geometrischen Gegebenheiten und der Beschaffenheit der Oberflächen im Raum bietet EASE ein Tool zur schnellen Berechnung von Nachhallzeiten. Diese Berechnung kann nach den beiden klassischen Methoden von Sabine oder Eyring erfolgen. Jedoch ist dabei zu beachten, dass bei einem derart hohen Anteil an hochabsorbierenden Flächen nur eine der beiden Berechnungsweisen gut verwendbar ist.

Nach [Graber et al., RA, 2011] ergeben sich für die beiden Verfahren zu Berechnung der Nachhallzeit folgende Formeln (Annahme immer $c = 343\text{m/s}$):

Nachhallzeit nach Sabine [Graber et al., RA, 2011, S.68]:

$$T = 0,161 \left[\frac{\text{s}}{\text{m}} \right] * \frac{V}{A_{\text{ges},1}} \quad (\text{Gl. 1})$$

Dabei entspricht V dem gesamten Raumvolumen und $A_{\text{ges},1}$ der gesamten Absorptionsfläche im Raum.

Nachhallzeit nach Eyring [Graber et al., RA, 2011, S.73]:

$$T = -0,161 \left[\frac{\text{s}}{\text{m}} \right] * \frac{V}{S_{\text{ges}} * \ln(1 - \alpha_m)} \quad (\text{Gl. 2})$$

Wiederum ist V das gesamte Raumvolumen. S_{ges} ist die gesamte Raumbofläche und α_m ein mittlerer Absorptionsgrad für die Raumbofläche.

Wird eine Absorptionsgrad von $\alpha = 1$ angenommen (totale Absorption), so ergibt sich nach der Formel von Sabine trotzdem eine Nachhallzeit $T > 0$, was auf eine systematische Abweichung bei hoher Absorption ($\alpha > 0,3$) zurückzuführen ist. Die Formel nach Eyring ergibt hier für $\alpha = 1$ aber einen Nachhallzeit von $T = 0$.

Da im simulierten Raum alle Wandflächen und die Decke einen Absorptionsgrad von $\alpha = 1$ aufweisen und daher der durchschnittliche Absorptionsgrad weit höher als $\alpha = 0,3$ ist, wird für die Berechnungen der Nachhallzeit die Formel nach Eyring herangezogen.

Die Berechnungen von EASE ergeben für die vier Aufbauvarianten die in den folgenden Abbildungen (Abb. 68 bis Abb. 71) angegebenen Werte für die Nachhallzeit in Terzbändern von 100 Hz bis 10 kHz.

Ohne Stellwände

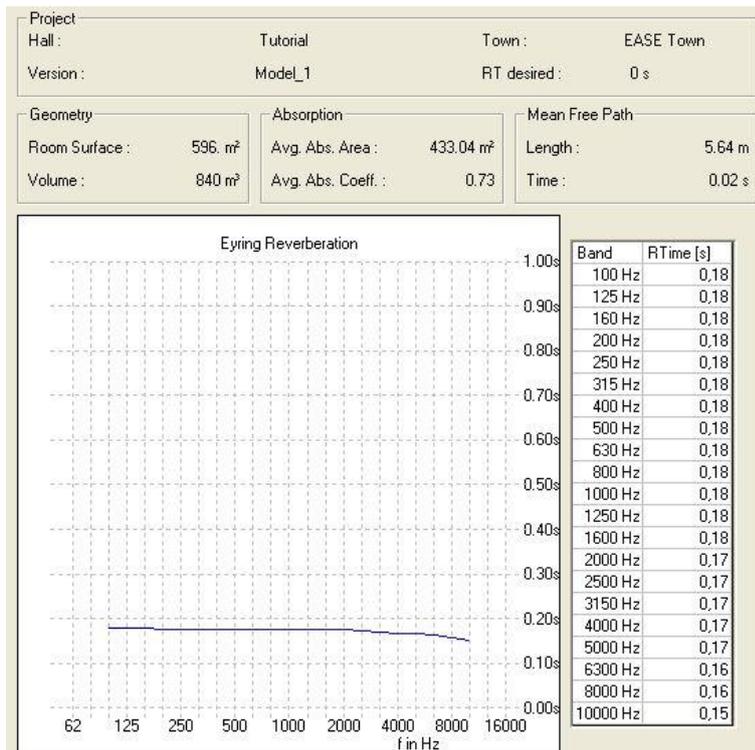


Abb. 68: Nachhallzeit nach Eyring ohne Stellwände

Senkrechte Stellwände

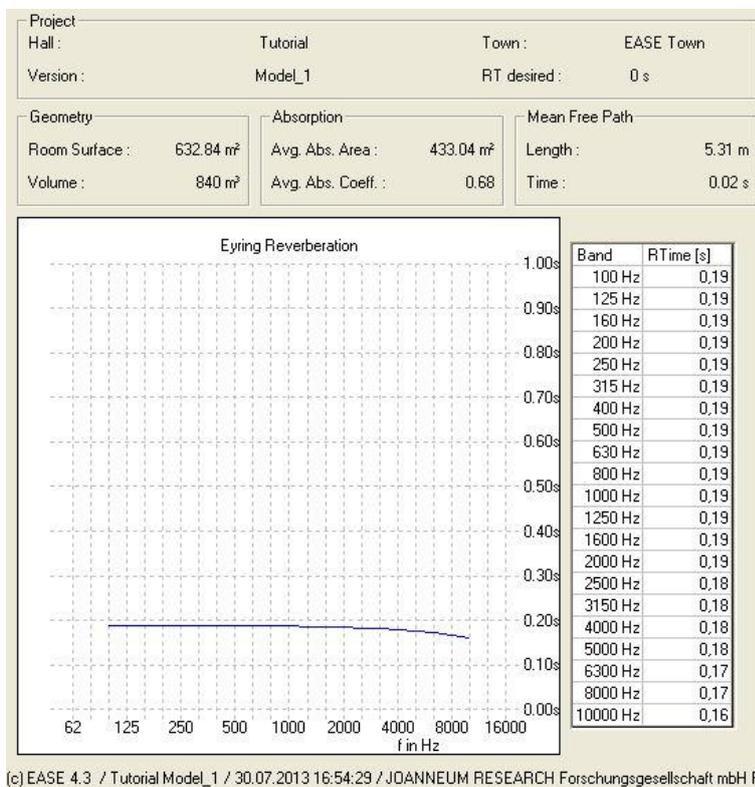
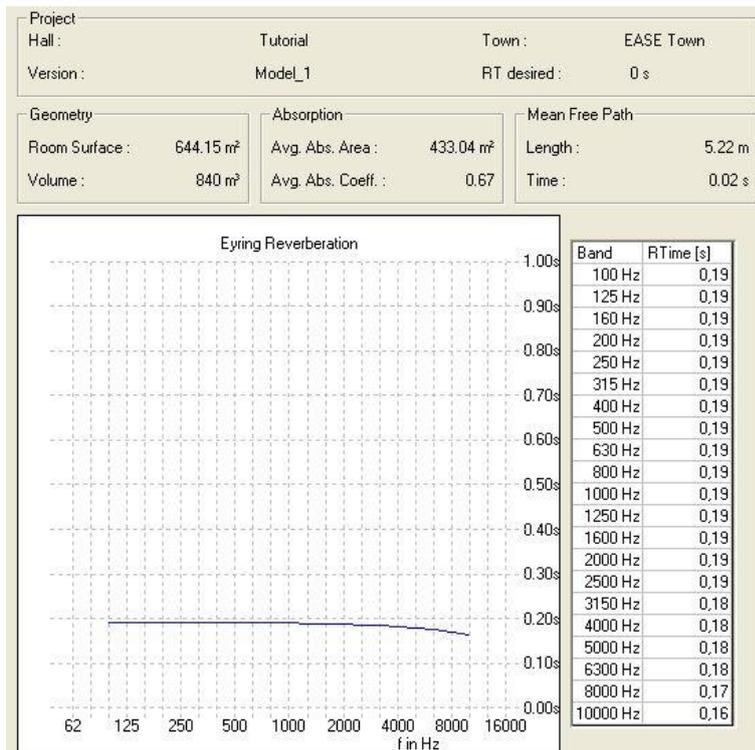


Abb. 69: Nachhallzeit nach Eyring Stellwände senkrecht

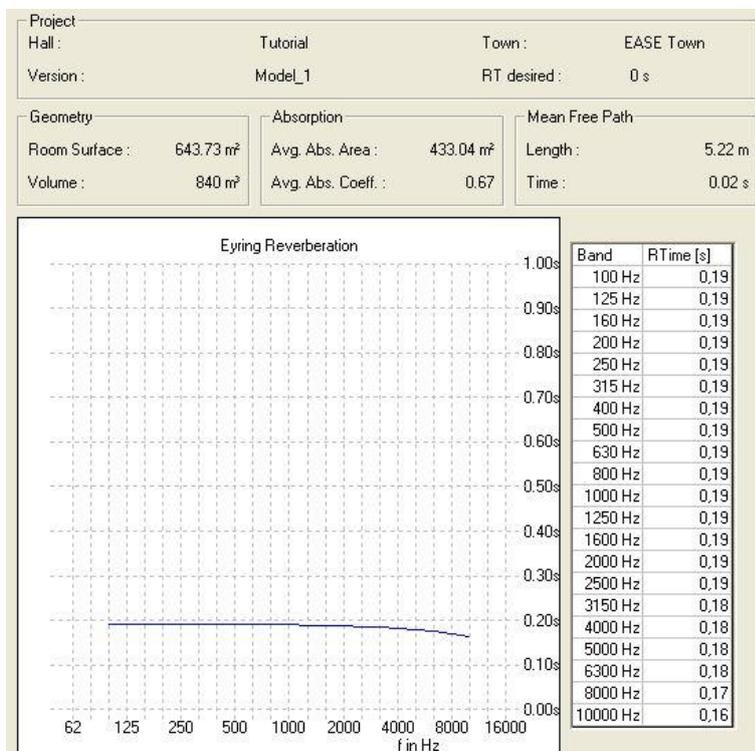
Aufsteckwände mit 30° Neigungswinkel aus der Senkrechten



(c) EASE 4.3 / Tutorial Model_1 / 30.07.2013 16:58:48 / JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH Fr

Abb. 70: Nachhallzeit nach Eyring Aufsteckwände 30°

Aufsteckwände mit 45° Neigungswinkel aus der Senkrechten



(c) EASE 4.3 / Tutorial Model_1 / 30.07.2013 16:56:35 / JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH Fr

Abb. 71: Nachhallzeit nach Eyring Aufsteckwände 45°

Dass die Nachhallzeiten hier keine besonders große Aussagekraft haben, ist aus den Zahlenwerten in den Tabellen rechts in den Abbildungen ersichtlich. Diese steigen beim Einbringen der Muschel in den leeren Raum nur um etwa 0,01 s. Jedoch sinkt der mittlere Absorptionskoeffizient von 0,73 bei leerem Raum (Abb. 68) auf 0,68 beim Einbringen der Akustikstellwände (Abb. 69, Abb. 70 und Abb. 71). Außerdem sinkt die mittlere freie Weglänge von 5,64 m im leeren Raum auf 5,22 m bei Verwendung der Akustikstellwände.

5.3. Simulationsergebnisse für verschiedene Aufbauvarianten

5.3.1. Gewählte Parameter

Für die Beschreibung der Qualität eines Schallfelds stehen unzählige raumakustische Gütemaße und Parameter zur Verfügung. Jedoch sind viele davon für die hier vorliegende Anordnung nicht zulässig oder nicht aussagekräftig bzw. können einige davon bei den durchgeführten Messungen nicht vernünftig verifiziert werden. Daher fiel die Wahl für die verwendeten Parameter hier nur auf einige wenige. Dies sind in erster Linie der Gesamtschalldruckpegel in dB(A) bei einer Frequenz von 1 kHz und daneben das Klarheitsmaß C_{80} für Musik und das Deutlichkeitsmaß C_{50} für Sprache.

Der Gesamtschalldruckpegel bedarf hier keiner genaueren Erklärung, jedoch sollen C_{80} und C_{50} anhand von [Graber et al., RA, 2011] kurz genauer beschrieben werden.

Klarheitsmaß C_{80} [Graber et al., RA, 2011, S. 114]:

Das Klarheitsmaß beschreibt die Durchsichtigkeit von Musik, das heißt, die Erkennbarkeit zeitlich aufeinanderfolgender Töne und die Unterscheidbarkeit verschiedener Instrumente. Die Berechnung erfolgt nach nachstehender Formel über die Verhältnissbildung von früh eintreffender Energie (bis 80 ms) zur restlichen Energie (ab 80 ms). Je höher der Anteil der früh eintreffenden Energie im Verhältnis zur restlichen Energie ist, desto höher ist die Klarheit.

$$C_{80} = 10 * \log \frac{W_{0...80}}{W_{80...∞}} \quad (\text{Gl. 3})$$

Nach [Graber et al., RA, 2011, S. 114] liegen optimale Ergebnisse für die Klarheit bei folgenden Werten:

0 dB < C_{80} hohe Durchsichtigkeit von Musik (eher für moderne Musik)

-3 dB < C_{80} < 0 dB Musik umhüllt den Zuhörer/die Zuhörerin (klassische Musik)

Deutlichkeitsmaß C_{50} [Graber et al., RA, 2011, S. 101]:

Analog zum Klarheitsmaß für Musik wird für Sprache das Deutlichkeitsmaß C_{50} verwendet, welches sich ebenfalls aus dem Verhältnis von früh eintreffender Schallenergie (bis 50 ms) und Restenergie (ab 50 ms) berechnet. Das heißt, dass im Vergleich zum Klarheitsmaß die Anforderungen für eine gute Deutlichkeit von Sprache strenger ausgelegt sind. Die Berechnung erfolgt nach folgender Formel.

$$C_{50} = 10 * \log \frac{W_{0...50}}{W_{50...∞}} \quad (\text{Gl. 4})$$

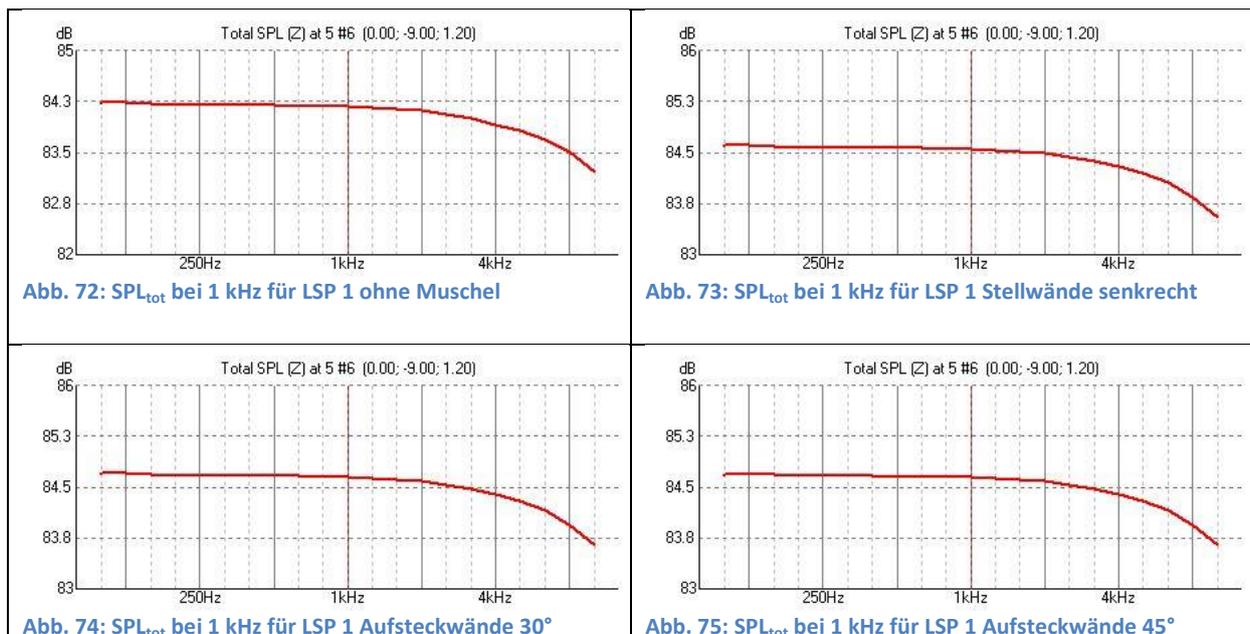
Nach [Graber et al., RA, 2011, S. 101] liegen optimale Ergebnisse für die Deutlichkeit bei folgenden Werten:

- 2 dB < C_{50} sehr gute Verständlichkeit
- 3 dB < C_{50} < 2 dB gute Verständlichkeit
- 8 dB < C_{50} < -3 dB noch ausreichende Verständlichkeit

5.3.2. Vergleich der Ergebnisse

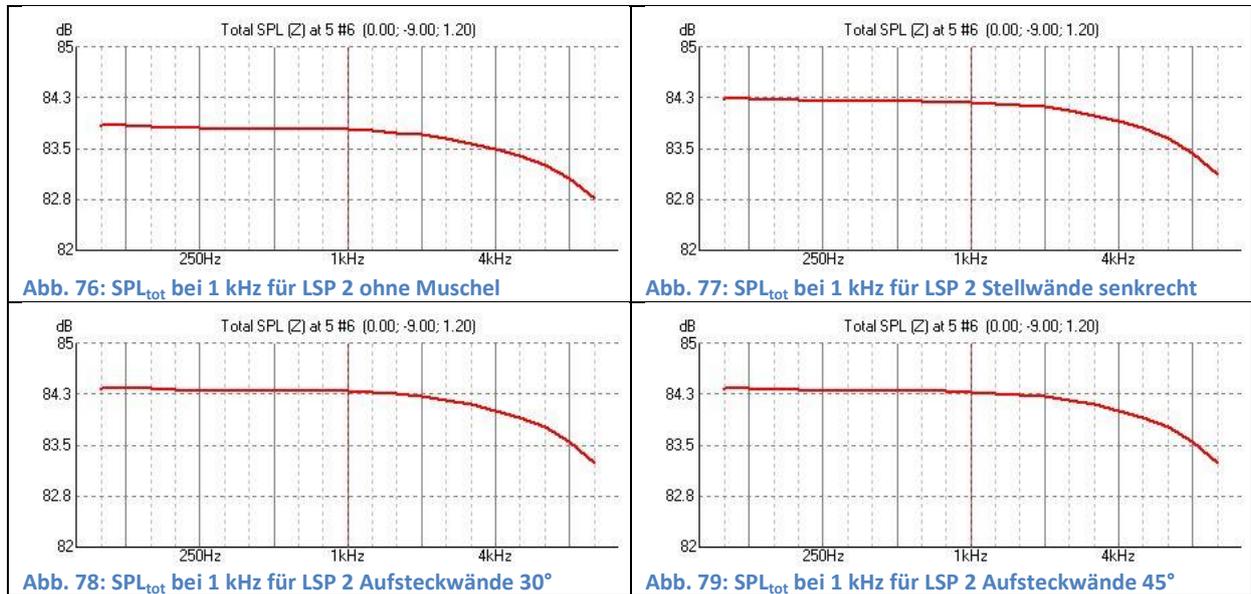
Zunächst werden die Gesamtschalldruckpegel bei 1 kHz am oben schon beschriebenen Referenzpunkt (0,0/-9,0/1,2) in der Mitte der Publikumsfläche miteinander verglichen. Dies geschieht für alle drei genannten Lautsprecherpositionen.

Die folgenden vier Abbildungen (Abb. 72 bis Abb. 75) zeigen den Gesamtschalldruckpegel bei 1kHz am Referenzpunkt für die Beschallung mit einem Kugelstrahler an der Lautsprecherposition 1 (2,5/-3,0/1,2) für die vier verschiedenen Aufbauvarianten.

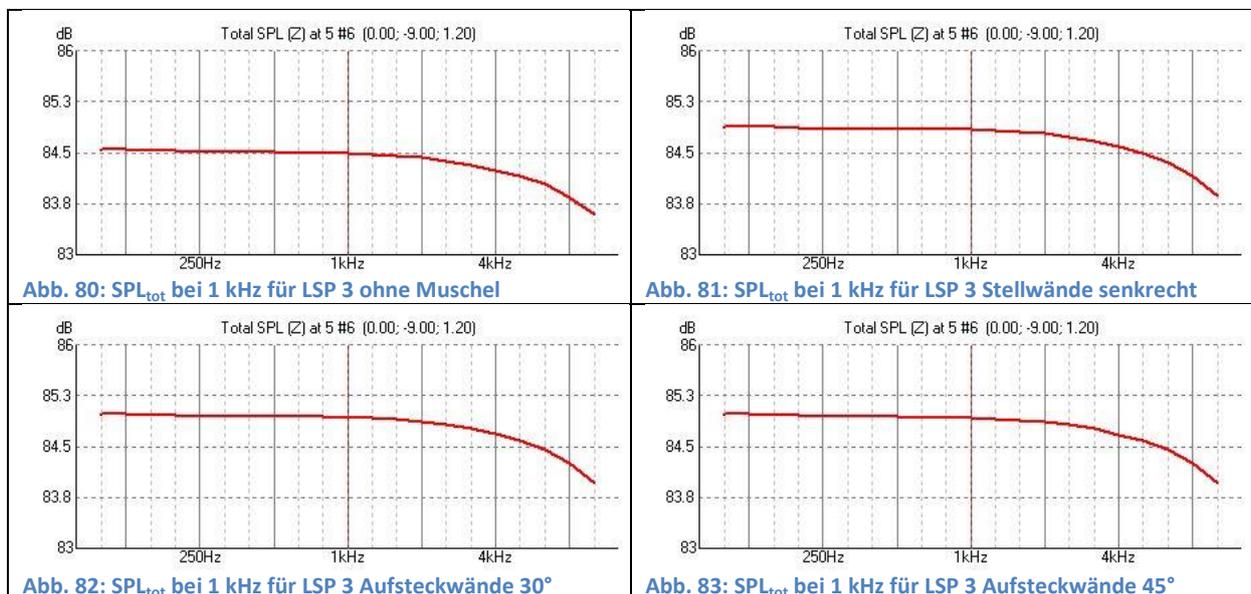


Simulationen mit EASE

Die folgenden vier Abbildungen (Abb. 76 bis Abb. 79) zeigen den Gesamtschalldruckpegel bei 1kHz am Referenzpunkt für die Beschallung mit einem Kugelstrahler an der Lautsprecherposition 2 (2.0/-2.0/1.7) für die vier verschiedenen Aufbauvarianten.



Die folgenden vier Abbildungen (Abb. 80 bis Abb. 83) zeigen den Gesamtschalldruckpegel bei 1kHz am Referenzpunkt für die Beschallung mit einem Kugelstrahler an der Lautsprecherposition 3 (0,0/-3,0/1,2) für die vier verschiedenen Aufbauvarianten.



Da sich die Ergebnisse der jeweils vier verschiedenen Simulationsvarianten für alle drei Lautsprecherpositionen nur sehr wenig voneinander unterscheiden, wird hier nicht auf alle drei Lautsprecherpositionen separat eingegangen, sondern stattdessen eine allgemeine Beschreibung angeführt. Als Referenzpunkt für die im Folgenden angegebenen dB-Werte gilt immer jener bei der Frequenz von 1 kHz. Die Unterschiede zwischen den Punkten bei 1 kHz

können aber quasi auf den gesamten abgebildeten Frequenzbereich umgelegt werden, da sich die Kurvenformen stark ähneln.

Für LSP 1, LSP 2 und LSP 3 zeichnen sich folgende Unterschiede zwischen den vier Simulationsvarianten ab:

- Der Anstieg des SPL_{total} in der Simulation mit senkrechten Wandteilen gegenüber der Simulation ohne Stellwände beträgt bei einer Frequenz von 1 kHz ca. 0,4 dB. Dies gilt in dieser Größenordnung für den gesamten abgebildeten Frequenzbereich.
- Der SPL_{total} in der Variante mit den Aufsteckwänden mit einem Winkel von 30° steigt gegenüber der Simulation mit senkrechten Stellwänden bei 1 kHz um etwa 0,2 dB, was ebenfalls als ein für den gesamten interessierenden Frequenzbereich geltender Wert angenommen werden kann.
- Zwischen den beiden verschiedenen Aufsteckvarianten mit 30° bzw. 45° Aufsteckwinkel ist aus den Simulationsergebnissen kein Unterschied erkennbar.

Aus diesen Ergebnissen ist das schallharte Verhalten der verwendeten Materialien gut erkennbar, da sämtliche Ergebnisse bei einer Frequenz von 1 kHz auch auf den gesamten betrachteten Frequenzbereich umgelegt werden können. Dies begründet sich darin, dass Schallenergie aller interessierenden Frequenzen zu 100 % von den Polycarbonatwänden reflektiert wird.

Des Weiteren werden unten stehend einige raumakustische Kenngrößen beispielhaft für die Beschallung mit einem Kugelstrahler an der Lautsprecherposition 2 (2,0/-2,0/1,7) über die beiden Audience Areas (Publikumsbereich, Bühnenbereich) simuliert dargestellt. Diese Darstellungen werden in EASE standardmäßig mit verschiedenen Farbabstufungen ausgeführt. Die jeweiligen Werte der Kenngrößen innerhalb der Flächen können durch die Farbtabelle am rechten Rand der Abbildungen nachvollzogen werden.

Gesamtschalldruckpegel SPL_{tot}

Nachstehende Abbildungen (Abb. 84 bis Abb. 87) zeigen die Simulationsergebnisse für die Verteilung des Gesamtschalldruckpegels SPL_{tot} bei 1 kHz über die beiden Audience Areas bei einer Beschallung mit einem Kugelstrahler an der Lautsprecherposition 2 (2,0/-2,0/1,7). Die Wertebereiche werden durch verschiedene Farbgebungen gekennzeichnet. Die Bedeutung der Farben kann durch die Farbskalen am rechten Rand der Abbildungen nachvollzogen werden.

Simulationen mit EASE

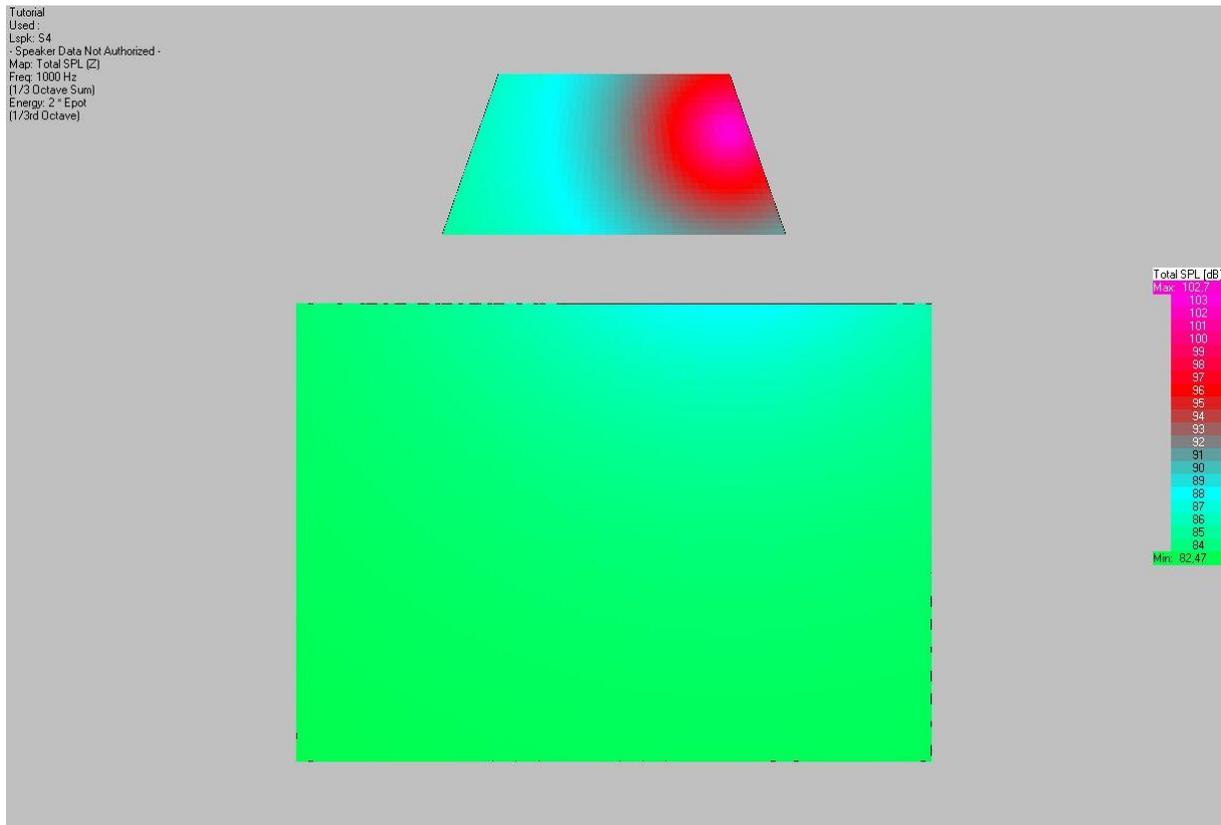


Abb. 84: SPL_{tot} bei 1 kHz über Audience Areas ohne Muschel

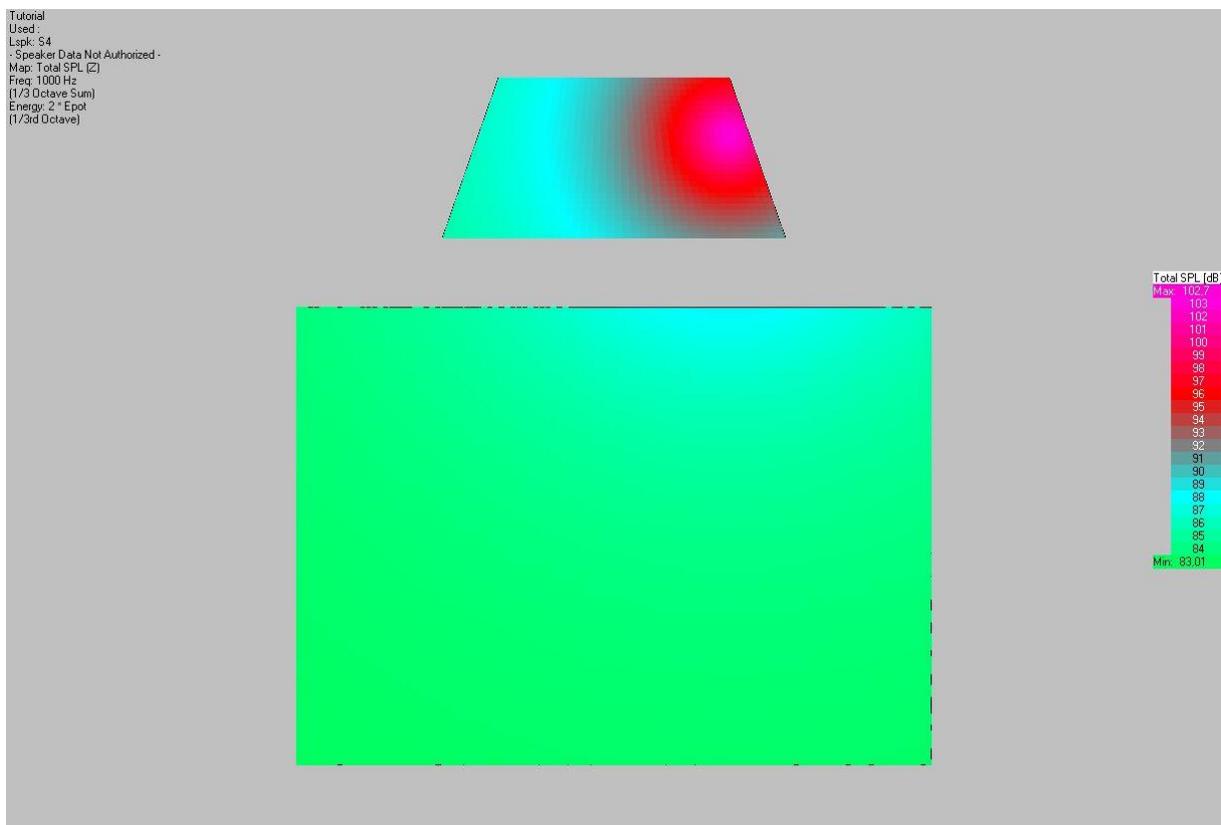


Abb. 85: SPL_{tot} bei 1 kHz über Audience Areas Stellwände senkrecht

Simulationen mit EASE

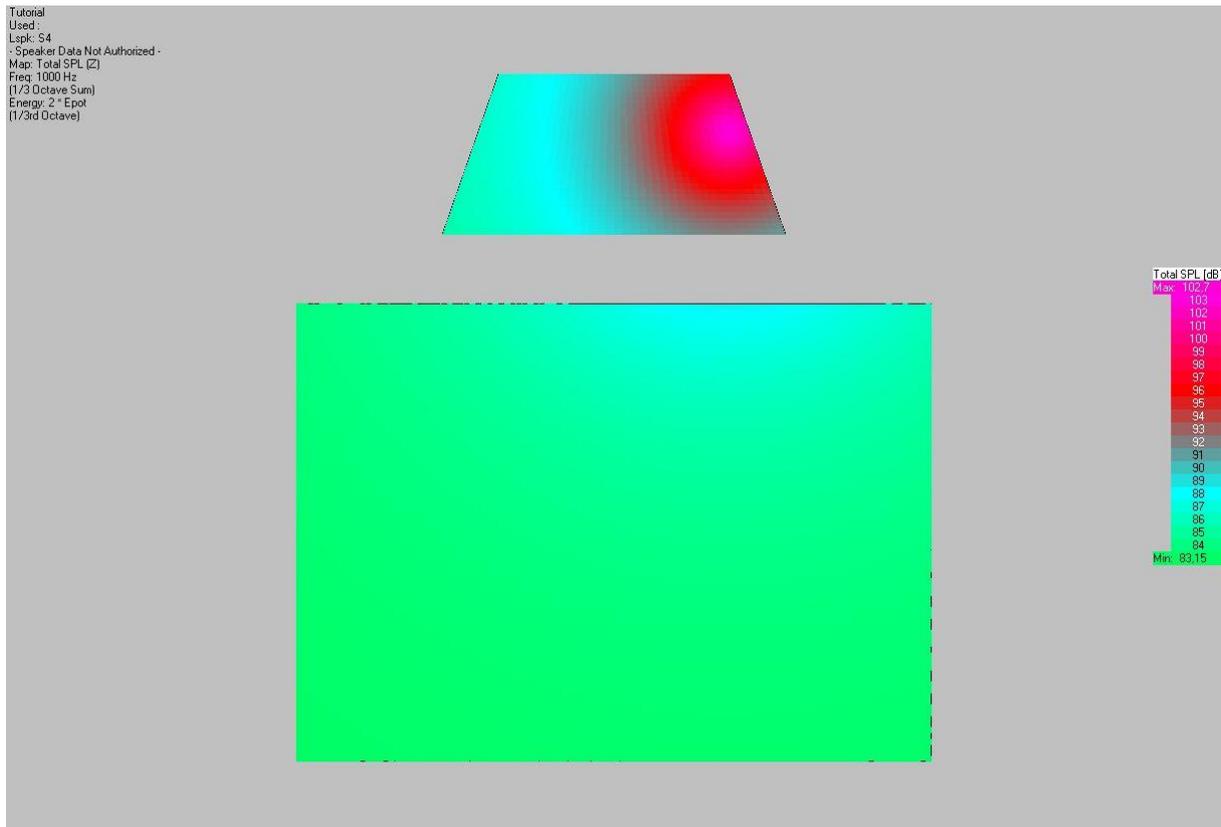


Abb. 86: SPL_{tot} bei 1 kHz über Audience Areas Aufsteckwände 30°

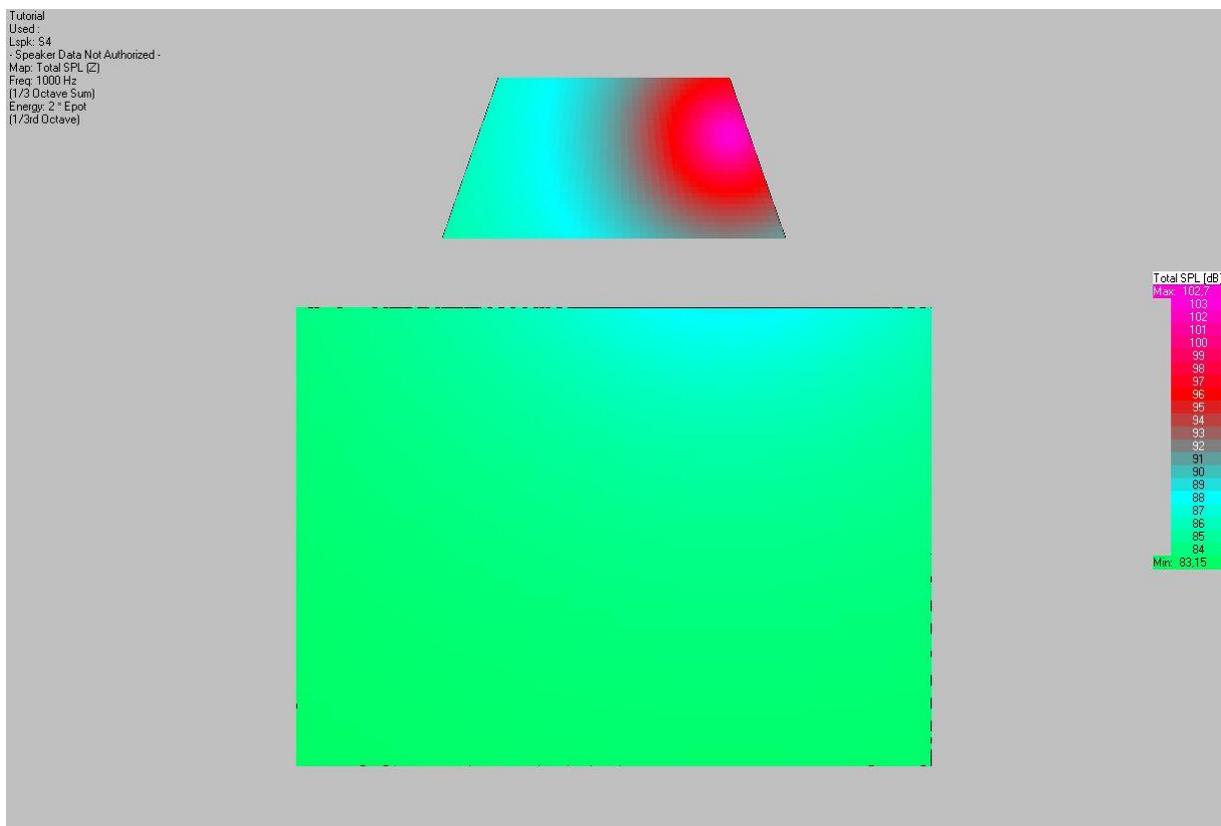


Abb. 87: SPL_{tot} bei 1 kHz über Audience Areas Aufsteckwände 45°

Simulationen mit EASE

Aus den obigen vier Abbildungen können einige Unterschiede in der Höhe der Schalldruckpegel über die interessierenden Flächen erkannt werden. Gegenüber der Simulation ohne Muschel ergeben sich bei allen Aufbauvarianten Erhöhungen der Schalldruckpegel. Diese Unterschiede betragen beim Vergleich zwischen Simulation ohne Muschel und Simulation mit senkrechten Wänden im Bühnenbereich ca. 1 dB und in großen Teilen des Publikumsbereichs auch etwa 1 dB.

Die Unterschiede zwischen den beiden verschiedenen Aufsteckwinkeln sind nach den Simulationsergebnissen relativ gering. Bei Betrachtung der Farbskalen kann sowohl im Bühnenbereich als auch im Publikumsbereich kein Unterschied erkannt werden. Im Vergleich mit den Ergebnissen beim Einsatz der senkrechten Wände ohne Aufsteckteile ist jedoch ein nochmaliger Pegelgewinn vor allem im Bühnenbereich erkennbar.

Klarheitsmaß C_{80}

Nachstehende Abbildungen (Abb. 88 bis Abb. 91) zeigen die Simulationsergebnisse für die Verteilung des Klarheitsmaßes C_{80} über die beiden Audience Areas bei einer Beschallung mit einem Kugelstrahler an der Lautsprecherposition 2 (2,0/-2,0/1,7). Die Wertebereiche werden durch verschiedene Farbgebungen gekennzeichnet. Die Bedeutung der Farben kann durch die Farbskalen am rechten Rand der Abbildungen nachvollzogen werden.

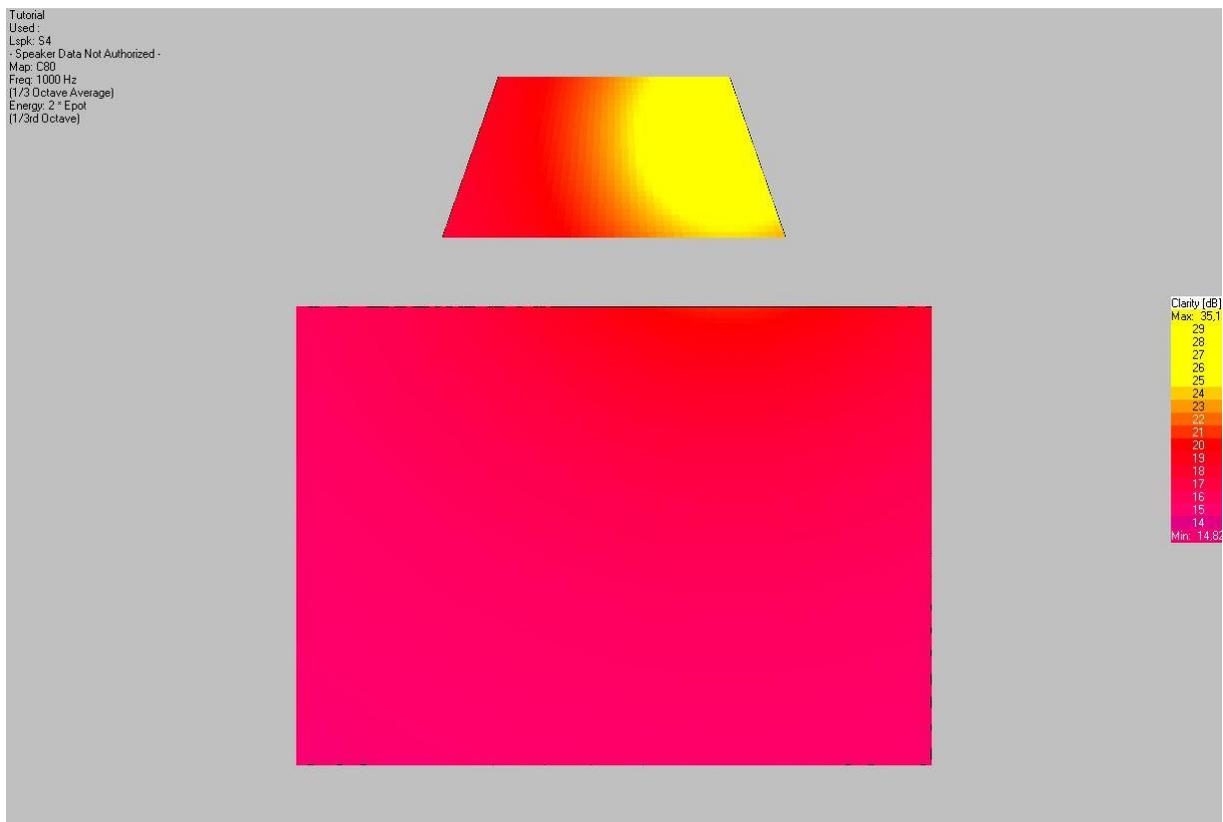


Abb. 88: C_{80} über Audience Areas ohne Muschel

Simulationen mit EASE

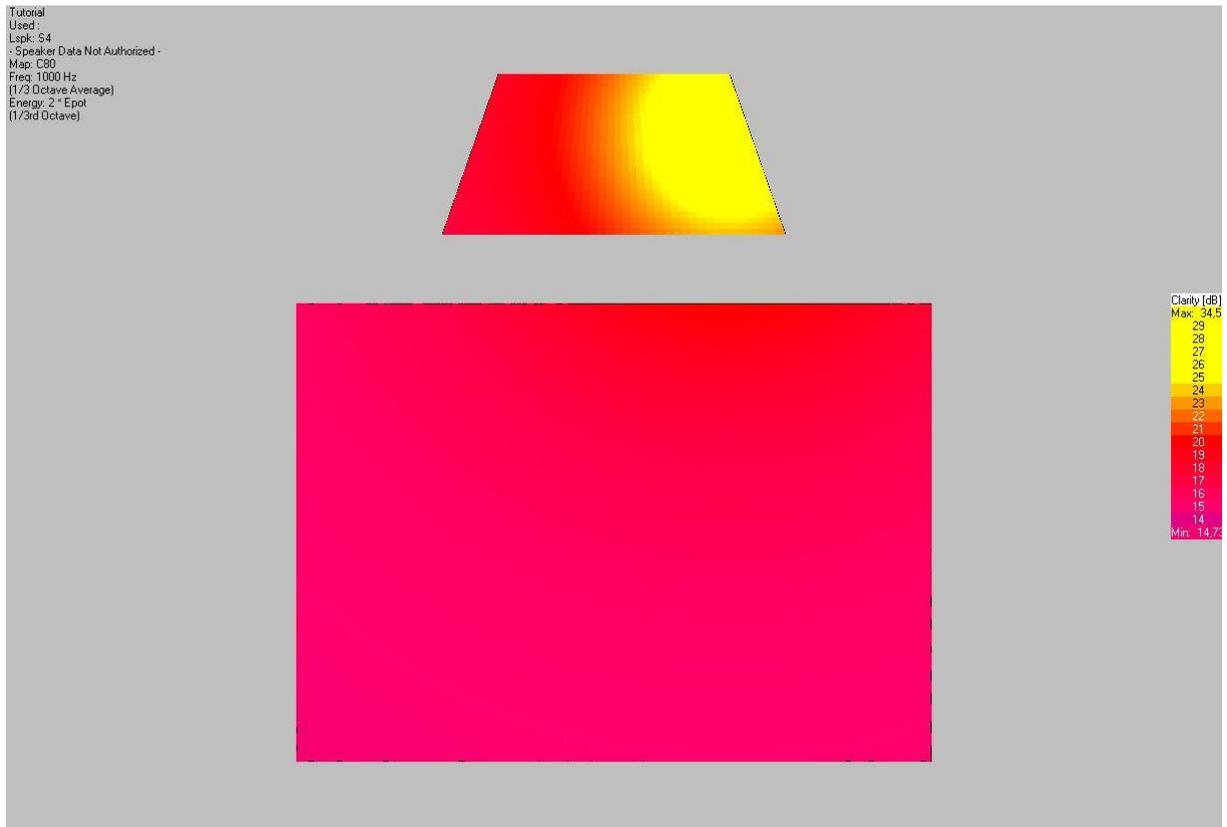


Abb. 89: C_{80} über Audience Areas Stellwände senkrecht

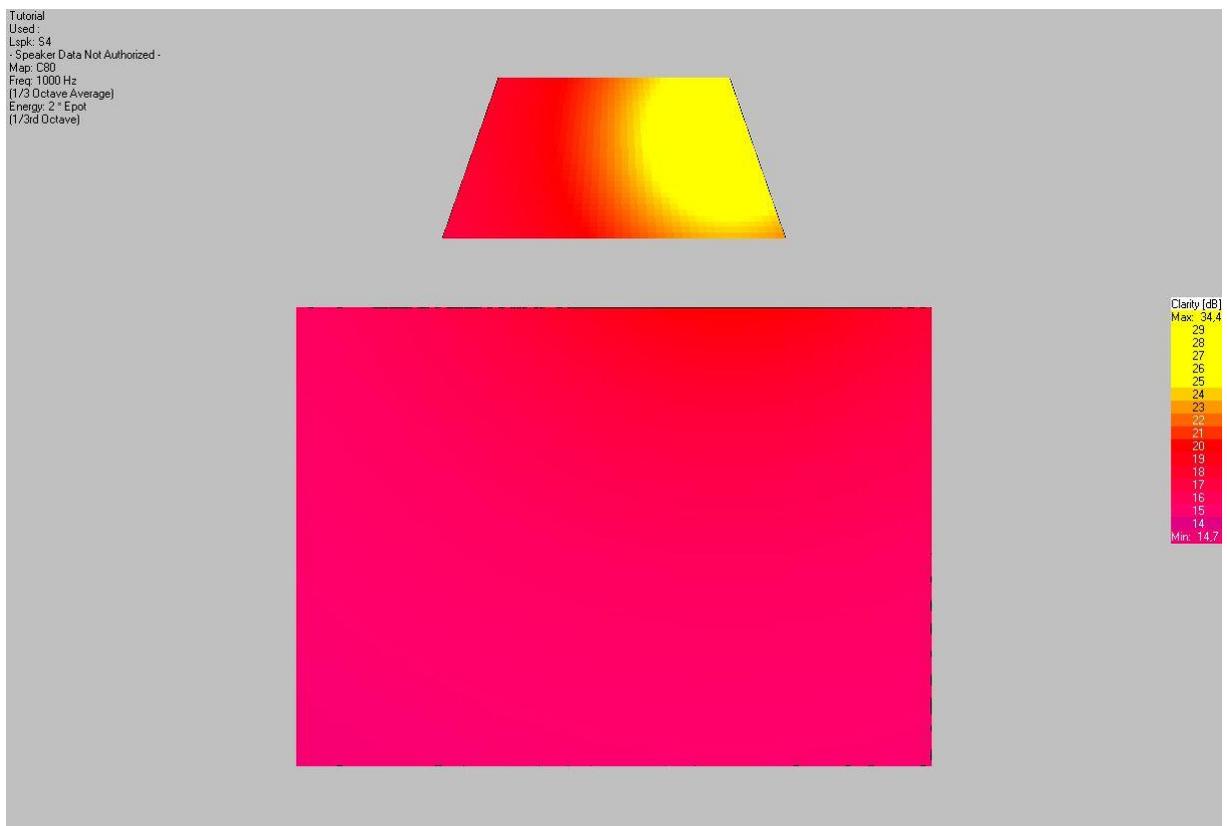


Abb. 90: C_{80} über Audience Areas Aufsteckwände 30°

Simulationen mit EASE

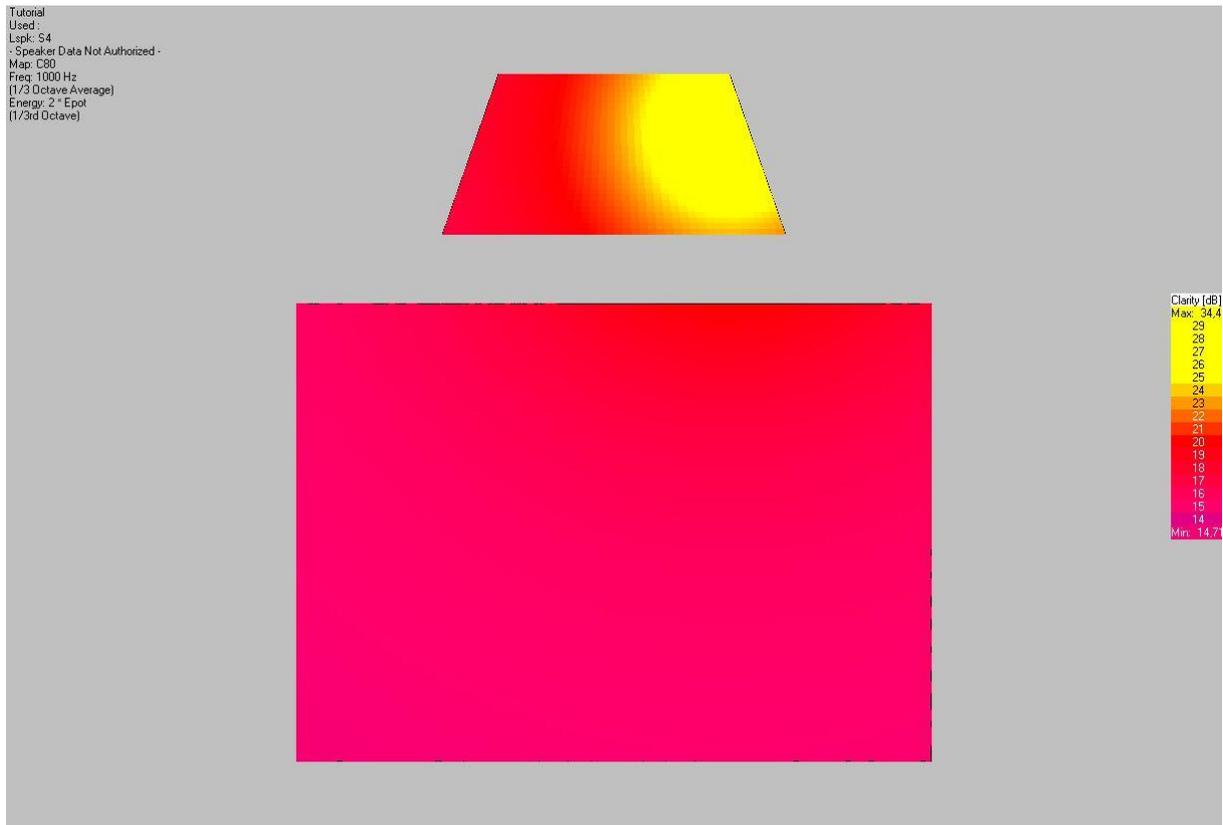


Abb. 91: C_{80} über Audience Areas Aufsteckwände 45°

Zuerst sei hier erwähnt, dass die Werte für das Klarheitsmaß bei Ermittlung in Räumen mit Halbfreifeldbedingungen immer in sehr hohen Bereichen (= hohe Durchsichtigkeit) liegen müssen, da durch die hoch absorbierenden Wände und Decken (so gut wie) keine spät eintreffenden Schallreflexionen zu erwarten sind. Jedoch kann die Beeinflussung des Klarheitsmaßes durch das Einbringen der Akustikstellwände in das akustische Halbfreifeld trotzdem simuliert und analysiert werden.

Beim Vergleich zwischen den obigen vier Simulationsvarianten lässt sich allerdings nur ein wirklich relevanter Unterschied erkennen. Und zwar ist bei allen drei Aufstellvarianten der Akustikwände im Bühnenbereich eine leichte Erhöhung des Klarheitsmaßes gegenüber der Simulation ohne Einsatz der Wände sichtbar. Unterschiede zwischen den drei verschiedenen Aufbauvarianten sind nach diesen Simulationsergebnissen nicht erkennbar. Außerdem ergeben sich im Publikumsbereich auch keine deutlich sichtbaren Unterschiede gegenüber den Simulationen ohne Akustikwände.

Deutlichkeitsmaß C_{50}

Nachstehende Abbildungen (Abb. 92 bis Abb. 95) zeigen die Simulationsergebnisse für die Verteilung des Deutlichkeitsmaßes C_{50} über die beiden Audience Areas bei einer Beschallung mit einem Kugelstrahler an der Lautsprecherposition 2 (2,0/-2,0/1,7). Die Wertebereiche werden durch verschiedene Farbgebungen gekennzeichnet. Die Bedeutung der Farben kann durch die Farbskalen am rechten Rand der Abbildungen nachvollzogen werden.

Simulationen mit EASE

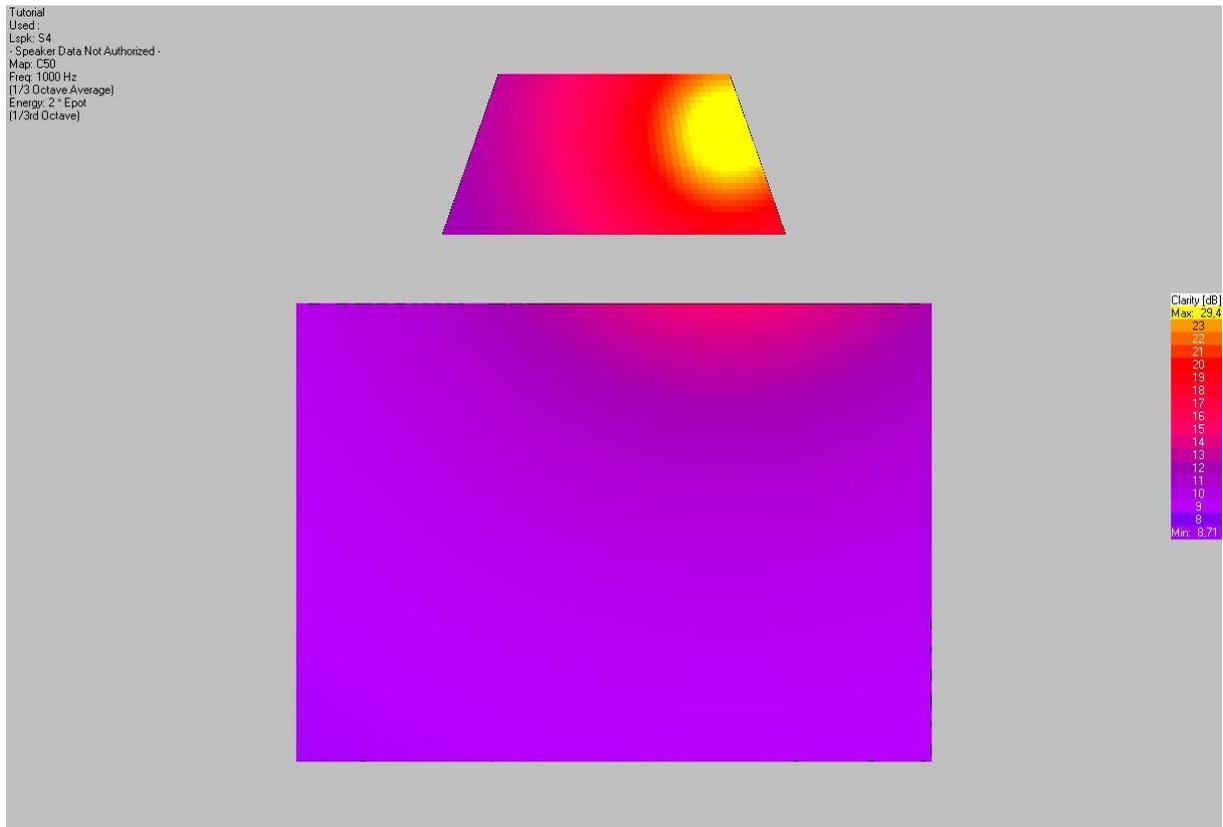


Abb. 92: C_{50} über Audience Areas ohne Muschel

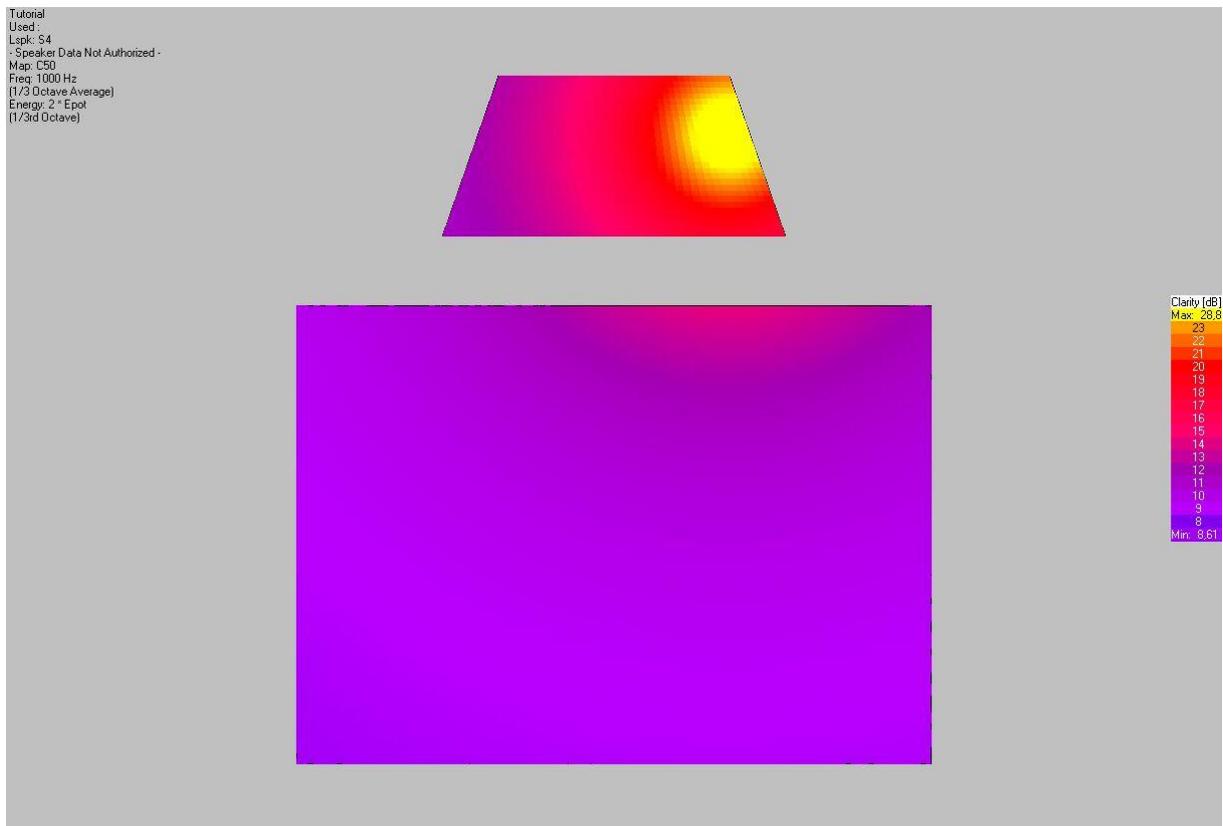


Abb. 93: C_{50} über Audience Areas Stellwände senkrecht

Simulationen mit EASE

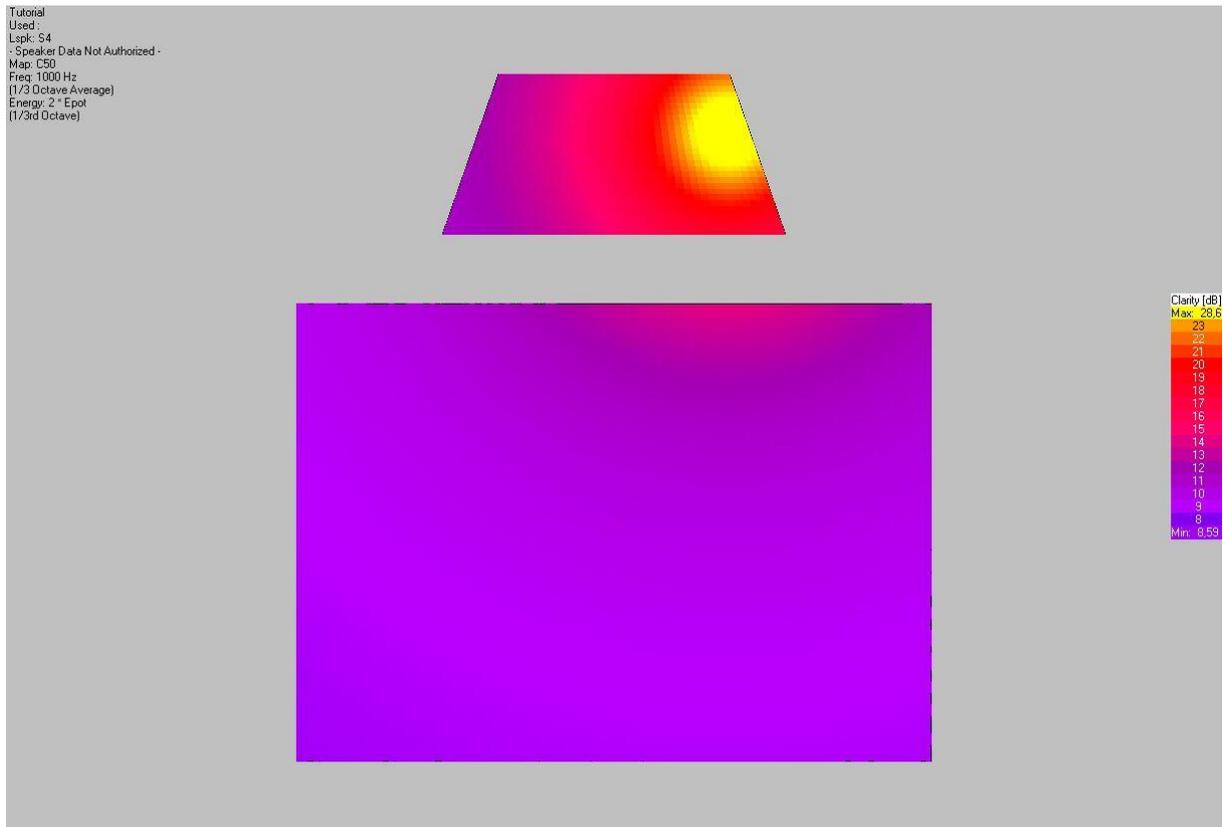


Abb. 94: C_{50} über Audience Areas Aufsteckwände 30°

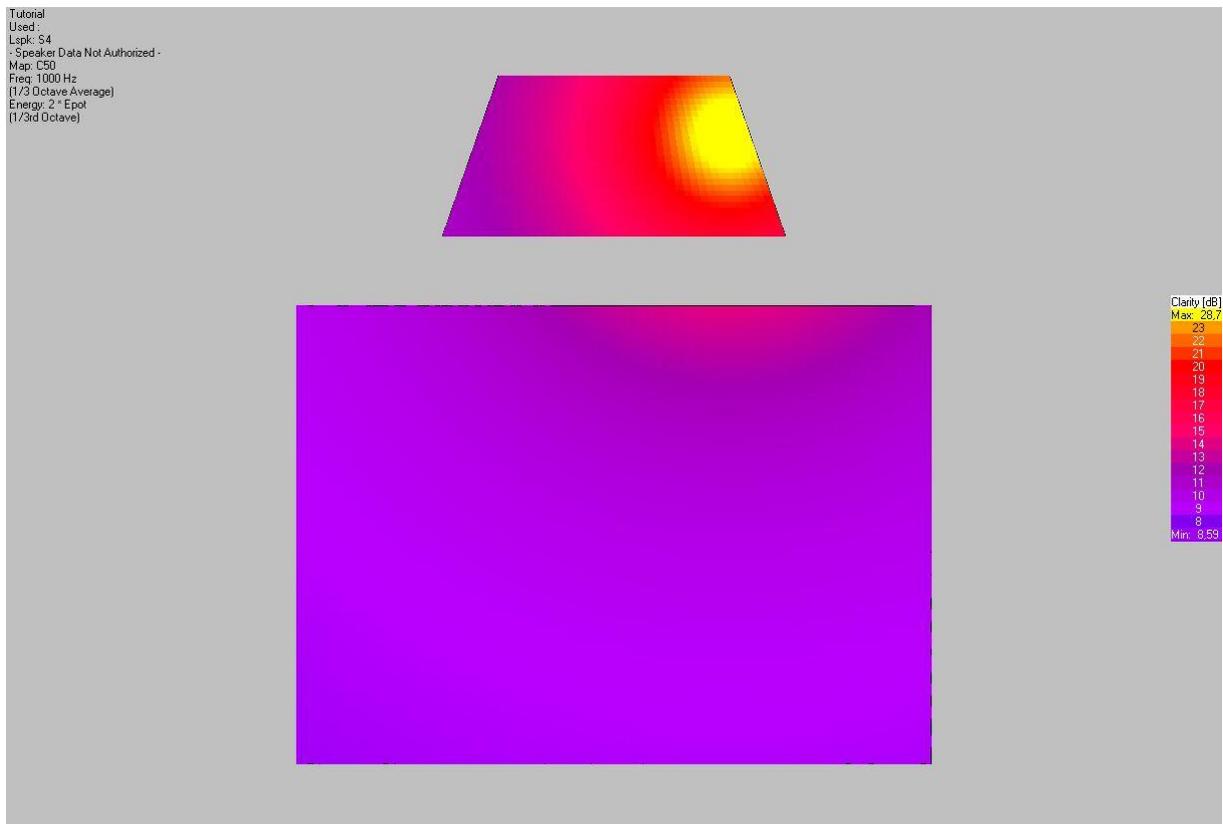


Abb. 95: C_{50} über Audience Areas Aufsteckwände 45°

Im Wesentlichen gelten für die Simulationsergebnisse für das Deutlichkeitsmaß dieselben Annahmen wie schon oben beim Klarheitsmaß. Wiederum liegen die Werte aus denselben Gründen in sehr hohen Bereichen (= sehr gute Verständlichkeit für Sprache). Auch hier sind im Publikumsbereich wiederum keine signifikanten Unterschiede zwischen der Simulation ohne Wände und den Simulationen mit den unterschiedlichen Aufbauvarianten der Akustikwände erkennbar. Im Bühnenbereich ist jedoch abermals eine leichte Verbesserung durch den Einsatz von Akustikstellwänden zu erkennen, allerdings unabhängig davon, welche Aufbauvariante simuliert wird.

5.3.3. Kommentar zu den Simulationsergebnissen

Als Kommentar sei hier erwähnt, dass es schwierig einzuschätzen ist, ob die Beeinflussung der akustischen Parameter in den Simulationen wirklich realistische Werte ergibt oder ob diese in der Realität doch unterschiedlich ausfallen. Die erwarteten Unterschiede vor allem zwischen den Werten ohne Wände und jenen beim Einsatz der Akustikwände sind doch deutlich größer. Ein Vergleich zwischen den unterschiedlichen Aufbauvarianten anhand der Messungen ist in Abschnitt 6.4 gegeben. Um die Aussagekraft der Simulationsergebnisse auch referenzieren zu können, werden diese in Abschnitt 6.5 kurz mit den Messergebnissen verglichen.

6. Messungen am Prototyp

Für die Messungen wurde der Prototyp, der für das Steirische Kammermusikfestival im Einsatz ist, verwendet und in verschiedenen Varianten aufgebaut. Die Messungen wurden zum einen durchgeführt, um die Wirkung der Akustikstellwände in der Praxis zu belegen, in dem eine Erhöhung des Schalldrucks über eine bestimmte Fläche nachgewiesen wird. Zum anderen wurden die Messungen aus persönlichem Interesse durchgeführt, um die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Simulationen zu überprüfen.

6.1. Messumgebung und Bedingungen

Die Auswahl der Messumgebung hat bei akustischen Messungen großen Einfluss auf die Messergebnisse. Daher sind gewisse Anforderungen an die Messumgebung zu stellen.

Diese sollte in erster Linie den praktischen Einsatzgebieten der Akustikwände ähnlich sein. Außerdem soll es möglichst keine Geräusche aus der Umgebung oder Einflussfaktoren wie Wind und Wetter geben, um die Messungen reproduzierbar zu machen. Daneben ist es auch wichtig, dass der Aufbau der Akustikwände einfach und stabil möglich ist und dass das verwendete Messequipment einfach mit Strom versorgt werden kann. Wichtig ist auch, dass eine große ebene Grundfläche vorhanden ist, sodass die Messungen über eine entsprechend große Fläche mit durchgängig gleichen akustischen Eigenschaften durchgeführt werden können.

Um alle diese Anforderungen zu erfüllen, wurden die Messungen am akustischen Rollenprüfstand am Gelände der AVL List GmbH in Graz durchgeführt. Dieser Rollenprüfstand entspricht einem akustischen Halbfreifeldraum. Das heißt, dass abgesehen von der Bodenfläche alle Wände sowie auch die Decke mit akustisch hochabsorbierendem Material ausgekleidet sind. Die Bodenfläche ist mit einem normierten Asphaltbelag ausgestattet und kann somit als schallhart im interessierenden Frequenzbereich angenommen werden. Die untere Grenzfrequenz des Raums liegt bei 85 Hz.

Folgende akustisch relevante Voraussetzungen bietet der akustische Rollenprüfstand der AVL Graz:

- Raumabmessungen: Länge x Breite x Höhe = 12 x 14 x 5 m (netto)
- Akustische Gegebenheiten: ISO362 Pass-by capability
- Untere Grenzfrequenz: 85 Hz
- Raum-in-Raum-Konstruktion mit 30 cm starken Massivwänden, schwingungsentkoppelt oberhalb von 2,5 Hz
- Hintergrundgeräuschpegel: 20 dB(A) bei abgeschalteter Messtechnik und Belüftungsanlage

6.2. Messequipment

In diesem Abschnitt ist das für die Messungen verwendete Equipment mit den jeweiligen Bezeichnungen aufgelistet und illustriert. Auf die Beilage von Datenblättern wurde im Zuge dieser Dokumentation verzichtet, um den Umfang nicht zu sehr zu erhöhen. Diese können jedoch einfach aus dem Internet bezogen werden.

Dodekaeder-Lautsprecher Norsonic AS (Abb. 96)



Abb. 96: Dodekaeder Messlautsprecher

Lautsprecher-Verstärker Norsonic Power Amplifier 260 (Abb. 97)



Abb. 97: Lautsprecher-Verstärker

ICP-Messmikrofone Brüel&Kjaer Type 2671 (Abb. 98)



Abb. 98: ICP-Messmikrofon

Laptop mit Messsoftware WinMLS und RME Mixer für Fireface Soundkarte (Abb. 99)



Abb. 99: Messlaptop mit WinMLS

Soundkarte RME Fireface UFX (Abb. 100)



Abb. 100: RME Soundkarte

Weiteres Equipment

- Luftschall-Kalibrator
- Stative für Lautsprecher und Mikrophone
- diverse Kabel
- Messwagen

6.3. Messablauf

6.3.1. Kurzzusammenfassung des Messablaufs

Die Messungen am Prototyp des Akustikstellwandsystems fanden am 22. November 2013 am Akustikrollenprüfstand der AVL List GmbH in Graz statt.

Messungen am Prototyp

Nacheinander wurden dabei verschiedene Aufbauvarianten der Akustikwände vermessen. Dies war einerseits die Aufbauvariante mit 45° Neigungswinkel und andererseits die Aufbauvariante ohne Aufsteckwände, also nur mit den senkrechten Wandteilen. Es wurde in beiden Fällen die Vollaufbauvariante mit allen acht senkrechten Wandelementen verwendet. Um eine Referenz für die Messungen mit den unterschiedlichen Aufbauvarianten zu haben, wurden alle Messungen auch im leeren Raum, also ohne Verwendung der Akustikstellwände, durchgeführt.

Als Schallquelle für die Messungen wurde ein Dodekaeder-Lautsprecher von Norsonic verwendet, der an drei verschiedenen Positionen im Bühnenbereich aufgestellt wurde. Dieser Lautsprechertyp wurde eingesetzt, um eine möglichst gleichmäßige Schallabstrahlung in alle Raumrichtungen zu erreichen und damit sozusagen einen Kugelstrahler zu simulieren.

Mit ICP-Messmikrofonen von Brüel&Kjaer (Kugelcharakteristik) wurde an jeweils insgesamt 18 Punkten sowohl im Bühnen- als auch im Zuschauerbereich gemessen. Ein Messstellenplan hierzu befindet sich in Abschnitt 6.3.2. In diesem Plan sind auch die drei Lautsprecherpositionen eingetragen.

Die Verarbeitung der Messsignale erfolgte mit Hilfe einer Fireface Soundkarte und mit dem Messprogramm WinMLS, das die Ermittlung unzähliger raumakustischer Parameter ermöglicht. Die eingesetzte Soundkarte ermöglicht die Verarbeitung von gleichzeitig maximal sechs Mikrofonsignalen, weshalb die oben erwähnten 18 Messpunkte in drei Gruppen zu jeweils sechs Messpunkten unterteilt wurden.

Das heißt, dass also insgesamt 27 verschiedene Konfigurationen aus Aufbauvariante, Lautsprecherposition und Mikrofonpositionen vermessen wurden.

6.3.2. Messstellenplan

Folgende Abbildung (Abb. 101) zeigt einen Plan für die Positionierung des Lautsprechers und der Messmikrofone am Akustikrollenprüfstand. Allen Punkten sind dabei Koordinaten zugeordnet. Der Ausgangspunkt (0/0) liegt dabei unter dem mittleren Steher der Akustikstellwände. Um den Vorgaben für eine normierte Ohrposition nachzukommen, wurden alle Mikrofone auf einer Höhe von 1.2 m positioniert. Der Lautsprecher wurde mit seinem akustischen Zentrum ebenfalls in einer Höhe von 1.2 m ausgerichtet. Um die Arbeiten für den Aufbau- und Abbau der Stellwände zu ermöglichen, war es nötig, hinter den Akustikwänden einen Abstand von 1,5 m zur Wand des Messraums zu halten.

Messungen am Prototyp

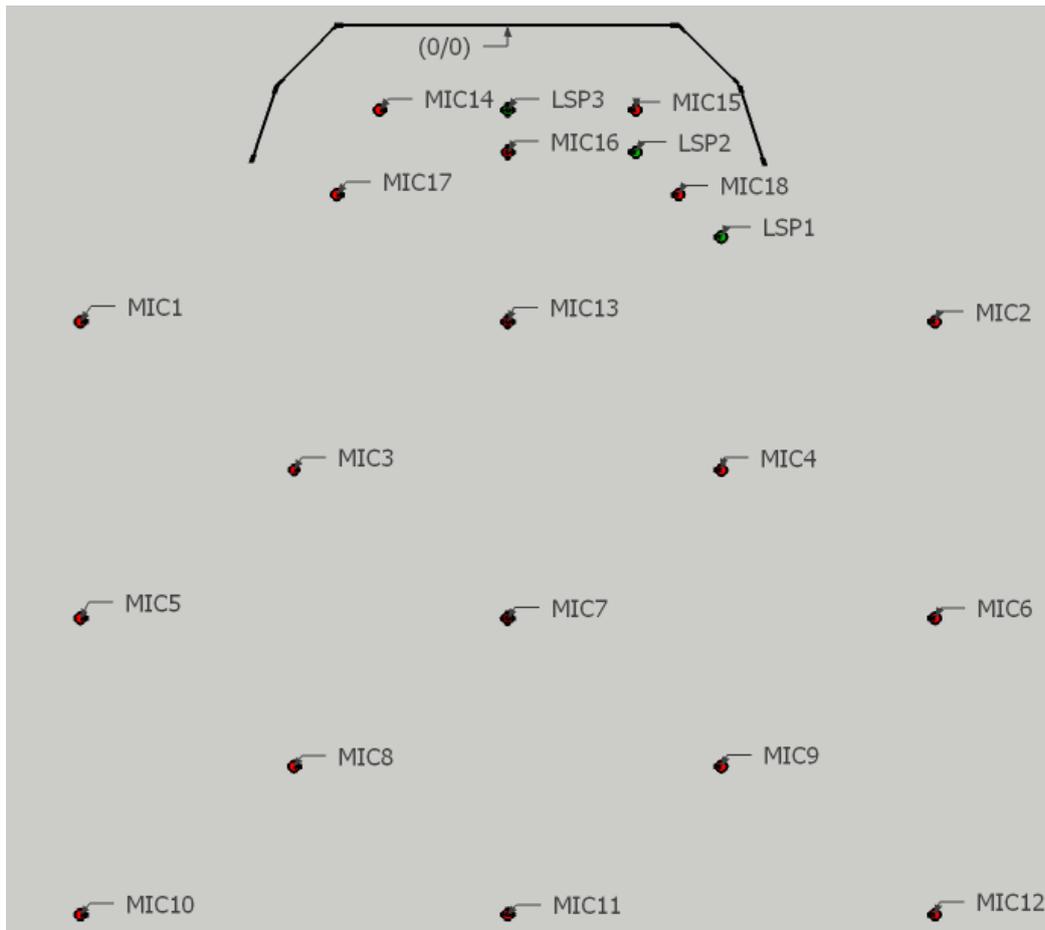


Abb. 101: Lautsprecher- und Mikrofonpositionsplan

Tabelle 1 zeigt die Messpunkte mit den entsprechenden Koordinaten, als Bezugspunkt dient der mittlere Steher der Stellwände (mit (0/0) markiert).

Tabelle 1: Mikrofonpositionen mit Koordinaten

Mic.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x	-5.00	5.00	-2.50	2.50	-5.00	5.00	0.00	-2.50	2.50
y	3.50	3.50	5.25	5.25	7.00	7.00	7.00	8.75	8.75
Mic.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
x	-5.00	0.00	5.00	0.00	-1.50	1.50	0.00	-2.00	2.00
y	10.50	10.50	10.50	3.50	1.00	1.00	1.50	2.00	2.00

Des Weiteren sind in Tabelle 2 die Positionen für den Lautsprecher mit den entsprechenden Koordinaten eingetragen.

Tabelle 2: Lautsprecherpositionen mit Koordinaten

LSP	1	2	3
x	2.50	1.50	0.00
y	2.50	1.50	1.00

Messungen am Prototyp

Zur einfachen und schnellen Orientierung bei der Positionierung von Lautsprecher und Mikrofonen wurde am Boden des Akustikrollenprüfstands quasi ein Raster aufgetragen, in dem alle relevanten Punkte markiert wurden. Dies geschah durch Beschriftung mit Koordinatenposition, Nummer der Quellen- oder Messstelle und Markierung durch einen Farbpunkt (blau = Steherposition, grün = Lautsprecherposition, rot = Mikrofonposition).

Beispielhaft sind in Abb. 102 die Markierungen für eine Lautsprecherposition (links) und eine Mikrofonposition (rechts) zu sehen.



Abb. 102: Positionsmarkierung für Lautsprecher (links) und Mikrofon (rechts)

6.3.3. Eckdaten zur Messung (Tabelle 3)

Tabelle 3: Eckdaten zur Messung

Datum	22. November 2013
Zeitraum	15:00 bis 23:00
Ort	AVL Graz, Hans List-Platz 1, Akustischer Rollenprüfstand mit Halbfreifeldbedingungen
Raumabmessungen	$l \times b \times h = 12 \times 14 \times 5\text{m}$
Akustische Eigenschaften	Untere Grenzfrequenz bei 85 Hz, Hintergrundgeräuschpegel bei 20 dBA
Raumtemperatur	19° C
Beteiligte Personen	Alexander Ulz (Durchführung der Messungen) Holger Hütter (Anlieferung der Akustikwände und Mithilfe bei Auf- und Abbau) Anita Orthofer (Mithilfe bei den Messungen)
Messequipment von	AVL List GmbH, Department for Powertrain and Vehicle Acoustics Technische Universität Graz

6.3.4. Fotos zu den Messungen

Nachstehende Abbildungen (Abb. 103 bis Abb. 106) wurden im Zuge der Messungen am Akustikrollenprüfstand erzeugt und dienen lediglich der Dokumentation der Messabläufe.

Messungen am Prototyp

Kurze Beschreibungen zu den Abbildungen sind den jeweiligen Abbildungsbeschriftungen zu entnehmen.



Abb. 103: Lautsprecher und Mikrofone

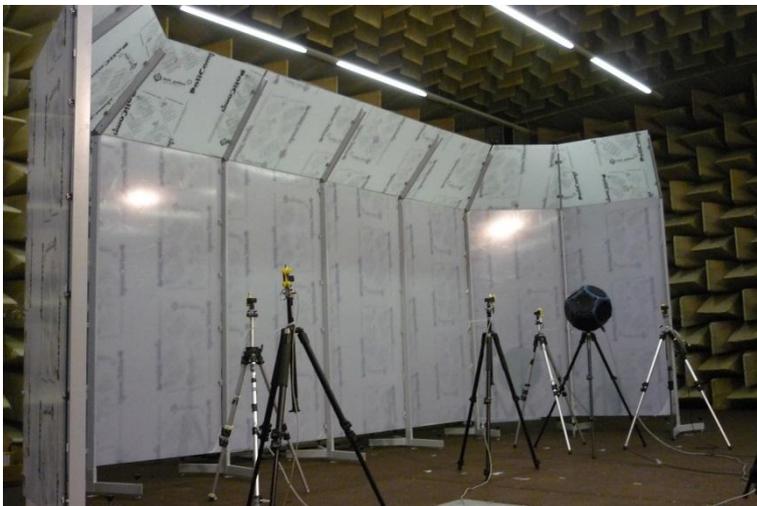


Abb. 104: Akustikstellwände mit Messaufbau

Messungen am Prototyp



Abb. 105: Dodekaederlautsprecher mit Stativ



Abb. 106: Mikrofone im Messraum

Nachstehende Abbildungen (Abb. 107 bis Abb. 111) stammen ebenfalls aus den Aufbauten bei den Messungen. Sie dienen zur Ergänzung der Abbildungen in Abschnitt 4.10 und zeigen einige Details der Konstruktionen der Akustikstellwände. Kurze Beschreibungen zu den Abbildungen sind wiederum den Beschriftungen zu entnehmen.

Messungen am Prototyp



Abb. 107: Detailansicht Aufsteckrahmen mit Winkelstück 45°



Abb. 108: Detailansicht Aufsteckwände 45°

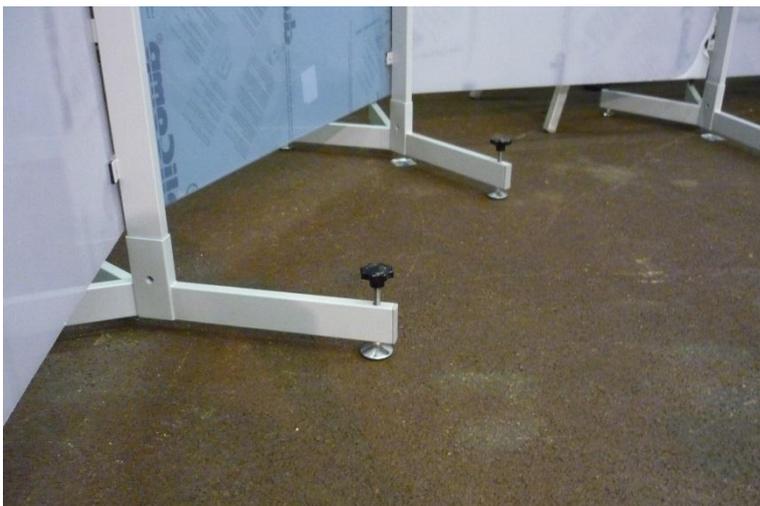


Abb. 109: Detailansicht Stellfüße mit Höhenverstellmöglichkeit



Abb. 110: Detailansicht Winkelstück 45°

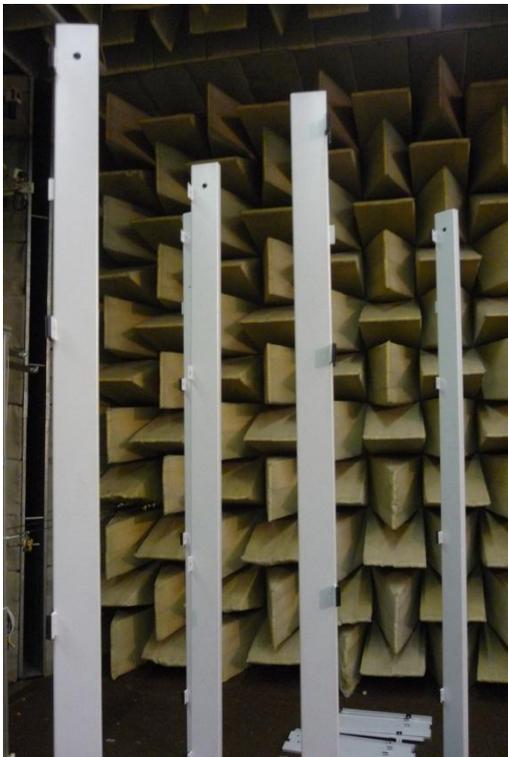


Abb. 111: Verschiedene Steherteile

6.4. Ergebnisse der Messungen (Auszug)

An dieser Stelle alle bei den Messungen ermittelten Ergebnisse darzustellen, ist auf Grund der enormen Anzahl nicht möglich, da es insgesamt einige hundert verschiedene Kombinationen aus Aufbauvariante, Lautsprecherposition, Mikrofonposition und ausgewertetem Parameter gibt. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse sollen daher einen kurzen Überblick auf die Beeinflussung der vorliegenden akustischen Situation durch das Akustikstellwandssystem in verschiedenen Aufbauvarianten geben. Dabei wird auch versucht, durch die Wahl der entsprechenden Lautsprecherposition eine Vergleichbarkeit zu

Messungen am Prototyp

den oben gezeigten Simulationsergebnissen herzustellen. Die Messergebnisse sind jeweils für einen Frequenzbereich von 63 Hz bis 16 kHz in Oktavbändern dargestellt.

Für jede durchgeführte Messung wurden immer jeweils sechs Mikrofonpositionen gleichzeitig aufgenommen (Nr. 1 – 6 bzw. 7 – 12 und 13 – 18 → vgl. Abb. 101). Zu jeder Kombination aus Aufbauvariante, Lautsprecherposition und Mikrofonpositionen wurden immer zwei Messungen durchgeführt. Einerseits wurde für die Ermittlung verschiedener raumakustischer Parameter wie T_{30} , Clarity usw. eine Sinussweep von 16 Hz bis 20 kHz als Anregungssignal verwendet (siehe Messseite 1 mit Konfiguration „Room Acoustics“ in Abb. 112).

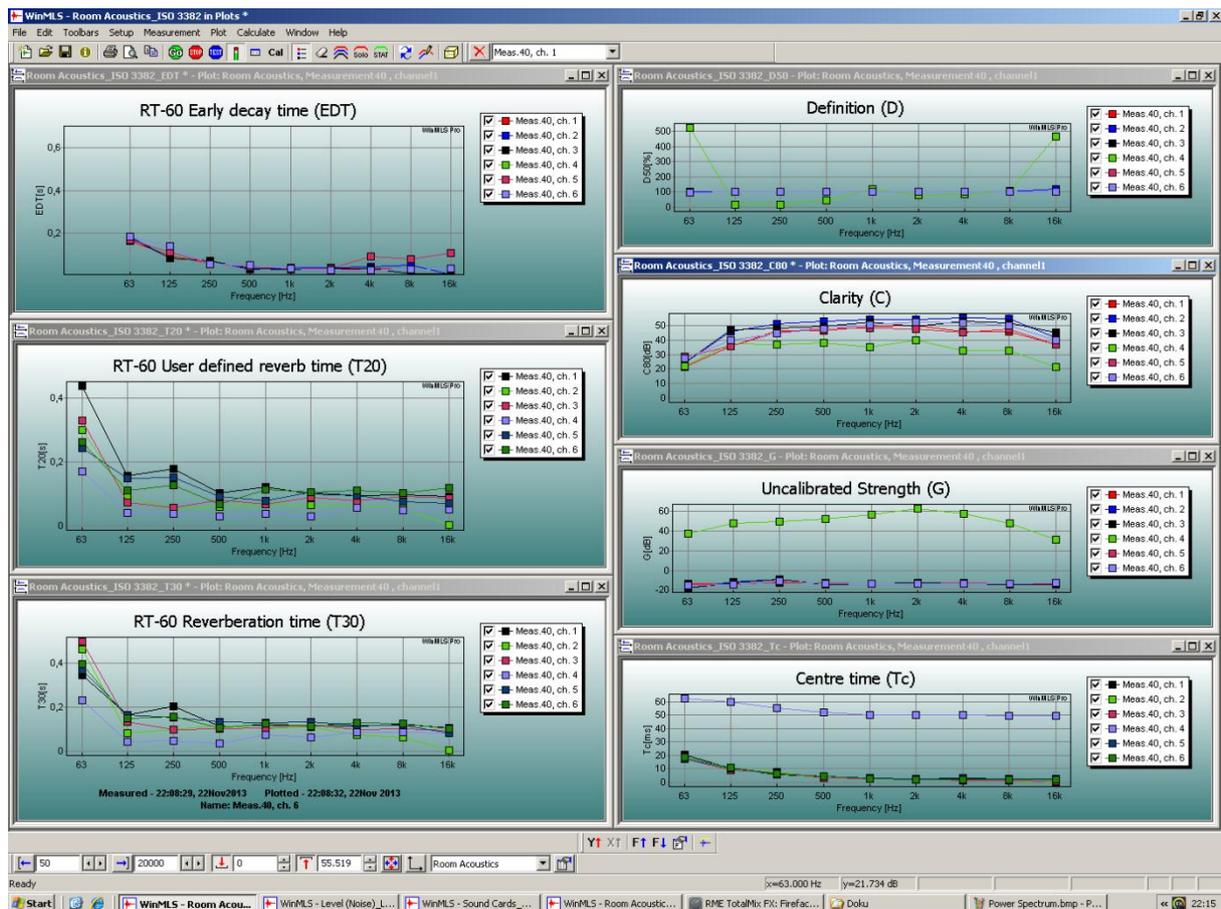


Abb. 112: Screenshot mit Messkonfiguration "Room Acoustics"

Andererseits wurde weißes Rauschen als Anregungssignal verwendet, um die Schalldruckpegelverteilungen über das Spektrum zu ermitteln (siehe Messseite 2 mit Konfiguration „Leq“ in Abb. 113).

Messungen am Prototyp

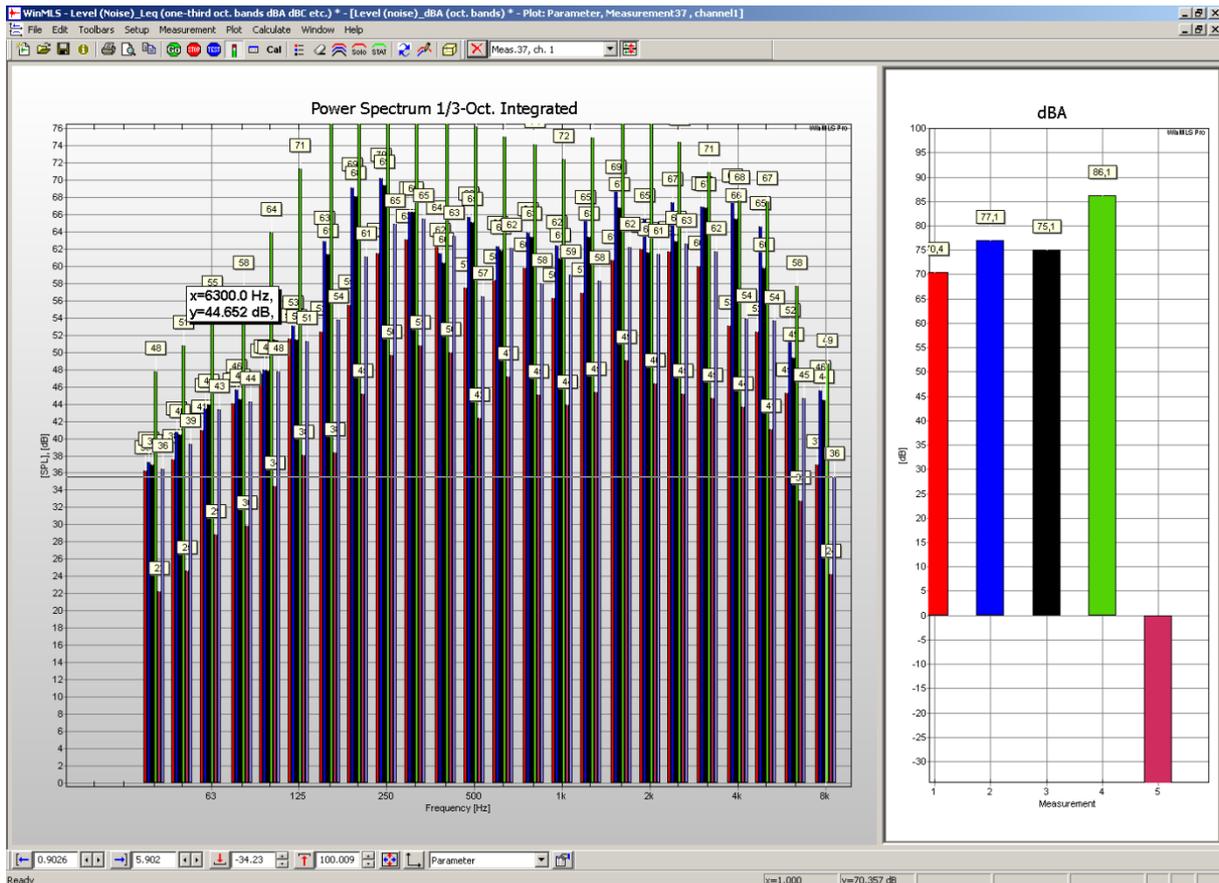


Abb. 113: Screenshot mit Messkonfiguration "Leq"

Zusätzlich ist hier noch anzumerken, dass für die Mikrofonpositionen im Bühnenbereich (13 - 18) auf Grund der unmittelbaren Nähe zum Lautsprecher ein geringerer Ausgangspegel des Dodekaeders (-12.4 dB im Fireface-Mixer) verwendet wurde, um die Mikrofone nicht zu übersteuern. Da die Mikrofonpositionen 1 – 12 wesentlich weiter entfernt sind und eine möglichst gute Aussteuerung notwendig ist, wurde für diese der Ausgangspegel höher eingestellt (-6.6 dB im Fireface-Mixer).

Um die Ergebnisse der Messungen übersichtlich zu gestalten, wurden diese teilweise anhand der exportierten txt.-Files nachträglich aufbereitet. Alle präsentierten Messergebnisse beziehen sich auf die in Abb. 101 eingetragenen Mikrofonpositionen und sind für die Lautsprecherposition 2 ausgewertet, die auch für die Simulationen verwendet wird. Alle Messungen wurden natürlich auch für die anderen Lautsprecherpositionen durchgeführt und ausgewertet. Da jedoch die Trends immer dieselben bleiben und sonst enorm viele Ergebnisse darzustellen wären, sind die Ergebnisse nur für diese eine Lautsprecherposition dargestellt.

Nachhallzeit RT-60 (extrapoliert aus T₃₀)

Folgende Abbildungen (Abb. 114 bis Abb. 122) zeigen die Messergebnisse zur Nachhallzeit für alle 18 Mikrofonpositionen und die oben genannten drei Aufbauvarianten bei Beschallung mit einem Dodekaeder-Lautsprecher an Position 2. In einer Spalte angeordnet

Messungen am Prototyp

befinden sich von oben nach unten betrachtet immer die Darstellungen der Ergebnisse für die Messung ohne Stellwände, für den Aufbau mit senkrechten Wänden und für den Vollaufbau mit den Aufsteckwänden mit 45° Neigungswinkel.

ch.1 – ch.6 entspricht MIC 1-6

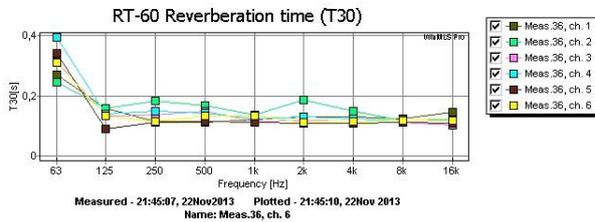


Abb. 114: RT-60 Ohne Stellwände MIC 1-6

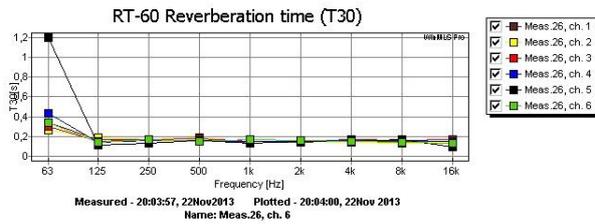


Abb. 116: RT-60 Stellwände senkrecht MIC 1-6

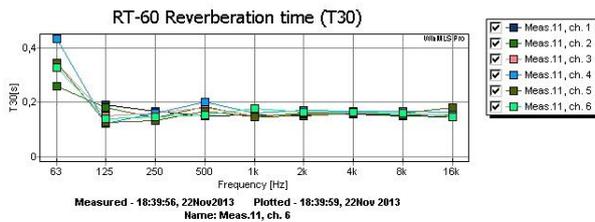


Abb. 118: RT-60 Aufsteckwände 45° MIC 1-6

ch.1 – ch.6 entspricht MIC 7-12

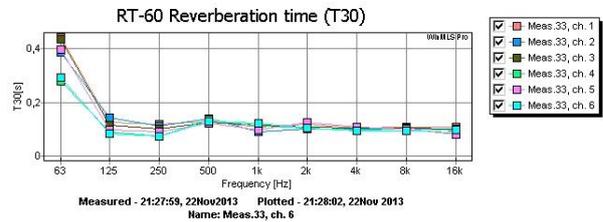


Abb. 115: RT-60 Ohne Stellwände MIC 7-12

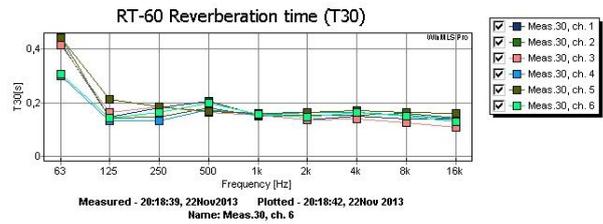


Abb. 117: RT-60 Stellwände senkrecht MIC 7-12

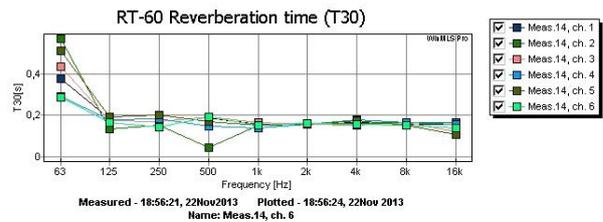


Abb. 119: RT-60 Aufsteckwände 45° MIC 7-12

Messungen am Prototyp

ch.1 – ch.6 entspricht MIC 13-18

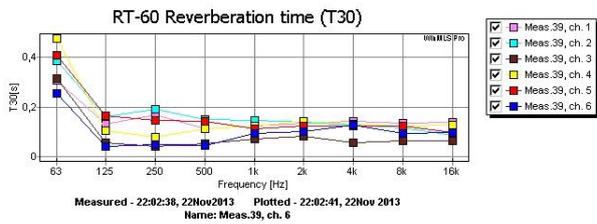


Abb. 120: RT-60 Ohne Stellwände MIC 13-18

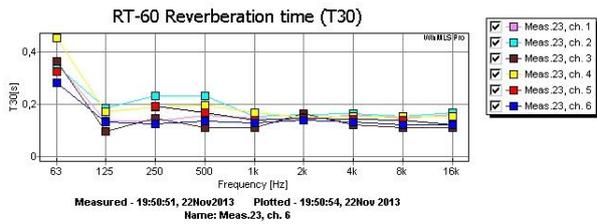


Abb. 121: RT-60 Stellwände senkrecht MIC 13-18

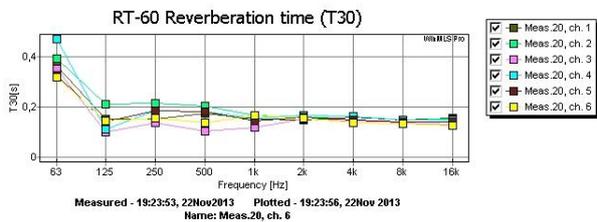


Abb. 122: RT-60 Aufsteckwände 45° MIC 13-18

Werden jeweils die Messergebnisse für die drei Aufbauvarianten (übereinander stehend) miteinander verglichen, kann an allen Mikrofonpositionen derselbe Trend festgestellt werden. Wie zu erwarten, steigt die Nachhallzeit beim Einbringen der Akustikstellwände in den Raum an. Der Unterschied zwischen den Messungen mit den senkrechten Stellwänden und mit dem Gesamtaufbau mit 45° Aufsteckwänden ergibt bei den Messwerten der Nachhallzeit eine sehr kleine Veränderung, da die zusätzlich eingebrachte Reflexionsfläche einen doch recht kleinen Anteil im Vergleich mit allen anderen betrachteten Grenzflächen darstellt.

Um die Veränderung der Nachhallzeit auf einen Blick sehen zu können, zeigt Tabelle 4 deren Werte für den Referenzpunkt an Mikrofonposition 7 bei 1 kHz.

Tabelle 4: RT-60 @ 1 kHz am Referenzpunkt (MIC 7)

	RT-60 @ 1 kHz MIC 7
Ohne Stellwände	0.11 s
Stellwände senkrecht	0.15 s
Aufsteckwände 45°	0.16 s

Kommentar: In Abb. 116 ist der angegebene Messwert für ch.1 bei 63 Hz mit großer Wahrscheinlichkeit auf einen Verarbeitungsfehler der Software zurückzuführen, da dieser verglichen mit allen anderen Messwerten deutlich zu hoch liegt.

Gesamtschalldruckpegel SPL_{total}

Da die Darstellung des Gesamtschalldruckpegels (vgl. Abb. 112) durch WinMLS bei der gleichzeitigen Verwendung von sechs Messkanälen über den gesamten Frequenzbereich sehr unübersichtlich werden kann, wurden die entsprechenden Messergebnisse aus den .txt-Files exportiert und nachbearbeitet. Daher unterscheidet sich die Art der folgenden Darstellungen von den anderen in diesem Abschnitt. Eine Darstellung über die betrachtete Fläche vergleichbar zu den Simulationen (vgl. mit Abschnitt 5.3.2) ist durch die Messung an diskreten Punkten hier nicht so einfach möglich. Daher wird eine andere Darstellungsweise gewählt, welche kompakt für über die gesamte Fläche verteilte Positionen die Schalldruckpegel darstellt. Die folgenden drei Tabellen (Tabelle 5, Tabelle 6 und Tabelle 7) zeigen die Schalldruckpegel an sechs Positionen (vgl. Positionsplan in Abb. 101) über den gesamten betrachteten Frequenzbereich unterteilt in Terzen von 40 Hz bis 10 kHz für die drei Aufbauvarianten – ohne Stellwände, senkrechte Stellwände und Vollaufbau mit Aufsteckwänden mit 45°. Zu beachten ist hier noch, dass es notwendig war, den Ausgangspegel für die Messungen im Bühnenbereich bei Verwendung von Stellwänden noch einmal um zusätzlich 5 dB zu senken, um eine Übersteuerung der Mikrophone zu verhindern. Dies muss in der Interpretation der Messergebnisse und beim Vergleich der Aufbauvarianten berücksichtigt werden.

Tabelle 5: SPL_{total} an sechs Mikrofonpositionen ohne Stellwände

Ohne Stellwände						
	MIC 1	MIC 3	MIC 7	MIC 10	MIC 14	MIC 16
Frequenz [Hz]	SPL [dBA]					
40	31,77	40,19	39,95	28,85	34,39	41,72
50	37,04	41,37	37,47	35,02	43,21	43,63
62,5	45,48	45,11	42,46	45,46	42,93	48,52
80	42,84	44,90	45,33	45,25	42,69	48,83
100	49,07	50,35	50,55	49,35	47,58	51,88
125	55,00	56,48	56,12	55,23	51,52	55,69
160	59,71	61,82	61,32	62,10	54,47	65,73
200	62,39	62,69	62,37	63,44	51,12	72,22
250	59,07	58,21	59,03	61,65	56,42	73,30
315	55,09	49,27	51,99	58,86	60,53	69,85
400	54,56	55,28	53,96	54,04	62,51	64,50
500	52,86	57,79	56,63	51,73	59,52	68,60
630	57,43	58,06	60,71	50,66	52,48	65,09
800	58,57	57,44	59,73	49,20	58,71	66,49
1000	59,33	51,80	54,94	52,20	55,32	63,53
1260	54,13	57,14	56,45	58,03	58,64	64,32
1600	62,88	58,75	60,82	59,10	59,92	67,02
2000	54,79	54,41	56,49	51,13	57,91	63,84
2500	53,55	54,33	57,13	56,53	56,97	63,33

Messungen am Prototyp

3160	55,15	55,37	56,34	53,99	55,18	61,13
4000	59,30	56,90	58,13	58,09	57,77	60,26
5000	54,60	49,66	54,72	51,40	55,38	54,95
6300	44,91	42,13	42,28	38,01	44,46	46,80
8000	36,98	36,74	34,84	31,60	38,47	42,89
10000	30,85	29,26	27,36	28,13	30,61	36,07

Tabelle 6: SPL_{total} an sechs Mikrofonpositionen Stellwände senkrecht

Stellwände senkrecht						
	MIC 1	MIC 3	MIC 7	MIC 10	MIC 14	MIC 16
Frequenz [Hz]	SPL [dBA]					
40	33,30	41,93	41,12	24,83	37,51	39,72
50	39,12	43,97	38,63	33,87	40,33	41,29
62,5	47,05	45,22	39,98	42,18	46,96	46,81
80	42,54	42,11	40,96	38,34	46,31	45,86
100	42,16	51,09	50,68	47,73	44,81	47,50
125	54,90	62,85	59,79	59,08	51,16	60,05
160	59,85	68,68	64,39	64,84	63,97	65,55
200	58,78	63,79	63,68	62,67	65,28	66,80
250	65,97	62,44	64,16	65,17	64,64	70,11
315	64,71	55,00	61,41	57,94	63,34	66,88
400	62,68	60,13	59,98	56,47	65,72	62,46
500	59,43	58,04	59,83	53,28	61,59	69,13
630	58,58	59,36	61,45	50,67	59,06	64,92
800	59,94	59,88	61,70	49,17	62,17	64,02
1000	61,24	58,90	61,06	52,04	58,85	62,66
1260	60,84	62,26	61,60	53,41	60,86	62,30
1600	61,73	60,75	65,48	56,06	63,22	67,03
2000	60,56	63,48	62,91	53,95	58,50	67,86
2500	59,75	62,68	64,69	55,22	59,02	66,48
3160	60,68	63,46	62,42	53,74	56,75	64,78
4000	61,47	61,27	61,41	51,20	58,85	60,68
5000	57,46	55,13	58,77	50,82	56,02	59,27
6300	48,76	48,21	47,44	39,91	48,26	48,71
8000	40,54	68,44	40,06	32,26	40,35	39,90
10000	33,39	30,81	34,12	24,66	33,32	30,07

Kommentar zu Tabelle 6: Die Einbrüche des Schalldruckpegels bei 80 Hz (siehe MIC 1, MIC 3, MIC 7) sind vermutlich auf eine durch die jetzt im Raum befindlichen Stellwände entstandene Raummode zurückzuführen. Wie schon bei der Beschreibung der akustischen Eigenschaften des Messraums (siehe 6.1) erwähnt, ist eine totale Absorption erst für Frequenzen über 85 Hz zu erwarten, weshalb sich die 80 Hz – Mode ausbilden kann.

Messungen am Prototyp

Tabelle 7: SPL_{total} an sechs Mikrofonpositionen Aufsteckwände 45°

Aufsteckwände 45°						
	MIC 1	MIC 3	MIC 7	MIC 10	MIC 14	MIC 16
Frequenz [Hz]	SPL [dBA]					
40	33,92	42,51	41,47	24,99	39,26	40,69
50	39,81	44,83	39,01	34,21	41,34	41,97
62,5	47,58	45,28	40,42	42,53	48,62	48,13
80	42,85	42,45	41,29	39,02	47,89	46,41
100	43,11	51,39	50,78	48,17	46,43	47,70
125	55,23	63,63	60,64	59,64	52,48	61,00
160	60,03	70,06	65,07	64,79	65,71	66,34
200	58,84	64,22	64,02	62,91	67,64	67,23
250	66,76	63,37	65,26	65,48	66,15	70,70
315	66,76	55,48	62,42	58,39	64,76	67,65
400	63,95	60,86	60,77	56,74	66,94	63,38
500	60,69	58,21	60,63	53,57	62,63	70,42
630	58,84	59,74	61,58	50,72	61,01	66,49
800	60,38	60,69	62,06	49,36	63,46	65,03
1000	61,73	61,05	62,48	52,24	59,99	63,98
1260	61,79	63,40	62,33	53,97	61,78	63,25
1600	62,15	61,53	66,81	56,41	64,23	67,51
2000	61,27	65,00	64,12	54,20	59,37	69,64
2500	60,44	64,17	65,69	55,15	60,44	67,37
3160	61,81	65,38	63,97	54,00	57,64	66,06
4000	62,08	62,82	61,98	51,22	59,64	61,55
5000	58,53	56,14	59,65	51,38	57,13	61,19
6300	50,15	49,90	48,40	40,13	49,96	49,62
8000	41,42	36,99	41,00	32,64	41,60	40,90
10000	33,99	31,51	35,24	24,96	34,48	31,02

Werden die Schalldruckpegel in den drei Tabellen miteinander verglichen, so können einige Trends zusammengefasst werden. Für alle betrachteten Mikrofonpositionen ergeben sich höhere Pegel, wenn die Akustikwände in den Raum eingebracht werden. Die Anstiege zwischen den Messungen ohne Wände und jenen mit senkrechten Stellwänden sind verständlicherweise deutlich höher als jene zwischen den senkrechten Stellwänden und bei Verwendung des Vollaufbaus mit Aufsteckwänden. Diese Anstiege sind eigentlich an allen Positionen und über alle Frequenzen zu beobachten, allerdings sind sie in den Randbereichen des Frequenzbereichs nicht so stark ausgeprägt wie bei mittleren Frequenzen.

Die Größe des Pegelanstiegs zwischen den drei Aufbauvarianten ist natürlich stark von der Entfernung der betrachteten Messposition zum Lautsprecher abhängig. Während dieser im Publikumsbereich (MIC 1, MIC 3, MIC 7 und MIC 10) meist zwischen 0,5 dB und etwa 3 dB

Messungen am Prototyp

beträgt, sind im Bühnenbereich (MIC 14 und MIC 16) im mittleren Frequenzbereich Anstiege von bis zu 10 dB (Achtung auf -5 dB – Offset bei Verwendung der Stellwände) gegenüber den Messungen ohne Akustikstellwände erkennbar. Was bei diesen Messergebnissen auch auffällt, ist, dass die zusätzlichen Aufsteckwände gegenüber dem Aufbau mit senkrechten Stellwänden noch deutliche Pegelerhöhungen bringen und somit eine weitere Verbesserung, welche vor allem bei den Simulationsergebnissen nicht so deutlich wird.

Um die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Simulation und einen schnelleren Überblick über die Auswirkungen der verschiedenen Aufbauvarianten zu haben, stellt die Tabelle 8 für zwei Messpunkte (Mikrofonposition 7 – Referenzpunkt – und Mikrofonposition 16 im Bühnenbereich) die Messergebnisse für den Schalldruckpegel direkt gegenüber. Dieselben Ergebnisse sind auch in den nachstehenden Diagrammen (Abb. 123 für MIC 7 bzw. Abb. 124 für MIC 16) graphisch dargestellt. Auch hier ist wieder der um 5 dB niedrigere Ausgangspegel bei MIC 16 bei den Messungen mit den Stellwänden zu berücksichtigen, der eine Übersteuerung des Mikrophons verhindert. Um die Übersicht im Diagramm für MIC 16 (Abb. 124) zu gewährleisten, sind bei den entsprechenden Kurven für die beiden Messungen mit den Stellwänden (senkrecht und 45°) hier die vom oben erwähnten Offset verursachten 5 dB zu den gemessenen Werten addiert. So können die Verhältnisse wahrheitsgemäß dargestellt werden.

Tabelle 8: SPL_{total} an zwei Mikrofonpositionen für drei Aufbauvarianten

Frequenz [Hz]	MIC 7			MIC 16		
	Ohne Stellwände	Stellwände senkrecht	Aufsteckwände 45°	Ohne Stellwände	Stellwände senkrecht	Aufsteckwände 45°
	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]
40	39,95	41,12	41,47	41,72	39,72	40,69
50	37,47	38,63	39,01	43,63	41,29	41,97
62,5	42,46	39,98	40,42	48,52	46,81	48,13
80	45,33	40,96	41,29	48,83	45,86	46,41
100	50,55	50,68	50,78	51,88	47,50	47,70
125	56,12	59,79	60,64	55,69	60,05	61,00
160	61,32	64,39	65,07	65,73	65,55	66,34
200	62,37	63,68	64,02	72,22	66,80	67,23
250	59,03	64,16	65,26	73,30	70,11	70,70
315	51,99	61,41	62,42	69,85	66,88	67,65
400	53,96	59,98	60,77	64,50	62,46	63,38
500	56,63	59,83	60,63	68,60	69,13	70,42
630	60,71	61,45	61,58	65,09	64,92	66,49
800	59,73	61,70	62,06	66,49	64,02	65,03
1000	54,94	61,06	62,48	63,53	62,66	63,98
1260	56,45	61,60	62,33	64,32	62,30	63,25
1600	60,82	65,48	66,81	67,02	67,03	67,51
2000	56,49	62,91	64,12	63,84	67,86	69,64

Messungen am Prototyp

2500	57,13	64,69	65,69	63,33	66,48	67,37
3160	56,34	62,42	63,97	61,13	64,78	66,06
4000	58,13	61,41	61,98	60,26	60,68	61,55
5000	54,72	58,77	59,65	54,95	59,27	61,19
6300	42,28	47,44	48,40	46,80	48,71	49,62
8000	34,84	40,06	41,00	42,89	39,90	40,90
10000	27,36	34,12	35,24	36,07	30,07	31,02

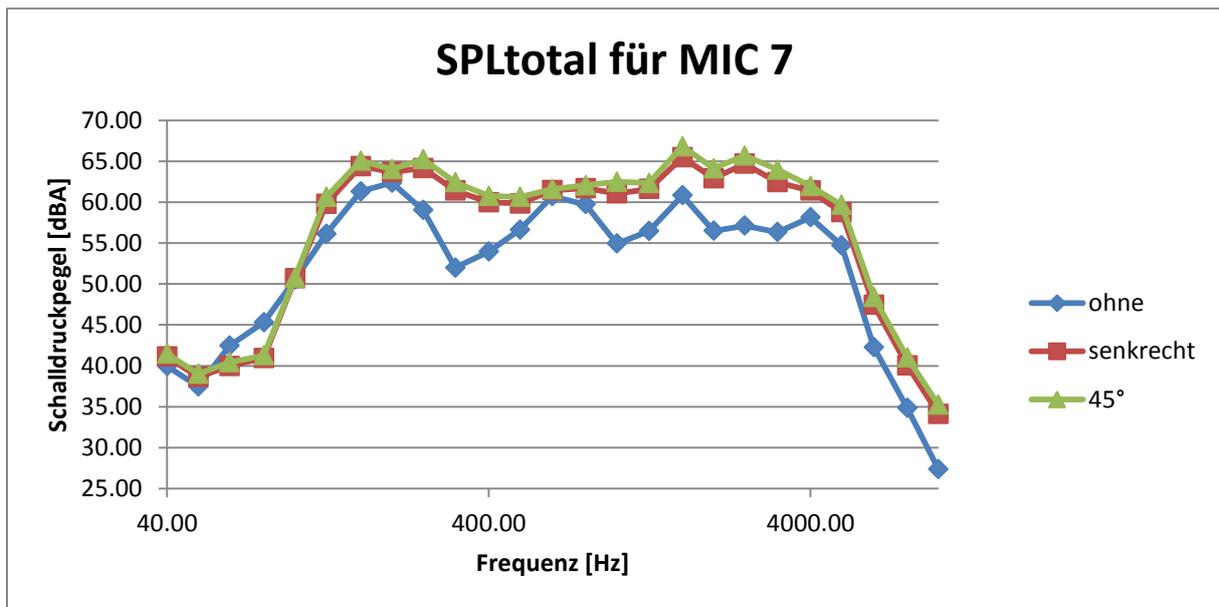


Abb. 123: SPL_{total} für drei Messungen bei MIC 7

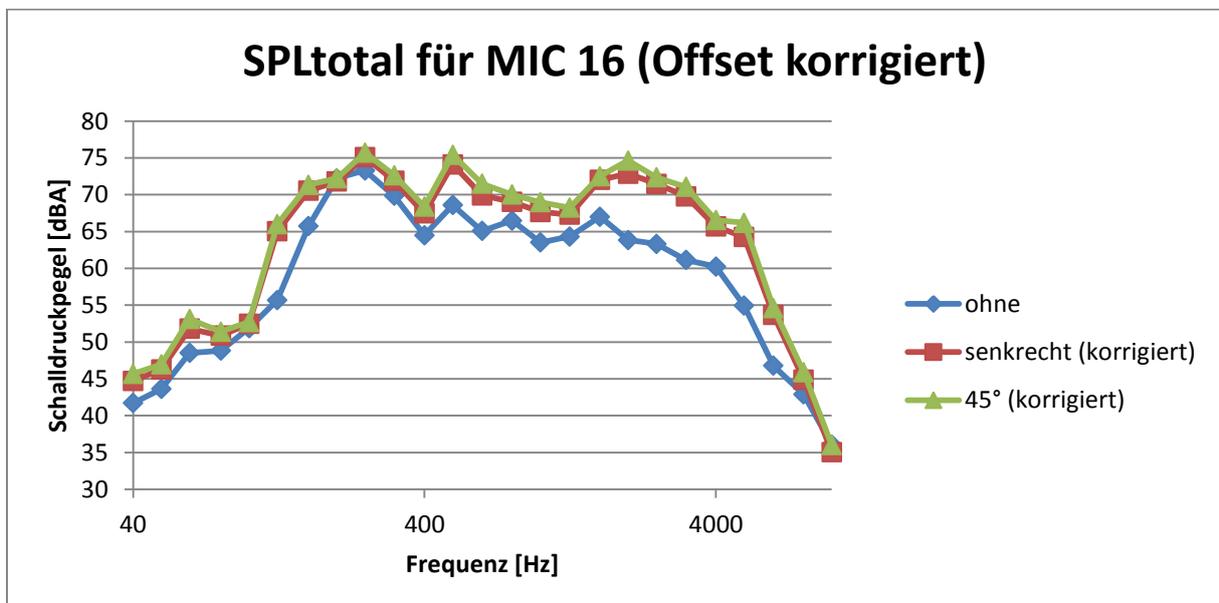


Abb. 124: SPL_{total} für drei Messungen bei MIC 16

Die oben schon beschriebenen Pegelanstiege bei Verwendung der Stellwände bzw. der Aufsteckwände sind in den beiden Diagrammen nun deutlich sichtbar. Es ist auch zu erkennen, dass die Unterschiede im mittleren Frequenzbereich höher ausfallen als an den

Messungen am Prototyp

Rändern des betrachteten Frequenzbereichs. Bei einer zusammenfassenden Betrachtung der Messergebnisse für den Schalldruckpegel kann behauptet werden, dass der Einsatz der Akustikstellwände eine deutliche Pegelerhöhung sowohl im Bühnenbereich als auch im Publikumbereich bewirkt. Die zusätzlich verwendeten Aufsteckwände bringen verständlicherweise nicht mehr so deutliche Erhöhungen, da die zusätzlich eingebrachte Reflexionsfläche anteilmäßig nicht mehr so stark ins Gewicht fällt, jedoch sind vor allem im Bühnenbereich noch einmal zusätzliche Anstiege von 1 dB und mehr möglich, was vor allem für die KünstlerInnen natürlich noch eine zusätzliche Verbesserung ermöglicht.

Klarheitsmaß C_{80}

Folgende Abbildungen (Abb. 125 bis Abb. 133) zeigen die Messergebnisse zum Klarheitsmaß C_{80} für alle 18 Mikrofonpositionen und die oben genannten drei Aufbauvarianten bei Beschallung mit einem Dodekaeder-Lautsprecher an Position 2. In einer Spalte angeordnet befinden sich von oben nach unten betrachtet immer die Darstellungen der Ergebnisse für die Messung ohne Stellwände, für den Aufbau mit senkrechten Wänden und für den Vollaufbau mit den Aufsteckwänden mit 45° Neigungswinkel.

ch.1 – ch.6 entspricht MIC 1- 6

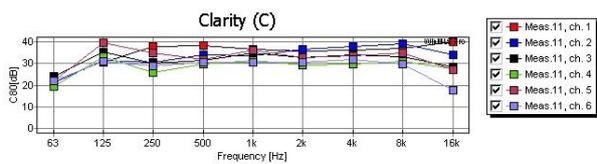


Abb. 125: C_{80} Ohne Stellwände MIC 1-6

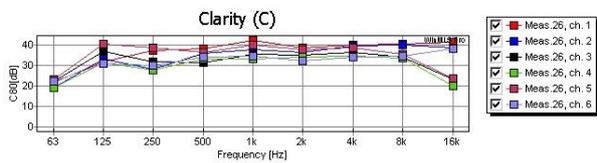


Abb. 127: C_{80} Stellwände senkrecht MIC 1-6

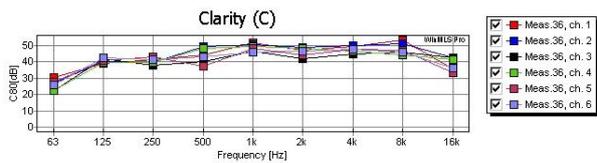


Abb. 129: C_{80} Aufsteckwände 45° MIC 1-6

ch.1 – ch.6 entspricht MIC 7-12

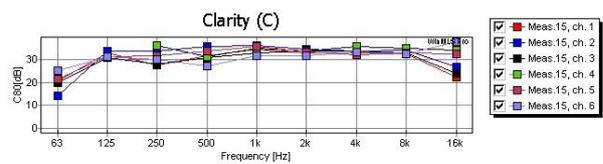


Abb. 126: C_{80} Ohne Stellwände MIC 7-12

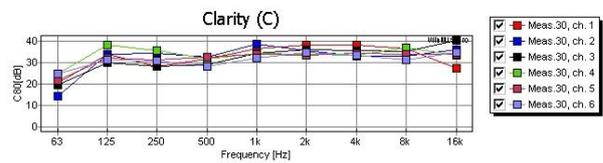


Abb. 128: C_{80} Stellwände senkrecht MIC 7-12

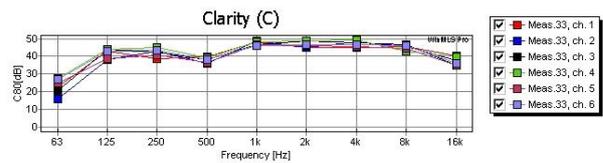


Abb. 130: C_{80} Aufsteckwände 45° MIC 7-12

ch.1 – ch.6 entspricht MIC 13-18

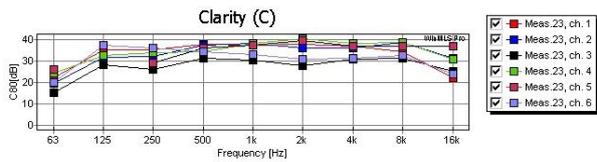


Abb. 131: C₈₀ Ohne Stellwände MIC 13-18

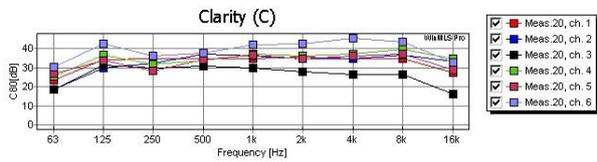


Abb. 132: C₈₀ Stellwände senkrecht MIC 13-18

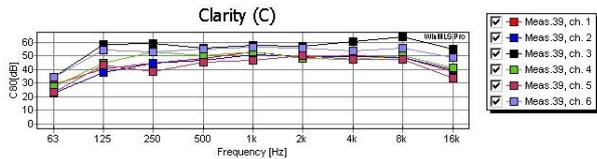


Abb. 133: C₈₀ Aufsteckwände 45° MIC 13-18

Wie schon bei den Simulationsergebnissen in Abschnitt 5.3.2 gilt auch hier wiederum, dass die Werte für das Klarheitsmaß in sehr hohen Bereich liegen. Da aber in einem Halbfreieid von keinen späten Reflexionen (nach 80 ms) ausgegangen werden kann und daher der Nenner in der Berechnungsformel (siehe Abschnitt 5.3.1) gegen Null geht, sind diese hohen Werte einfach erklärbar. Klar erkennbar ist außerdem, dass bei einer Frequenz von 63 Hz ein noch deutlich niedrigeres Klarheitsmaß erreicht wird. Dies liegt darin, dass bei einer so niedrigen Frequenz noch ein Teil der einfallenden Schallenergie von den Wänden und der Decke des Raums reflektiert wird.

Aus diesen Gründen sollen hier die absoluten Werte auch gar nicht so genau betrachtet werden. Entscheidend ist der Unterschied zwischen den drei Aufbauvarianten. Gegenüber den Messungen ohne Stellwände ist bei den Ergebnissen mit den Akustikwänden (beide Aufbauvarianten) ein deutlicher Anstieg des Klarheitsmaßes erkennbar. Dies gilt vor allem für den Bereich ab 125 Hz und bis 8 kHz. Bei den höchsten und niedrigsten Frequenzen fällt der Unterschied etwas geringer aus, doch dazwischen beträgt der Unterschied bei den weiter entfernten Mikrofonpositionen 1-6 bzw. 7-12 meist etwa 10 dB zwischen 125 und 500 Hz und bis zu 15 dB zwischen 1 kHz und 8 kHz. Vergleiche: 30 – 35dB ohne Stellwände, 35 - 40 dB bei senkrechten Wänden und sogar 40 – 50 dB bei Verwendung der Aufsteckwände mit 45°. Noch größer wird dieser Unterschied, wenn die Mikrofonposition 13-18 im Bühnenbereich verglichen werden. Während ohne die Akustikwände im Schnitt ein Klarheitsmaß von ca. 28 bis 38 dB erreicht wird, beträgt dieses ungefähr 33 bis 41 dB mit den senkrechten Stellwänden und mit der Vollaufbauvariante und den Aufsteckwänden mit 45° teilweise sogar zwischen 50 und 60 dB. Wiederum gilt hier, dass die Unterschiede in den Randbereichen des betrachteten Frequenzbereichs kleiner sind als in den mittleren Bändern.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich die Wirksamkeit der Akustikwände deutlich erkennen, da das Klarheitsmaß stark erhöht wird. Durch die Positionierung des Lautsprechers direkt im Bühnenbereich wird zu der an den senkrechten Stellwänden reflektierten Schallenergie somit auch ein großer Teil der Schallenergie zusätzlich an den Aufsteckwänden reflektiert, sodass dies das Klarheitsmaß noch einmal deutlich erhöht. Vor allem im Bühnenbereich ist dies deutlich sichtbar, wie an den Messergebnissen an den Mikrofonpositionen 13-18 schnell erkannt werden kann.

Kommentar:

Das Deutlichkeitsmaß C_{50} wird in diesem Zusammenhang hier nicht dargestellt. Die erzielten Ergebnisse verhalten sich allerdings sehr ähnlich zu jenen für das Klarheitsmaß C_{80} , weshalb hier aus Gründen einer besseren Übersicht und Kompaktheit auf die Darstellung verzichtet wird.

6.5. Vergleich mit den Ergebnissen der Simulationen

Werden Vergleiche zwischen den Ergebnissen der Simulationen und den Messungen angestellt, so sollten diese nicht anhand von absoluten Kenngrößen durchgeführt werden, da sich diese doch deutlich unterscheiden. Also muss als Maßstab der Unterschied der betreffenden Parameter für die verschiedenen Aufbauvarianten herangezogen. Dabei kann festgehalten werden, dass die Simulation zwar Unterschiede deutlich macht, diese aber wesentlich kleiner ausfallen als dies bei den Messungen der Fall ist (z. B. Vergleich der Schalldruckpegel). Die Erklärung für diese Abweichungen zwischen Simulation und Messungen ist vermutlich irgendwo in den Randbedingungen und den Genauigkeiten der EASE-Simulationen zu finden. Der simulierte „Raum“ besteht ja immerhin nur aus einer einzigen Fläche, welche nicht als 100 % schallabsorbierend ausgelegt ist. Da es sich hierbei also um einen extremen Grenzfall einer Simulationsumgebung handelt, lässt sich somit unter Umständen die Nichtkonformität der Simulationen begründen.

Zusammenfasst kann aber gesagt werden, dass zumindest die Trends der Simulationsergebnisse erkennbar sind und somit eine Abschätzung der Veränderungen der akustischen Parameter auf Grund der Aufbauten möglich ist. Auf die absoluten Zahlen sollte allerdings bei Simulationen mit derart speziellen Randbedingungen nicht vertraut werden.

6.6. Subjektiver Eindruck

Wie schon die Ergebnisse der Simulationen mit EASE (siehe Abschnitt 5.3) zeigten, sind raumakustische Parameter und deren absolute Werte und auch deren Verhältnisse zueinander nicht immer sehr aussagekräftig.

Daher ist es oft trotz aller Möglichkeiten, welche Simulations- und Messsysteme bieten, sinnvoll, sich einfach auf das eigene subjektive Hörempfinden zu verlassen. Dieses reagiert

sehr empfindlich auf Änderungen vom Gewohnten. Können diese Empfindungen auch halbwegs gut ausgedrückt werden, so sind auch subjektiv ermittelte Ergebnisse durchaus vertrauenswürdig.

Deshalb sei auch beim konkreten Beispiel eine kurze Zusammenfassung über die subjektiv empfundenen Änderungen und Beeinflussungen der (Raum-)Akustik bei den Messungen am Akustikrollenprüfstand angeführt. Zuallererst ist dabei die Akustik des vorliegenden und oben (Abschnitt 6.1) beschriebenen Messraums erläutert. Es handelt sich dabei um ein akustisches Halbfreifeld, was heißt, dass abgesehen von Reflexionen am Boden die gesamte auf Grenzflächen (Wände und Decke) auftreffende Schallenergie ab einer unteren Grenzfrequenz von 85 Hz total absorbiert wird. Rein subjektiv wird beim Aufenthalt in dieser Umgebung kein wirklicher Raum wahrgenommen und nach einer bestimmten Zeit wird die Belastung des Stimmapparats durch häufiges Sprechen deutlich. Zusätzlich ist es schwierig, die Abstände von Geräuschquellen im Raum ohne Blickkontakt einigermaßen richtig einzuschätzen, da die dazu hilfreichen frühen Reflexionen fehlen.

Wird nun eine derart große schallharte Fläche wie die Akustikstellwände in den Raum eingebracht, so verändert dies die subjektiv empfundene akustische Situation völlig. Sofort wird merkbar, dass die vorhandene Schallenergie teilweise reflektiert wird und es wird ein besseres Gefühl für die vorhandene Raumakustik sowie eine bessere Quellenortbarkeit möglich. Besonders beim Aufenthalt im Bereich der sogenannten Bühne, das heißt, direkt im Bereich der Muschel, werden die nun vorhandenen Schallreflexionen an den Akustikwänden besonders deutlich und es stellt sich ein räumliches Gefühl ein. Automatisch wird dabei auch die Sprachverständlichkeit deutlich besser und die Belastung der Stimme durch das Sprechen nimmt spürbar ab. Bei Vorhandensein einer Schallquelle im Bühnenbereich ist die schallreflektierende und schalllenkende Wirkung der Akustikstellwände auch im Publikumsbereich eindeutig vernehmbar, weil die stattfindenden Schallereignisse wesentlich definierter empfunden werden können. Außerdem sei hier noch erwähnt, dass das Verwenden der Aufsteckwände zusätzlich zur Aufbauvariante bestehend aus den senkrechten Wandteilen noch einmal eine deutliche Verstärkung der eben erwähnten Effekte mit sich bringt.

Somit ist auch subjektiv die Wirksamkeit der Akustikstellwände gut nachweisbar. Nach den ersten Einsätzen in der Praxis bei Konzerten werden sowohl die von den agierenden KünstlerInnen als auch die vom Publikum gegebenen Rückmeldungen natürlich aufgenommen und dann die hier beschriebenen Hörempfindungen vermutlich in ähnlicher Form bestätigen.

6.7. Zusammenfassung der Messergebnisse

Prinzipiell lassen sich alle Ergebnisse der Messungen auf einen wesentlichen Faktor zusammenfassen. Die Akustikstellwände stellen eine schallharte Fläche dar, welche über einen weiten Frequenzbereich auftreffende Schallenergie nahezu zu hundert Prozent

Messungen am Prototyp

reflektiert. Durch die Anordnung der Akustikstellwände in Form einer Muschel wird quasi ein halboffener künstlicher Raum im Bühnenbereich geschaffen.

Senden Quellen nun in diesem Bereich Schallenergie aus, so geht diese nicht völlig in die Umgebung „verloren“, sondern wird zu einem bestimmten Teil an den Akustikwänden reflektiert. Diese frühen Reflexionen führen zu deutlich erhöhten Gesamtschalldruckpegeln, höherem Klarheitsmaß und einer (gefühlten) deutlich besseren Sprachverständlichkeit. Wie auch schon in Abschnitt 6.6 beschrieben, entsteht durch das Einbringen der Reflexionsflächen auch ein Raumempfinden, das so in einem Halbfreifeldraum auch nicht empfunden wird. All diese Veränderungen raumakustischer Gütemaße und subjektiver Bewertungen treten im Bühnenbereich besonders stark auf und sind somit allesamt für eine Verbesserung der Akustik für musikalische Darbietungen verantwortlich.

Eine endgültige Bestätigung dieser Aussagen wird freilich erst nach dem Einsatz des Akustikstellwandensystems im Konzertbetrieb mit verschiedenen KünstlerInnen möglich sein. Aber die ermittelten Messwerte zeigen zufriedenstellende Ergebnisse bezüglich der anfangs festgelegten Kriterien.

7. Praxis und Resümee

Zwar werden in dieser Arbeit zu einem großen Teil die theoretischen Aspekte des entwickelten Akustikstellwandsystems behandelt, jedoch können beim Einsatz in der Praxis viele zusätzliche Aspekte auftreten, welche eine Weiterentwicklung und das Einfließenlassen von notwendigen Verbesserungen nötig machen, um beim Fernziel einer Produktion in Kleinserie eine hohe Kundenzufriedenheit zu garantieren.

Dazu wurden die bei den ersten Aufbauten gewonnenen Erfahrungswerte mit dem Prototyp des Systems gesammelt, um aus diesen Erkenntnissen in der Praxis notwendige Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten.

7.1. Erfahrungen aus den ersten Aufbauten

Wie schon oben erwähnt, fand der erste Aufbau des Prototyps des Akustikstellwandsystems im September 2013 bei Firma Kiefer in Bad Gleichenberg statt. Ein weiterer Auf- und Abbau in drei für die Messung verwendeten Aufbauvarianten wurde im November 2013 am akustischen Rollenprüfstand der AVL List GmbH in Graz durchgeführt.

Aus diesen ersten Auf- und Abbauten des Systems wurden wichtige Erfahrungen gewonnen, wie das Handling am schnellsten und besten durchzuführen ist, welche Hilfsmittel für ein gutes und sicheres Arbeiten notwendig sind und welche notwendigen Verbesserungen für weitere produzierte Systeme noch vorzunehmen sind. Auf diesen letzten Punkt wird in Abschnitt 7.3 noch genauer eingegangen.

Der erste Auf- und Abbau bei Firma Kiefer wurde unter der Anleitung und Mithilfe eines Konstrukteurs von zwei Personen durchgeführt. Jedoch sind die dem Akustikstellwandsystem beiliegenden Pläne in Verbindung mit den Beschriftungen der Rahmen- und Wandteile selbsterklärend, sodass ein Aufbau in den Grundvarianten auch ohne besondere Anleitung möglich ist.

Ein Vollaufbau des Gesamtsystems kann durch zwei ungeübte Personen in einer Zeit von maximal 1,5 h bewerkstelligt werden, für den Abbau ist ungefähr eine halbe Stunde nötig. Bei erfahrenen Personen, die den Auf- und Abbau schon mehrere Male erledigt haben, sind diese Zeiten vermutlich deutlich geringer anzusetzen. Wichtig ist, dass sowohl für den Aufbau als auch den Abbau mindestens zwei Personen notwendig sind, um die nötige Sicherheit zu gewährleisten. Außerdem sind auch zwei Stehleitern notwendig, da die Aufsteckwände immer von einer Person gehalten und von einer anderen befestigt werden müssen.

Um die richtige Positionierung und ein einfacheres Befestigen der Polycarbonatscheiben an den Rahmenteilern zu gewährleisten, wurden von der Firma Kiefer an den Rahmenteilern kleine Montagehilfen angebracht, an welchen die Polycarbonatscheiben mit den

entsprechenden Ausnehmungen während der Befestigung schon vorarretiert und ausgerichtet werden können.

Ein großer Vorteil des System ist, dass durch das Modulsystem ohne Weiteres kleinere Aufbauvarianten möglich sind, welche einen genauso sicheren Stand wie die Vollaufbauvariante bieten und eben für kleinere Ensembles oder bei beengtem Raum besser verwendet werden können. Ebenso ist auch eine Erweiterung um beliebig viele Elemente möglich, was die Vorteile des Baukastensystem unterstreicht.

Eine recht unangenehme Eigenschaft des Prototyps ist dessen Empfindlichkeit bei schon kleinen Bodenunebenheiten. Da alle Einzelteile in den Produktionsmaßen sehr genau aufeinander abgestimmt sind, um schöne Spaltmaße zu garantieren und größtmögliche Stabilität zu erreichen, müssen alle Einzelteile recht exakt aneinander befestigt werden. Unebenheiten des Bodens führen nun dazu, dass die Steher nicht alle hundertprozentig senkrecht ausgerichtet sind und es beim Einsetzen der Polycarbonatwandteile zu Schwierigkeiten und Verspannungen des Gesamtsystems kommt. Um dieser Tatsache Abhilfe zu schaffen, wurden von der Firma Kiefer sogleich Verstellmöglichkeiten für die Stellfüße entwickelt und umgesetzt, welche nun ein Anpassen an kleinen Unebenheiten ermöglichen, um den Aufbau trotzdem recht einfach, schnell und sicher und ohne das Unterlegen von zusätzlichen Teilen zu garantieren. Die vorgenommenen Adaptierungen sind ebenfalls in Abschnitt 7.3 noch einmal genau beschrieben und illustriert.

7.2. Transportmöglichkeiten

Da das Acoustaflex-System hauptsächlich für den mobilen Einsatz konzipiert wurde, ist der Transport von Ort zu Ort ein wichtiger Faktor.

Durch den Aufbau aus vielen Einzelteilen, ist es möglich, diese relativ kompakt in der Größe zu halten. Die größten Einzelteile sind die neun senkrechten Wandteile mit einer Höhe von 2150 mm und einer Breite von 1000 mm. Die Formrohre für die senkrechten Steher sind 2262 mm lang. Alle anderen Teile sind wesentlich kleiner. Auch das Gewicht der Einzelteile ist nicht besonders hoch, sodass das Tragen von einer Person ohne weiteres bewältigt werden kann. Für den Aufbau- und Abbau sind jedoch immer mindestens zwei Personen notwendig.

Der Transport des Prototyps wurde bisher mit einem Kleinbus (Mercedes Vito) durchgeführt. Bei Ausbau der hintersten Sitzbank ist der Transport mit diesem Fahrzeug bei guter Befestigung der Teile im Fahrzeug gut möglich. Die Kleinteile wie Schrauben und Winkelteile sind in Kartons verstaut ebenfalls einfach zu transportieren.

Auf das für Später angedachte Verlade- und Transportsystem mit einem Anhänger wird in Abschnitt 8.2 noch näher eingegangen.

7.3. Notwendige Verbesserungen

Auf Grund der Erfahrungen, welche bei der ersten Handhabung mit dem fertigen Prototyp des Acoustaflex-Systems auftraten, wurden einige notwendige Verbesserungen augenscheinlich. Dazu sei aber gleich erwähnt, dass es sich dabei um recht kleine Änderungen handelt, welche auf die Funktion und auf das grundlegende Design keinen Einfluss nehmen.

7.3.1. Höhenverstellbare Stellfüße

Um die Stabilität und Standfestigkeit des Akustikstellwandensystems sowohl im Gesamtaufbau als auch bei Verwendung kleinerer Aufbauvarianten zu garantieren, sind alle Einzelteile fest miteinander zu verschrauben. Da die Teile sehr exakt gefertigt sind, um schöne Spaltmaße und eine lange Haltbarkeit sicher zu stellen, können schon kleine Unebenheiten zu Abweichungen von den vorgesehenen Winkel führen und es kann im Aufbau zu Problemen auf Grund von Verspannungen im Gesamtsystem kommen.

Da in sehr vielen praktischen Fällen kein absolut ebener Untergrund vorhanden ist, wurden hier Anpassungen notwendig, um einen Aufbau der Akustikstellwände auch bei kleinen Unebenheiten zu ermöglichen. Um ein aufwendiges Unterlegen von Keilen oder Platten zu verhindern, wurden die bereits vorhandenen Stellfüße zusätzlich um ein System zur Höhenverstellung und -anpassung erweitert.

In der folgenden Abbildung (Abb. 134) ist ein Stellfuß mit den einfachen Höhenverstellungsmöglichkeiten zu sehen.



Abb. 134: Stellfuß mit Höhenverstellungsschrauben

Wie aus der Abbildung zu erkennen ist, wurde in jeden Arm des Y-Stehers ein Gewinde eingeschnitten, durch das über eine Gewindestange verbunden mit einer Schraube an der Oberseite kleine verstellbare Füßchen aus- und eingeschraubt werden können. Bei absolut ebenem Boden werden ganz einfach alle Verstellfüßchen ganz eingeschraubt. Gibt es aber

kleinen Unebenheiten am Untergrund im Umfang von einigen Zentimetern, so können diese durch einfaches Einstellen der Stellschrauben ausgeglichen werden und das Gesamtsystem trotzdem schnell aufgestellt und Verspannungen zwischen den Einzelelementen vermieden werden.

7.3.2. Verbesserung der Verschraubungen inklusive Gummiauflagen

Wie schon aus den Abbildungen (Abb. 54 bis Abb. 56) in Abschnitt 4.10 erkennbar ist, sind die Polycarbonatscheiben mit Rändelschrauben an den Rahmen- und Steherteilen befestigt. Um eine verlässliche Befestigung auch bei Wind und anderen Belastungen zu gewährleisten und um gleichzeitig ein Schwingen der Platten und eventuell damit auftretende Störgeräusche zu verhindern, sind beim Prototyp sehr viele Schraubverbindungen vorgesehen. Diese sind zwar aus dem Blickwinkel der Stabilität und Sicherheit vorteilhaft, jedoch ergibt sich beim Aufbau dadurch ein großer Schraubaufwand. Zusätzlich sind die recht kleinen Rändelschrauben schwer zu drehen.

Als Abhilfe hierzu sollen zukünftig Knebelschrauben (wie in Abb. 58) zum Einsatz kommen, welche wesentlich einfacher zu bewegen sind. Da diese ohnehin auf der Rückseite der Muschel zum Einsatz kommen, ist deren Einsatz auch optisch nicht nachteilig.

Eine weitere Option wäre eine Verringerung der Anzahl von Schrauben, was jedoch Nachteile bezüglich der Stabilität und des Schwingungsverhaltens der Polycarbonatscheiben mit sich bringen würde.

Ein weiteres kleines Problem machen die Gummiauflagen, welche an allen Laschen an den Rahmen zur Verschraubung mit den Polycarbonatscheiben angebracht sind. Diese sind beim Prototyp nur auf die Stahllaschen aufgeklebt und können sich daher leicht ablösen. Fallen diese Gummiauflagen zwischen Stahl und Polycarbonat weg, kann dies zu Geräuschen durch ein leichtes Zusammenschlagen der Teile und zu kleinen Beschädigungen führen.

Unterstehende Abbildung (Abb. 135) zeigt einer der Laschen mit den angesprochenen Gummiauflagen.



Abb. 135: Schraublasche mit Gummiauflage

Als Abhilfe gegen das Ablösen der Gummiauflagen ist entweder die Verwendung von geklebten Filzteilen oder von Gummiteilen, welche über die gesamte Lasche gesteckt und verklebt werden, angedacht.

7.3.3. Einheitliches Beschriftungssystem der Polycarbonatscheiben

Zwar ist der Aufbau des Systems bei Verwendung der beiliegenden Pläne und Aufbauanleitungen prinzipiell sehr einfach zu erledigen, jedoch können vor allem die trapezförmig zugeschnittenen Aufsteckwände durch kleine Unachtsamkeiten zwischen den verschiedenen Aufbauvarianten vertauscht oder zum Beispiel seitenverkehrt probiert werden. Ein falscher Aufbau ist zwar nicht möglich, da eine Befestigung an den Rahmenteilen immer nur mit den jeweils dazu passenden Wandteilen durchgeführt werden kann, es kann aber zu Verzögerungen und unnötigem Ärger bei wenig geübten Personen kommen.

Um diese zu verhindern, werden die Polycarbonatscheiben eindeutig gekennzeichnet. Dies erfolgte beim Prototyp durch Beschriftungen mit einem Lackstift und Aufklebern und soll bei später gefertigten Teilen durch Einprägen von Kennzeichnungen in die Ecken der Polycarbonatteile passieren. Somit wird ein noch einfacheres und effizienteres Aufbauen auch bei kleineren Aufstellvarianten ermöglicht.

8. Ausblick

Wie schon einige Male erwähnt, ist das Fernziel der Entwicklung des Acoustaflex-Systems die Produktion in einer Kleinserie mit individueller Gestaltung auf Kundenwunsch sowie die Möglichkeit zum Verleih und Vertrieb über verschiedene Plattformen wie etwa einer eigenen Webseite.

Um diese Ziele erreichen zu können, sind neben den technischen und akustischen Aspekten noch viele andere zu beachten. Die Aufgaben reichen dabei von Umgang mit Patentrechten über Marketing bis hin zu produktionstechnischen Herausforderungen. Da damit einer enormer Arbeitsaufwand und somit auch ein entsprechender Dokumentationsaufwand einhergehen wird, sind hier nur einige Aspekte kurz angeschnitten, um einen kleinen Ausblick zu gewähren.

8.1. Verleih und Vertrieb

Bei einer Realisierung einer Produktion in Kleinserie mit den schon genannten Produktionspartnern soll als Basis für Verleih und Vertrieb eine entsprechende Webseite dienen. Diese wird von der Cultural Foundation der AVL betrieben werden und eine ansprechende Aufbereitung mit den nötigen technischen Informationen und Kontaktdaten beinhalten. Daneben werden diverse Drucksorten des Steirischen Kammermusikfestivals als Werbemittel dienen.

Ziel ist es, sowohl den bestehenden Prototyp, welcher für das Kammermusikfestival nur für den Zeitraum von wenigen Wochen pro Jahr im Einsatz ist, für den Verleih zu nutzen, als auch einen Vertrieb von auf Kundenwunsch produzierten Acoustaflex-Systemen zu realisieren.

Entsprechende Kontaktpersonen in den beteiligten Partnerunternehmen sind dazu festzulegen.

8.1.1. Individuelle Gestaltung und Produktion auf Kundenwunsch

Da im Zuge der Konzerte des Steirischen Kammermusikfestivals immer wieder Anfragen von diversen Veranstaltern und auch von Künstlerinnen und Künstlern bezüglich der Verwendung der vormals in Verwendung stehenden Plexiglas-Akustikwände gestellt wurden, entstand im Zuge dieses Projekts auch die Idee zum Verleih bzw. auch zur Möglichkeit der Produktion in Kleinserie des neuen Acoustaflex-Systems.

Nachdem zu Beginn der Planungen für dieses Projekt zahlreiche Recherchen in diverser Literatur und im Internet nur sehr wenige Ergebnisse über ähnliche in Verwendung stehende Systeme ergaben, wurden diese Pläne noch zusätzlich bekräftigt.

Um dieses Fernziel der Produktion in einer Kleinserie auf Kundenwunsch zu realisieren, sind natürlich viele Details zu beachten und abzuklären. Im Wesentlichen sollen die am Prototyp beteiligten Partner, die verwendeten Materialien sowie das Modulsystem gleich bleiben.

Eine individuelle Anpassung an Kundenwünsche soll jedoch in Bezug auf die Größe des Systems, die Anzahl an Elementen und Details wie Höhe der Stellwände, Winkel für die Aufstellung zwischen den senkrechten Stellwänden und Neigungswinkel und Höhe der Aufsteckwände möglich sein. Auch einige andere Details wie Farben der Rahmenteile und Beschaffenheit und Farbe der Polycarbonatelemente sollen auf Kundenwunsch individuell angepasst werden können, da dies den Produktionsprozess nicht wesentlich beeinflusst.

Wichtig für die Produktion und den Verkauf des Systems ist noch ein vorheriges Einholen von Sachverständigengutachten, welche anhand des Prototyps erstellt werden. Diese sind notwendig, um eine Verwendung bei öffentlichen Veranstaltungen möglich zu machen.

Die Idee sieht vor, dass der Kontakt zu potentiellen Kunden über eine Homepage der AVL Cultural Foundation oder über direkte mündliche Anfragen an einen der Projektpartner hergestellt wird. Diese werden dann an mich weitergeleitet und eine individuelle Planung des jeweiligen Acoustflexsystems sowie die Koordination der Bestellung, Produktion und Auslieferung mit den Projektpartnern wird von mir übernommen.

Entsprechende Vereinbarung mit den Produktions- und Verkaufspartnern über Produktions- und Lieferzeiten sowie finanzielle Abmachungen sind noch zu treffen.

8.2. Verlade- und Transportsystem

Wie schon in Abschnitt 7.2 ist ein System mit der Größe und Anzahl an Teilen des Prototyps mit einem durchschnittlichen Kleinbus ohne weiteres transportierbar.

Da dies aber ein ständiges mühsames Ein- und Ausladen verursacht, ist ein speziell für die Acoustflex-Akustikwände verwendbares Verlade- und Transportsystem angedacht. Dieses soll im Wesentlichen aus einem überdachten PKW-Anhänger bestehen, der das gesamte System beinhaltet, sodass bei einer Verwendung keine zusätzlichen Teile mehr nötig sind.

Auf diesem Anhänger wird sich ein auf die Einzelteile abgestimmtes Regal befinden, in dem ein sicherer und schonender Transport sowie ein einfaches Ein- und Ausladen möglich ist. Neben den Elementen für den Aufbau der Akustikstellwände wird sich ein Flightcase auf dem Anhänger befinden, das neben Reserveteilen wie Schrauben und zusätzlichen Gummiauflagen auch die Pläne zum Aufbau in verschiedenen Varianten sowie ein Handbuch mit einer Einzelteilaufstellung zur Kontrolle der Vollständigkeit beinhalten wird. Daneben sollen noch einige nützliche Utensilien für eine einfache Handhabung wie beispielsweise Rollmeter und Wasserwaage sowie zwei Stehleitern auf dem Anhänger Platz finden.

Außerdem soll noch etwas freier Platz vorhanden sein, um eventuell zusätzlich Scheinwerfer zur Beleuchtung der Akustikstellwände oder andere Kleinteile transportieren zu können.

Somit ist für einen Einsatz des Acoustaflex-Systems nur ein einzelner PKW-Anhänger notwendig, der alle notwendigen Teile beinhaltet und dessen Inhalt idealerweise nach jeder Benutzung auf Vollständigkeit und Funktionstüchtigkeit zu kontrollieren ist.

8.3. Gesamtsystem bestehend aus Bühnenunterkonstruktion und Überdachung

Wie schon in der Einleitung erwähnt, war die ursprüngliche Idee, das Akustikstellwandsystems vor allem bei Konzerten im Freien einzusetzen.

Bei Anwendungen wie diesen ist so gut wie immer die Verwendung von Bühnenelementen notwendig, um einerseits nicht zu sehr von der Beschaffenheit des Untergrunds abhängig zu sein und um andererseits eine Erhöhung des Bereichs für die musikalischen Darbietungen zu erreichen. Mit den im Moment beim Steirischen Kammermusikfestival in Verwendung stehenden Bühnenelementen ist es notwendig, die Akustikwände mit den schon oben beschriebenen Stellfüßen einfach auf die Bühne zu stellen.

In diesem Zusammenhang liegt es nahe, Bühnenelemente zu verwenden, welche eine Befestigungsmöglichkeit für die Akustikstellwände bieten. Grundsätzlich soll dabei die bestehende Rahmenkonstruktion für die Akustikstellwände nicht verändert werden. Als beste Variante würden sich hier Bühnenelemente mit Aluminiumrahmen und Siebdruckplatten mit Einsteckvorrichtungen für die Steher der Akustikwände anbieten. In diese Vierkantprofile würden die Steher einfach eingeschoben und mit Knebelschrauben verschraubt werden. Somit würde eine feste Verbindung und somit eine hohe Standsicherheit für die Akustikstellwände auf der Bühne garantiert werden.

Als zusätzliche Anmerkung sei hier auch noch erwähnt, dass in Zusammenhang mit den oben beschriebenen Bühnenelementen auch der Einsatz eines Überdachungssystems für die Bühne angedacht ist, für welches ebenfalls schon erste Konstruktionspläne entworfen wurden. Diese Überdachung soll nach erstem Entwurf aus vier Alustehern bestehen, welche ebenfalls mit den Bühnenelementen fest verschraubt werden und Ballonplanen über der Bühne aufspannen. Diese Überdachung soll einerseits Schutz gegen Wettereinflüsse wie leichten Regen oder starke Sonneneinstrahlung bieten und andererseits noch zu einer weiteren Verbesserung der Akustik sowohl auf der Bühne als auch für den Publikumsbereich führen.

Da sowohl Bühnenelemente als auch Überdachung bisher lediglich als Ideen für die Zukunft existieren, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher darauf eingegangen.

9. Literaturverzeichnis

- [Höldrich, 2011] Robert Höldrich; *“Skriptum Musikalische Akustik 1+2”*; Version 2011
- [Graber et al., RA, 2011] Gerhard Graber, Werner Weselak; *“Skriptum Raumakustik”*; Version 5.3, WS 2009/10
- [Eade et. al, 1981] Robert E. Eade, Peter V. C. Quaintance; *“US Patent 4.278.145, Concert Shell”*; Jul. 14, 1981
- [Eade et. al, 1982] Robert E. Eade, Peter V. C. Quaintance; *“US Patent Des. 267.315, Concert Shell”*; Dec. 21, 1982
- [Ahnert, 2013] Acoustic Design Ahnert, Berlin; *„EASE - Brochure“*; 2013
- [Ahnert, 2009] Acoustic Design Ahnert, Berlin; *„EASE Version 4.3 – User’s Guide & Tutorial“*; Berlin, 2009
- [Kiefer, 2013] Kiefer Technic Bad Gleichenberg; Mag.^a Astrid Kiefer (Geschäftsführerin), Manfred Suppan (Projektleiter), Mario Käfer (Produktions- und Montageleiter), Ing. Michael Rauch (Technische Projektabwicklung)
- [www.wikipedia.org] Wikipedia Online Lexikon; www.wikipedia.org; Stand: 16. 6. 2013
- [www.blogspot.com] www.blogspot.com; Stand: 1. 5. 2013
- [www.electrovoice.com] www.electrovoice.com; Stand: 1. 5. 2013
- [www.show4you.net] www.show4you.net; Stand: 1. 5. 2013
- [www.cbdx.de] www.cbdx.com; Stand: 1. 5. 2013
- [www.theomader.at] www.theomader.at; Stand: 1. 5. 2013
- [www.irresberger.com] www.irresberger.com; Stand: 1. 5. 2013
- [www.sunflex.de] www.sunflex.de; Stand: 26. 6. 2013
- [www.findeis.de] www.findeis.de; Stand: 26. 6. 2013
- [www.kammermusik.co.at] Steirisches Kammermusikfestival; www.kammermusik.co.at; Stand: 29. 6. 2013
- [www.avlcf.com] AVL List Cultural Foundation; www.avlcf.com; Stand: 29. 6. 2013

Literaturverzeichnis

[www.avl.com]

AVL List GmbH; www.avl.com; Stand: 29. 6. 2013

[www.joanneum.at] Joanneum Research Forschungsgesellschaft; www.joanneum.at;
Stand: 29. 6. 2013

10. Anhang 1 - Handbuch

Um den Aufbau und die Verwendung des Acoustaflex Akustikstellwandsystems möglichst einfach und verständlich erklärbar zu machen, wird im Zuge des Projekts auch ein Handbuch erstellt. Dieses wird den Akustikwänden beiliegen und soll eine schnelle Anleitung bieten, um den Aufbau durch mindestens zwei Personen ohne die Unterstützung von Fachpersonal zu ermöglichen.

In diesem Handbuch befinden sich einige typische Anwendungsmöglichkeiten und die jeweils dazu empfohlenen Aufbauvarianten. Diese sind an gängige Ensemblekonstellationen auf der Bühne und an einige allgemein beschriebene akustische Situationen angepasst.

Vorerst liegt dieses Handbuch dem Acoustaflex-System in gedruckter Form bei. Zukünftig soll es auch über die geplante Online-Plattform downloadbar sein.

Da bis zum jetzigen Zeitpunkt noch einige Verbesserungen an der Konstruktion des Akustikstellwandsystems zu tätigen waren, ist auch noch kein fertiges Handbuch verfügbar. Ein Überblick über den Aufbau soll jedoch schon gegeben werden.

10.1. Aufbau des Handbuchs

- Deckblatt und Einband (in Folie eingeschweißt)
- Überblick über den Inhalt
- Vorstellung des Systems
 - o Motivation und Begründung für den Einsatz
 - o Kurzbeschreibung der akustischen Eigenschaften
 - o Begründung der Form und Materialwahl
- Stückliste für das Gesamtsystem (ähnlich einem Möbelaufbauplan)
 - o Stücklisten für Wandteile mit Beschriftungen durch Buchstaben- und Ziffernzuordnung
 - o Stücklisten für Rahmenteile und Übergangsstücke mit Beschriftungen (wie oben)
 - o Stücklisten für alle verwendeten Schrauben
 - o Stücklisten für diverse Ersatzteile
 - o Erklärung des Verpackungs- und Transportsystems
 - o (nur bei Leihvariante:) Stücklisten zur Kontrolle bei Entgegennahme und Rückgabe sowie Richtlinien zur Verwendung des Leihsystems
- Verschiedene vorgeschlagene Aufbauvarianten
 - o Jeweils mit detailliertem Aufbauplan und
 - o Ungefähr vorgeschlagenem Einsatzzweck (Ensemblegröße, Bühnensituation, Raumsituation)
- Hinweise auf andere mögliche Aufbauvarianten und auf die Möglichkeit zur Erweiterung des Systems

Anhang 1 - Handbuch

- Reinigungsanleitung für die Polycarbonatelemente
- Hinweise auf individuelle Produktionsmöglichkeiten auf Kundenwunsch
- Kontaktdaten zu den Projektverantwortlichen und Hinweis auf die Homepage

11. Anhang 2 – Zusammenfassung Projektdetails

11.1. Materialeigenschaften

Da das gesamte Akustikstellwandsystem nur aus zwei verschiedenen Materialien – nämlich Stahl und Polycarbonat – besteht, sind in diesem Abschnitt einige der wichtigsten Eigenschaften dieser beiden Materialien aufgelistet. Diese sind direkt aus den entsprechenden Materialdatenblättern entnommen und daher nicht nachbearbeitet.

11.1.1. Rahmen aus Stahl (vollverzinkt und pulverbeschichtet nach Standardfarbkarte RAL 9006)

PADANA TUBI
6. PROFILATI ACCIAIO S.P.A.
Via Perlemurata, 6/A
42016 GUASTALLA (RE) - ITALIA
Tel. +39 522 83 85 51 (0-3)
Fax +39 522 83 85 72 85 85 73
Cod. Fis. P. IVA IT029232310333
MAIL EM 862.9891

ADRIANA CON SISTEMA DI GESTIONE
QUALITÀ CERTIFICATO SECONDO
UNI EN ISO 9001

FRANKSTAHL
ROHR- UND STAHL-Handels GmbH
FRANKS TALS-STRASSE 2
2303 GUNTREMSDORF
AUSTRIA

(2020) | Consegna:
LINZ/ST. VAISSE 200
AUSTRIA

FRANKSTAHL ORBIS *HALLE 60-63*

1190 DOCUMENTO - TYPE DOCUMENT (01/10/2004)
Reporto di Prova 2.2
Nr. : 13035232

18/06/2013

D.O.T. - DELIVERY NOTE
13027409 - 18/06/2013

(45153)

Proprietà Meccaniche e Tensologiche
Mechanical and Technical Properties
Tensione / Tensile Test Durezza
Resistenza
N.0: Rm A A50 Martens. Charpy Impact Test (KV)
MPa N. HB-HB30 1 [H] 3 [H] X [H] T [°C]

Riferimenti Normativi Tubi - Hollow Sections Standard:		Tubi saldati longitudinalmente (EN10210)		Composizione Chimica Chemical Composition		Proprietà Meccaniche e Tensologiche Mechanical and Technical Properties																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Dim.	Sp. L. (mm)	Acciaio (mm)	Fin. (mm)	Min. Peso (kg)	Coef. di Esp. (10 ⁻³)	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cu	% Ni	% Cr	% Nb	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh	% Os	% Te	% Bi	% Pb	% Sn	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Al	% Ti	% N	% As	% Se	% Sn	% Pb	% Bi	% Sb	% Zn	% In	% Ag	% Au	% Pt	% Ir	% Pd	% Rh

11.1.2. Wandteile aus Polycarbonat

Die Eigenschaften von Polycarbonat-Kunststoff können auf den Homepages diverser Anbieter und Händler nachgelesen werden (z.B. www.acrylplex.at) oder auch direkt angefragt werden (z.B. bei Hostra). Da es eine große Anzahl verschiedener Kennzahlen unterschiedlicher Bedeutung zur Beschreibung der Materialeigenschaften gibt, sind dieser hier auch nicht alle angeführt. Wichtig ist, dass Polycarbonat trotz des um ca. 30 bis 40 % höheren Preises dem Standard-Acrylglas vorgezogen wurde, da es eine deutlich höhere Schlagfestigkeit und somit eine wesentlich robustere Oberfläche aufweist. Es ist jedoch genauso hoch transparent, UV-beständig und hat dasselbe spezifische Gewicht von $1,19 \text{ g/cm}^3$ wie Acrylglas.

11.2. Kostenaufstellung

Da bis zum jetzigen Zeitpunkt noch keine endgültige in Produktion befindliche Ausführung des Acoustaflex-Systems verfügbar war, ist eine exakte Kostenaufstellung auch nicht möglich. Als Eckpunkte können hier allerdings nur die ungefähren Materialkosten genannt werden. Diese belaufen sich für die Polycarbonatwände auf ca. € 2.600.-, wobei in diesem Preis keine Kantenentgratung inbegriffen ist. Die Materialkosten für die Rahmenteile mit Beschichtung, die Winkelteile und die verwendeten Schrauben belaufen sich auf etwa € 1.500.-.

Zu den hier erwähnten Kosten sei allerdings noch erwähnt, dass diese für den vorgestellten Prototyp gültig sind. Bei größeren Bestellmengen und dementsprechender Angebotseinholung sind vermutlich niedrigere Materialkosten zu erwarten.

Ein zusätzlicher großer Kostenpunkt für eine kostendeckende Produktion und einen gewinnbringenden Verkauf sind natürlich die Kosten für die Arbeitsstunden. Diese sind zum jetzigen Zeitpunkt noch schwer abschätzbar und werden erst nach Entscheidung über die endgültige Bauform genau ermittelt.

Um den schlussendlichen Verkaufspreis zu ermitteln, muss erst noch eine ungefähre Analyse über das Verkaufspotential erstellt werden und Verhandlungen mit allen beteiligten Projektpartnern sind notwendig. Dies soll nach den ersten Einsätzen des Systems in der Praxis und nach dem Anlaufen der Website erfolgen und liegt weit außerhalb des Fokus dieser Projektdokumentation.

12. Anhang 3

12.1. Projektpartner

Folgende Partner sind an der Durchführung des Projekts beteiligt:



Abb. 137: Logo SKF [www.kammermusik.co.at]

Steirisches Kammermusikfestival (Mag. Holger Hütter)



Abb. 138: Logo Kiefer Technic [Kiefer]

Kiefer Metalltechnik Bad Gleichenberg (Mag.^a Astrid Kiefer)



Abb. 139: Logo AVLCF [www.avlcf.com]

AVL – List Cultural Foundation (Kathryn List, Dr.ⁱⁿ Elisabeth Gigler)



Abb. 140: Logo AVL [www.avl.com]

AVL – List GmbH Department for Vehicle and Powertrain Acoustics (DI (FH) Bernhard Graf)

AVL – List GmbH Supply Chain Management (Dr. Christian Haring)

12.2. Danksagungen

Zuerst sei hier angemerkt, dass in dieser Danksagung nicht allen persönlich gedankt werden kann, die einen wichtigen Teil zur Durchführung dieses Projekts beitragen. Stellvertretend sollen nur einige Personen genannt werden, denen besonderer Dank gilt.

Ein großes Danke geht an Holger Hütter, Leiter des Steirischen Kammermusikfestivals, der mich bei der Umsetzung dieser Idee von Anfang an unterstützt hat und der auch gleich großes Interesse bekundete, einen Prototyp des Systems beim Kammermusikfestival einzusetzen. Viele Besprechungen und organisatorische Details waren zu klären, bevor die Akustikwände schlussendlich in Produktion gehen konnten. Holger wird auch im Zuge der Konzerte des Festivals auf das System und auf mich als Planer aufmerksam machen, um auch eine wenig Werbung zu machen.

Ebenfalls gedankt sei der AVL Cultural Foundation unter der Leitung von Kathryn List, welche die Finanzierung ermöglichte und bei der Herstellung der Kontakte sehr behilflich war. Dabei möchte ich auch Elisabeth Gigler herzlich danken, die meine persönliche Ansprechperson war und unter anderem die Verbindung zum Supply Chain Management der AVL darstellte, über welches das Material für die Akustikwände zu einem äußerst guten Preis bezogen werden konnte.

Ein besonderer Dank gilt auch Astrid Kiefer und ihren MitarbeiterInnen der Firma Kiefer Metalltechnik in Bad Gleichenberg. Als Projektpartner wurden sowohl die Erstellung der Pläne für die Rahmenteile als auch das Material für den Prototypen und dessen Aufbau kostenlos zur Verfügung gestellt. Ohne diese große Hilfe wäre die Realisierung des Projekts vermutlich nicht möglich gewesen.

Danke auch an Bernhard Graf, den Skill Team Manager der Abteilung für Fahrzeug- und Antriebsstrangakustik der AVL in Graz, für das Zurverfügungstellen des akustischen Rollenprüfstands, um die akustischen Messungen an den Stellwänden zu ermöglichen.

Zuletzt noch ein großer Dank an Franz Graf, den Betreuer dieser Arbeit, für die Unterstützung bei technischen Fragen und vor allem bei der Durchführung der Akustiksimulationen mit EASE.

12.3. Erklärung

Ich versichere, dass ich das vorliegende Toningenieursprojekt selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel durchgeführt habe und keine anderen als die genannten Quellen zur Verfassung dieser schriftlichen Arbeit herangezogen wurden. Inhalte, welche wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder anderen Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Graz, am 30. 12. 2013

A handwritten signature in purple ink, appearing to read 'Alexander Ulz', written in a cursive style.

Alexander Ulz, BSc