

BHT

Berliner Hochschule
für Technik

B A C H E L O R A R B E I T

Anton Kempe

Empirische Untersuchung des Zusammenspiels
von Raumakustik und Beschallungsanlagen mit
Methoden der virtuellen Akustik: Eine Fallstudie

2022

BERLINER HOCHSCHULE FÜR TECHNIK

FACHBEREICH ACHT

Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Theater- und Veranstaltungstechnik und -Management

BACHELORARBEIT

AUTOR **Anton Martin Alfred Kempe**

Zur Erlangung des akademischen Grads Bachelor of Engineering (B.Eng) im Studiengang Veranstaltungstechnik und Management

TITEL

Empirische Untersuchung des Zusammenspiels von Raumakustik und Beschallungsanlagen mit Methoden der virtuellen Akustik: Eine Fallstudie

BETREUER **Prof. Dr. rer. nat. Alexander Lindau**

GUTACHTER **Prof. Dr. Stefan Weinzierl**

ABGABEDATUM

08.04.2022

BERLIN UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

FACULTY EIGHT

Mechanical Engineering, Process Engineering, Theater- and
Event Technology and Management

BACHELOR THESIS

AUTHOR **Anton Martin Alfred Kempe**

For the acquisition of the academic degree Bachelor of
Engineering (B.Eng) in the course of studies Event Technology
and Management

TOPIC

Empirical Investigation of the Interactions between Room
Acoustics and Public Address Systems, with methods of virtual
Acoustics: a Case Study

SUPERVISOR **Prof. Dr. rer. nat. Alexander Lindau**

ASSESSOR **Prof. Dr. Stefan Weinzierl**

DATE OF SUBMISSION

08.04.2022

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Beantwortung der Frage welche Bedeutung den beiden Faktoren Raumakustik und Beschallung im Hinblick auf das in Kombination erzeugte resultierende Klangbild zukommt, wird aufgrund aktueller Forschungen und mit Methoden der virtuellen Akustik ein Versuchsdesign entwickelt. Nach der Festlegung, welche Eigenschaften eine gute Raumakustik und welche Leistungsparameter einen guten Lautsprecher auszeichnen, können mit der Bereitstellung von binauralen Hörproben für die Teilnehmenden die Auswirkungen der Faktoren auf die Beurteilung mit verschiedenen statistischen Methoden analysiert werden. Dabei interessiert besonders die Frage, welcher der beiden Einflüsse Raumakustik und Beschallungsanlage den herausstechenden Effekt bildet und ob hohe Kosten auch gleichzeitig gute Ergebnisse bedeuten. Die Untersuchung ist aufgrund der vielfältigen Veranstaltungsformen als nicht allgemeingültig einzustufen, sondern konzentriert sich primär auf die Formate Musik, insbesondere Rock und Pop, sowie Vortragsveranstaltungen mit hohem Informationsgehalt.

Die Ergebnisse lassen die Behauptung zu, dass die Raumakustik in allen Bereichen stets den stärksten Einfluss ausübt und der Qualität einer Beschallungsanlage im vorliegenden Versuchsdesign eine oft untergeordnete bzw. nicht messbare Rolle zukommt. Weiter wird in der Bewertung ein großer Unterschied zwischen musikalischen und sprachlichen Inhalten festgestellt. Die beiden Formate unterliegen also stark unterschiedlichen Ansprüchen, die in der Praxis berücksichtigt werden müssen.

Nach der Identifizierung des maßgebenden Einflussfaktors kann also festgestellt werden, dass Investitionen in die Verbesserung der Raumakustik nach den hier gewonnenen Erkenntnissen stets einen stärkeren Effekt erzielen als alleinige Investitionen in eine hochpreisige Beschallungsanlage. Eine bedachte und kluge Kombination der beiden Faktoren wird in vielen Fällen die besten und wirtschaftlichsten Ergebnisse liefern.

ABSTRACT

Experience shows that “good” sound in a venue doesn’t always stem from a top-quality PA-System (*Public Addressed*). Instead, if the venue is acoustically well treated and therefore sounding good in itself, it can be observed, that it doesn’t seem to matter at all, what PA-System is being used, because the overall result will be pleasing in most cases. In contrast, a similar observation can be made for bad room acoustics, in which even the best PA-System can’t overcome the acoustical issues and deliver an overall pleasing sound.

To find the conclusion to the question, which one of these two factors (Room Acoustics or PA-Systems) have the most significant effects on the resulting sound image, an experiment - based on current research and with methods of virtual acoustics - is designed. After determining what acoustical properties define “good” Room Acoustics and what performance parameters of Speakers define a “good” PA-System, the participants of the experiment receive binaural audio-samples in form of a listening test. The results of this carefully designed test ultimately show the effect of these factors and can be analysed, using different statistical methods. For economical, or financial reasons, it is of particular interest to identify the most decisive factor to make sure, future investments in that factor will actually improve the overall result. Because of the numerous different sorts of events (and venues), the examination cannot be hold valid in general. It instead focuses on musical events, such as rock- and pop-concerts as well as lecture-events with highly informational content.

The results of the experiment show, that Room Acoustics always show a much stronger effect and vice versa, the quality of a PA-System only has subordinate effects on the assessments by the participants. Furthermore, it can be shown, that there is a significant difference in the expectations between musical and Lecture-Events, which must be dealt with, when it comes to practical implementation.

After the analysis the conclusion is obvious, that investments that will improve Room Acoustics will always have a more dramatic effect on the resulting sound image, than solely done investments in a better PA System. A clever combination of both factors might deliver the best audible, as well as financial results.

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	V
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	VI
1. Einführung in die Fragestellung und Beschreibung der Hypothesen.....	- 1 -
2. Die Grundlage des Versuchsaufbaus anhand wissenschaftlicher Forschungen.....	- 3 -
2.1. Auszug wichtiger raumakustischer Größen.....	- 3 -
2.1.1. Frequenzabhängige Nachhallzeit T30 und EDT	- 4 -
2.1.2. Verhältnis aus EDT/T30.....	- 7 -
2.1.3. Klarheitsmaß C ₈₀ und C ₅₀ , Deutlichkeit D.....	- 8 -
2.1.4. Bassverhältnis BR und Wärme	- 10 -
2.1.5. Speech Transmission Index (STI)	- 12 -
2.1.6. Skalierung der Einflussgrößen, Entwicklung eines Bewertungssystems.....	- 13 -
2.2. Entscheidende Merkmale von Beschallungsanlagen	- 14 -
2.2.1. Frequenzabhängiges Abstrahlverhalten – die Richtwirkung	- 14 -
2.2.2. Komplexer Frequenzgang.....	- 16 -
2.2.3. Kennschalldruckpegel und Wirkungsgrad	- 18 -
2.2.4. Priorisierung der Parameter, Entwicklung eines Bewertungssystems.....	- 19 -
3. Erläuterung des Versuchsdesigns und Erklärungen zur Durchführung.....	- 21 -
3.1. Simulation durch virtuelle Akustik	- 21 -
3.2. Vorstellung der unabhängigen Variablen.....	- 22 -
3.2.1. Festlegung der Hörpositionen.....	- 22 -
3.2.2. Die virtuell-akustischen Räume	- 23 -
3.2.3. Die Wahl der Lautsprecher	- 28 -
3.2.4. Festlegung geeigneter Stimuli	- 35 -
3.3. Vorstellung der Bewertungskriterien als abhängige Variablen.....	- 35 -

3.4.	Erklärungen zur Erzeugung der Hörproben.....	- 37 -
4.	Ergebnisse des Versuchs und Analyse der Daten	- 38 -
4.1.	Untersuchung des alleinigen Einflusses der unabhängigen Variablen	- 39 -
4.2.	Untersuchung der Haupteffekte und Interaktionen zwischen den unabhängigen Variablen.....	- 42 -
4.2.1.	Abhängige Variable: Qualität	- 43 -
4.2.2.	Abhängige Variable: Nachhall.....	- 45 -
4.2.3.	Abhängige Variable: Räumlichkeit	- 46 -
4.2.4.	Abhängige Variable: Klarheit	- 47 -
4.2.5.	Abhängige Variable: Intimität	- 49 -
4.2.6.	Abhängige Variable: Verständlichkeit.....	- 50 -
4.2.7.	Abhängige Variable: Klangfärbung	- 51 -
4.3.	Mögliche Einschränkungen der Untersuchung	- 52 -
5.	Abschließende Beurteilungen.....	- 54 -
5.1.	Überprüfung des Sprachübertragungsindex STI.....	- 54 -
5.2.	Messung der Raumakustik der referenzierten Veranstaltungsstätte.....	- 55 -
5.3.	Aufstellung eines Kostenvergleichs.....	- 56 -
5.4.	Klärung der Hypothesen und Erkenntnisgewinn	- 58 -
	LITERATURVERZEICHNIS	VIII
	EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG.....	X
	ANHANGSVERZEICHNIS	XI

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 1: GEMITTELTE NACHHALLZEITEN ALS FUNKTION ÜBER DIE OKTAVBÄNDER. (ADELMAN-LARSEN, 2014, P. 123).	- 4 -
ABBILDUNG 2: LINEARER (A) UND NICHTLINEARER (B) AUSKLANG DES NACHHALLS IN EINEM RAUM (ADELMAN-LARSEN, 2014, P. 8).....	- 7 -
ABBILDUNG 3: BEISPIELHAFTES DARSTELLUNG DER VERSCHIEDENEN ANTEILE DER IMPULSANTWORT EINES RAUMES. (AHNERT & STEFFEN, 1999, P. 21).....	- 8 -
ABBILDUNG 4: KURVEN GLEICHER LAUTHEIT (QUELLE: VORLÄNDER, 2008, P. 82)	- 11 -
ABBILDUNG 5: DIRECTIVITY INDEX UND DIRECTIVITY FACTOR EINES BEISPIELHAFTEN LAUTSPRECHERS ALS FUNKTION ÜBER DER FREQUENZ (KLING & FREITAG GMBH, 2017, P. 18).....	- 15 -
ABBILDUNG 6: BEISPIELHAFTES POLARDIAGRAMM ZUR DARSTELLUNG DES ABSTRAHLVERHALTENS EINES LAUTSPRECHERS. (AHNERT & STEFFEN, 1999, P. 89).....	- 15 -
ABBILDUNG 7: BEISPIELHAFTES ISOBARENDIAGRAMM DES HORIZONTALEN ABSTRAHLVERHALTENS EINES LAUTSPRECHERS. (KLING & FREITAG GMBH, 2017, P. 19).....	- 16 -
ABBILDUNG 8: DREIDIMENSIONALE DARSTELLUNG DES ABSTRAHLVERHALTENS EINES LAUTSPRECHERS. (AFMG (AHNERT FEISTEL MEDIA GROUP), 2016, P. 40)	- 16 -
ABBILDUNG 9: KOMPLEXER FREQUENZGANG EINES LAUTSPRECHERS MIT DARSTELLUNG DER AMPLITUDE (ROT) UND DER PHASE (BLAU). (AFMG (AHNERT FEISTEL MEDIA GROUP), 2016, P. 58).....	- 17 -
ABBILDUNG 10: PHASENVERLAUF UND ZUGEHÖRIGE GRUPPENLAUFZEIT EINES LAUTSPRECHERS. (GÖRTZ & LAWS, P. 3).....	- 17 -
ABBILDUNG 11: DARSTELLUNG DER SCHALLAUSBREITUNG IN HORIZONTALER EBENE DES LAUTSPRECHERS DBTECHNOLOGIES DVA T8. (QUELLE: SOFTWARE EASE)	- 30 -
ABBILDUNG 12: KOMPLEXER FREQUENZGANG DES LAUTSPRECHERS DVA T8. (QUELLE: SOFTWARE EASE)	- 30 -
ABBILDUNG 13: HORIZONTALE SCHALLAUSBREITUNG DES LAUTSPRECHERS SEEBURG GALEO C (QUELLE: SOFTWARE EASE)-	32 -
ABBILDUNG 14: BODE-DIAGRAMM DES LAUTSPRECHERS SEEBURG GALEO C (QUELLE: SOFTWARE EASE)	- 32 -
ABBILDUNG 15: HORIZONTALE SCHALLAUSBREITUNG DES LAUTSPRECHERS D&B AUDIOTECHNIK XSL8 (QUELLE: SOFTWARE EASE).....	- 34 -
ABBILDUNG 16: BODE-DIAGRAMM DES LAUTSPRECHERS D&B AUDIOTECHNIK XSL8 (QUELLE: SOFTWARE EASE).....	- 34 -
ABBILDUNG 17: DARSTELLUNG DER MITTELWERTE DER BEWERTETEN ABHÄNGIGEN VARIABLEN MIT ALLEINIGEM BEZUG ZUR EINFLUSSGRÖÙE: STIMULI (QUELLE: SPSS).....	- 39 -
ABBILDUNG 18: DARSTELLUNG DER MITTELWERTE DER BEWERTETEN ABHÄNGIGEN VARIABLEN MIT ALLEINIGEM BEZUG ZUR EINFLUSSGRÖÙE: HÖRPOSITION (QUELLE: SPSS)	- 40 -
ABBILDUNG 19: DARSTELLUNG DER MITTELWERTE DER BEWERTETEN ABHÄNGIGEN VARIABLEN MIT ALLEINIGEM BEZUG ZUR EINFLUSSGRÖÙE: BESCHALLUNG (QUELLE: SPSS).....	- 40 -
ABBILDUNG 20: DARSTELLUNG DER MITTELWERTE DER BEWERTETEN ABHÄNGIGEN VARIABLEN MIT ALLEINIGEM BEZUG ZUR EINFLUSSGRÖÙE: RAUMAKUSTIK (QUELLE: SPSS).....	- 41 -
ABBILDUNG 21: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND HÖRPOSITION, AV: QUALITÄT (QUELLE: SPSS) -	43 -
ABBILDUNG 22: INTERAKTION ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND STIMULUS, AV: QUALITÄT (QUELLE: SPSS).....	- 44 -
ABBILDUNG 23: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs BESCHALLUNG UND HÖRPOSITION, AV: QUALITÄT (QUELLE: SPSS) -	44 -
ABBILDUNG 24: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND PA, AV: NACHHALL (QUELLE: SPSS).....	- 45 -
ABBILDUNG 25: INTERAKTION ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND HÖRPOSITION, AV: NACHHALL (QUELLE: SPSS) ..	- 45 -

ABBILDUNG 26: INTERAKTION ZWISCHEN RAUMAKUSTIK UND HÖRPOSITION, AV: RÄUMLICHKEIT (QUELLE: SPSS)	- 46 -
ABBILDUNG 27: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND BESCHALLUNG, AV: KLARHEIT (QUELLE: SPSS)	- 47 -
ABBILDUNG 28: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND STIMULUS, AV: KLARHEIT (QUELLE: SPSS).....	- 48 -
ABBILDUNG 29: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND HÖRPOSITION, AV: KLARHEIT (QUELLE: SPSS)	- 48 -
ABBILDUNG 30: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND STIMULUS, AV: INTIMITÄT (QUELLE: SPSS)	- 49 -
ABBILDUNG 31: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND HÖRPOSITION, AV: INTIMITÄT (QUELLE: SPSS)	- 49 -
ABBILDUNG 32: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND HÖRPOSITION, AV: VERSTÄNDLICHKEIT	- 50 -
ABBILDUNG 33: INTERAKTION ZWISCHEN DEN UVs BESCHALLUNG UND HÖRPOSITION, AV: VERSTÄNDLICHKEIT (QUELLE: SPSS).....	- 51 -
ABBILDUNG 34: INTERAKTION ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND STIMULUS, AV: KLANGFÄRBUNG (QUELLE: SPSS)	- 52 -
ABBILDUNG 35: DARSTELLUNG DER STI-WERTE AM HÖRERORT SWEETSPOT (QUELLE: SPSS).....	- 54 -
ABBILDUNG 36: DARSTELLUNG DER STI-WERTE AM HÖRERORT DIFFUSFELD (QUELLE: SPSS)	- 55 -

TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 1: BEWERTUNGSSYSTEM FÜR DIE AKUSTISCHE QUALITÄT VON RÄUMEN	- 13 -
TABELLE 2: BEWERTUNGSSYSTEM DER QUALITÄTSSTUFEN VON LAUTSPRECHERN	- 20 -
TABELLE 3: BEWERTUNG UND PUNKTEERMITTLUNG DER RAUMAKUSTIK 1 - MANGELHAFT	- 25 -
TABELLE 4: BEWERTUNG UND PUNKTEERMITTLUNG DER RAUMAKUSTIK 2 - BEFRIEDIGEND	- 26 -
TABELLE 5: BEWERTUNG UND PUNKTEERMITTLUNG DER RAUMAKUSTIK 3 - GUT	- 27 -
TABELLE 6: BEWERTUNG UND PUNKTEERMITTLUNG VON LAUTSPRECHER 1 - MANGELHAFT	- 30 -
TABELLE 7: BEWERTUNG UND PUNKTEERMITTLUNG VON LAUTSPRECHER 2 – BEFRIEDIGEND	- 31 -
TABELLE 8: BEWERTUNG UND PUNKTEERMITTLUNG VON LAUTSPRECHER 3 – GUT.....	- 34 -
TABELLE 9: LOKAL GEMESSENE, RAUMAKUSTISCHE WERTE DER ALS REFERENZ GENUTZTEN VERANSTALTUNGSSTÄTTE	- 56 -

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ANOVA *Analysis of Variance: Varianzanalyse*

AURA *Auralisationsmodul der Software EASE*

AV *abhängige Variable*

B *Qualitätsstufe "Befriedigend"*

BR *Bass Ratio - Bassverhältnis*

C *Klarheitsmaß*

C₅₀ *Klarheitsmaß mit zeitlicher Grenze zwischen Direkt- und Diffusschall bei 50ms*

C₈₀ *Klarheitsmaß mit zeitlicher Grenze zwischen Direkt- und Diffusschall bei 80ms*

D *Deutlichkeitsmaß*

D₅₀ *Deutlichkeitsmaß*

dB *deziBel*

DI *Directivity Index*

DIN *Deutsche Industrienorm*

EASE *Handelsname der Planungssoftware EASE (Enhanced Acoustic Simulations for Engineers)*

EDT *Early Decay Time - frühe Abklingzeit im 10dB Intervall*

G *Qualitätsstufe "Gut"*

GLL *"Generic Loudspeaker Library" - herstellerübergreifende Datenbank der elektroakustischen Werte verschiedener Lautsprecher*

HOAI *Honorarordnung für Architekten und Ingenieure*

HP *Abkürzung für: Hörposition*

HP_D *Abkürzung für: Hörposition Diffusfeld*

HP_s *Abkürzung für: Hörposition SweetSpot*

Hz *Einheit: Hertz*

IR *Impulse Response, Impulsantwort*

M *Qualitätsstufe "Mangelhaft"*

PA *"Public addressed" - bedeutet Beschallungsanlage*

PA_b *Abkürzung für: Beschallung befriedigend*

PA_g *Abkürzung für: Beschallung gut*

PA_m *Abkürzung für: Beschallung mangelhaft*

Q *Directivity Factor*

RA *Abkürzung für: Raumakustik*

RA_b *Abkürzung für: Raumakustik befriedigend*

RA_g *Abkürzung für: Raumakustik gut*

RA_m *Abkürzung für: Raumakustik mangelhaft*

RT60 *Nachhallzeit gemessen im Intervall von 60dB*

SPSS *Markenname der Statistik-Software des Herstellers IBM*

ST *Abkürzung für: Stimulus/Stimuli*

STI *"Speech Transmission Index" - Sprachübertragungsindex*

ST_{Mus} Abkürzung für: Stimulus Musik

ST_{Spr} Abkürzung für: Stimulus Sprache

T10 Nachhallzeit gemessen im Intervall von 10dB

T20 Nachhallzeit gemessen im Intervall von 20dB

T30 Nachhallzeit, gemessen im Intervall von 30dB

T60 Siehe RT60

UV unabhängige Variable

1. Einführung in die Fragestellung und Beschreibung der Hypothesen

Die Erfahrung (auch des Autors) zeigt, dass die Qualität einer Beschallungsanlage nicht immer entscheidend ist, um gute klangliche Ergebnisse zu liefern. Diese Beobachtung fällt besonders dann auf, wenn man sich in einer „raumakustisch schlechten“ Umgebung befindet. Besonders interessant wird die weitergehende Beobachtung, dass in „raumakustisch guten“ Umgebungen die Qualität (und der Preis) einer Beschallungsanlage weitaus weniger Einfluss auf das Ergebnis zu haben scheint. Die Klassifizierung in akustisch gute und akustisch schlechte Räume ist bis zu einem gewissen Grad bereits technisch festgelegt, kann aber unmöglich alle Formen szenischer Darbietungen einschließen und bleibt in hohem Maße subjektiv. Vielmehr behandelt diese Arbeit die Frage, welche Kombination aus Beschallungsanlage und raumakustischer Werte die überzeugendsten klanglichen, aber auch die wirtschaftlich sinnvollsten Ergebnisse liefert.

Das Ziel dieser Arbeit ist also zu bewerten, welcher Faktor (Beschallungsanlage oder Raumakustik) den größeren Einfluss auf das Ergebnis hat und wie man mit geringstem Aufwand den größten Verbesserungseffekt erzielen kann. Außerdem kann eine Aussage zur Frage gemacht werden, ob hohe Kosten auch immer mit guten Ergebnissen verbunden sind, oder ob es auch mit begrenzten Mitteln möglich ist, gute Qualität zu erreichen. Weiterhin wird untersucht, ob gegenseitige Abhängigkeiten zwischen diesen beiden Faktoren bestehen. Gesucht werden daher physikalische Eigenschaften des Raumes und Leistungsparameter von Lautsprechern, die dabei die dominierenden Effekte bilden und wie diese Eigenschaften und Parameter miteinander interagieren.

Im Hinblick auf die Relevanz des Forschungsthemas kommt unweigerlich der finanzielle Aspekt in den Vordergrund. Wenn finanzielle Mittel primär in diejenigen Bereiche fließen, die für das gewünschte Ergebnis maßgeblich verantwortlich sind, könnten Kosten gespart werden und Budgetentscheidungen können leichter getroffen werden. Allgemeingültige Aussagen sind bei der Vielzahl an Veranstaltungsformen und Stätten nur schwer möglich, deshalb orientiert sich diese Arbeit an der Geometrie einer realen, mittelgroßen Veranstaltungsstätte in Berlin, um in einer Art Fallstudie einen praktischen Bezug herzuleiten. Die häufigsten, in dieser Veranstaltungsstätte vorkommenden Veranstaltungsformen sind Rock/Pop-Konzerte und

Sprachdarbietungen mit unterhaltenden oder informativen Inhalten und sollen in dieser Arbeit beispielhaft eingesetzt werden.

Als wesentliches und aussagekräftiges Werkzeug werden Hörproben einer Versuchsgruppe zur Bewertung gestellt und die Ergebnisse des Experiments analysiert, um die aufgestellten Hypothesen beantworten zu können. Die Planungssoftware EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers)¹ erzeugt dafür virtuelle dreidimensionale Räume und stattet diese mit Lautsprechern aus. Auf diese Art ist es ohne lokale Messungen möglich, alle entscheidenden Parameter flexibel zu ändern und mehrere Messreihen zu erzeugen. Die Simulationen folgen dabei den Modellannahmen der geometrischen und statistischen Akustik. Die Software erlaubt die Generierung von monauralen und binauralen Impulsantworten. Mit diesen Impulsantworten können die verschiedenen – eingangs diskutierten – Wirkkombinationen durch Faltung via Kopfhörer hörbar gemacht werden und schließlich zur qualitativen Bewertung durch die Versuchsteilnehmer genutzt werden, bspw. anhand von gewissenhaft ausgewähltem Audiomaterial.

Das Bewertungssystem für die Hörproben ist angelehnt an aktuelle Studien der TU Berlin und bietet eine ideale Grundlage für die vorgesehenen Analysen und Diskussionen der Ergebnisse.

¹ Produkt der Firma AFMG Technologies GmbH

2. Die Grundlage des Versuchsaufbaus anhand wissenschaftlicher Forschungen

Die Vielzahl verschiedener raumakustischer Größen und Leistungsparameter von Lautsprechern macht es nötig, die für diese Arbeit wesentlichen Werte zu finden und zu beschreiben. Das Ziel dieses Kapitels ist eine finale Skalierung der hier beschriebenen Einflussgrößen, nach der definiert werden kann, wie und warum ein Raum als akustisch gut oder mangelhaft und weshalb Lautsprechersysteme als qualitativ gut oder schlecht einzustufen sind. Wie eingangs beschrieben, sind für den späteren Hörversuch insbesondere die verschiedenen Kombinationen der verschiedenen Qualitätsstufen von ausschlaggebendem Interesse. Zuerst werden die für den Versuch wichtigen raumakustischen Werte bestimmt und priorisiert. Anschließend werden die elektroakustischen Leistungsparameter von Lautsprechern beschrieben und skaliert. Dabei werden jeweils vier bis fünf Werte als ausreichend erachtet. Die Reihenfolge der Auflistung legt dabei gleich die Prioritäten und die daraus resultierende Skalierung der Einflussgrößen fest.

2.1. Auszug wichtiger raumakustischer Größen

Als wichtige Literatur in diesem Abschnitt dient die Forschung von Niels W. Adelman-Larsen. Er untersucht unter anderem die raumakustischen Begebenheiten in Konzertstätten, die für die Aufführung rhythmischer Musik, insbesondere Rock, Pop und Jazz genutzt werden. Wie er bemerkt:

„The existing body of literature regarding the acoustic design of concert halls has focused almost exclusively on classical music, although there are many more performances of rhythmic music, including rock and pop.“ vgl. (Adelman-Larsen, et al., 2007, p. 1)

Seine Erkenntnisse sammelt er in seinem Buch „Rock and Pop Venues – Acoustic and Architectural Design“. Da diese Arbeit ebenfalls den Sonderfall von Rock, Pop und ähnlicher Veranstaltungsformen behandelt, bieten seine Untersuchungen (u. a.) eine ideale Basis als Grundlage für weiterführende Diskussionen.

2.1.1. Frequenzabhängige Nachhallzeit T30 und EDT

Eine wesentliche Kerngröße zur Bestimmung der Raumakustik ist die weithin bekannte und in der Literatur omnipräsente Nachhallzeit. Sie findet unter anderem praktische Anwendung in geltenden Industrienormen wie bspw. der DIN 18041 – Hörsamkeit in Räumen, vgl. (e.V., Deutsches Institut für Normung). Üblicherweise wird sie als RT60 oder T60 (*Reverberation Time 60*) angegeben, unter der Bezeichnung sie auch seit der Einführung durch Wallace Clement Sabine (1868-1919) bekannt ist. Sie gibt den Zeitraum an, in der ein Schallereignis unmittelbar nach Abschalten der Schallquelle in seinem Pegel um 60dB abnimmt, vgl. (Ahnert & Steffen, 1999, p. 17). Jedoch wird nach Adelman-Larsen das Intervall von 60dB während eines Konzerts außer in Pausen zwischen den Stücken selten bis nie erreicht. Eine Angabe der Nachhallzeit in einem gemessenen Intervall von 30dB ist daher weitaus zielführender und naheliegend, vgl. (Adelman-Larsen, 2014, p. 7). Dieser Wert wird mit dem Faktor 2 multipliziert, um ihn mit dem Wert T60 vergleichen zu können. Nachdem die Angaben T60 und T30 den Zeitwert angeben, nachdem ein Schallereignis bis zur Unhörbarkeit abgeklungen ist, liefert die Größe EDT (*early decay time*), eingeführt 1968 von Vilhelm Lassen Jordan die Nachhallzeit in einem Intervall von 10dB (anschließend multipliziert mit dem Faktor 6). Ein Intervall, das durchaus auch während eines Konzerts erreicht wird und dadurch die tatsächliche Wahrnehmung des Nachhalls eines Konzertbesuchers am ehesten abbildet. Die beiden Zeitwerte T30/T60 und EDT tragen daher auch die Beinamen *Terminal Reverberation Time* (T30/T60: Ausklang bis zur Unhörbarkeit) und *Running Reverberation Time* (EDT: wahrgenommene Nachhallzeit bei anhaltendem Schallereignis), vgl. (Adelman-Larsen, 2014, pp. 7-8 und 30).

Der Ausklang eines Schallereignisses in Räumen ist selten über den gesamten hörbaren Frequenzbereich linear, begründet durch die Frequenzabhängigkeit des Absorptions- und Reflektionsverhaltens verschiedener Baustoffe und Oberflächenmaterialien und deren Einfluss auf die frequenz-

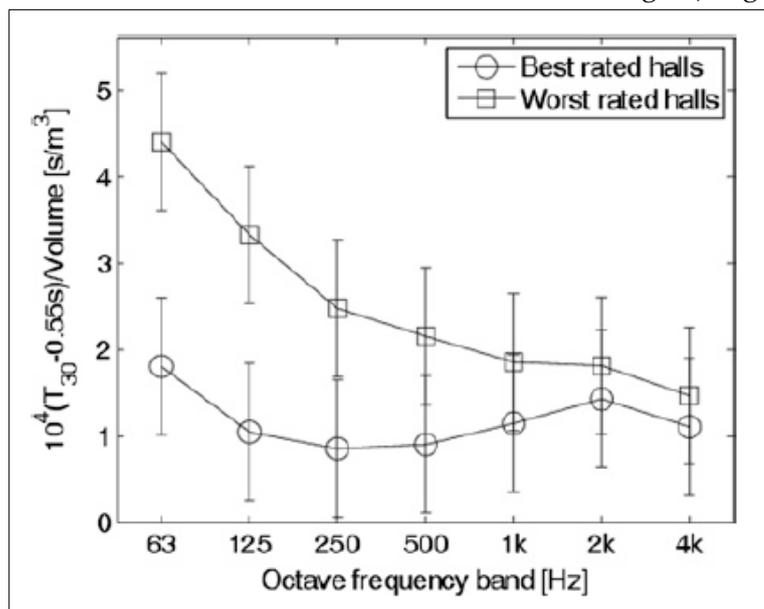


Abbildung 1: gemittelte Nachhallzeiten als Funktion über die Oktavbänder. (Adelman-Larsen, 2014, p. 123)

abhängigen Nachhallzeiten. Die naturgemäß geringe Richtwirkung von tieffrequenten Schallwellen (20-250 Hz) und deren große Wellenlängen sind der Grund, weshalb diese Schallanteile weniger stark absorbiert werden als hochfrequente Schallwellen. In diesem tieferen Frequenzbereich ergeben sich damit meist höhere Nachhallzeiten, die zu Nichtlinearitäten im Diffusschallfeld² führen können und ein unausgewogenes Klangbild erzeugen³. Während dieser Effekt für die Akustik in Konzerthäusern für klassische Musik genutzt wird (Stichwort *Room Gain*), hätte diese Eigenschaft hingegen im Bereich der verstärkten Rock- und Popkonzerte dramatisch nachteilige Auswirkungen.

Es ist daher zweckmäßig, Nachhallzeiten für mindestens 2 verschiedene Frequenzbereiche zu bestimmen, um genauere Aussagen zur akustischen Qualität eines Raumes treffen zu können. Nach Adelman-Larsen sollten diese 2 Bereiche einerseits von 63 Hz bis 125 Hz und andererseits von 250 Hz bis 2500 Hz gemessen werden, vgl. (Adelman-Larsen, et al., 2010, p. 248). Je nach Anwendungszweck einer Veranstaltungsstätte existieren verschiedene Richtwerte, die laut dem aktuellen Stand der Technik einzuhalten sind, um im Sinne der Veranstaltungen gute Ergebnisse zu erreichen. Um nun festzulegen, welche Nachhallzeiten wie einzustufen sind soll die Grafik in Abbildung 1 – ein Ergebnis der umfangreichen Untersuchungen von Adelman-Larsen - genutzt werden. Er untersuchte dazu 20 verschiedene Veranstaltungsstätten und lies diese sowohl von Besuchern als auch von Musikern qualitativ bewerten.

Um nun im Folgenden genutzten Qualitätsstufen „Mangelhaft“, „Befriedigend“ und „Gut“ - erkennbar an den Indizes *M*, *B* und *G* - in Zahlen auszudrücken, kommt man anhand der Grafik zu folgendem Ergebnis:

T30 _M (63Hz-125Hz):	4,50s und 3,30s	- Mittelwert <u>3,90s</u>
T30 _M (250Hz-2,5kHz):	2,50s, 2,20s, 1,80s, 1,70s	- Mittelwert <u>2,05s</u>
T30 _G (63Hz-125Hz):	1,70s und 1,00s	- Mittelwert <u>1,35s</u>

² Der Ort innerhalb eines Schallfeldes, an dem der Diffusschallpegel den Direktschallpegel übersteigt.

³ „By far the biggest share of electric amplification energy is used below 200 Hz and reaches considerable levels [...]. Because of a low *Q* [directivity] value of bass loudspeakers emitting bass sound, the critical distance becomes very short, leading to much reverberant bass sound almost everywhere in the venue [...]. Therefore, an overall undefined sound will most often stem from reverberant bass sound that [...] will partially mask even the direct higher frequency sound.“ (Adelman-Larsen, 2014, p. 122)

T30_G (250Hz-2,5kHz): 0,80s, 0,85s, 1,15s, 1,40s - Mittelwert 1,05s

Da die Grafik lediglich die besten und die schlechtesten Werte angibt, wird aus den eben errechneten Werten der raumakustisch befriedigende Bereich bestimmt.

$$T30_B (63\text{Hz}-125\text{Hz}): \frac{3,90s+1,35s}{2} = \underline{2,63s}$$

$$T30_B (250\text{Hz}-2,5\text{kHz}): \frac{2,05s+1,05s}{2} = \underline{1,55s}$$

Diese absoluten Zahlenwerte müssen nun noch in Zeitbereiche gewandelt werden, um die später im Versuch entstehenden Nachhallzeiten einordnen zu können. Die unteren und oberen Grenzen der Bereiche ergeben sich aus dem zwischen den Stufen herrschenden Zeitintervall, dessen Hälfte jeweils zu den Mittelwerten oben subtrahiert bzw. addiert werden muss:

$$T30_G (63\text{Hz}-125\text{Hz}): 1,35s - \frac{2,63s-1,35s}{2} \text{ und } 1,35s + \frac{2,63s-1,35s}{2} \quad \underline{\text{ergibt } 0,71s \text{ bis } 1,99s}$$

$$T30_G (250\text{Hz}-2\text{kHz}): 1,05s - \frac{1,55s-1,05s}{2} \text{ und } 1,05s + \frac{1,55s-1,05s}{2} \quad \underline{\text{ergibt } 0,80s \text{ bis } 1,30s}$$

$$T30_B (63\text{Hz}-125\text{Hz}): 2,63s - \frac{3,90s-2,63s}{2} \text{ und } 2,63s + \frac{3,90s-2,63s}{2} \quad \underline{\text{ergibt } 1,99s \text{ bis } 3,27s}$$

$$T30_B (250\text{Hz}-2\text{kHz}): 1,55s - \frac{2,05s-1,55s}{2} \text{ und } 1,55s + \frac{2,05s-1,55s}{2} \quad \underline{\text{ergibt } 1,30s \text{ bis } 1,80s}$$

$$T30_M (63\text{Hz}-125\text{Hz}): \quad \underline{\text{ab } 3,27s}$$

$$T30_M (250\text{Hz}-2\text{kHz}): \quad \underline{\text{ab } 1,80s}$$

2.1.2. Verhältnis aus EDT/T30

Verständlicherweise sollte der Nachhall, ohne nennenswerte Über- oder Unterbetonungen im hörbaren Frequenzbereich wahrgenommen werden – ein linearer Ausklang des Diffusschalls ist also anzustreben. Ein linearer Ausklang liegt genau dann vor, wenn T30 und EDT den gleichen Wert annehmen, eine Pegelreduzierung des Nachhalls um 10dB (multipliziert mit 6) also genauso lange dauert wie die Reduzierung um 30dB (multipliziert mit 2). Setzt man also EDT und T30 ins Verhältnis, sollte in einem perfekt linearen Raum das Ergebnis gleich 1 sein. Die Ratio aus EDT und T30 liefert also eine Aussage darüber wie linear die Akustik eines Raumes einzustufen ist. Nach Adelman-Larsen können selbst in Veranstaltungsstätten mit sehr langen Nachhallzeiten gute Ergebnisse erzielt werden, wenn sie einen linearen Diffusschall erzeugen, vgl. (Adelman-Larsen, 2014, p. 30). Abbildung 2 zeigt beispielhaft einen linearen Ausklang (a) in dem alle Schallanteile gleichmäßig ausklingen, während (b) darstellt, dass manche Schallanteile „schneller“ abklingen als andere, was man an dem starken Pegelabfall direkt nach Abschalten der Schallquelle erkennen kann.

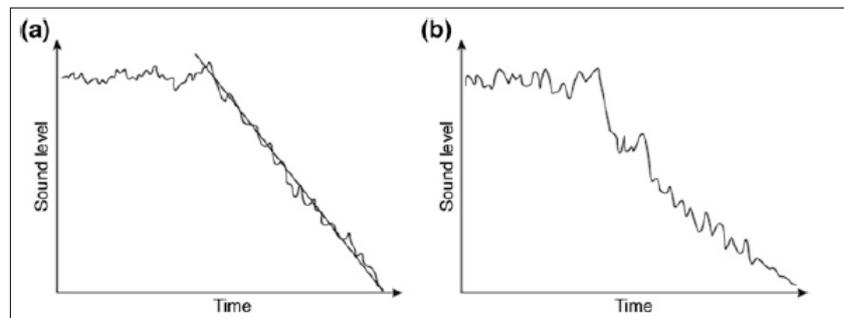


Abbildung 2: Linearer (a) und nichtlinearer (b) Ausklang des Nachhalls in einem Raum (Adelman-Larsen, 2014, p. 8)

Über- und Unterbetonungen im Frequenzgang führen also zu einer wahrnehmbaren Unausgewogenheit im Klangbild. Da sich diese Arbeit zum großen Teil mit der Frage beschäftigt, was guten Klang ausmacht und wann er als solcher wahrgenommen wird, spielt die Linearität bzw. Diffusität eines akustischen Raumes eine tragende Rolle. Das Verhältnis aus EDT und T30 (desselben Frequenzbereichs) liefert daher einen gut vergleichbaren Zahlenwert, der Aussagen über die akustische Qualität zulässt. Unterstrichen wird diese Aussage in Abbildung 1: die Hallen mit den größten Unterschieden der Nachhallzeiten in den verschiedenen Frequenzbändern wurden am schlechtesten bewertet. Bei kleineren Unterschieden der einzelnen Zeiten, werden eher gute Ergebnisse festgestellt.

Wünschenswert wäre also eine Ratio von 1,0 zu erzeugen, was einem linearen Ausklang des Nachhalls und damit einer perfekten Diffusität entspräche. Für die Einschätzung als raumakustisch „Gut“ scheint eine niedrige Abweichung von $\pm 10\%$ vom idealen Verhältnis von

1,0 sinnvoll. Abweichungen von $\pm 20\%$ können als befriedigend, Werte von $\pm 30\%$ müssen als mangelhaft bewertet werden. Da die Betrachtung der Linearität über das gesamte Frequenzspektrum ausschlaggebend ist, findet hier keine Aufteilung in Frequenzgruppen statt.

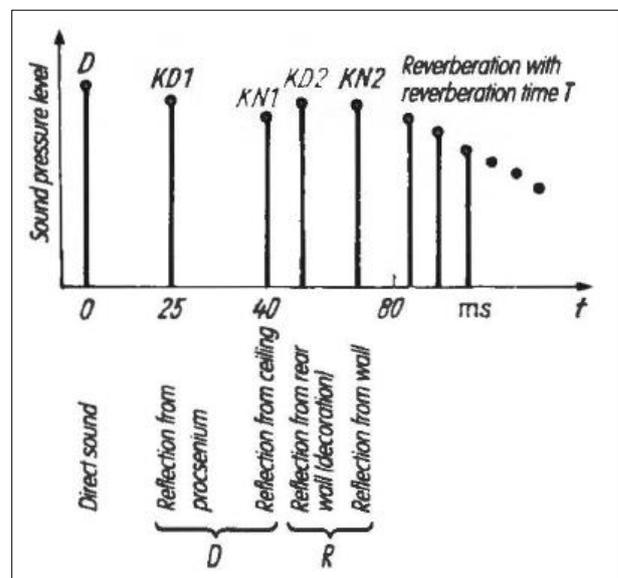
$$\text{EDT/T30}_G = 1,0 \pm 10\%$$

$$\text{EDT/T30}_B = 1,0 \pm 20\%$$

$$\text{EDT/T30}_M = 1,0 \pm 30\%$$

2.1.3. Klarheitsmaß C_{80} und C_{50} . Deutlichkeit D

Die Impulsantwort eines Raumes besteht aus verschiedenen Schallanteilen. Beispielhaft dargestellt in Abbildung 3 enthält sie Anteile des Direktschalls, dessen erste oder frühe Reflektionen (*early reflections*) in der Grafik benannt mit $KD1$ und $KN1$, und weitere Reflektionen $KD2$ und $KN2$, die ab einem gewissen Zeitpunkt in ihrer Intensität abnehmen, jedoch in ihrer Dichte zunehmen und den eigentlichen diffusen Nachhall (hier R) bilden.



Den ersten Reflektionen kommt dabei eine große Bedeutung zu. Nach Ahnert &

Abbildung 3: beispielhafte Darstellung der verschiedenen Anteile der Impulsantwort eines Raumes. (Ahnert & Steffen, 1999, p. 21)

Steffen fallen dem Direktschall lediglich 5-15% und dem Nachhall 10% zu. Demzufolge beinhalten die ersten Reflektionen ca. 80% der Gesamtenergie. Weiterhin wird in Theorie und Praxis festgelegt, dass die Informationen der ersten Reflektionen einen Teil des Direktschalls bilden, siehe Abbildung 3, vgl. (Ahnert & Steffen, 1999, p. 23). Um also ein ausgewogenes Klangbild zu erzeugen, ist die Intensität und der Schalldruck der verschiedenen Schallanteile entscheidend. Laut Literatur ist festgelegt, dass Direktschall und erste Reflektionen nach einem definierten Zeitraum abgeschlossen sind. Nach diesem Zeitraum bilden die weiteren Reflektionen den Nachhall. Um also die Akustik eines Raumes mit Zahlenwerten beschreib- und damit vergleichbar zu machen, wurden die Begriffe Klarheit C (*clarity*) und Deutlichkeit D (*Definition*) eingeführt. Während C vor Allem die Klarheit musikalischer Inhalte beschreibt, liefert

D eine Aussage über die Sprachverständlichkeit innerhalb eines Raumes. Der Unterschied der beiden Werte liegt zum einen in den gemessenen Zeitintervallen 50ms (D) und 80ms (C) und damit einer Verschiebung der Grenze zwischen Direkt- und Diffusschall – weshalb D und C auch häufig mit den entsprechenden Indizes versehen werden (D_{50} und C_{80}). D_{50} beschreibt jedoch das Verhältnis der Energie des Direktschalls zur Gesamtenergie, während C_{80} die Energie des Direktschalls mit der Energie des Nachhalls ins Verhältnis setzt. Die folgenden Formeln verdeutlichen dies durch die Grenzen der bestimmten Integrale, vgl. (Kuttruff, 2000, pp. 207-209):

$$D_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \text{ dB} \quad \text{und} \quad C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \text{ dB}$$

p ist dabei der an einem Ort gemessene Schalldruckpegel als Funktion der Zeit t .

Der Kern des Wertes C_{80} liegt also in der Angabe, um wieviel dB der Direktschall im Verhältnis zum Diffusschall größer (lauter) ist. Für die in dieser Arbeit zunächst betrachtete Veranstaltungsform (Musik), wäre per Definition das Zeitintervall zwischen Direkt- und Diffusschall mit 80ms festgelegt. Dieses Intervall wurde jedoch im Wesentlichen für die Darbietung von symphonischer (klassischer) Musik eingeführt, vgl. (Ahnert & Steffen, 1999, p. 24). Da es auch in Konzertveranstaltungen der Richtungen Rock, Pop und auch Jazz häufig auf eine gute Verständlichkeit der Liedtexte ankommt, ist nach Adelman-Larsen eine Reduzierung des Zeitintervalls auf 50ms sinnvoll, vgl. (Adelman-Larsen, 2014, p. 31). Ebenso leben die genannten Musikstile von stark rhythmischen und synkopischen Anteilen, die von einer besseren Klarheit profitieren können. Das im Zeitintervall reduzierte Klarheitsmaß C_{50} kann damit als gut vergleichbarer Wert für die Bewertung herangezogen werden.

Der Literatur sind für eine gute Bewertung der Klarheit einerseits 3 bis 4dB für den Anwendungsfall für vorproduzierte Musik (Diskotheken und Kinos) und andererseits 0 bis 4dB für gemischte Veranstaltungsformen zu entnehmen, vgl. (Ahnert & Steffen, 1999, p. 26). Bedenkt man dabei, dass ein negativer Wert bedeutet, dass der Diffusschall am gemessenen Ort den Direktschall überwiegt, so sind negative Werte bei moderatem Abstand zur Schallquelle grundsätzlich als mangelhaft zu interpretieren (im Anwendungsbereich dieser Arbeit). Die Firma AFMG beschreibt in ihrem Handbuch zur Software EASE sogar gute Klarheitswerte von 6 ± 2 dB für „Rock and Roll“, vgl. (ADA - Acoustic Design Ahnert, 2000, p. 165). An einer sinnvoll gewählten Hörposition, bspw. dem „SweetSpot“ (siehe Abschnitt 3.2.1), sollte in jedem Fall

ausreichende Klarheit herrschen und die Werte für die unterschiedlichen Qualitätsstufen können festgelegt werden zu:

C50_G = 3 bis 6 [dB]

C50_B = 0 bis 3 [dB]

C50_M = - ∞ bis 0 [dB]

2.1.4. Bassverhältnis BR und Wärme

Ein weiteres akustisches Qualitätsmerkmal ist das von L.L. Beranek eingeführte Bassverhältnis (*Bass Ratio*). Es setzt die Nachhallzeiten des Frequenzbereichs 125Hz-250Hz mit den Zeiten des Bereichs 500Hz-1000Hz ins Verhältnis. In Konzerthäusern für klassische Musik ist wie im Abschnitt 2.1.1 erwähnt ein Anstieg der Nachhallzeit im tieffrequenten Bereich anzustreben, sodass der Raum in diesem Bereich unterstützend wirkt. Tatsächlich wird die so entstehende „Wärme“ von vielen Konzertbesuchern als angenehm empfunden. In der Literatur sind für das Bassverhältnis verschiedene Werte zu finden und allgemeinhin sind Werte bis zu 1,4 als zufriedenstellend einzustufen, vgl. (Adelman-Larsen, 2014, p. 32).

Diese Definitionen sind allerdings für klassische Musik entwickelt worden und berücksichtigen nicht die Anforderungen für Rock- und Popkonzerte. In Häusern für elektroakustisch verstärkte Veranstaltungen ist es häufig nicht nötig, dass die Wärme durch die Raumakustik geschaffen wird, sondern von den installierten Lautsprechern erzeugt wird. Nach Adelman-Larsen profitieren solche Veranstaltungsorte trotzdem von längeren Nachhallzeiten im Bassbereich (gemeint ist hier der Frequenzbereich um 63Hz – Frequenzen um 250Hz werden bei Rock und Pop nicht zu den Bassfrequenzen gezählt), vgl. (Adelman-Larsen, 2014, p. 32). Berücksichtigt man weiterhin die „Kurven gleicher Lautheit“ in Abbildung 4, ist dieses Argument sinnvoll. Betrachtet man diese Kurven, fällt auf, dass sich die empfundene Lautstärke in den von Beranek definierten Frequenzbereichen bei hohen Pegeln, wie sie bei Rock und Popkonzerten vorherrschen, weniger stark unterscheiden, als bei geringeren Schalldruckpegeln. Auch um Maskierungseffekte zu vermeiden, ist also nach Meinung des Autors eine Reduzierung des Grenzwerts bzgl. des Bassverhältnisses sinnvoll. Zu beachten ist hier, dass das Bassverhältnis für Hallen mit Publikum definiert wurde, vgl. (Fuchs, 2018, p. 129). Von dieser Definition wird in

dieser Arbeit abgewichen und das Bassverhältnis wird stets für leere Hallen angegeben. Da hier der Sonderfall von elektroakustisch verstärkten Konzerten betrachtet wird und Unausgewogenheiten im Klangbild über die Anpassung des Beschallungssystems nur in begrenztem Maß ausgeglichen werden können, ist es zweckmäßig die bereits erwähnte Linearität des Diffusschalls anzustreben, um

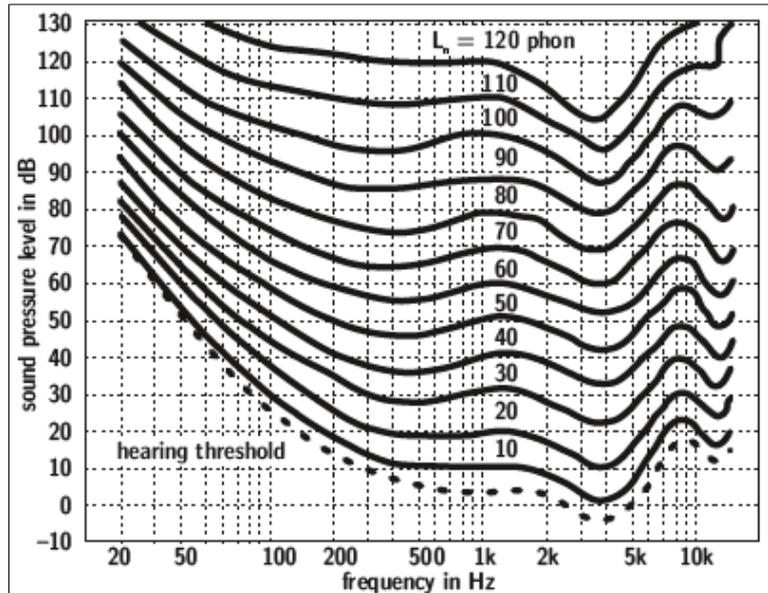


Abbildung 4: Kurven gleicher Lautheit (Quelle: Vorländer, 2008, p. 82)

größtmögliche Flexibilität zu erreichen. Reagiert also der Raum annähernd linear, kann das Beschallungssystem gut an die Bedürfnisse der Veranstaltung angepasst werden, ohne weitere ungewünschte Effekte zu erzeugen. Des Weiteren ist es stets vorteilhaft für die verantwortlichen Techniker*innen, wenn sich die Raumakustik zwischen leerer und voll besuchter Halle nicht wesentlich ändert.

Für den Geltungsbereich dieser Arbeit werden auf dieser Grundlage zur Einstufung der akustischen Qualität eines Raumes die folgenden Grenzwerte bzgl. des Bassverhältnisses definiert:

BR_G = bis 1,2

BR_B = 1,2 – 1,4

BR_M = ab 1,4

2.1.5. Speech Transmission Index (STI)

Für (fast) alle Veranstaltungsformen ist es notwendig eine ausreichende Sprachverständlichkeit (*speech intelligibility*) zu erzielen. Zu diesem Thema existieren zahlreiche Forschungen und Studien. In dieser Hinsicht besonders herausragend, sind die Forschungen von Houtgast und Steeneken aus den 70er und 80er Jahren, die durch ihre Arbeit die Grundlage für den heute angewandten Stand der Technik ermöglichten.

Der Sprachübertragungsindex (*Speech Transmission Index*) oder weithin bekannt als STI ist keine reine raumakustische Größe. Vielmehr bezieht er den gesamten Übertragungsweg zwischen Quelle und Empfänger (Sprecher/Lautsprecher, Raum und Zuhörer) mit ein. Mögliche Einflussgrößen für eine Störung des Übertragungswegs können anhaltende Geräuschpegel (Lüftungen, Straßenlärm, Zugverkehr, etc.), starker Nachhall, zu geringer Pegel der Schallquelle, oder auch psychoakustische Effekte wie Maskierungen bei zu lauten Schallanteilen sein, vgl. (Görtz, 2016, p. 2). Zur Bestimmung des STI wurde die menschliche Stimme (männlich und weiblich) signaltheoretisch analysiert und die spektrale Zusammensetzung und deren Modulationen bestimmt. So ergeben sich 7 wesentliche Oktavbänder zwischen 125Hz und 8kHz, die durch verschiedene Modulationsfrequenzen bis ca. 16Hz charakterisiert sind. Die Modulationen sind dabei von besonderem Interesse, tragen sie doch in der menschlichen Stimme den Großteil des Informationsgehalts, vgl. (Görtz, 2016, p. 5). Um ein Maß für die Sprachverständlichkeit zu erhalten, ist es also entscheidend, bestimmen zu können, wie gut die Modulationen im gewählten Übertragungsweg erhalten bleiben. Das Ergebnis einer solchen Messung bzw. Berechnung ergibt einen gut verständlichen und damit gut vergleichbaren Zahlenwert zwischen Null (völlig unverständlich) und Eins (perfekt verständlich), wobei in der Praxis Werte zwischen 0,35 (quasi verständlich) und 0,75 (sehr gut verständlich) üblich sind, vgl. (Görtz, 2016, p. 2).

Da es bei diesem Messverfahren ausdrücklich um die Qualität eines akustischen Gesamtsystems geht, also den kompletten Übertragungsweg, bestehend aus bspw. Mischpult, Lautsprecher, Raum und Zuhörer/Messmikrofon liefert STI per Definition keine Möglichkeit zur alleinigen Bewertung der Raumakustik. In einem späteren Abschnitt der Arbeit werden die verschiedenen Wirkkombinationen aus Raum und Lautsprecher festgelegt und für den Hörversuch genutzt (siehe 5.1). Erst an diesem Punkt ist mithilfe des sich ergebenden STI-Wertes eine Überprüfung der Sprachverständlichkeit der verschiedenen Kombinationen möglich.

2.1.6. Skalierung der Einflussgrößen, Entwicklung eines Bewertungssystems

Zusammenfassend wird ein Bewertungssystem entwickelt, anhand dessen in der späteren Versuchsvorbereitung die Räume nach ihrer Qualität beurteilt werden können. Für die im oberen Abschnitt ermittelten Werte werden Punkte vergeben. Dabei erhalten raumakustisch gute Werte 3 Punkte, befriedigende 2 Punkte und mangelhafte Werte 1 Punkt. Diese Punkte werden nach der festgelegten Gewichtung mit einem Faktor (absteigend von 5 bis 1) multipliziert. Aus der erzielbaren Maximal- und Minimalpunktzahl eines Raumes ergibt sich ein Wertebereich, nach dem die Akustik eines Raumes eingestuft werden kann. Folgende Übersicht verdeutlicht dies – die Farbgebung (Ampel) erleichtert später die Zuordnung:

<u>Qualität</u>	<u>Parameter</u>	<u>Wert</u>	<u>Pkte</u>	<u>Faktor</u>	<u>Prod.</u>	<u>Ges.</u>
GUT	T30 _G (63Hz-125Hz)	0,71 – 1,99s	3	5	15	<u>45</u>
	T30 _G (250Hz-2kHz)	0,80 – 1,30 s	3	4	12	
	EDT/T30 _G	1,0 ± 10%	3	3	9	
	C50 _G	3 bis 6 dB	3	2	6	
	BR _G	bis 1,2	3	1	3	
BEFRIEDIGEND	T30 _B (63Hz-125Hz)	1,99 – 3,27 s	2	5	10	<u>30</u>
	T30 _B (250Hz-2kHz)	1,30 – 1,80 s	2	4	8	
	EDT/T30 _B	1,0 ± 20%	2	3	6	
	C50 _B	0 bis 3 dB	2	2	4	
	BR _B	1,2 – 1,4	2	1	2	
MANGELHAFT	T30 _M (63Hz-125Hz)	3,27 – ∞ s	1	5	5	<u>15</u>
	T30 _M (250Hz-2kHz)	1,80s – ∞ s	1	4	4	
	EDT/T30 _M	1,0 ± 30%	1	3	3	
	C50 _M	-3 bis 0 dB	1	2	2	
	BR _M	ab 1,4	1	1	1	

Tabelle 1: Bewertungssystem für die akustische Qualität von Räumen

Da verschiedene Kombinationen der Werte innerhalb der Tabelle in der Realität denkbar sind und anzunehmen ist, dass nur selten ideale Bedingungen erreicht werden können, ist die Umwandlung der absoluten Punktzahlen in der Tabelle zu Punktbereichen notwendig. Mit einer maximal erreichbaren Punktzahl von 45 und einer minimalen von 15 ergibt sich ein Intervall von 30. Teilt man dieses auf die drei Qualitätsstufen auf, kann die raumakustische Qualität einer Veranstaltungsstätte kategorisiert werden.

Das bedeutet:

Raumakustisch GUT: 35 – 45 Punkte

Raumakustisch BEFRIEDIGEND: 25 – 35 Punkte

Raumakustisch MANGELHAFT: 15 – 25 Punkte

2.2. Entscheidende Merkmale von Beschallungsanlagen

Dieser Abschnitt stellt die für die Forschungsfrage relevanten Leistungsparameter von Lautsprechern vor. Das Ziel ist, wie in dem vorangehenden Kapitel eine Priorisierung der verschiedenen Parameter, um im weiteren Verlauf bestimmen zu können, wie und warum ein Lautsprecher als schlecht bzw. gut eingestuft werden kann. Die Forschung und damit auch die technischen Eigenschaften von Lautsprechern sind äußerst umfangreich, weshalb hier eine Auswahl der Leistungsparameter stattfindet. Ebenso werden die gewählten Parameter entsprechend der Reihenfolge ihrer Aufzählung priorisiert.

2.2.1. Frequenzabhängiges Abstrahlverhalten – die Richtwirkung

Lautsprecher besitzen eine stark frequenzabhängige Richtwirkung, die sich in den verschiedenen Frequenzbereichen stark unterscheidet. Einfach vorzustellen als Bündelung der Schallwellen und der damit einhergehenden Ausbreitung in der horizontalen Ebene. Dabei ermöglichen die Lautsprecher in den tiefen Frequenzen nur eine sehr geringe, bis unbedeutende Richtwirkung, die zu den hohen Frequenzen zunimmt. Der Grund ist das Verhältnis der Wellenlänge zur schallemittierenden Oberfläche (bspw. der Membran eines Konuslautsprechers). Bei tiefen Frequenzen ist die produzierte Wellenlänge deutlich größer als die schwingende Oberfläche, was in einer geringen Richtwirkung resultiert. Dieses Verhältnis nimmt mit steigender Frequenz ab, weshalb die Richtwirkung mit steigender Frequenz zunimmt, vgl. (Ahnert & Steffen, 1999, p. 86). Das Ziel der Lautsprecherhersteller (zu Beschallungszwecken) ist stets eine hohe Richtwirkung, da eine kontrollierte Schallausbreitung in horizontaler Ebene weniger, bzw. spätere Reflektionen

zur Folge hat, was unmittelbare Auswirkungen auf die Anregung des Raumes und damit des Nachhalls hat.

Als gängige Begriffe zur mathematischen oder messtechnischen Beschreibung der Richtwirkung gelten der *Directivity Factor* (Q) und dessen logarithmischer Wert, der *Directivity Index* (DI). Sie bezeichnen unter Berücksichtigung des Bündelungsfaktors⁴ eines Lautsprechers das winkelabhängige Verhältnis zwischen einem Schalldruck (gemessen im Winkel ϑ zur Nullachse) und dem Schalldruck auf der Nullachse, vgl. (Ahnert & Steffen, 1999, pp. 88-89).

Stellt man den Directivity Factor, sowie den Directivity Index als Funktion der Frequenz dar, ergibt sich bspw. ein Graph wie in Abbildung 5.

Außerdem werden in der Regel Visualisierungen genutzt, um eine gute Interpretation der Richtwirkung

zu ermöglichen. Polardiagramme (Abbildung 6) stellen das Richtverhalten eines Lautsprechers für bestimmte Frequenzbereiche (Terzen oder Oktaven) in einer Ebene dar, während die Iso-

barendiagramme in Abbildung 7 oder drei-

dimensionale Bilder (Abbildung 8) eine Darstellung des gesamten Frequenzbereichs ermöglichen, vgl. (Görtz & Laws, p. 9). In den Abbildungen ist die Frequenzabhängigkeit der Richtwirkung von Lautsprechern gut zu erkennen und der große Unterschied zwischen tiefen

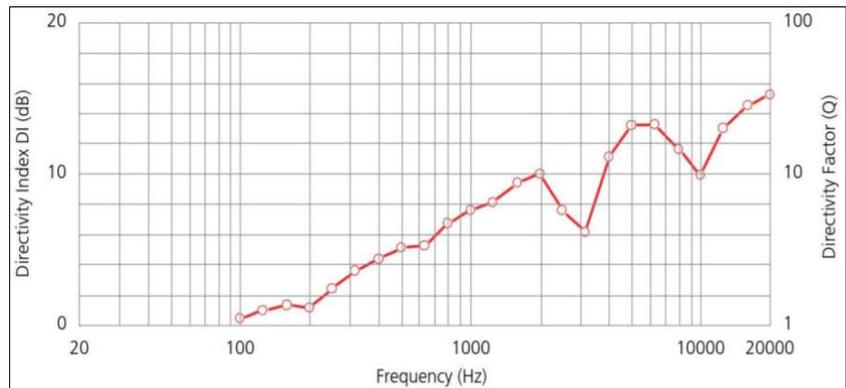


Abbildung 5: Directivity Index und Directivity Factor eines beispielhaften Lautsprechers als Funktion über der Frequenz (KLING & FREITAG GmbH, 2017, p. 18)

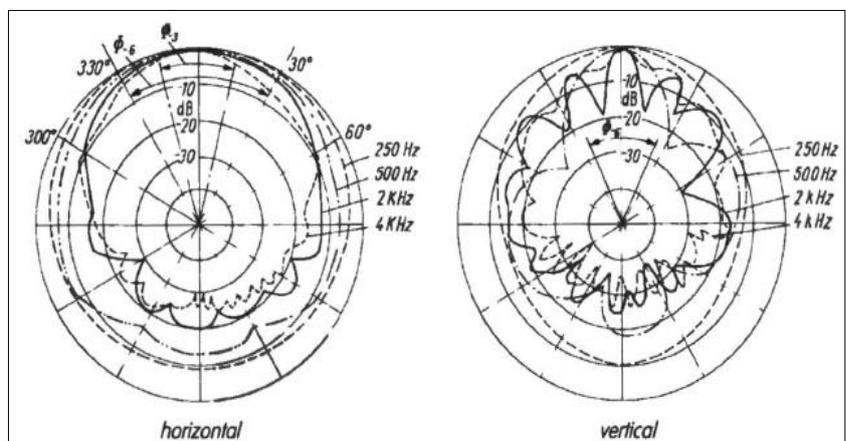


Abbildung 6: beispielhaftes Polardiagramm zur Darstellung des Abstrahlverhaltens eines Lautsprechers. (Ahnert & Steffen, 1999, p. 89)

⁴ Beschreibt das Verhältnis aus dem Schalldruck auf der Nullachse im Direktschallfeld und mit Abstand r zur Schallquelle und dem Schalldruck im Diffusschallfeld eines Raumes mit dem Hallradius r_H (Ahnert & Steffen, 1999, p. 85)

und hohen Frequenzen wird deutlich. In Anlehnung zur Forschungsfrage (Interaktion zwischen Lautsprecher und Raumakustik) wird die Richtwirkung in dieser Arbeit als das wichtigste Leistungsmerkmal von Lautsprechern behandelt, vgl. (Goertz & Makarski, 2008). Ein stark unkontrolliertes Abstrahlverhalten führt unweigerlich zu einer starken Anregung des Raumes über die umliegenden Begrenzungsflächen. Ist außerdem der umgebende Raum in seinem Reflektions- und Absorptionsverhalten stark nicht-linear (*non-diffuse*), so ist der erzeugte Diffusschall in seinem Frequenzgang ebenso stark nichtlinear und beeinflusst wegen Über- und Unterbetonungen im Frequenzspektrum das resultierende Klangbild.

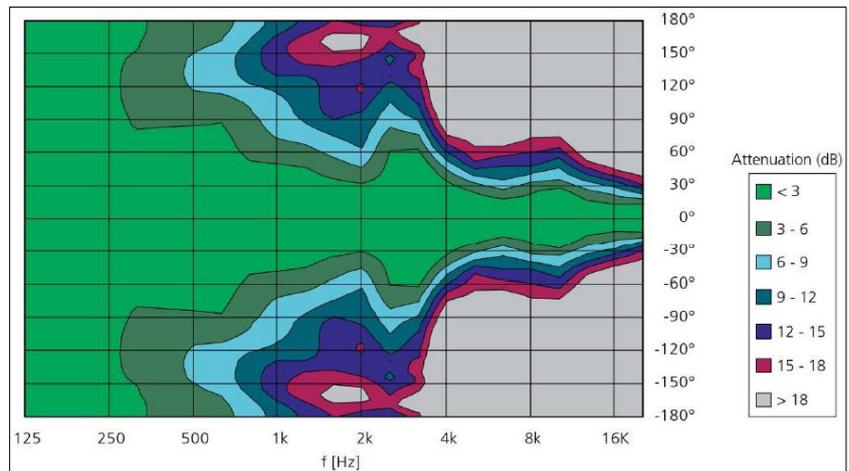


Abbildung 7: beispielhaftes Isobarendiagramm des horizontalen Abstrahlverhaltens eines Lautsprechers. (KLING & FREITAG GmbH, 2017, p. 19)

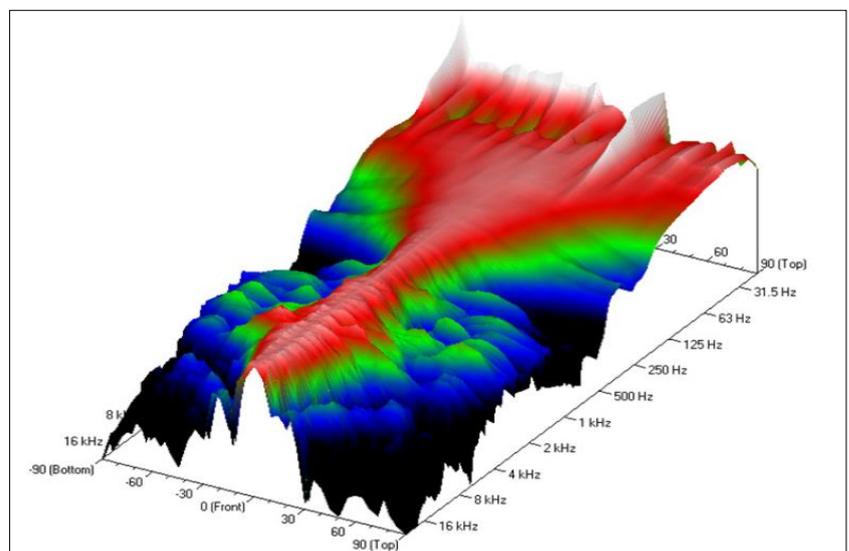


Abbildung 8: dreidimensionale Darstellung des Abstrahlverhaltens eines Lautsprechers. (AFMG (Ahnert Feistel Media Group), 2016, p. 40)

2.2.2. Komplexer Frequenzgang

Neben der Richtwirkung gilt der komplexe Frequenzgang (Bode-Diagramm), also die Darstellung der Amplitude, sowie des Phasenverlaufs über der Frequenz als wichtige technische Eigenschaft eines Lautsprechers, vgl. (Goertz & Makarski, 2008). Die Darstellungen sind in der Literatur omnipräsent und lassen gute Schlüsse zur Qualität zu.

Wird angenommen, dass ein Lautsprecher in verschiedenen akustischen Umgebungen gute Ergebnisse liefern soll, so ist nach Meinung des Autors ein möglichst konstanter

Amplitudenverlauf über das Spektrum erstrebenswert (Beschränkung auf den PA-Sektor). Der Phasenverlauf weist naturgemäß einen stark unregelmäßigen Verlauf auf, der zumindest für die weitverbreiteten Mehrwegsysteme im PA-Sektor nicht anders möglich ist, vgl. (Görtz & Laws, p. 3). Der in Abbildung 9 gemessene passive 2-Wege-Lautsprecher (Tief-/Mitteltöner und Hochtöner) weist über den Frequenzbereich 2 Phasendrehungen von 360 Grad auf. Gründe hierfür kann einerseits die Bauweise des Chassis sein. Ein Bassreflexgehäuse entspräche bspw. einem Hochpass vierter

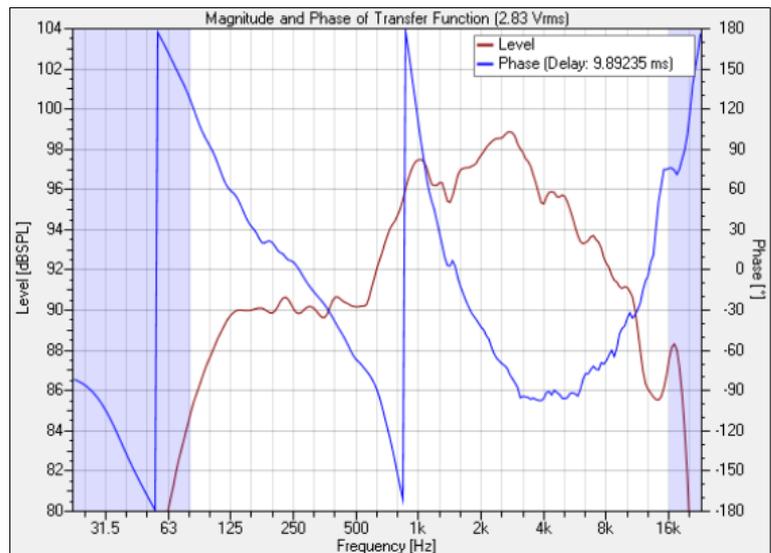


Abbildung 9: komplexer Frequenzgang eines Lautsprechers mit Darstellung der Amplitude (rot) und der Phase (blau). (AFMG (Ahnert Feistel Media Group), 2016, p. 58)

Ordnung, woraus die Phasendrehung im unteren Bereich resultieren würde. Der Hochtöner stellt für sich einen Hochpass zweiter Ordnung (180 Grad) dar und ergibt mit der technisch notwendigen Frequenzweiche zweiter Ordnung wieder eine Drehung um 360 Grad, vgl. (Görtz & Laws, p. 3). Durch die bauartbedingten oder technisch notwendigen Filter eines Lautsprechers ergeben sich also frequenzabhängige Laufzeitunterschiede, die in hohem Maße Einfluss auf den Klang eines Lautsprechers haben können. Daher ist ein weiterer wichtiger Parameter, der sich aus dem Bode-Diagramm ergibt, die Gruppenlaufzeit (Verzögerungen von Frequenzgruppen) innerhalb eines Lautsprechers. Mathematisch betrachtet entspricht sie der ersten Ableitung der Phase über der Frequenz, also der Steigung des Phasengraphen. Eine konstante Steigung des Phasengraphen ergäbe eine konstante Gruppenlaufzeit. Starke Änderungen der Steigung führen also zu starken Änderungen im Laufzeitverhalten, siehe Abbildung 10 („nacheilende/schleppende Bässe“), vgl. (Görtz & Laws, p. 4).

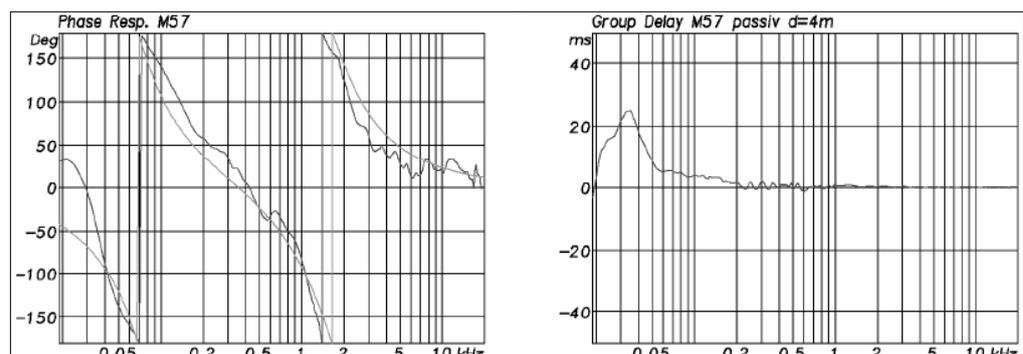


Abbildung 10: Phasenverlauf und zugehörige Gruppenlaufzeit eines Lautsprechers. (Görtz & Laws, p. 3)

Der Vollständigkeit halber muss erwähnt werden, dass der oben beschriebene Amplitudenverlauf im Freifeld (Abwesenheit von Reflektionen) gemessen wird. Eine Messung des Frequenzgangs des Lautsprechers im Diffusfeld ist durchführbar, hat aber für diese Arbeit wenig Aussagekraft, da sie stets vom akustischen Raum abhängig sein wird. Zudem wird der Diffusfeldfrequenzgang eines Lautsprechers in der Praxis mittels Filter verändert und an die räumlichen Begebenheiten angepasst. Dem Ziel, Lautsprecher verschiedener Qualitätsstufen auszuwählen, würde die Betrachtung des Diffusfeldfrequenzgangs keinen Mehrwert bieten.

Um die Qualitätsstufen in der Versuchsvorbereitung differenziert betrachten zu können, werden Amplituden- und Phasenverlauf als eigenständige Kriterien behandelt und durch Interpretation des Autors bewertet.

2.2.3. Kennschalldruckpegel und Wirkungsgrad

Der in der Literatur oft erwähnte Kennschalldruckpegel, der auch unter dem Begriff Empfindlichkeit (*sensitivity*) bekannt ist, liefert gut vergleichbare Werte verschiedener Lautsprecher. Der Amplitudenverlauf wird hier messtechnisch nach festen Kriterien erfasst. Der Messpunkt liegt dabei auf der Nullachse und in einem festen Abstand von 1 Meter zum Lautsprecher (und damit im Freifeld). Die anliegende Klemmenspannung erzeugt unter Berücksichtigung der nominellen Impedanz des Lautsprechers eine Leistung von 1 Watt, vgl. (Görtz & Laws, p. 1). Dieses normierte Messverfahren schafft demnach eine gute Vergleichbarkeit verschiedener Lautsprechertypen.

Der Kennschalldruckpegel lässt Aussagen darüber zu, wie effizient ein Lautsprecher eine vorgegebene elektrische Leistung in akustische Schallleistung umsetzen kann. Oft wird er deshalb mit dem Begriff Wirkungsgrad (*efficiency*) gleichgesetzt, was allerdings nicht korrekt ist. Der Kennschalldruckpegel wird stets in dB angegeben und der Wirkungsgrad wird per Definition in Prozent, bzw. als Zahlenwert zwischen 0 und 1 angegeben. Da der Wirkungsgrad von Lautsprechern bemerkenswert gering ausfällt, liefert die Angabe des Kennschalldruckpegels in dB in den Datenblättern eine einfachere und eindeutige Vergleichbarkeit. Ein höherer Wert bedeutet hier klar, dass der Lautsprecher effizienter arbeitet. Eine Steigerung des Kennschalldruckpegels um 3dB käme einer Verdoppelung des Wirkungsgrades und damit der Effizienz gleich, vgl. (Sengpiel, 2021). Bei Großveranstaltungen mit entsprechender Anzahl und

Dimensionierung der Lautsprecher wäre also bei geringerem Wirkungsgrad ein signifikant höherer Energieaufwand nötig, um die gleiche akustische Schallleistung eines effizienteren Systems zu erreichen. Auch wenn der Kennschalldruckpegel keine Aussage über die klanglichen Qualitäten eines Lautsprechers liefert, soll er doch als Qualitätsmerkmal zum Vergleich herangezogen werden, da eben auch die Frage formuliert wurde, ob teuer gleichzeitig besser bedeutet. Hier kann kalkulatorisch begründet werden, dass effizientere Systeme im wirtschaftlichen Sinne besser sind.

Die Beurteilung des Kennschalldruckpegels ist lediglich im direkten Vergleich möglich und findet in der Versuchsvorbereitung zwischen den gewählten Lautsprechern statt (siehe 0).

2.2.4. Priorisierung der Parameter, Entwicklung eines Bewertungssystems

Wie im vorangegangenen Kapitel zu den raumakustischen Merkmalen, wurden auch die beschriebenen Leistungsparameter in ihrer Priorität skaliert, um für den späteren Versuch Lautsprecher unterschiedlicher Qualitätsstufen auswählen zu können.

Anders als bei den raumakustischen Merkmalen, die ausschließlich eindeutige Zahlenwerte bieten, müssen ein Teil der elektroakustischen Parameter aus Funktionsgraphen oder ähnlichen visuellen Darstellungen interpretiert werden. Lediglich der Parameter Kennschalldruckpegel/Wirkungsgrad liefert klar vergleichbare Zahlenwerte. Das zu entwickelnde Punktesystem für die spätere Auswahl von Lautsprechern ist daher stark von der Interpretation des Autors abhängig.

Die 4 festgelegten Leistungsparameter und deren Gewichtung (in Reihenfolge: Richtwirkung, Amplitudenfrequenzgang, Phasenverlauf, Kennschalldruckpegel) werden absteigend faktorisiert (Faktor 4 bis Faktor 1). Gute Eigenschaften erhalten 3 Punkte, befriedigende 2 Punkte und mangelhafte Werte einen Punkt. Summiert man die sich ergebenden Produkte, erhält man eine Gesamtpunktzahl, die den Lautsprecher in seiner Qualität einstuft:

<u>Qualität</u>	<u>Parameter</u>	<u>Pkte</u>	<u>Faktor</u>	<u>Prod.</u>	<u>Ges.</u>
GUT	Richtwirkung	3	4	12	<u>30</u>
	Amplitudenverlauf	3	3	9	
	Phasenverlauf	3	2	6	
	Kenschalldruckpegel	3	1	3	
BEFRIEDIGEND	Richtwirkung	2	4	8	<u>20</u>
	Amplitudenverlauf	2	3	6	
	Phasenverlauf	2	2	4	
	Kenschalldruckpegel	2	1	2	
MANGELHAFT	Richtwirkung	1	4	4	<u>10</u>
	Amplitudenverlauf	1	3	3	
	Phasenverlauf	1	2	2	
	Kenschalldruckpegel	1	1	1	

Tabelle 2: Bewertungssystem der Qualitätsstufen von Lautsprechern

Ähnlich wie in Abschnitt 2.1.6 werden aus den absoluten Zahlenwerten der Tabelle oben wieder Punktebereiche definiert. Mit einer maximal erreichbaren Punktzahl von 30 und einer minimalen von 10 ergibt sich ein Intervall von 20. Aufgeteilt auf die drei Qualitätsstufen, kann die Qualität eines Lautsprechers anhand der folgenden Bereiche eingeordnet werden:

Lautsprecher GUT: 23 – 30 Punkte

Lautsprecher BEFRIEDIGEND: 16 – 23 Punkte

Lautsprecher MANGELHAFT: 10 – 16 Punkte

3. Erläuterung des Versuchsdesigns und Erklärungen zur Durchführung

Auf Basis der erarbeiteten theoretischen Grundlage, wird nun die weitere Vorgehensweise erläutert. Dieses Kapitel ist wegbereitend zur Beantwortung der beschriebenen Hypothese und widmet sich einerseits der Vorstellung der verwendeten Werkzeuge, insbesondere der Planungssoftware EASE. Über die Festlegung der unabhängigen und der abhängigen Variablen des Versuchsdesigns ergeben sich die von den Versuchsteilnehmern zu bewertenden Hörproben.

3.1. Simulation durch virtuelle Akustik

Die aktuell gängige Praxis bei der Planung von Beschallungsanlagen oder Veranstaltungsstätten ist die Simulation mit Methoden der virtuellen Akustik. Die Vorteile liegen dabei auf der Hand: die Simulationen ermöglichen realistische Einschätzungen der zu erwartenden Ergebnisse und lassen schon in der Planungsphase mögliche Schwierigkeiten erkennen. Mithilfe der Planungssoftware EASE 4.4 wird ein Veranstaltungsraum in drei akustischen Qualitätsstufen erstellt und mit den vorher diskutierten Lautsprechersystemen (ebenso 3 Qualitätsstufen) ausgestattet. Weiterhin werden 2 verschiedene Hörpositionen festgelegt, sowie 2 verschiedene Stimuli. Die Simulationen beruhen dabei auf den Modellannahmen der geometrischen Akustik, also der Annahme, dass sich Schallwellen in ihrem Absorptions- und Reflektionsverhalten wie Lichtstrahlen verhalten, vgl. (Vorländer, 2008, p. 164). Dabei wird das Schallfeld auf Energie, Laufzeit und Richtung reduziert, was insofern korrekt ist, solange die Dimension des Raumes groß gegenüber der Wellenlänge ist, vgl. (Vorländer, 2008, p. 175). Sind alle Parameter bzw. unabhängigen Variablen in der Simulation festgelegt, ermöglicht die Software die Erstellung von binauralen Impulsantworten. Die Impulsantwort beinhaltet dabei alle Auswirkungen des linearen und zeitinvarianten Übertragungssystems auf das Ursprungssignal als Funktion der Zeit, vgl. (Vorländer, 2008, p. 107). Mit einem Faltungsalgorithmus lässt sich diese Impulsantwort wiederum aus der Zeitdomäne mithilfe der Fast Fourier Transformation in die Frequenzdomäne übertragen und hörbar machen, vgl. (Vorländer, 2008, p. 137 ff.). Die so entstehenden Hörproben beinhalten also das Stimulus, das durch die diskutierten Lautsprecher in den Raum mit den diskutierten akustischen Eigenschaften an die festgelegte Hörposition übertragen wird.

3.2. Vorstellung der unabhängigen Variablen

In diesem Abschnitt werden die unabhängigen Variablen festgelegt und die sich daraus ergebenden Wirkkombinationen vorgestellt. Der in EASE skizzierte Raum bildet über die verschiedenen akustischen Qualitätsstufen eine dreistufige Variable, ebenso wie die drei verschiedenen Lautsprechersysteme. Es werden außerdem die zwei erwähnten Hörpositionen als zweistufige Variable vorgestellt und es wird begründet welche zwei Stimuli als weitere zweistufige Variable geeignet sind. Die Ergebnisse dieses Abschnittes liefern die den Versuchsteilnehmern zur Verfügung gestellten Hörproben. Skizzen und Übersichten zu den nun folgenden Abschnitten befinden sich in Anhang 1.

3.2.1. Festlegung der Hörpositionen

Zunächst werden die zwei Hörpositionen und damit eine zweistufige unabhängige Variable festgelegt. Die erste befindet sich im sogenannten „Sweet Spot“ also an der Spitze eines gleichseitigen Dreiecks, dessen andere Eckpunkte von den zwei PA-Seiten gebildet werden (Tops, Links und Rechts). Üblicherweise bildet dieser Ort die Position für das Mischpult und eine ideale Hörposition für den verantwortlichen Techniker und befindet sich in diesem Versuchsmodell in einem Abstand von 14,6m zur Bühnenkante. Die zweite Position befindet sich auf gleicher Achse im hinteren Teil der Halle und damit im Diffusfeld. Mit einem Abstand von 26m zur Bühnenkante liegt sie damit auf der untersten Ebene der großen Stehtribüne in 4,3m Höhe. Das Verlassen der Achse würde in einer binauralen Impulsantwort des Raumes den Höreindruck auf eine Seite verlagern, kann so evtl. zu Verwirrungen führen, und ist für die Bewertung durch die Teilnehmer nicht zielführend. Es soll lediglich der Höreindruck an den zwei Positionen und nicht der binaurale Eindruck bewertet werden. Eine Skizze der Positionen findet sich in Abb. 5, Anhang 1.

3.2.2. Die virtuell-akustischen Räume

Wie beschrieben, orientiert sich diese Arbeit an einer realen, mittelgroßen Veranstaltungsstätte in Berlin mit einfacher Geometrie (Huxleys neue Welt). Die frei zur Verfügung stehenden VenueSpecs der Halle liefern über den Grundriss⁵ die erforderlichen Maße, um den Raum in EASE nachbauen zu können. Diese virtuelle Halle⁶ dient stets als Grundlage für die drei erforderlichen Qualitätsstufen. Um die akustischen Eigenschaften zu verändern, wird lediglich die Beschaffenheit der Begrenzungsflächen (Oberflächenmaterialien, Absorber, etc.) angepasst und die Architektur in seinem Ursprungszustand belassen. Es wird weiterhin festgelegt, dass stets von einer leeren Halle ausgegangen wird, der Publikumseffekt (Wegfall einer der größten Reflektionsflächen – dem Fußboden) also unbeachtet bleibt. Hintergrund dieser Festlegung ist der Wunsch vieler Tontechniker, dass sich die Akustik zwischen leerer und voller Halle nur gering ändern sollte, wie es in Theatern bspw. oft der Fall ist. Die folgende Auswahl der drei akustisch verschiedenen Qualitätsstufen, liefert eine dreistufige unabhängige Variable.

Die raumakustischen Werte werden über das AURA Modul in EASE berechnet. Als Anregung des Raumes wird eine virtuelle, idealisierte, kugelförmig abstrahlende Schallquelle⁷ eingesetzt. Die Software ist auf 21 Messpunkte (100Hz – 10kHz) im Terzbandabstand begrenzt, weshalb die von Adelman-Larsen empfohlenen Frequenzbereiche aus 0 verändert werden müssen. Zur Berechnung der Nachhallzeit T30 für die zwei vorgesehenen Frequenzbereiche ist der Bereich 100Hz – 160Hz repräsentativ für den Bass-Bereich. Die Nachhallzeit für den höherfrequenten Anteil wird über den Bereich 200Hz bis 2,5kHz gebildet. Die Berechnung erfolgt als Mittelwertbildung.

Die Bildung des Verhältnisses aus EDT und T30 ist in EASE nicht möglich, da die Berechnung von T30 einer anderen Definition folgt. Die Berechnungen zu T10, T20, T30 exkludieren die ersten 5dB des Pegelabfalls, was bei der Berechnung der EDT nicht geschieht vgl. (AFMG Ahnert Feistel Media Group, p. 320). Würde man also die Werte von EDT und T30 ins Verhältnis setzen, erhielte man irreführende Ergebnisse. Die Überprüfung der Linearität des Nachhallausklangs wird daher

⁵ Siehe Abb. 1, Anhang 1

⁶ Perspektivische Ansichten, siehe Abb. 2, Abb. 3 und Abb. 4 in Anhang 1

⁷ Siehe Abb. 6, Anhang 1

über das Verhältnis aus T10 und T30 gebildet. Dabei wird jeweils für T10 und T30 der Mittelwert über den nach Adelman-Larsen entscheidenden Bereich, hier 100Hz bis 2,5kHz, gebildet.

Die Überprüfung der Klarheit C_{50} erfolgt an den festgelegten Hörpositionen und ist ebenfalls der Mittelwert aus den Messpunkten 100Hz-2,5kHz.

Zur Ermittlung des Bassverhältnisses wird die von Beranek definierte Formel genutzt:

$$\frac{T30 (125Hz \text{ bis } 250Hz)}{T30 (500Hz \text{ bis } 1000Hz)}$$

Zur Berechnung der Datensätze werden in der Software bestimmte Parameter festgelegt. Die Berechnung erfolgt für alle Hörerflächen und speziell für die Hörpositionen SweetSpot und Diffusfeld. Ebenso simuliert die Software einen Grundgeräuschpegel von über das Spektrum konstanten 30dB. Die Auflösung wird über die Anzahl der von der virtuellen Schallquelle ausgesendeten Schallstrahlen (*Particles*) bestimmt und mit 2803000 Particles (High Resolution) festgelegt. Die Länge des Echogramms soll nach Empfehlung von AFMG etwa zwei Drittel der zu erwartenden Nachhallzeit betragen und wird jeweils für die verschiedenen Simulationen angepasst. Die in EASE zur Verfügung stehenden Oberflächenmaterialien liefern keine Streuungsdaten (Scattering), da die Streuung wesentlich von Position und Ausrichtung des Materials abhängt. Es wird also zur Berechnung ein Streuungswert bestimmt, der prozentual Streuungseffekte zum Reflexionsverhalten hinzufügt. Nach Empfehlung von AFMG wird für Räume mit vorrangig ebenen und glatten Oberflächen ein Streuungswert von über das Spektrum konstanten 10% verwendet. Nach Einbringen verschiedener Absorbermaterialien soll jedoch eher die „S-Curve“ angewandt werden. Diese Einstellung liefert für Frequenzen unterhalb 1kHz einen Streuungsanteil von 10%, für Frequenzen oberhalb der Trennfrequenz eine Streuung von 40%. Dieses Streuungsverhalten entspricht laut AFMG am ehesten dem realen Verhalten typischer Raumgeometrien, vgl. (AFMG Ahnert Feistel Media Group, p. 328).

Die sich ergebenden Werte werden dem im Abschnitt 2.1.6 entwickelten Bewertungssystem zugeführt und ermöglichen so die Einordnung zu den drei Qualitätsstufen. Die zugrundeliegenden Daten können dem Anhang 2-4 entnommen werden.

Raumakustik 1 – mangelhaft

Eine Begehung der als Referenz genutzten Halle ergab, dass sowohl die gesamte Hallendecke als auch die Wände der großen Stehtribüne mit akustisch wirksamen Materialien versehen sind, was auch hier berücksichtigt wird. Eine Übersicht der verwendeten Oberflächenmaterialien findet sich in Tab. 1, Anhang 2. Das AURA Modul liefert mit konstanter 10% Streuung⁸:

$$T30 (100\text{Hz}-160\text{Hz}) = 4,29 \text{ s}$$

$$T30 (200\text{Hz}-2,5\text{kHz}) = 3,41 \text{ s}$$

$$T10/T30 (100\text{Hz}-2,5\text{kHz}) = \frac{T10}{T30} = \frac{2,78\text{s}}{3,59\text{s}} = 0,77$$

$$C50_{\text{SweetSpot}} = - 0,42 \text{ dB}$$

$$C50_{\text{Diffusfeld}} = - 1,47 \text{ dB}$$

$$BR = \frac{4,11\text{s}}{3,43\text{s}} = 1,20$$

<u>Parameter</u>	<u>Wert</u>	<u>Pkte</u>	<u>Faktor</u>	<u>Prod.</u>	<u>Ges.</u>
T30 (100Hz-160Hz)	4,29s	1	5	5	<u>16</u>
T30 (200Hz-2,5kHz)	3,41s	1	4	4	
T10/T30 (100Hz-2,5kHz)	0,77	1	3	3	
C50 (SweetSpot/Diffus)	- 0,42 dB	1	2	2	
	- 1,47 dB				
BR	1,20	2	1	2	

Tabelle 3: Bewertung und Punkteermittlung der Raumakustik 1 - mangelhaft

Die ermittelten Werte zeigen deutlich, dass die Akustik in diesem Zustand als außerordentlich schlecht einzustufen ist. Es ergibt sich ein befriedigendes Bassverhältnis jedoch ist die Nachhallzeit T30 wesentlich zu lang und dabei im Ausklang stark nichtlinear.

⁸ Siehe Abb. 7, Abb. 8, Abb. 9 und Abb. 10 in Anhang 2

Raumakustik 2 – befriedigend

Nach Einbringen von verschiedenen absorbierenden Materialien (Übersicht siehe Tab. 2, Anhang 3), kann nicht mehr von vorrangig ebenen und glatten Oberflächen ausgegangen werden, daher wird zur Berechnung die oben beschriebene „S-Curve“ angewandt. Die Daten aus AURA ergeben⁹:

$$T_{30} (100\text{Hz}-160\text{Hz}) = 2,49 \text{ s}$$

$$T_{30} (200\text{Hz}-2,5\text{kHz}) = 1,57 \text{ s}$$

$$T_{10}/T_{30} (100\text{Hz}-2,5\text{kHz}) = \frac{T_{10}}{T_{30}} = \frac{1,49\text{s}}{1,75\text{s}} = 0,85$$

$$C_{50\text{SweetSpot}} = + 1,36 \text{ dB}$$

$$C_{50\text{Diffusfeld}} = + 1,49 \text{ dB}$$

$$BR = \frac{2,25\text{s}}{1,57\text{s}} = 1,43$$

<u>Parameter</u>	<u>Wert</u>	<u>Pkte</u>	<u>Faktor</u>	<u>Prod.</u>	<u>Ges.</u>
T30 (100Hz-160Hz)	2,49s	2	5	10	<u>29</u>
T30 (200Hz-2,5kHz)	1,57s	2	4	8	
T10/T30 (100Hz-2,5kHz)	0,85	2	3	6	
C50 (SweetSpot/Diffus)	+ 1,36 dB	2	2	4	
	+ 1,49 dB				
BR	1,43	1	1	1	

Tabelle 4: Bewertung und Punkteermittlung der Raumakustik 2 - befriedigend

Außer eines mangelhaften Wertes für das Bassverhältnis ergeben sich ansonsten durchweg befriedigende Werte.

⁹ Siehe Abb. 11, Abb. 12, Abb. 13 und Abb. 14 in Anhang 3

Raumakustik 3 – gut

Um die Akustik noch weiter zu verbessern, wäre in der Realität ein gehöriger Aufwand nötig. Im Modell sind nun nahezu alle Oberflächen mit absorbierenden Materialien versehen, siehe Tab. 3, Anhang 4. Das AURA Modul liefert unter Anwendung der „S-Curve“¹⁰:

$$T_{30} (100\text{Hz}-160\text{Hz}) = 1,44 \text{ s}$$

$$T_{30} (200\text{Hz}-2,5\text{kHz}) = 0,94 \text{ s}$$

$$T_{10}/T_{30} (100\text{Hz}-2,5\text{kHz}) = \frac{0,89\text{s}}{1,04\text{s}} = 0,86$$

$$C_{50\text{SweetSpot}} = + 4,72 \text{ dB}$$

$$C_{50\text{Diffusfeld}} = + 5,96 \text{ dB}$$

$$BR = \frac{1,16\text{s}}{0,95\text{s}} = 1,22$$

<u>Parameter</u>	<u>Wert</u>	<u>Pkte</u>	<u>Faktor</u>	<u>Prod.</u>	<u>Ges.</u>
T30 (100Hz-160Hz)	1,44s	3	5	15	<u>41</u>
T30 (200Hz-2,5kHz)	0,94s	3	4	12	
T10/T30 (100Hz-2,5kHz)	0,86	2	3	6	
C50 (SweetSpot/Diffus)	+ 4,72 dB	3	2	6	
	+ 5,96 dB				
BR	1,22	2	1	2	

Tabelle 5: Bewertung und Punkteermittlung der Raumakustik 3 - gut

Es ergibt sich eine den Werten entsprechend gute Akustik, auch wenn die Linearität des Nachhalls nur befriedigend ist. Die tieffrequenten Anteile lassen sich aufgrund der großen Wellenlängen nur schwer absorbieren, was auch den Wert für das Bassverhältnis erklärt.

¹⁰ Siehe Abb. 15, Abb. 16, Abb. 17 und Abb. 18 in Anhang 4

3.2.3. Die Wahl der Lautsprecher

Zunächst muss geklärt sein, dass die Beschallung der Halle nicht von einem einzelnen Lautsprecher geleistet werden kann. Nötig ist hier die Installation eines Beschallungssystems, bestehend aus mehreren Einzelkomponenten. Eine angemessene Beschallung besteht nach Meinung des Autors aus einem Line-Array aus je 8 Elementen pro Seite, sowie der gleichen Anzahl an Subbass-Lautsprechern. Zur Auswahl und Qualitätsbeurteilung des Lautsprechersystems werden die messtechnischen elektroakustischen Werte eines einzelnen Elements (einzelner Lautsprecher) genutzt. Um gute Vergleichbarkeit zu erzielen, wird entschieden, dass die verschiedenen Lautsprecher mit Komponenten gleicher Baugrößen bestückt sind (Tief- und Hochtontreiber).

Wie schon erwähnt, ist die qualitative Beschreibung eines Lautsprechers mit klaren Zahlenwerten nur bedingt möglich. Vielmehr müssen in diesem Abschnitt Messdaten und Graphen bewertet werden. Die Werte liefert dabei die Software EASE über die GLL-Daten¹¹, die von den Herstellern der Lautsprecher zur Verfügung gestellt werden. Zur Berechnung der Daten müssen außerdem bestimmte Parameter festgelegt werden, die für alle Lautsprecher gelten müssen. Abb. 19 in Anhang 5 zeigt die eingestellten Werte. Die folgende Auswahl der drei verschiedenen Qualitätsstufen, liefert eine weitere dreistufige unabhängige Variable.

¹¹ GLL: Generic Loudspeaker Library

Lautsprecher 1 – mangelhaft

Die Wahl fällt auf einen Lautsprecher des Herstellers dbTechnologies™ mit der Bezeichnung „DVA T8“.

Bei der Beurteilung der Richtwirkung (siehe Abbildung 11), fällt eine stark unkontrollierte Schallausbreitung auf, die besonders in den Frequenzbereichen 250Hz-315Hz, 500Hz-1000Hz und im Bereich 2kHz für große Unregelmäßigkeiten sorgt. Aus bekannten Gründen ist die Richtwirkung im tieffrequenten Bereich sehr gering, was auch auf diesen Lautsprecher zutrifft. Ein Blick auf die Polardiagramme (siehe Anhang 5) zeigt weiterhin eine bis 500Hz nur sehr geringe Richtwirkung und eine rückwärtige Schallausbreitung von relativ hohem Pegel. Insgesamt kann die Richtwirkung als mangelhaft bewertet werden. Weitere Ansichten wie Directivity Index, sowie Polardiagramme finden sich in Abb. 20 bis Abb. 24 in Anhang 5.

Die Betrachtung des Bode-Diagramms (Abbildung 12) zeigt in den oben genannten Frequenzbereichen weitere Unregelmäßigkeiten. Eine Überbetonung des Bereichs um 80Hz, die bekannte Einschnürung um 250Hz und einer daraus resultierenden schmalbandigen Absenkung im Spektrum, sowie der markante Höhenabfall bei ca. 13 kHz dürften in der Praxis das Klangbild beeinflussen, zumal sich diese Merkmale im LineArray aus mehreren Lautsprechern noch verstärken könnten. Der Amplitudenfrequenzgang muss daher mit mangelhaft bewertet werden. Der Phasenverlauf lässt mit 5 Phasendrehungen im Spektrum, sowie einigen starken Änderungen der Steigung des Graphen (stets in den oben genannten Frequenzbereichen) auf starke Laufzeitverzögerungen in den Frequenzbereichen schließen und ist daher ebenso als mangelhaft zu bewerten.

Um den Kennschalldruckpegel zu bewerten, sind weitere Quellen wie Testberichte oder Datenblätter nötig. Dort findet sich ein gemittelter Wert für die Sensitivity von 97dB, vgl. (Goertz, 2014, p. 4), der umgerechnet einem Wirkungsgrad von knapp 3,2% entspricht und als befriedigend zu bewerten ist.

Überträgt man die Erkenntnisse in die bereits bewährte Bewertungstabelle aus Abschnitt 2.2.4 so ergibt sich ein Lautsprecher, der im weiteren Versuch als mangelhaftes Beispiel dienen soll (siehe Tabelle 6).

<u>Parameter</u>	<u>Bewertung</u>	<u>Pkte</u>	<u>Faktor</u>	<u>Prod.</u>	<u>Ges.</u>
Richtwirkung	mangelhaft	1	4	4	<u>11</u>
Amplitudenverlauf	mangelhaft	1	3	3	
Phasenverlauf	mangelhaft	1	2	2	
Kennschalldruckpegel	befriedigend	2	1	2	

Tabelle 6: Bewertung und Punkteermittlung von Lautsprecher 1 - mangelhaft

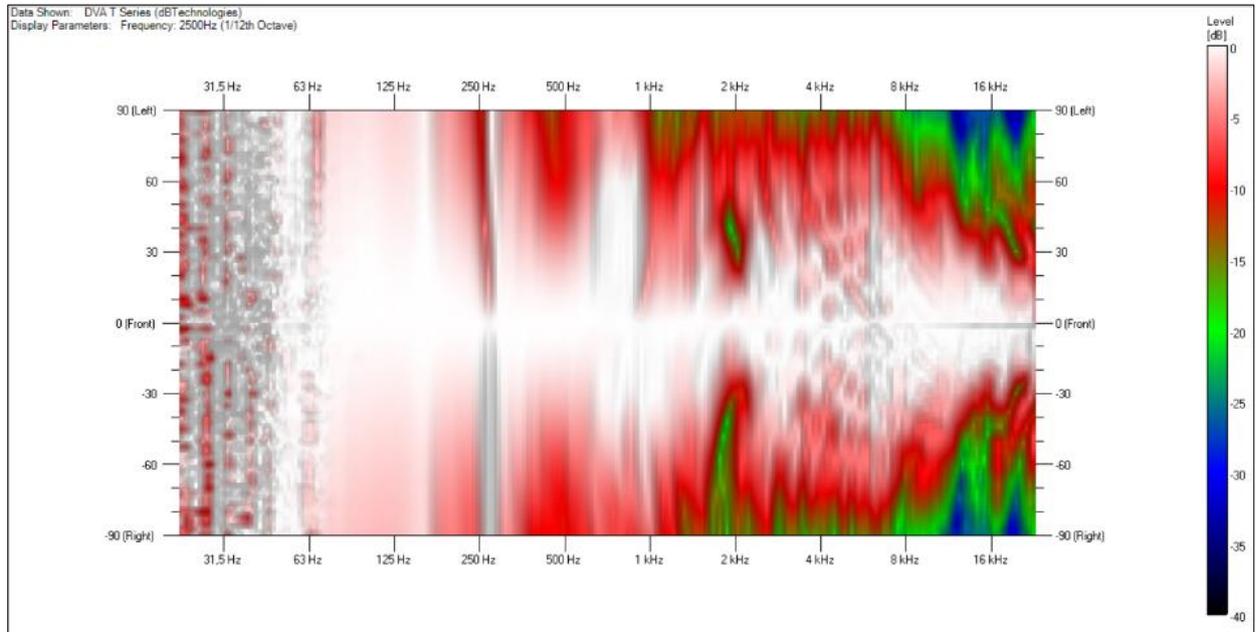


Abbildung 11: Darstellung der Schallausbreitung in horizontaler Ebene des Lautsprechers dbTechnologies DVA T8. (Quelle: Software EASE)

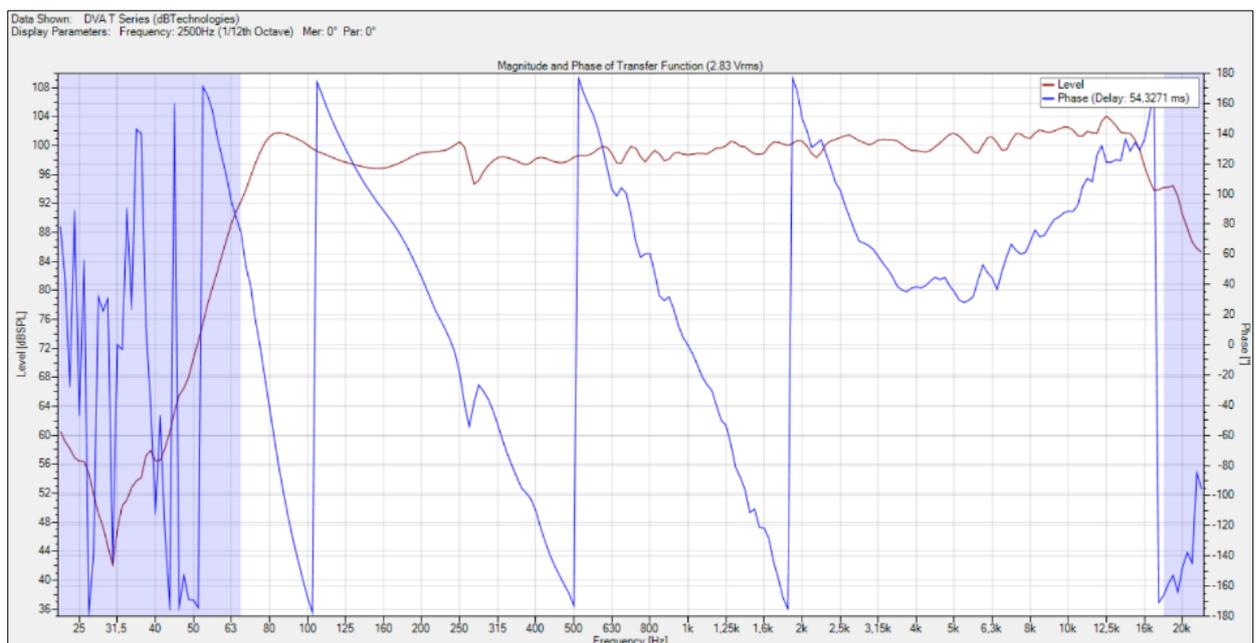


Abbildung 12: komplexer Frequenzgang des Lautsprechers DVA T8. (Quelle: Software EASE)

Lautsprecher 2 – befriedigend

Die Wahl für den Lautsprecher des mittleren Segments fällt auf einen Lautsprecher des Herstellers Seeburg mit der Bezeichnung Galeo C.

Die Richtwirkung (Abbildung 13) des Lautsprechers verläuft bis auf einen starken Einbruch zwischen 630 und 800 Hz ohne nennenswerte Auffälligkeiten, jedoch fällt eine im Vergleich geringe Richtwirkung bei 80 Hz ins Auge. Der Blick auf die Polardiagramme (Abb. 30, Abb. 31, Abb. 32 in Anhang 6) zeigt ein Abstrahlverhalten, welches man bei den dargestellten Werten erwarten würde. Vergleicht man die Werte mit dem vorangehenden Lautsprecher so sind deutliche Verbesserungen zu erkennen und lassen eine befriedigende Bewertung zu. Weitere Ansichten wie bspw. der Directivity Index, siehe Abb. 28 und Abb. 29 in Anhang 6.

Der Amplitudenverlauf (Abbildung 14) des Lautsprechers ist außer einer leichten breitbandigen Überbetonung des Bereichs 6,3 – 12 kHz nahezu linear. Negativ fällt auf, dass der Lautsprecher nur Frequenzen bis 80Hz im tieffrequenten Bereich wiedergeben kann, was ihn als FullRange-Lautsprecher eher ungeeignet macht. So kann trotz der nahezu perfekten Linearität nur eine befriedigende Bewertung ausgesprochen werden. Der Phasenverlauf zeigt im tieffrequenten Bereich starke Schwankungen, sowie im sensiblen Mittenbereich (hörbarer Bereich) mittelstarke Schwankungen der Steigung, insbesondere im identifizierten Bereich 630-800Hz. Die Bauweise des Lautsprechers und die Filteranordnung sorgt dafür, dass der Phasenverlauf mit nur drei Phasendrehungen im Spektrum auskommt. Insgesamt wird für den Phasenverlauf eine befriedigende Bewertung ausgesprochen.

Das Datenblatt des Lautsprechers liefert eine gemittelte Sensitivity von 104dB und damit einen umgerechneten Wirkungsgrad von beachtlichen 15,8%, welcher als gut eingestuft wird.

Die Eintragung der erhaltenen Werte liefert einen Lautsprecher, der im oberen Mittelfeld eine befriedigende Punktzahl erreicht.

<u>Parameter</u>	<u>Bewertung</u>	<u>Pkte</u>	<u>Faktor</u>	<u>Prod.</u>	<u>Ges.</u>
Richtwirkung	befriedigend	2	4	8	<u>21</u>
Amplitudenverlauf	befriedigend	2	3	6	
Phasenverlauf	befriedigend	2	2	4	
Kennschalldruckpegel	gut	3	1	3	

Tabelle 7: Bewertung und Punkteermittlung von Lautsprecher 2 – befriedigend

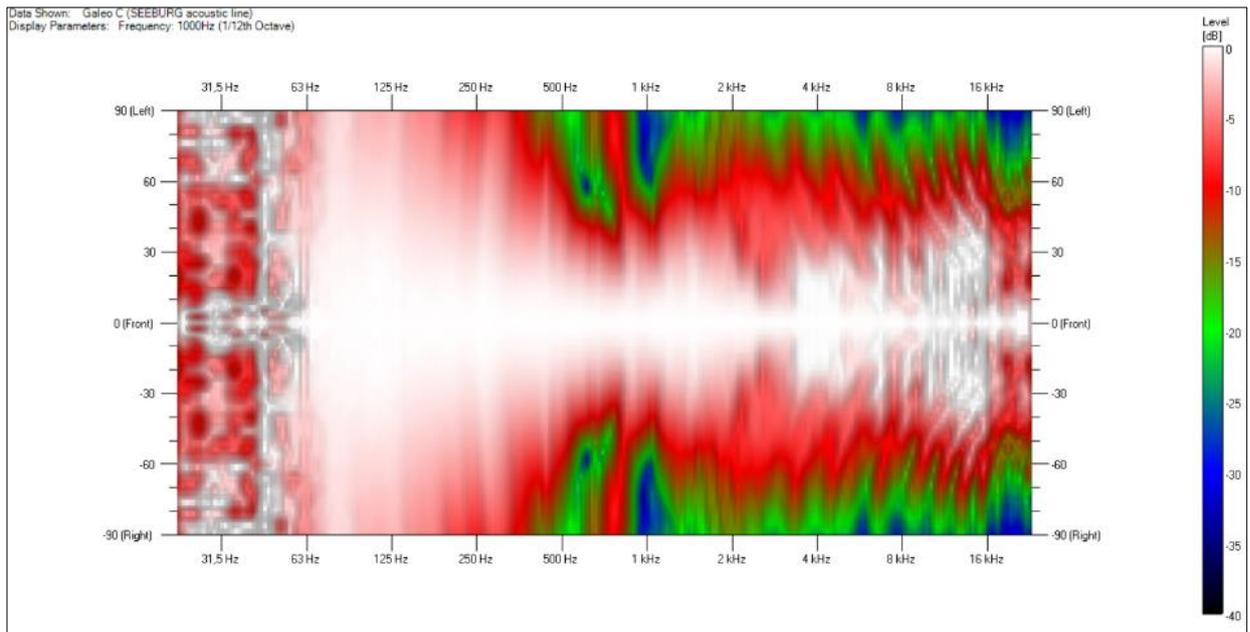


Abbildung 13: horizontale Schallausbreitung des Lautsprechers Seeburg Galeo C (Quelle: Software EASE)

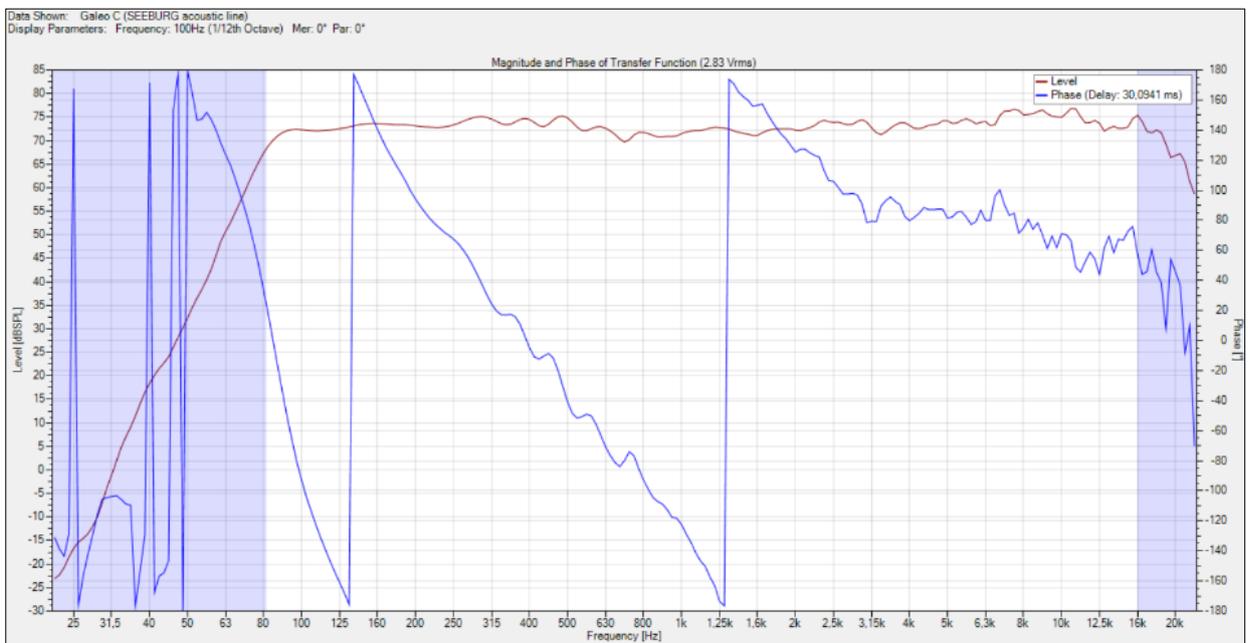


Abbildung 14: Bode-Diagramm des Lautsprechers Seeburg Galeo C (Quelle: Software EASE)

Lautsprecher 3 – gut

Die Wahl fällt hier auf einen Lautsprecher des Herstellers d&b audiotechnik mit der Bezeichnung XSL8. Die Besonderheit dieses Lautsprechers ist eine sehr hohe Richtwirkung, selbst in den tiefen Frequenzen. Laut Hersteller wird der nominelle Abstrahlwinkel von 80 Grad über das gesamte wiedergegebene Spektrum erreicht. Der Hersteller erreicht dies über zwei weitere seitlich angebrachte Treiber, die eine frequenzabhängige Auslöschung bestimmter Schallanteile ermöglichen, was eine nierenförmige Schallausbreitung und damit eine stärkere rückwärtige Bedämpfung erzeugen soll.

Gut erkennbar sind die im Vergleich durchweg hohen Werte des Directivity Index bereits ab 63Hz (Abb. 36, Anhang 7) und der tatsächlich annähernd homogene Verlauf des horizontalen Abstrahlverhaltens (Abbildung 15). Vergleicht man die Polardiagramme (Abb. 38, Abb. 39, Abb. 40 in Anhang 7) mit denen der vorangegangenen Lautsprecher, so ist erneut eine starke Verbesserung bzgl. der Richtwirkung zu erkennen, welche damit als gut bewertet wird. Weitere Ansichten finden sich in Anhang 7.

Der Amplitudenverlauf (Abbildung 16) ist bei diesem Lautsprecher nicht linear und gleicht mit den relativ starken Anhebungen im Bassbereich und im hochfrequenten Bereich der heute selten gewordenen „Loudness“-Schaltung an HiFi-Verstärkern. Der Frequenzgang ist sicherlich vom Hersteller so beabsichtigt, kann aber aufgrund der Nichtlinearität und im Vergleich mit den vorangegangenen Lautsprechern nur mit befriedigend gewertet werden. Der Phasenverlauf weist insgesamt gleich 5 Phasendrehungen im Spektrum auf, was bei der großen Anzahl verschiedener Treiber innerhalb des Chassis nicht verwundert. Allerdings liegt ein deutlicher Unterschied zu den anderen Lautsprechern im sensiblen Mittenbereich vor. Die Steigung des Phasenverlauf weist lediglich bei ca. 290Hz und bei ca. 1kHz eine kleine Unregelmäßigkeit auf und ist sonst weitestgehend konstant, was für gute Werte bzgl. der Gruppenlaufzeiten sorgen dürfte. Insgesamt kann also eine gute Bewertung ausgesprochen werden.

Das Datenblatt des Lautsprechers liefert keine Werte für den Kennschalldruckpegel, daher wird er durchschnittlich gewertet.

Insgesamt ergibt sich ein Lautsprecher mit gemischten Werten (siehe Tabelle 8), der dadurch zwar nicht die maximale Punktzahl erreicht, jedoch aufgrund seiner herausragenden Richtwirkung im weiteren Versuch als qualitativ bester Lautsprecher genutzt werden kann.

<u>Parameter</u>	<u>Bewertung</u>	<u>Pkte</u>	<u>Faktor</u>	<u>Prod.</u>	<u>Ges.</u>
Richtwirkung	gut	3	4	12	<u>26</u>
Amplitudenverlauf	befriedigend	2	3	6	
Phasenverlauf	gut	3	2	6	
Kennschalldruckpegel	befriedigend	2	1	2	

Tabelle 8: Bewertung und Punkteermittlung von Lautsprecher 3 – gut

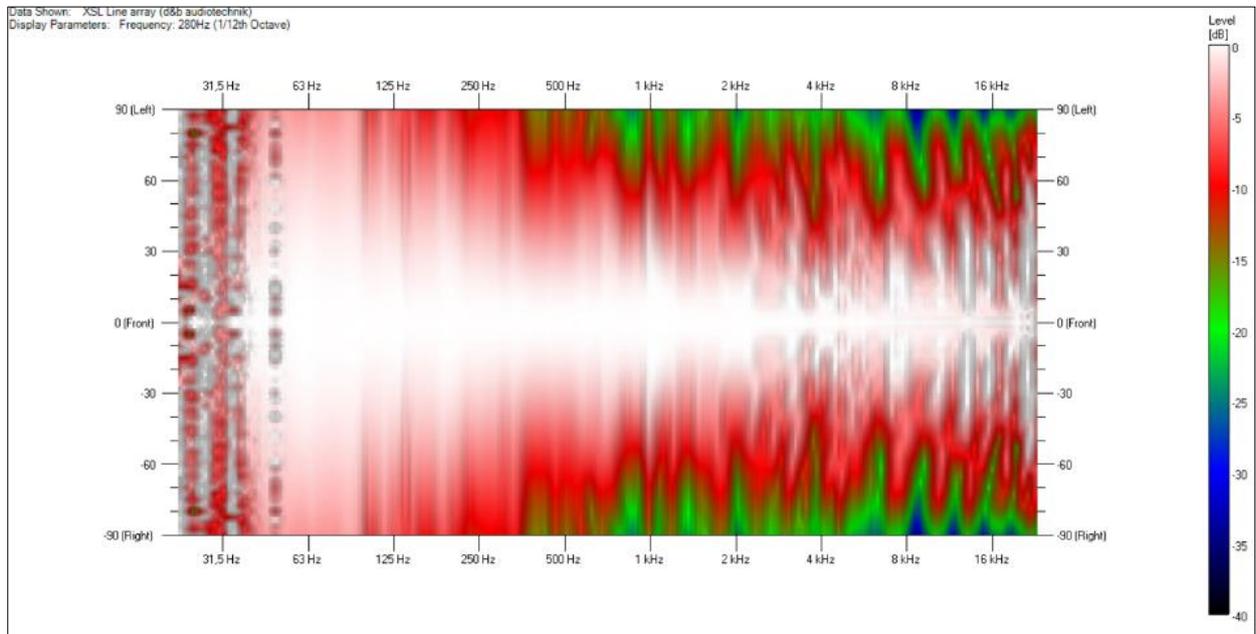


Abbildung 15: horizontale Schallausbreitung des Lautsprechers d&b audiotechnik XSL8 (Quelle: Software EASE)

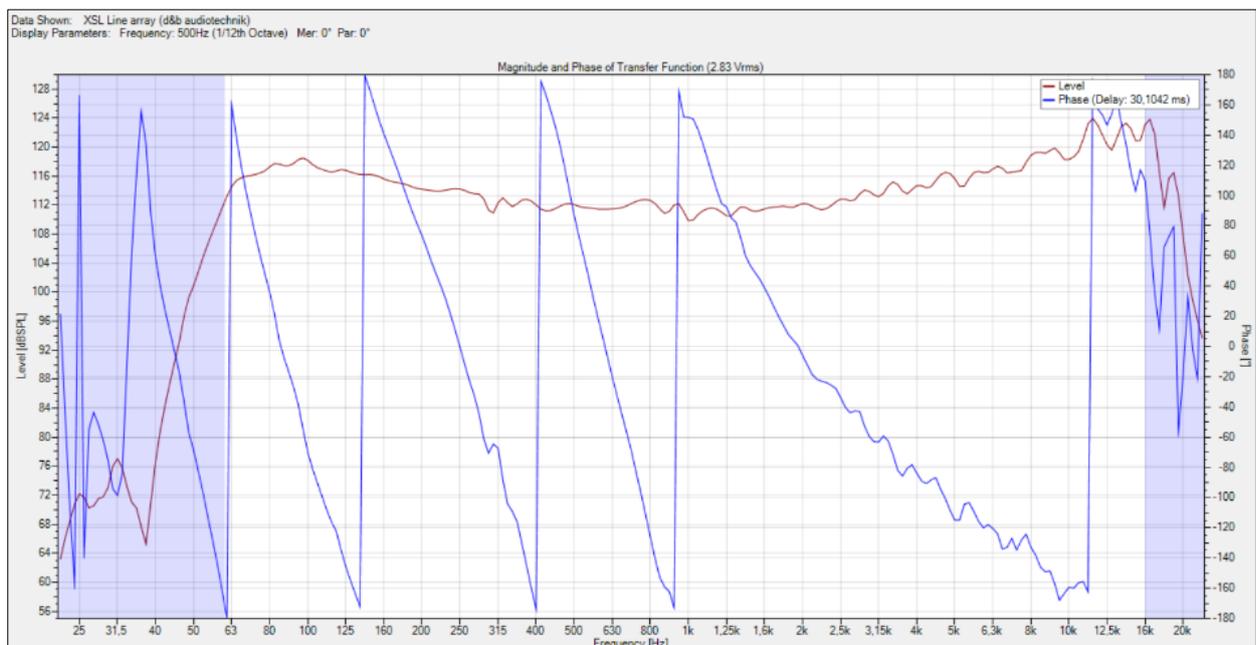


Abbildung 16: Bode-Diagramm des Lautsprechers d&b audiotechnik XSL8 (Quelle: Software EASE)

Die verschiedenen Qualitätsstufen der Lautsprecher stehen nun fest, also kann im nächsten Schritt aus dem einzelnen Lautsprecher ein Beschallungssystem entworfen werden. Die drei verschiedenen Lautsprecher besitzen alle in etwa die gleichen Bauteile bzgl. ihrer Baugröße und

haben daher ein ähnliches Format. Außerdem sind laut Herstellerangaben alle Lautsprecher für mittlere bis große Beschallungen geeignet, was in dem Anwendungsfall dieser Arbeit als gegeben erachtet wird. Die Beschallungssysteme werden mithilfe der Software EASE, EASE Focus und ArrayCalc (d&b audiotechnik) entworfen und an die räumlichen Begebenheiten angepasst. Genaue Beschreibungen und Simulationsansichten dazu finden sich in den Anhängen 5-7.

3.2.4. Festlegung geeigneter Stimuli

Wie eingangs erwähnt werden in dieser Arbeit die Veranstaltungsformate Vortrag und Musik (speziell Rock und Pop) näher betrachtet. Als Stimuli werden also jeweils ein musikalisches Beispiel und ein Vortragsbeispiel verwendet, von denen ein Ausschnitt von je 10-15 Sekunden genügen soll. Für die Wahl des Musik-Stimulus ist es zweckmäßig ein Stück zu wählen, das ausreichend perkussive Elemente, Dynamik und Rhythmik enthält, damit Kriterien wie Nachhall und Klarheit gut einzuschätzen sind. Natürlich sollte das Stück auch die gesamte Bandbreite des hörbaren Spektrums ausfüllen. Für das Vortrags-Stimulus wird eine Sprachaufnahme eines männlichen Sprechers verwendet, da die Sprachverständlichkeit bei männlichen Sprechern aufgrund der Tonalität tendenziell schwieriger zu erreichen ist. Die Wahl fällt auf:

Musik Auszug aus „No Doubt – Hella Good“ (Sekunde 8-24)

Vortrag Auszug aus dem Hörbuch „Dreifach“ von Ken Follet (Sekunde 4-20, Prolog)

3.3. Vorstellung der Bewertungskriterien als abhängige Variablen

Die Bewertungsstufen für die Versuchsteilnehmer bilden die abhängigen Variablen. Denkbar wäre eine einfache Beurteilung der empfundenen Qualität nach „gefällt“ und „gefällt nicht“. Um aussagekräftigere Ergebnisse zu bekommen, können in Anlehnung an die aktuelle Forschung aber auch weitere Kriterien gewählt werden. Davon ausgehend, dass sich der durchschnittliche Besucher mit den akustischen und technischen Aspekten einer solchen Veranstaltung kaum bzw. gar nicht beschäftigt, müssen die Bewertungskriterien für Laien nachvollziehbar und bewertbar sein. Nach (Weinzierl, et al., 2018) sind Kriterien wie Nachhall (trocken – hallig) und Räumlichkeit (klein – groß) in der Literatur omnipräsent. Weiterhin werden in anderen Studien

die Eigenschaften Klarheit (verwaschen – transparent/klar) und Intimität (entfernt/losgelöst – intim) als wichtige raumakustische Kriterien angeführt, vgl. (Lokki, et al., 2012, pp. 3148-3161). In ihrer Studie beschreiben Weinzierl, Lepa und Ackermann außerdem, dass klangfärbenden Eigenschaften des Raumes eine größere Bedeutung zukommt als bisher angenommen wurde. Daher sollte ein weiteres Kriterium wie Klangfärbung (bspw. dröhnt nicht – stark dröhnend) bewertet werden. Da auch das Stimulus Sprache verwendet wird, soll auch das Attribut Verständlichkeit bewertet werden. Diese für Laien gut verständlichen und auch beschreibbaren Begrifflichkeiten, stammen zum großen Teil aus der Publikation „The Room Acoustical Quality Inventory (RAQI)“, vgl. (Weinzierl, et al., 2018). In dieser Publikation werden 9 Oberbegriffe und insgesamt 29 Unterstufen zur Bewertung der raumakustischen Qualität definiert. Diese Arbeit konzentriert sich allerdings auf sieben Kategorien für die Bewertung:

Qualität	sehr gut – gefällt nicht
Nachhall	trocken – hallig
Räumlichkeit	klein – groß
Klarheit	transparent – verwaschen
Intimität	intim – entfernt
Verständlichkeit	gut verständlich – unverständlich
Klangfärbung	dröhnt nicht – dröhnt stark

Zur Bewertung der Kategorien steht den Versuchsteilnehmenden eine 7-stufige Skala zur Verfügung. Ein beispielhafter Bewertungsbogen, der in gleicher Form den Teilnehmenden zur Verfügung gestellt wurde, ist in Abb. 45, Anhang 8 zu sehen.

3.4. Erklärungen zur Erzeugung der Hörproben

Die Hörproben ergeben sich aus allen möglichen Kombinationen der unabhängigen Variablen, also:

$$\mathbf{3\ Räume\ x\ 3\ Beschallungsanlagen\ x\ 2\ Hörpositionen\ x\ 2\ Stimuli = \underline{36\ Hörproben}}$$

Tab. 4 in Anhang 8 liefert dazu einen guten Überblick aus welchen Kombinationen die Hörproben bestehen. Wegen des vollständig randomisierten Versuchsdesign ist es außerdem nötig, die Hörproben für alle Teilnehmenden in unterschiedlicher Reihenfolge zur Verfügung zu stellen. Tab. 5 in Anhang 8 ermöglicht dafür eine Codierung, bzw. die Decodierung.

Zur Erzeugung der Hörproben sind zunächst die Impulsantworten für die verschiedenen Kombinationen notwendig. Das AURA Modul innerhalb der Software EASE liefert die dazu erforderlichen Berechnungen, deren Parameter für jede Halle aufgrund der unterschiedlichen Nachhallzeiten angepasst werden müssen. Das Modul erzeugt für die Hörpositionen SweetSpot und Diffusfeld jeweils eine binaurale Impulsantwort, bestehend aus der gesamten Wirkkombination Lautsprecher und Raum. Nun ist die Software auf Messpunkte von 100Hz bis 10000Hz beschränkt, was zur Folge hat, dass die Impulsantworten lediglich Informationen dieses Frequenzbereichs enthalten. Nutzt man diese Impulsantworten zur Faltung der Stimuli, entsprechen diese im Resultat nur bedingt dem zu erwartenden (realen) Höreindruck, sind aber nach Meinung des Autors für eine Bewertung ausreichend. Zumal eher ein Vergleich der Hörproben untereinander zu erwarten ist, statt der Vergleich mit dem Original.

4. Ergebnisse des Versuchs und Analyse der Daten

Dieses Kapitel widmet sich der umfassenden Auswertung der gewonnenen Daten durch den durchgeführten Hörversuch. Die Grundlage bilden die Bewertungen der Hörbeispiele durch insgesamt 17 Teilnehmende, deren Ergebnisse mit der Statistik-Software SPSS analysiert, berechnet und anschaulich dargestellt werden können. Um Verfälschungen der Ergebnisse durch mögliche Ermüdungseffekte des Gehörs vorzubeugen, wurden den Versuchsteilnehmenden die 36 Hörproben in stets unterschiedlicher und quasi zufälliger Reihenfolge zur Bewertung gestellt, um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Im ersten Schritt der deskriptiven Statistik werden die vorgestellten unabhängigen Variablen einzeln und bezüglich ihres Einflusses auf die bewerteten abhängigen Variablen untersucht. Hier können bereits Auswirkungen und Tendenzen erkannt werden und erste interessante Schlüsse gezogen werden. Im abschließenden Schritt der induktiven Statistik werden Haupteffekte identifiziert und entscheidende Interaktionen zwischen den unabhängigen Variablen festgestellt. Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Grafiken, hier nochmals die Bewertungskriterien mit den zugehörigen Abstufungen:

<u>Qualität:</u>	1 = gefällt nicht,	7 = sehr gut
<u>Nachhall:</u>	1 = hallig,	7 = trocken
<u>Räumlichkeit:</u>	1 = groß,	7 = klein
<u>Klarheit:</u>	1 = verwaschen,	7 = transparent
<u>Intimität:</u>	1 = entfernt,	7 = intim
<u>Verständlichkeit:</u>	1 = unverständlich,	7 = verständlich
<u>Klangfärbung:</u>	1 = dröhnt stark,	7 = dröhnt nicht

Zur Verbesserung der Lesbarkeit werden die nun häufig verwendeten Begriffe Raumakustik, Beschallung, Stimulus und Hörposition und ihre jeweiligen Ausprägungen in diesem Abschnitt mit folgenden Abkürzungen ersetzt:

RA_m (Raumakustik mangelhaft), RA_b (Raumakustik befriedigend), RA_g (Raumakustik gut) PA_m (Beschallung mangelhaft), PA_b (Beschallung befriedigend), PA_g (Beschallung gut), ST_{Mus} (Stimulus Musik), ST_{Spr} (Stimulus Sprache), HP_s (Hörposition SweetSpot) und HP_D (Hörposition Diffusfeld).

4.1. Untersuchung des alleinigen Einflusses der unabhängigen Variablen

Im Folgenden werden durch die Software SPSS zu jeder unabhängigen Variable die Mittelwerte der Bewertungen der AVs mit einem Konfidenzintervall von 5% gebildet und in Diagrammen veranschaulicht.

Offensichtlich bewerteten die Teilnehmenden die beiden Stimuli weitgehend unterschiedlich (siehe Abbildung 17). ST_{Mus} wurde dabei in jeder Kategorie höher bewertet und die Kategorien erhielten dabei auch öfter wertähnliche Bewertungen. Im Vergleich wurde ST_{Spr} in den Kategorien stark unterschiedlich bewertet. Das menschliche Gehör ist

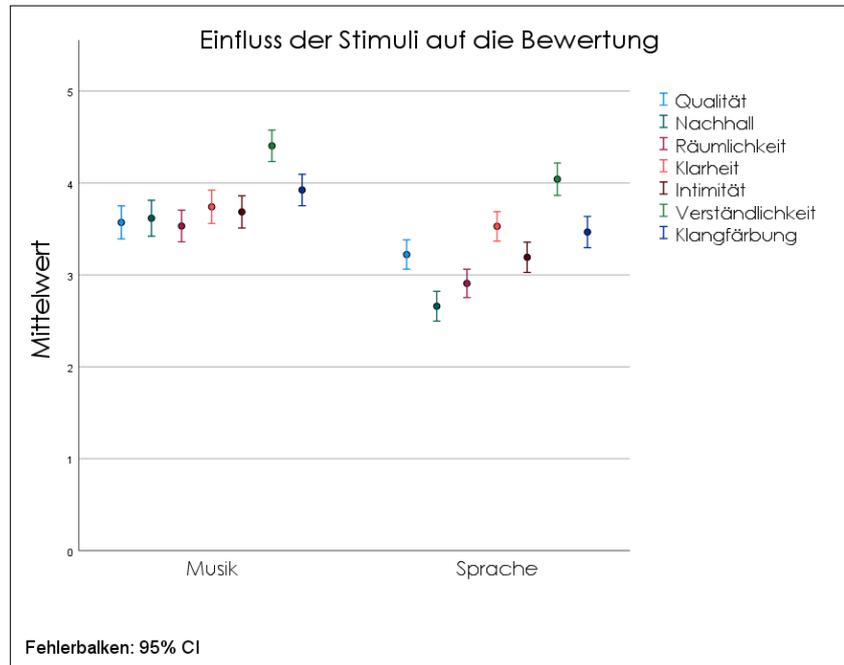


Abbildung 17: Darstellung der Mittelwerte der bewerteten abhängigen Variablen mit alleinigem Bezug zur Einflussgröße: Stimuli (Quelle: SPSS)

naturgemäß am stärksten auf menschliche Stimmen trainiert und angepasst, daher ist es nicht verwunderlich, dass ST_{Spr} augenscheinlich deutlich analytischer und präziser bewertet wurde. So fallen in Sprechpausen die Unausgewogenheit der Raumakustik (bspw. Nachhall) sicherlich stärker auf als bei dem musikalischen Beispiel. ST_{Mus} kann eher als durchgängig und mit nur sehr kurzen und rhythmischen Pausen angesehen werden und verzeiht dadurch eher klangliche Probleme. Zumal musikalische Inhalte zum großen Teil den Transport von Emotionen zur Aufgabe haben und damit dem Zuhörer einfacher zugänglicher sind, dienen Vorträge eher dem Austausch von Informationen. Die Sprachverständlichkeit ist für diesen Zweck eine grundlegende Voraussetzung und wird deswegen, wie im Diagramm zu erkennen ist, deutlich kritischer bewertet.

Vergleicht man die zwei Stufen der UV Hörposition (Abbildung 18) hinsichtlich ihrer Bewertung, so fallen lediglich dezente Schwankungen auf. Die Unterschiede sind sogar so gering, dass die Behauptung aufgestellt werden kann, dass hinsichtlich der Hörposition keine Unterschiede in

den klanglichen Eigenschaften gemacht wurden. Das Hörerlebnis scheint für die beiden Positionen nahezu gleich zu sein. Die vorhandenen minimalen Unterschiede in den Kriterien Nachhall, Räumlichkeit, Klarheit und Intimität erscheinen plausibel, wenn man die Position der beiden Hörerorte bedenkt. Natürlich sollten bei HP_S weniger raumakustische Einflüsse wahrnehmbar sein als im hinteren Teil der Halle, mit großer Distanz zur PA, bei HP_D . Umgekehrt sollten mit kürzerer Distanz zur PA die Klarheit und die Intimität zunehmen.

Besondere Beachtung fällt auf die UV Beschallung in Abbildung 19. Gerade mit Bezug zur Forschungsfrage sind die Ergebnisse für diese UV besonders interessant.

Bedenkt man hier außerdem die starken Preisunterschiede der verschiedenen Beschallungsanlagen (siehe 5.3), würde man auch für die Bewertung erkennbare Unterschiede erwarten. Auf den ersten Blick ist dies jedoch für keine der AVs der Fall. Eine mögliche Erklärung, weshalb PA_m sogar geringfügig bessere Bewertungen erhielt, liegt evtl. in der AV Klangfärbung begründet. Die Teilnehmenden attestieren dieser PA eine geringere Ausprägung

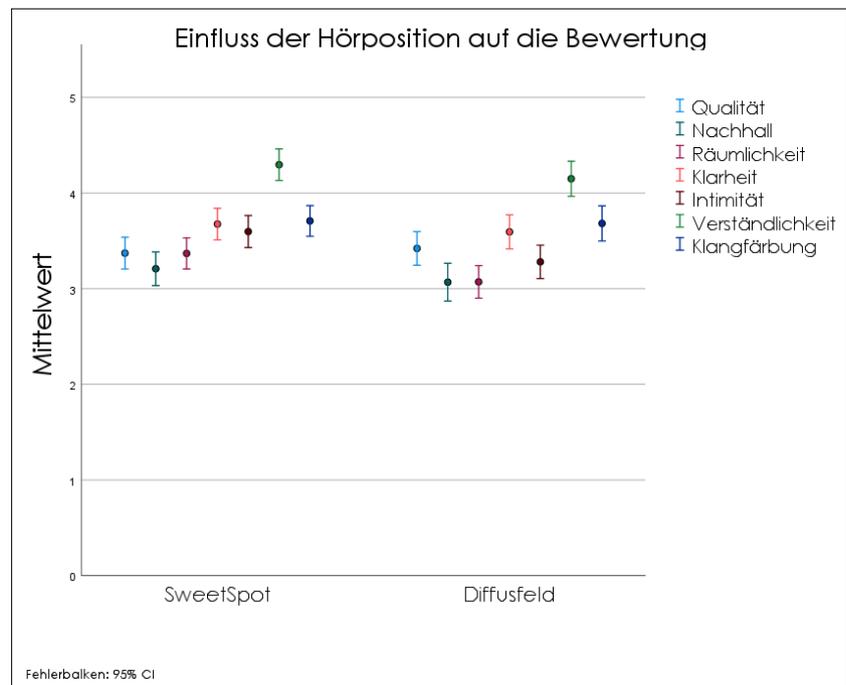


Abbildung 18: Darstellung der Mittelwerte der bewerteten abhängigen Variablen mit alleinigem Bezug zur Einflussgröße: Hörposition (Quelle: SPSS)

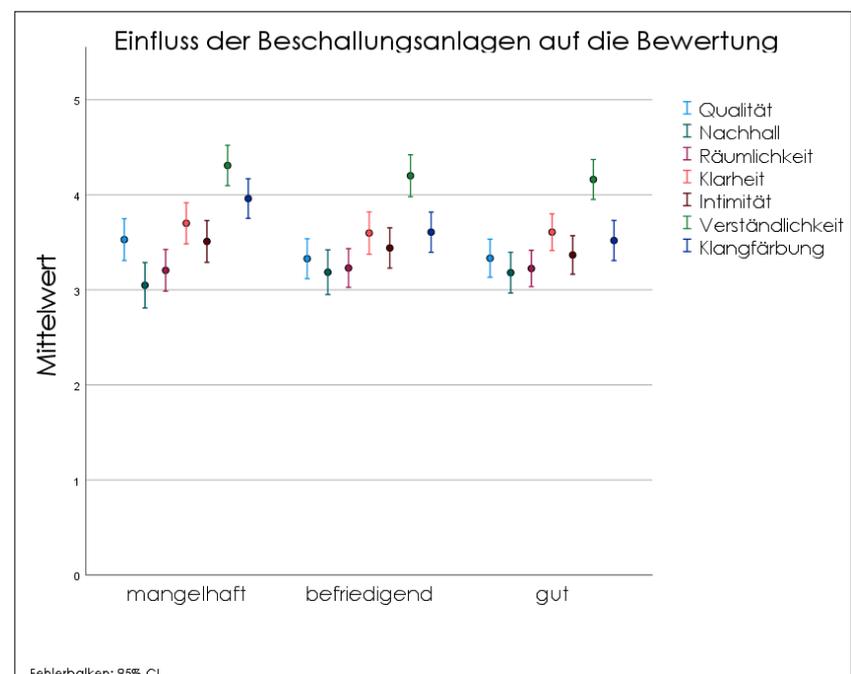


Abbildung 19: Darstellung der Mittelwerte der bewerteten abhängigen Variablen mit alleinigem Bezug zur Einflussgröße: Beschallung (Quelle: SPSS)

dröhnender Klangeigenschaften. Ob dieses Dröhnen nun durch den Raum (angeregt durch die PA) oder durch die PA selbst bewirkt wird, kann in diesem Teil nicht beantwortet werden. Möglich ist aber, dass dieses Dröhnen zu Maskierungen führt. Eine PA, die weniger Dröhnen bewirkt, verursacht auch weniger Maskierungseffekte. Das Klangbild wirkt klarer, eine gute Verständlichkeit ist eher gegeben. Im Abschnitt 3.2.3 wurden auch die Unterschiede der Beschallungsanlagen hinsichtlich ihrer Richtwirkung betrachtet. Laut der Grafik scheint die bessere Richtwirkung von PA_b und PA_g zur Folge zu haben, dass der Raum weniger stark angeregt wird, der entstehende Nachhall in der Bewertung also geringer wahrgenommen wird.

Abschließend können bei Betrachtung der UV Raumakustik die größten Unterschiede erkannt werden. Die optische Darstellung in Abbildung 20 entspricht dem zu erwartenden Ergebnis, aus dem geschlussfolgert werden kann, dass die Raumakustik von allen UVs den größten Einfluss auf die Teilnehmenden zu haben scheint. RA_m wird demnach als so störend eingestuft, dass die Bewertungen deutlich unterdurchschnittlich ausfallen.

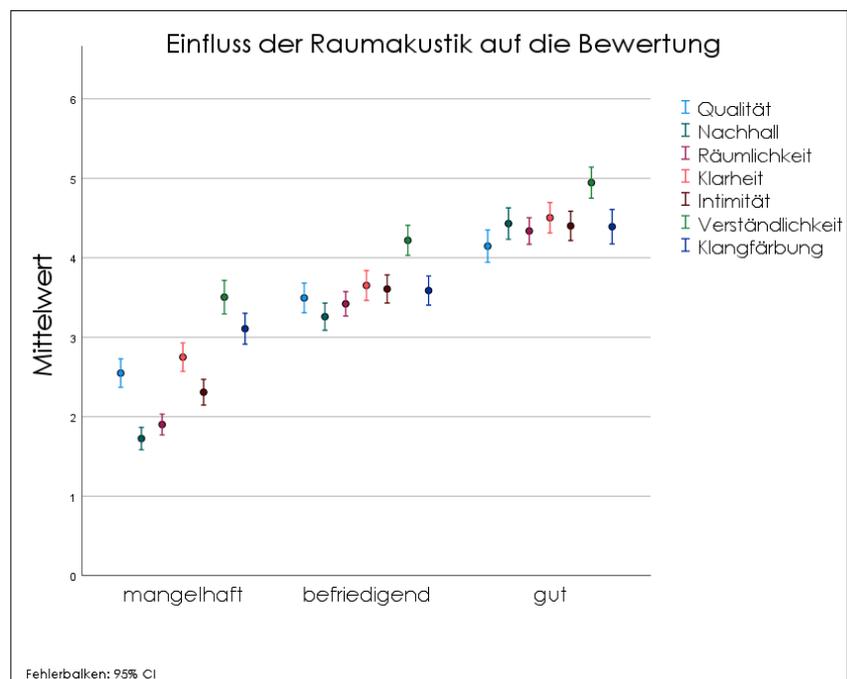


Abbildung 20: Darstellung der Mittelwerte der bewerteten abhängigen Variablen mit alleinigem Bezug zur Einflussgröße: Raumakustik (Quelle: SPSS)

RA_b schafft durchweg durchschnittliche Ergebnisse und RA_g liegt klar über dem Durchschnitt. Eine ausreichend gegebene Verständlichkeit wird für jeden der drei Fälle bestätigt.

4.2. Untersuchung der Haupteffekte und Interaktionen zwischen den unabhängigen Variablen

Aufgrund des Versuchsdesigns ist eine Analyse über eine 4-faktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung sinnvoll. Um diese durchführen zu können, werden zunächst die Voraussetzungen geprüft.

Da die Versuchsteilnehmenden stets alle und dieselben Hörproben bewerteten – zwar in zufällig geänderter Reihenfolge – handelt es sich hier klar um verbundene, bzw. voneinander abhängige Messwerte. Weiter sind die abhängigen Variablen in der Software SPSS metrisch skaliert. Eine ordinale Skalierung, läge per Definition näher, jedoch wird bei mehr als 5 Ausprägungen empfohlen, die metrische Skalierung zu verwenden, vgl. (Berry, 1993, p. 47). Die Messwerte befinden sich im Grenzbereich zwischen ordinaler und metrischer Skalierung, es kann jedoch festgestellt werden, dass die Mindestvoraussetzung für die Varianzanalyse erfüllt ist und eine metrische Skalierung außerdem keine Nachteile birgt. Die Überprüfung der Normalverteilung ergibt stark gemischte Ergebnisse und die Analyse zeigt, dass Normalverteilung nur in 12,7% der Fälle vorliegt. Anhand verschiedener Studien ist jedoch eine Verletzung der Normalverteilungsannahme kein Ausschlusskriterium zur Durchführung einer ANOVA mit Messwiederholung. Untersuchungen zeigen, dass eine solche Analyse ausreichend robust gegenüber derartigen Verletzungen ist. Insbesondere wenn alle weiteren Voraussetzungen gegeben sind, vgl. (Berkovits, et al., 2000, p. 890).

Im weiteren Verlauf wird für jede AV eine vierfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung in der Software SPSS durchgeführt. Die Anpassung des Konfidenzintervalls wird wegen multiplen Testen stets nach Bonferroni durchgeführt. Das lokale Signifikanzniveau wird für sieben durchgeführte Varianzanalysen zu $\frac{\alpha}{k} = \frac{0,05}{7} = 0,007$ reduziert, vgl. (Fahrmeier, et al., 1997, p. 396). Schließlich werden signifikante Effekte und Interaktionen identifiziert und in anschaulichen Diagrammen dargestellt. Diagramme zu nicht signifikanten Ergebnissen, sowie Übersichtstabellen zu Sphärizität und Signifikanzen finden sich stets in Anhang 9. Die unabhängigen Variablen werden im Folgenden abgekürzt mit *RA* (Raumakustik), *PA* (Beschallung), *ST* (Stimulus/Stimuli) und *HP* (Hörposition).

4.2.1. Abhängige Variable: Qualität

Es kann als hochsignifikanter Haupteffekt die UV *RA* (Sig. < 0,001¹²) identifiziert werden, was sich auch mit den Erkenntnissen des vorherigen Abschnitts deckt. Hoch signifikante Interaktionen erster Ordnung bestehen zwischen den UVs *RA* und *ST* (Sig. 0,002¹³), *RA* und *HP* (Sig. 0,005¹⁴) sowie *PA* und *HP* (Sig. 0,002).

Die mit Bezug zur Forschungsfrage wichtigste Interaktion zwischen *RA* und *PA* (siehe Abb. 46, Anhang 9) ist mit Sig. 0,138 nicht signifikant und kann keinen Aufschluss über gegenseitige Abhängigkeiten der beiden Faktoren liefern. Mit einer noch geringen Alpha-Fehler-Wahrscheinlichkeit von 13,8% kann jedoch von einer Tendenz gesprochen werden, dass Interaktionen möglich sind. Der Effekt ist evtl. im vorliegenden Versuchsdesign zu klein und eine Erhöhung der Versuchsteilnehmerzahl würde diese Tendenz möglicherweise noch weiter verstärken. Auf weitere Einschränkungen im Versuchsdesign wird im Abschnitt 4.3 eingegangen. Interessant sind aber die hoch signifikanten, hybriden Interaktionen, dargestellt in Abbildung 21 und Abbildung 22. Eine Verbesserung der *RA* hat demnach stets positive Auswirkungen auf die empfundene Qualität und bildet den Haupteffekt. Insbesondere musikalische Inhalte profitieren verstärkt von einer Verbesserung der *RA*, da das Klangbild mit steigender raumakustischer Qualität (über die Reduzierung der Nachhallzeit) tendenziell stärker dem Klangbild einer Studioproduktion ähneln kann. Die Mindestansprüche an die Qualität von *ST_{Spr}* scheinen allerdings deutlich höher zu liegen als die für

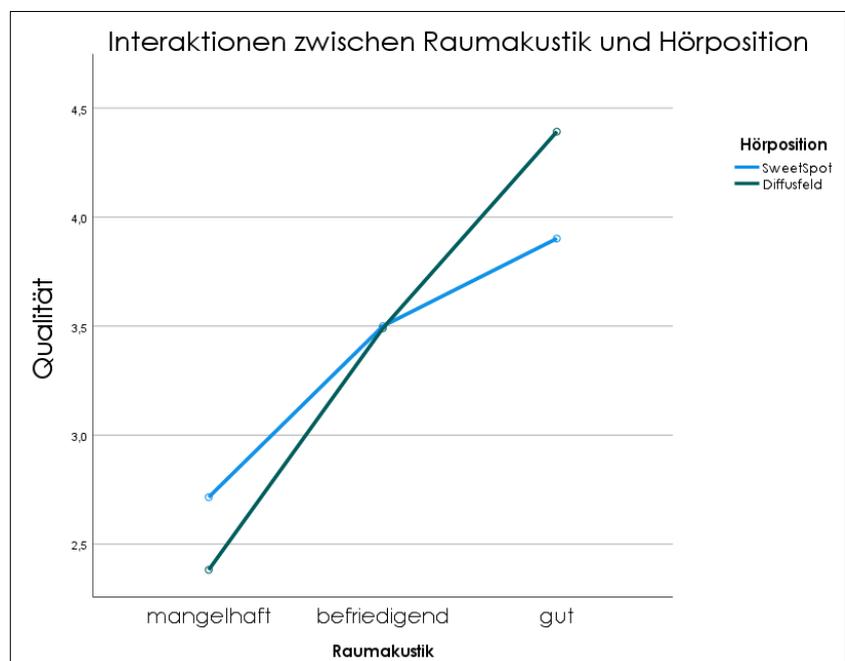


Abbildung 21: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und Hörposition, AV: Qualität (Quelle: SPSS)

¹² Sphärizität kann nicht angenommen werden, Greenhouse-Geisser Korrektur der Freiheitsgrade.

¹³ Siehe Fußnote 12

¹⁴ Siehe Fußnote 12

ST_{Mus} . Des Weiteren profitieren auch weit von der Bühne entfernte Hörerorte (im Beispiel HP_D) besonders stark von einer Verbesserung der RA. Der letzte Plot (Abbildung 23), eine disordinale Interaktion zeigt das Vorliegen reiner Wechselwirkungen zwischen PA und HP (Sig. 0,002). Haupteffekte können in dieser Kombination nicht interpretiert werden. Während PA_m und PA_g zumindest ähnliche Werte für die beiden Hörerorte erreichen, liegen die Ergebnisse für PA_b weit auseinander und die PA schafft es nicht auch für HP_s ein ähnliches Ergebnis zu erreichen.

Weitere interessante, jedoch nicht signifikante Interaktionen bestehen zwischen den UVs PA und ST (Sig.

0,099) in Abb. 47, Anhang 9: die Qualität der PA scheint für musikalische Inhalte in der Tendenz weniger Einfluss auszuüben als für Vortragsinhalte. Wie schon beschrieben, sorgt die Konditionierung des menschlichen Gehörs für deutlich kritischere Bewertungen bei sprachlichen Inhalten. Die Wechselwirkungen zwischen ST und HP (Sig. 0,069) in Abb. 48, Anhang 9 lassen Empfehlungen für die Veranstaltungsformate Musik und Vortrag zu: So scheint es für Vortragsveranstaltungen besonders empfehlenswert zu sein, weitere Lautsprecher (bspw. Delay-Lines)

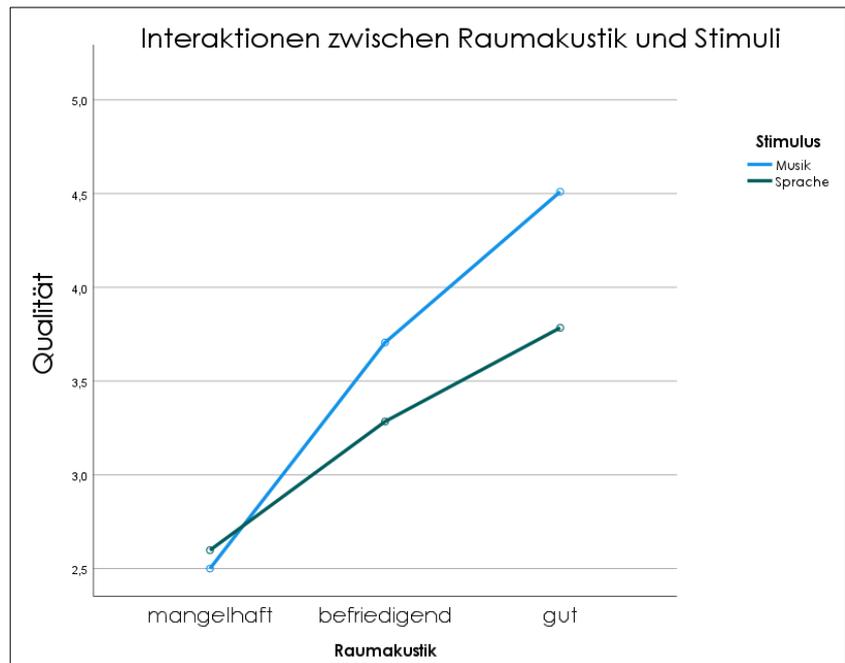


Abbildung 22: Interaktion zwischen den UVs Raumakustik und Stimulus, AV: Qualität (Quelle: SPSS)

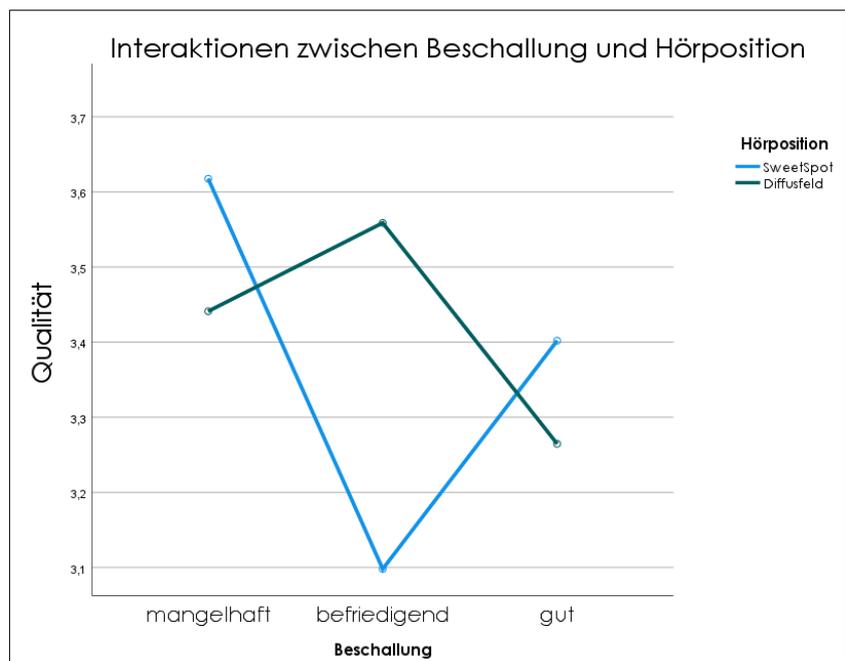


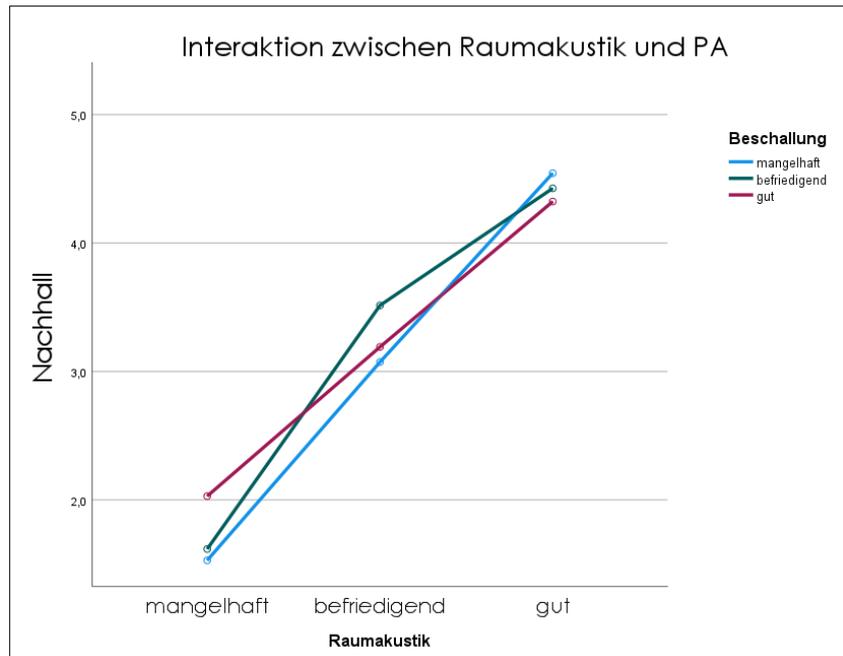
Abbildung 23: Interaktionen zwischen den UVs Beschallung und Hörposition, AV: Qualität (Quelle: SPSS)

einzusetzen, um den Informationstransport für alle Hörerorte besser sicherzustellen. Für musikalische Inhalte ist eine solche Maßnahme eher nicht nötig.

4.2.2. Abhängige Variable: Nachhall

Für das Kriterium Nachhall (1 = hallig, 7 = trocken) ergeben sich als hoch signifikante Haupteffekte die UVs *ST* (Sig. < 0,001) und *RA* (Sig. < 0,001). Signifikante Wechselwirkungen

können zwischen den UVs *RA* und *PA* (Sig. < 0,001), sowie zwischen *RA* und *HP* (Sig. < 0,001) identifiziert werden. Sphärizität kann für alle Fälle angenommen werden. Im Interaktionsplot zwischen *RA* und *PA* kann eine hybride Wechselwirkung festgestellt werden, auch wenn die Unterschiede in den Werten sehr gering



sind (siehe Abbildung 24).

Abbildung 24: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und PA, AV: Nachhall (Quelle: SPSS)

Anhand der Grafik kann die Vermutung aufgestellt werden, dass die sehr hohe Richtwirkung von PA_g zu einer Reduzierung der Raumanregung und damit des Nachhalls in RA_m führt. In RA_g scheint die Qualität der PA hingegen nur minimale Unterschiede hervorzurufen und lässt keine weitere Interpretation zu.

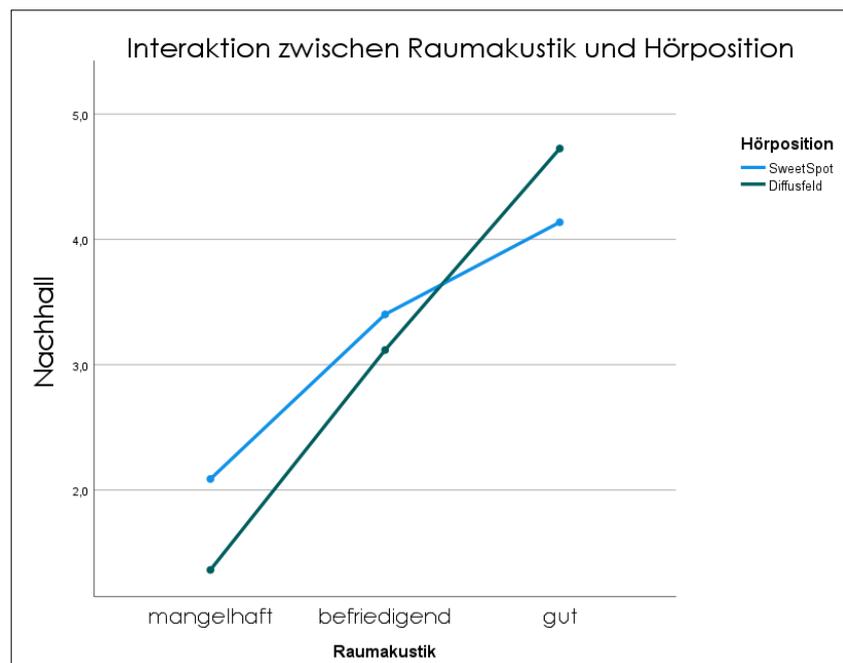


Abbildung 25: Interaktion zwischen den UVs Raumakustik und Hörposition, AV: Nachhall (Quelle: SPSS)

Interessant ist das Ergebnis in Abbildung 25: Es beschreibt für den hinteren Teil der Halle bei HP_D weniger Nachhall bei RA_g als für HP_s . Als mögliche Erklärung kann die deutlich kürzere Distanz von HP_D zu absorbierenden Oberflächen bedacht werden. Weiter ist es möglich, dass durch die große Zahl absorbierender Oberflächen bereits viele Reflektionen vermindert wurden, bevor sie im hinteren Bereich der Halle auftreffen. Die weiteren, nicht signifikanten Interaktionen in Abb. 50, Anhang 9 zwischen den UVs PA und ST , (Sig. 0,073) lassen außerdem Tendenzen erkennen, dass die steigende Richtwirkung der verschiedenen PA s zumindest für musikalische Inhalte eine Verbesserung, bezogen auf die Wahrnehmung des Nachhalls zu erreichen scheint.

Abb. 49, Anhang 9 zeigt eine nicht signifikante ordinale Interaktion aus der angenommen werden kann, dass musikalische Inhalte längeren Nachhall tendenziell eher verzeihen als Sprachinhalte. Das beide Stimuli von einer Verbesserung der RA profitieren, ist klar ersichtlich.

4.2.3. Abhängige Variable: Räumlichkeit

Spärizität kann bis auf die UV-Kombination PA und ST für alle sonstigen Fälle angenommen werden (siehe Tab. 8, Anhang 9). Für die Variable Räumlichkeit (1 = groß, 7 = klein) können zwei hoch signifikante Haupteffekte bestimmt werden: ST mit Sig. < 0,001 und RA mit Sig. < 0,001.

Zwischen den UVs RA und HP (Sig. < 0,001) besteht eine hoch signifikante hybride

Wechselwirkung, siehe Abbildung 26. Wie im vorherigen Abschnitt kann bestätigt werden, dass die verschiedenen Hörerorte innerhalb einer Veranstaltungsstätte von einer Verbesserung der RA stark profitieren. In der hier besten Raumakustik ist die Wahrnehmung der Räumlichkeit sogar für beide Hörerorte nahezu gleich.

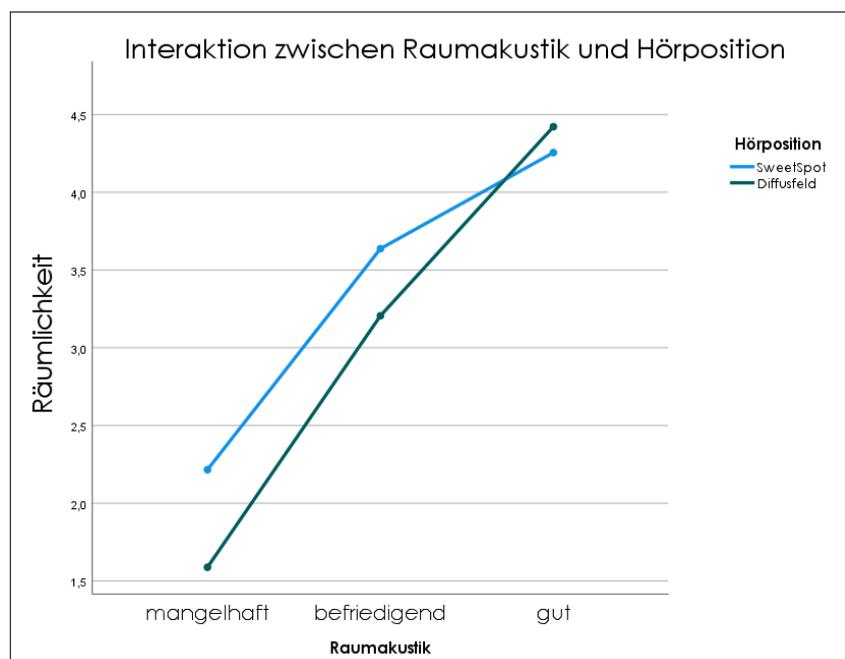


Abbildung 26: Interaktion zwischen Raumakustik und Hörposition, AV: Räumlichkeit (Quelle: SPSS)

Eine interessante, jedoch nicht signifikante, hybride Wechselwirkung kann für das UV-Paar *RA* und *PA* (Sig. 0,026) festgestellt werden, siehe Abb. 53, Anhang 9. Wie im vorherigen Abschnitt scheint die Verbesserung der Richtwirkung der drei *PA*s vor allem in *RA_m* einen Effekt zu haben. Die Wichtigkeit einer präzisen Richtwirkung nimmt aber mit Verbesserung der *RA* offensichtlich ab und andere Qualitätsmerkmale der *PA* werden wichtiger.

Wegen der Ähnlichkeit der beiden Bewertungskriterien Nachhall und Räumlichkeit kann außerdem auf der Grundlage zweier nicht signifikanter Interaktionsplots zwischen *RA* und *ST* (die jedoch starke Tendenzen erkennen lassen) vermutet werden, dass Sprachinhalte stets räumlicher wahrgenommen werden als musikalische Inhalte, siehe Abb. 49 und Abb. 54 in Anhang 9.

4.2.4. Abhängige Variable: Klarheit

Sphärizität wird für alle Fälle bis auf die UV-Kombination *ST*, *RA* und *PA* angenommen. Es ergibt sich damit *RA* als hoch signifikanter Haupteffekt (Sig < 0,001) und hoch signifikante hybride Interaktionen bestehend erwartungsgemäß zwischen *RA* und *PA* (Sig. < 0,001), *RA* und *ST* (Sig. < 0,001), sowie *RA* und *HP* (Sig. < 0,001). Aufgrund der hybriden Wechselwirkung

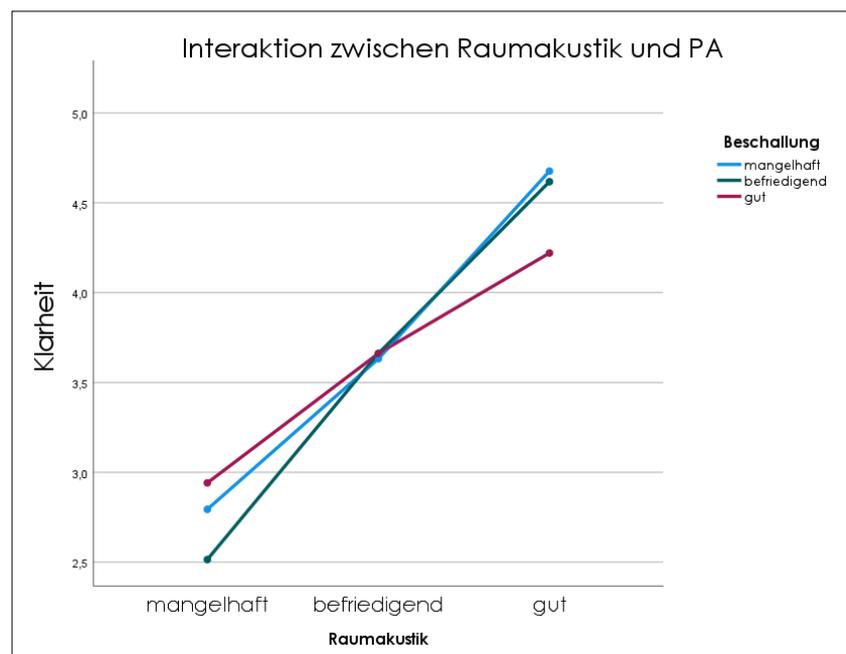


Abbildung 27: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und Beschallung, AV: Klarheit (Quelle: SPSS)

kann lediglich der Faktor *RA* als Haupteffekt interpretiert werden, der eine signifikante Auswirkung auf die AV Klarheit hat. In Abbildung 27 kann jedoch wieder festgestellt werden, dass *PA_g* besonders in *RA_m* zu Verbesserungen der Klarheit beiträgt. Von einer Verbesserung der *RA* profitieren außerdem *ST_{Mus}*, sowie *HP_D* deutlich stärker als *ST_{Spr}* und *HP_s* (siehe Abbildung 28 und Abbildung 29). Die übrigen nicht signifikanten Interaktionsplots finden sich in Anhang 9.

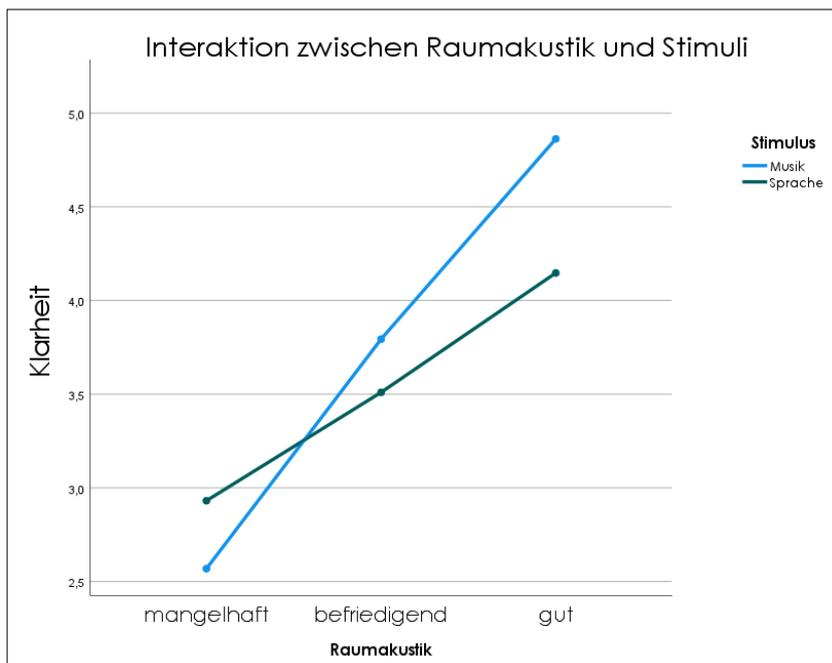


Abbildung 28: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und Stimulus, AV: Klarheit (Quelle: SPSS)

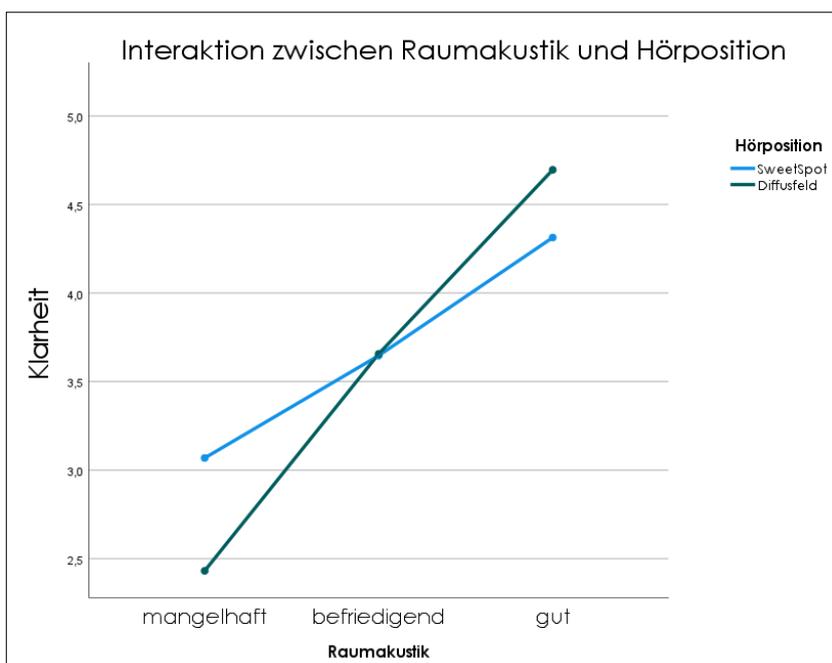


Abbildung 29: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und Hörposition, AV: Klarheit (Quelle: SPSS)

4.2.5. Abhängige Variable: Intimität

Außer für RA kann für alle sonstigen Fälle Sphärizität angenommen werden. Es ergeben sich damit hoch signifikante Haupteffekte für ST (Sig. 0,003), RA (Sig. < 0,001¹⁵) und HP (Sig. 0,004). Eine hoch signifikante, ordinale Interaktion besteht zwischen RA und ST (Sig. < 0,001) in Abbildung 30. Während in RA_m die Werte für ST_{Mus} und ST_{Spr} nahezu gleich sind, schafft es ST_{Mus} mit Verbesserung der RA eine größere Intimität zu erzielen als ST_{Spr} , was auf eine gegenseitige Abhängigkeit der beiden Faktoren schließen lässt. Eine weitere hoch signifikante, ordinale Interaktion herrscht zwischen RA und HP (Sig. 0,007). Wieder gut zu erkennen ist in Abbildung 31, dass HP_D stärker von einer Verbesserung der RA profitiert und

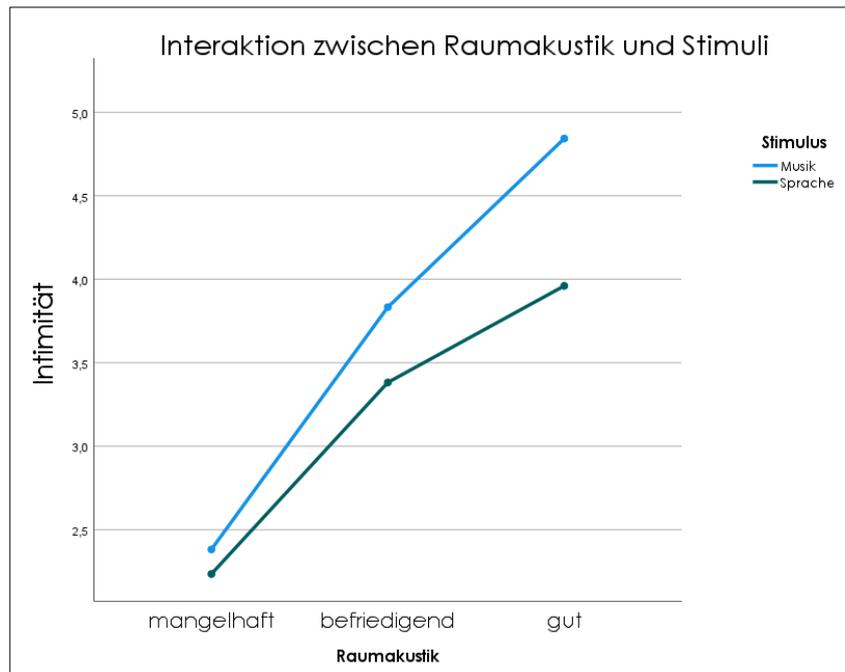


Abbildung 30: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und Stimulus, AV: Intimität (Quelle: SPSS)

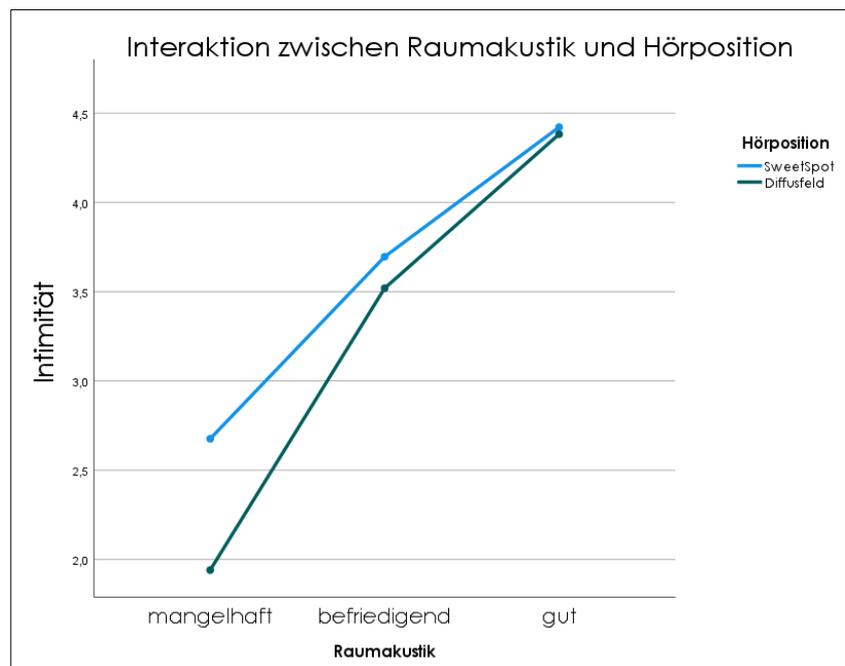


Abbildung 31: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und Hörposition, AV: Intimität (Quelle: SPSS)

besonders in RA_g kein Unterschied zwischen den beiden Hörerorten messbar ist. Eine

¹⁵ Greenhouse-Geisser Korrektur der Freiheitsgrade

interessante, jedoch nicht signifikante, hybride Interaktion besteht zwischen *RA* und *PA* (Sig. 0,021) in Abb. 61, Anhang 9. Die Qualität der *PA* spielt auch hier in der Tendenz eine untergeordnete Rolle und nur der Haupteffekt *RA* ist zu interpretieren. Die Wahrnehmung der Intimität steigt mit Verbesserung der *RA* stark an, die Qualitätsstufen der *PA* scheinen dagegen nicht messbare Auswirkungen zu haben.

4.2.6. Abhängige Variable: Verständlichkeit

Der Mauchly-Test besagt hier, dass für *RA* und *PA* keine Sphärizität vorliegt. Außerdem erzielt die Kombination aus *RA*, *PA* und *HP* keine Sphärizität. Für alle weiteren Fälle kann Sphärizität angenommen werden. Signifikante Haupteffekte liegen für *RA* (Sig. < 0,001¹⁶) sowie *HP* (Sig. 0,004) vor. Eine hoch signifikante, hybride Interaktion herrscht zwischen *RA* und *HP* (Sig. < 0,001) in Abbildung 32. Während bei *HP_S* auch in *RA_m* ausreichende Verständlichkeit herrscht, ist für *HP_D* das Gegenteil der Fall. Mit Verbesserung der *RA* werden diese Unterschiede angeglichen und *HP_D* erzielt sogar noch bessere Bewertungen. Eine mögliche Erklärung, könnte die größere Distanz zu den Bass-Lautsprechern sein. Damit sind in den hinteren Hörpositionen der Halle weniger Maskierungseffekte durch evtl. dröhnende Bässe zu erwarten und die Verständlichkeit steigt. Eine letzte hoch signifikante, disordinale Interaktion herrscht zwischen den Faktoren *PA* und *HP* (Sig. 0,002), siehe Abbildung 33. Die disordinale Natur lässt keine Interpretation von Haupteffekten zu, stattdessen liegen reine Wechselwirkun-

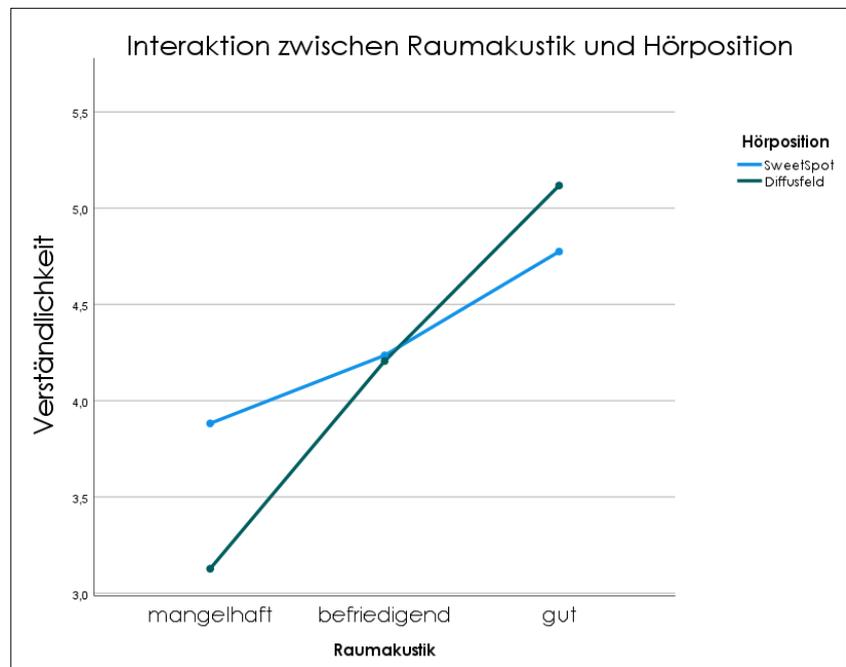


Abbildung 32: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und Hörposition, AV: Verständlichkeit

¹⁶ Greenhouse-Geisser Korrektur der Freiheitsgrade

gen vor. Die Verständlichkeit hängt also stark von der Kombination aus *HP* und *PA* ab. Eine nicht signifikante, hybride Interaktion mit stark erkennbarer Tendenz besteht zwischen *RA* und *PA* (Sig. 0,009), dargestellt in Abb. 65, Anhang 9. Wieder zeigen sich große Auswirkungen auf die wahrgenommene Verständlichkeit des Haupteffekts *RA* und lediglich geringe und damit nicht interpretierbare Beeinflussungen durch die *PA*.

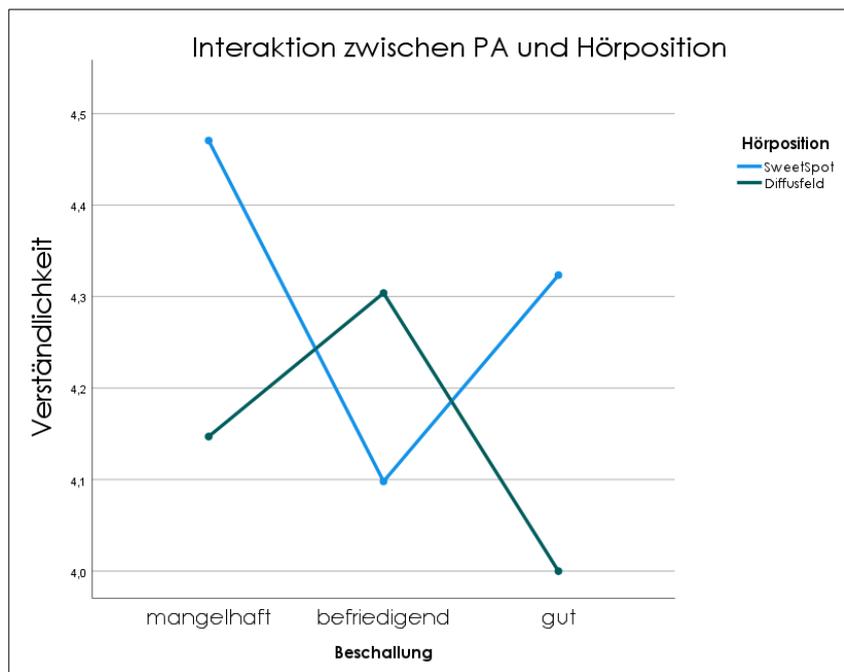


Abbildung 33: Interaktion zwischen den UVs Beschallung und Hörposition, AV: Verständlichkeit (Quelle: SPSS)

4.2.7. Abhängige Variable: Klangfärbung

Sphärizität wird außer für *RA* für alle sonstigen Fälle angenommen (siehe Tab. 12 in Anhang 9). Es ergeben sich signifikante Haupteffekte für *RA* (Sig. < 0,001¹⁷) und *PA* (Sig. < 0,001). Die einzige hoch signifikante, hybride Interaktion zwischen *RA* und *ST* (Sig. 0,001) in Abbildung 34 zeigt, dass störende klangfärbende Effekte besonders in *RA_m* auftreten und beide *ST* von der Verbesserung der *RA* profitieren. Wieder zeigen sich öfter bessere Werte für *ST_{Mus}*.

Die nicht signifikante teils ordinale und teils hybride Interaktion in Abb. 69 in Anhang 9 (Sig. 0,010), zeigt dass für *RA* und *PA* Haupteffekte vorliegen. Klangfärbende Effekte (Skala: 1 = stark dröhnend, 7 = dröhnt nicht) scheinen also zum einen durch *RA_m* hervorgerufen zu werden und zum anderen, mit Verbesserung der *RA* auch durch die *PA*. Die Grafik zeigt weiter, dass *PA_g* die größten klangfärbenden Effekte hervorzurufen scheint und viel tieffrequente Anteile produziert, die in der Bewertung als „dröhnend“ wahrgenommen wurden. Ein Blick auf den Frequenzgang des Lautsprechers (d&b XSL) in Abschnitt 3.2.3 untermauert diese Aussage. Betrachtet man

¹⁷ Greenhouse-Geisser Korrektur der Freiheitsgrade

weiter die nicht signifikante ordinale Interaktion zwischen *PA* und *ST* (Sig. 0,050) in Abb. 70, Anhang 9 kann eine ähnliche Aussage über die vorliegenden Tendenzen getroffen werden. Die drei unterschiedlichen *PA*s produzieren jeweils unterschiedlich kräftige Bassanteile, die als störend wahrgenommen werden. Dabei liefert *PA_m* augenscheinlich die geringsten störenden Dröhneffekte,

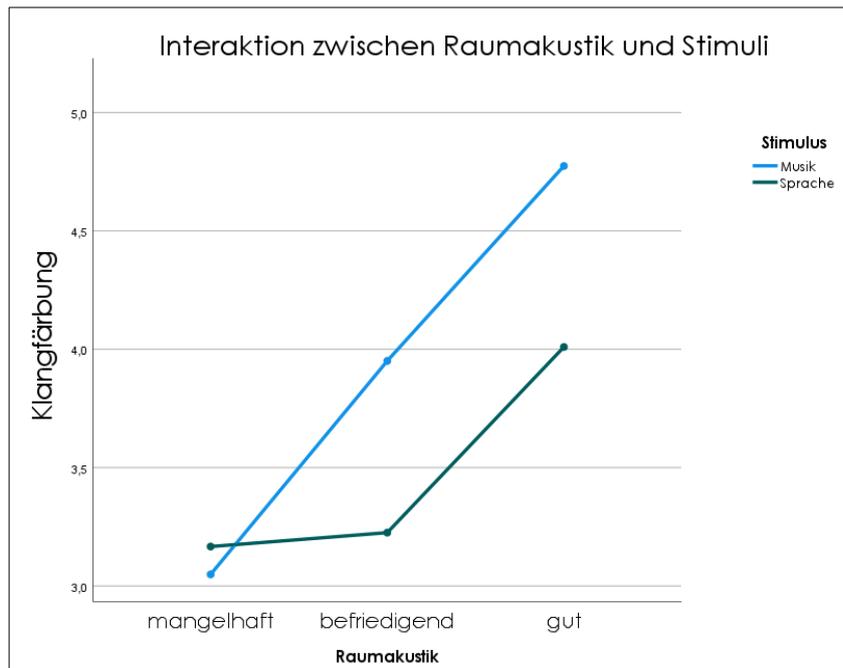


Abbildung 34: Interaktion zwischen den UVs Raumakustik und Stimulus, AV: Klangfärbung (Quelle: SPSS)

was die in diesem Versuch durchweg guten Ergebnisse des Systems erklären dürfte. Der Interaktionsplot zwischen *PA* und *HP* in Abb. 71, Anhang 9 (Sig. 0,058) bestätigt diese Einschätzung zusätzlich. Eine ebenfalls nicht signifikante hybride Interaktion zwischen *RA* und *HP* (Sig. 0,016) in Abb. 72, Anhang 9 zeigt Tendenzen, dass mit Verbesserung der *RA* klangfärbende Problemzonen für die verschiedenen Hörerorte reduziert werden können. Die letzte nicht signifikante hybride Interaktion zwischen *ST* und *HP* (Sig. 0,014) in Abb. 73, Anhang 9 lässt die Interpretation für den Haupteffekt *ST* zu, dass sprachliche Inhalte deutlich strenger bewertet werden und eine gute Sprachübertragung und damit Sprachverständlichkeit tendenziell schwieriger zu erreichen ist.

4.3. Mögliche Einschränkungen der Untersuchung

Der vorliegende Versuch unterliegt gewissen Einschränkungen, auf die im Versuchsdesign kein Einfluss ausgeübt werden konnte. So wurde an die Versuchsteilnehmenden lediglich die Bedingung gestellt, den Hörversuch mithilfe eines Kopfhörers durchzuführen. Hersteller und Modell der Kopfhörer konnten nicht bestimmt werden und oblag der Verantwortung der Teilnehmenden. Damit ist klar, dass der resultierende Klang für jeden Teilnehmer und jede Teilnehmerin anders gewesen sein dürfte. Viele „HiFi“ Kopfhörer verstärken bspw. die

Bassanteile oder aber auch die hohen Frequenzen und es ergibt sich ein verzerrtes Klangbild. Inwieweit dadurch Unterschiede in den Bewertungen entstanden sind, kann nicht beurteilt werden. Außerdem war ein häufiges Feedback der Teilnehmenden, dass der Hörversuch nach etwa zwei Drittel als anstrengend wahrgenommen wurde und die Konzentration durch Ermüdungseffekte des Gehörs nachließ. Durch die stets stark gemischte Reihenfolge der Hörproben für die Versuchsteilnehmenden wurde versucht, diesem Effekt entgegenzuwirken, aber dennoch kann ein Einfluss von Ermüdungserscheinungen auf die Bewertungen nicht ausgeschlossen werden. Des Weiteren ist eine indirekte Beeinflussung der Bewertungen durch individuelle Präferenzen denkbar. Gerade bei dem musikalischen Beispiel ist es für die Bewertung sicherlich nicht förderlich, wenn das gewählte Musikstück nicht dem eigenen persönlichen Geschmack entspricht. Der Einfluss wird eher als gering eingestuft, kann aber nicht ausgeschlossen werden.

Die weitaus gravierendste Einschränkung entsteht aber durch die schon erwähnte Limitierung der Software EASE. Das Frequenzspektrum der Hörproben ist durch die feststehenden Messpunkte der Software auf den Bereich 100 Hz bis 10 kHz begrenzt. Tiefer und höher liegende Anteile sind zwar in der Realität vorhanden, können aber in den Hörproben nicht wiedergegeben werden. Eine objektive Beurteilung des Klangbilds wird also massiv erschwert. Betrachtet man bspw. den Frequenzgang der mangelhaften PA in Abschnitt 3.2.3 erkennt man den starken Höhenabfall bei 13 kHz, der einen starken Einfluss auf das Klangbild haben dürfte, jedoch in den Hörproben nicht erkannt werden kann, da er außerhalb des möglichen Spektrums liegt. Eine Beurteilung der klanglichen Qualität der Beschallungsanlagen ist also erschwert und würde evtl. unter realen Bedingungen (volles hörbares Spektrum) anders ausfallen. Außerdem ist es technisch möglich und in der Praxis auch notwendig, die verschiedenen PAs an die räumlichen Begebenheiten klanglich anzupassen. Ein erfahrener Systemtechniker hätte also raumakustische Probleme über die Anpassung der PA in begrenztem Rahmen reduzieren können. Da die letzten beschriebenen zwei Punkte allerdings für jede PA im Versuch und nicht individuell gelten, kann davon ausgegangen werden, dass die Bewertungen dennoch ausreichende Aussagekraft besitzen.

5. Abschließende Beurteilungen

Das letzte Kapitel schließt mit zusammenfassenden Beurteilungen, einer Übersicht der entstehenden STI-Werte und beantwortet die Frage, ob die eingangs beschriebene Hypothese be- oder widerlegt werden kann. Außerdem wird ein Vergleich der zu erwartenden Kosten für die verschiedenen Qualitätsstufen von Raumakustik und PA aufgestellt und die nach den gewonnenen Erkenntnissen wirtschaftlichste Kombination identifiziert. Schlussendlich wird beschrieben, inwieweit aus den Ergebnissen Rückschlüsse für die gängige Praxis, sowie für verschiedene planerische Entscheidungen gezogen werden können.

5.1. Überprüfung des Sprachübertragungsindex STI

Zur noch offenen Überprüfung des Sprachübertragungsindex für die verschiedenen Wirkkombinationen aus Raumakustik, Beschallung und Hörposition wird eine dreifaktorielle Varianzanalyse durchgeführt (unabhängige Stichproben). Die Messwerte werden aus den jeweiligen Wirkkombinationen durch die Software EASE gewonnen und zur Software SPSS übertragen.

Für alle Wirkkombinationen werden zufriedenstellende Werte für die Sprachverständlichkeit erreicht. Der kleinste erreichte STI-Wert liegt mit 0,630 deutlich über dem Durchschnitt und wäre in der Praxis gut zu akzeptieren. Die grafischen Darstellungen in Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen eine zu erwartende Entwicklung. Mit steigender Qualität der Raumakustik, verbessert sich auch der Sprachübertragungsindex. Die verschiedenen PAs zeigen vor Allem in der Kombination RA_m und HP_s zwar kleine, aber erkennbare Unterschiede, die jedoch mit verbesserter Raumakustik stetig abnehmen und damit unbedeutender werden (Abbildung 35).

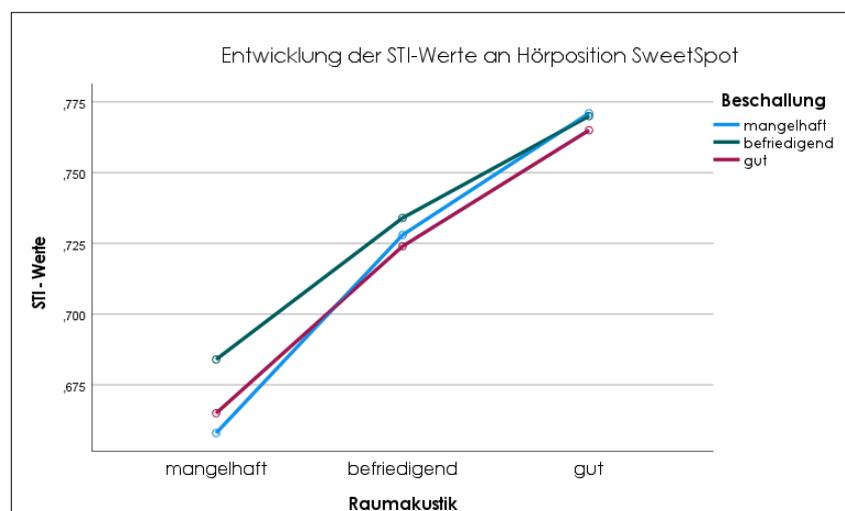


Abbildung 35: Darstellung der STI-Werte am Hörerort SweetSpot (Quelle: SPSS)

In HP_D fallen diese Unterschiede der PAs noch geringer aus, womit letztlich keine Aussage zu den Auswirkungen der verschiedenen PAs bzgl. ihres Einflusses auf den STI möglich ist (Abbildung 36). Der STI-Wert scheint in dieser Analyse und Darstellung vor

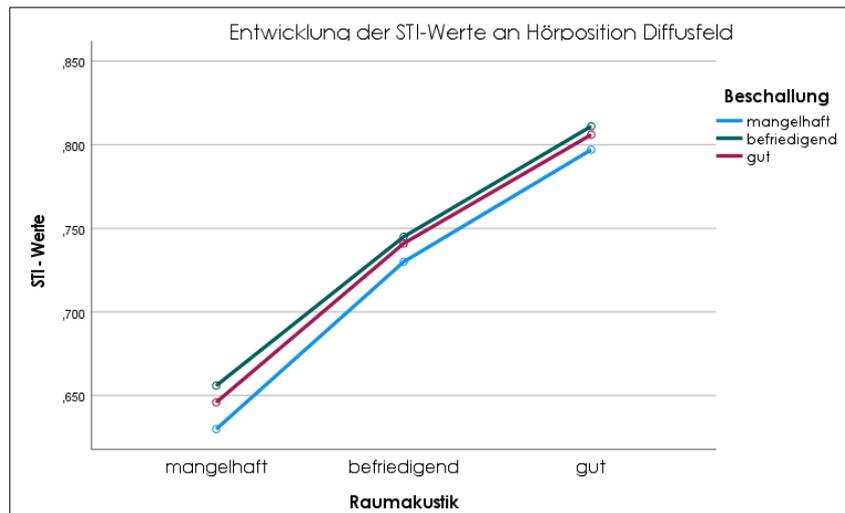


Abbildung 36: Darstellung der STI-Werte am Hörerort Diffusfeld (Quelle: SPSS)

Allem von den Faktoren HP und RA beeinflusst zu werden und die Qualität der PA scheint auch hier nur eine untergeordnete Rolle zu spielen.

5.2. Messung der Raumakustik der referenzierten Veranstaltungsstätte

Um eine Verbindung zwischen den hier genutzten virtuellen Simulationen und der Realität zu schaffen, wurde in der als Referenz genutzten Veranstaltungsstätte eine Messung der Raumakustik durchgeführt. Mit dem Gerät NTi XL2 wurden T30-Messungen vorgenommen und zusätzlich wurde die Impulsantwort (IR) des Raumes an 6 unterschiedlichen Positionen aufgezeichnet, um sie in EASE analysieren zu können. Die Schallquelle bildeten drei Luftballons von je einem Meter Durchmesser um ausreichend tiefe Frequenzen zu generieren, die zum Platzen gebracht wurden. Die gemessenen Werte werden nach dem in dieser Arbeit verwendeten Prinzip (siehe 3.2.2) der Bewertungstabelle zugeführt, um die Raumakustik kategorisieren zu können. Mit der vor Ort durchgeführten Messung können nun durch das Messgerät NTi XL2 auch Werte außerhalb der von EASE gesetzten technischen Grenzen genutzt werden, also auch Frequenzen unterhalb 100Hz. Interessant ist hier auch, inwieweit sich die Ergebnisse der Messung von der Analyse der Impulsantwort mittels EASE unterscheiden, daher werden beide Varianten in der folgenden Tabelle dargestellt. Übersichten der zugrundeliegenden Daten finden sich in Anhang 10.

<u>Parameter</u>	<u>NTi XL2</u>	<u>IR</u>	<u>Pkte</u>	<u>Faktor</u>	<u>Prod.</u>	<u>Ges.</u>
T30 (100Hz-160Hz)	2,14 s	1,99 s	2	5	10	<u>33</u>
T30 (200Hz-2,5kHz)	1,25 s	1,42 s	2	4	8	
T10/T30 (100Hz-2,5kHz)	--	0,97	3	3	9	
C50 (6 Pos)	--	1,66 dB	2	2	4	
BR	1,25	1,18	2	1	2	

Tabelle 9: lokal gemessene, raumakustische Werte der als Referenz genutzten Veranstaltungsstätte

Aus den Messwerten ergibt sich eine Veranstaltungsstätte mit vereinzelt guten Werten der Raumakustik, die im Gesamtergebnis befriedigend bewertet werden kann und für den vorrangigen Zweck (Musik- und Vortragsveranstaltungen) gut geeignet ist. Die Unterschiede zwischen den beiden Messvarianten (Messgerät und EASE) schwanken hier zwischen 5 und 13 Prozent.

5.3. Aufstellung eines Kostenvergleichs

Interessant ist nach der Darstellung der Ergebnisse auch eine Gegenüberstellung der zu erwartenden Kosten. Dafür wurden die Kosten für die Beschallungssysteme aus offiziellen Preislisten und durch Anfragen des jeweiligen Vertriebs gewonnen. Die Planung und Installation der Beschallungssysteme wird mit 32 Mannstunden zu je 70€ veranschlagt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Hängepunkte bereits statisch geprüft wurden und sämtliche sicherheitsrelevanten Grundvoraussetzungen gegeben sind.

Die Kalkulation für die Umsetzung der raumakustischen Maßnahmen folgt der DIN 276 sowie der HOAI (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure). In erster Linie werden nach der Planung einer Akustikingenieurin und der Architektin absorbierende Materialien an den Oberflächen (Wände, Decke, etc.) angebracht. Die Materialkosten (Kostengruppe 479) sind hier mit durchschnittlich 70 € pro m² veranschlagt. Der zeitliche Aufwand zur Durchführung der Baumaßnahmen ist mit 0,25 Stunden (15 Minuten) pro m² zu 70 € Stundenlohn kalkuliert. Die Leistung der Architektin liegt in der Umsetzung der Leistungsphasen 4-8 und wird nach HOAI (Honorarzone 1) mit 9% an der Gesamtsumme der Materialkosten vergütet. Die Akustikingenieurin setzt die Leistungsphasen 1-3 um und wird nach HOAI (Honorarzone 1) mit 7% an der Gesamtsumme der Materialkosten vergütet.

Im Anhang 11 finden sich detaillierte Kostenaufstellungen zu den Beschallungssystemen und den raumakustischen Baumaßnahmen.

Die Gesamtkosten belaufen sich gerundet zu:

Raumakustik 1, mangelhaft:	126375 €
Raumakustik 2, befriedigend:	173475 €
Raumakustik 3, gut:	239545 €
Beschallung 1, mangelhaft – dbTechnologies:	87476 €
Beschallung 2, befriedigend – Seeburg Acoustic Line:	139758 €
Beschallung 3, gut – d&b audiotechnik:	428245 €

Die in der Realität oft anzutreffende Kombination aus mangelhafter Akustik und guter (und teurer) PA, würde Kosten in Höhe von 554620 € verursachen und könnte dennoch nach den Erkenntnissen dieser Arbeit keine zufriedenstellenden Ergebnisse erreichen. Weitaus bessere Ergebnisse (beschränkt auf das Versuchsdesign dieser Arbeit) erzielt die Kombination aus guter Raumakustik und mangelhafter PA und läge mit 327021 € noch deutlich unter der ersten Kombination. Die mangelhafte PA kann jedoch nach Meinung des Autors und wegen der beschriebenen Einschränkungen der Untersuchung nicht ohne jeden Zweifel empfohlen werden, daher können bessere Ergebnisse mit der Kombination Raumakustik gut und PA befriedigend erwartet werden (Kosten: 379303 €). Diese Kombination ist nach Meinung des Autors zu wählen, wenn in einer Veranstaltungsstätte vorrangig Vortragsveranstaltungen stattfinden. Die beste und wirtschaftlichste Kombination für vorrangig musikalisches Programm wäre mit befriedigender Raumakustik und befriedigender PA (Kosten: 313233 €) erreicht.

In dem speziellen Fall, dass der Betreiber einer Veranstaltungsstätte nicht in die Akustik eingreifen kann oder darf (bspw. wegen Denkmalschutz), wäre die Wahl der guten und teuersten PA ratsam, da sie wegen der präzisen Richtwirkung in mangelhafter Akustik noch die besten Ergebnisse erreichen kann.

Es sei hier ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die vorliegende Kalkulation überschlägig erfolgte und keinen Anspruch an hohe Genauigkeit hat. Sie zeigt lediglich grobe Abschätzungen und daraus folgende Tendenzen.

5.4. Klärung der Hypothesen und Erkenntnisgewinn

Auf der Grundlage der gewonnenen Daten und Ergebnisse kann bestätigt werden, dass die Raumakustik einer Veranstaltungsstätte stets einen großen Einfluss auf den Klang ausübt. In allen Analysen ist die Raumakustik der herausstechende Faktor, der die Ergebnisse des Hörversuchs am stärksten beeinflusst. Die Qualität der verschiedenen eingesetzten Beschallungsanlagen hat zumindest in dieser Untersuchung und unter den geltenden Einschränkungen (siehe 4.3) nur geringe Auswirkungen auf das Ergebnis und gültige Aussagen über deren Wirkung sind nicht möglich. Dennoch sind Tendenzen erkennbar, dass besonders in mangelhaften raumakustischen Umgebungen die Qualität der Beschallung einen Unterschied hervorruft und die bessere Richtwirkung der Lautsprecher einen Vorteil bedeutet. Mit Verbesserung der Raumakustik nimmt jedoch auch die Wichtigkeit einer präzisen Richtwirkung ab und andere Qualitätsmerkmale der Beschallung, wie bspw. der Frei- und Diffusfeldfrequenzgang scheinen eine größere Rolle zu spielen. Diese Erkenntnisse können jedoch nicht allgemeingültig getroffen werden und sind auf den Versuchsrahmen dieser Arbeit begrenzt. Eines der wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit ist aber – und hier ist eine allgemeingültige Aussage möglich – dass die Verbesserung der Raumakustik stets den größten Einfluss auf die Qualität des Gesamtergebnisses ausübt. Natürlich hat auch die Lage des Hörerorts eine Auswirkung, jedoch zeigen die Analysen in Kapitel 4.2, dass auch diese Variable in ihrer Bedeutung mit verbesserter Raumakustik abnimmt. Die eingangs beschriebenen Hypothesen, können also im Rahmen dieses Experiments, als bestätigt angesehen werden.

Eine weitere interessante Erkenntnis aus dem Hörversuch ist der erkennbar große Unterschied im Qualitätsanspruch zwischen den Stimuli Musik und Sprache. So liegen die Ansprüche an eine gute Sprachbeschallung weitaus höher und die Beurteilungen fallen deutlich kritischer und analytischer aus als für das Stimulus Musik. Bedenkt man den Zweck der beiden Formate, sollten auch Beschallungsanlagen grundsätzlich anders geplant werden. So dienen Vortragsveranstaltungen vor Allem dem Informationsaustausch, daher muss Sprachverständlichkeit immer gegeben sein. Der Einsatz von mehreren in der Halle verteilten Lautsprechern (bspw. DelayLines) ist hier äußerst sinnvoll, besonders unter schlechten raumakustischen Bedingungen. Musikveranstaltungen, bspw. Konzerte werden als szenische Darstellung angesehen und der optische und akustische Fokus liegt beim Geschehen auf der

Bühne. Der Zweck dieses Formats liegt eher auf dem Transport von Emotionen, weshalb akustische Unausgewogenheiten weniger stark ins Gewicht fallen und eher „verziehen“ werden.

Die Beantwortung der Frage ob hohe Investitionen, auch stets mit guten klanglichen Ergebnissen korrelieren, ist nicht zweifelsfrei möglich. Wie oben beschrieben, führen Investitionen in eine gute Raumakustik immer zu besseren Ergebnissen. Die generierten Datensätze lassen jedoch eine solche Aussage für die Variable Beschallung nicht zu und es konnte nicht geklärt werden, ob starke preisliche Unterschiede gleichbedeutend mit starken klanglichen Unterschieden einhergehen. Es scheint deswegen empfehlenswert zu sein, bei anstehenden Investitionen und Budgetentscheidungen zuerst den Faktor Raumakustik zu bedenken und erst im Anschluss die für den geplanten Zweck der Veranstaltungsstätte optimale Beschallung zu wählen. Bei der Auswahl gelten oft, zusätzlich zu den qualitativen Ansprüchen, auch noch andere Kriterien. Häufig werden von Showproduktionen Beschallungsanlagen eines bestimmten Herstellers ausdrücklich gefordert, oder sind in Ausschreibungstexten eindeutig formuliert. Damit sind die Entscheidungen von vornherein stark eingeschränkt und müssen nicht nur wirtschaftlich, sondern auch firmenpolitisch sinnvoll getroffen werden. Weitere Faktoren wie Bedienbarkeit, Unterstützung durch den Hersteller (Kundendienst), Qualität der Software, Zukunftsfähigkeit der Technologien, Ausfallsicherheit sowie Wiederverkaufswert wurden nicht weiter untersucht und sollten bei der Wahl der Beschallungsanlage natürlich ebenfalls bedacht werden.

Zusammenfassend erwecken die gewonnen Erkenntnisse den Anschein, dass der Einfluss der Raumakustik eher objektiv beurteilt wurde, die Qualität der Beschallung jedoch tendenziell subjektiv. Diese Einschätzung ist aufgrund der Datenlage statistisch nicht belegbar, öffnet jedoch Raum für weitergehende Untersuchungen. Die Ergebnisse dieser Arbeit geben also nicht nur Aufschluss über wichtige Unterschiede der beschriebenen Einflussfaktoren, sondern liefern auch gleichzeitig die Möglichkeit neue Hypothesen aufzustellen, was ganz im Sinne der Wissenschaft und Forschung neue interessante Diskussionen ermöglicht.

LITERATURVERZEICHNIS

ADA - Acoustic Design Ahnert, 2000. *Tutorial für EASE 4.0*. Berlin: Renkus-Heinz Inc..

Adelman-Larsen, N. W., 2014. *Rock and Pop Venues - Acoustic and Architectural Design*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Adelman-Larsen, N. W., Thompson, E. R. & Gade, A. C., 2007. Acoustics in rock and pop music halls. *Audio Engineering Society - Convention Paper*, 05-08 05, p. 01.

Adelman-Larsen, N. W., Thompson, E. R. & Gade, A. C., 2010. Suitable reverberation times for halls for rock and pop music. *The Journal of the Acoustical Society of America*, January, pp. 247-255.

AFMG (Ahnert Feistel Media Group), 2016. *EASE Speaker Lab - User's Guide*, s.l.: s.n.

AFMG Ahnert Feistel Media Group, kein Datum *EASE 4.4 User's Manual*, Berlin: s.n.

Ahnert, W. & Steffen, F., 1999. *Sound Reinforcement Engineering, Fundamentals and Practice*. London, United Kingdom: E & FN Spon.

Anon., kein Datum *www.wikipedia.org*. [Online]

Available at:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/Kurve_gleicher_lautst%C3%A4rke.svg
[Zugriff am 21 01 2022].

Berkovits, I., Hancock, G. R. & Nevitt, J., 2000. *Bootstrap Resampling Approaches for repeated Measure Designs: Relative Robustness to Sphericity and Normality Violations*. Educational and Psychological Measurement, Vol. 60 No. 6 Hrsg. CA: SAGE Publications, Inc..

Berry, W. D., 1993. *Understanding Regression Assumptions*. Sage University Paper series on Quantitative Applications in the Social Sciences. series 07-092 Hrsg. Newbury Park, CA: SAGE Publications, Inc..

e.V., Deutsches Institut für Normung, kein Datum *DIN 18041:2016-03, Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Fahrmeier, L. et al., 1997. *Statistik - Der Weg zur Datenanalyse*. 8 Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Fuchs, H. V., 2018. *Considering the Bass Ratio in acoustically outstanding Concert Halls*, Berlin: s.n.

Goertz, A., 2014. Testbericht dbTechnologies DVA T8. *Production Partner - Fachmagazin für Veranstaltungstechnik*, 05.

Goertz, A. & Makarski, M., 2008. *Interaktion von Lautsprecher und Raum im Tonstudio*, s.l.: s.n.

Goertz, A., Makarski, M. & Feistel, S., 2010. *Welche Lautsprecherdaten werden für eine aussagekräftige Simulation benötigt?*, 26. Tonmeistertagung - VDT International Convention: s.n.

Görtz, A., 2016. *Sprachverständlichkeit - STI Basiswissen*, s.l.: s.n.

Görtz, A. & Laws, M., kein Datum *Mefßtechnische Kriterien zur Beurteilung von PA-Lautsprechern und deren Bedeutung für die klanglichen Qualitäten*, Aachen: s.n.

<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/direktschall/3164>, 2021. *www.spektrum.de*. [Online] Available at: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/direktschall/3164> [Zugriff am 10 05 2021].

Huxley's neue Welt, 2017. *Venue Specs*, Berlin: s.n.

KLING & FREITAG GmbH, 2017. *Users's Manual E90 MK2*, Hannover: s.n.

Kuttruff, H., 2000. *Room Acoustics*. London: Spon Press.

Lokki, T., Pätynen, J., Kuusinen, A. & Tervo, S., 2012. Disentangling preference ratings of concert hall acoustics using subjective sensory profiles. *The Journal of the Acoustical Society of America* 132(5), pp. 3148-3161.

Sengpiel, E., 2021. *www.sengpielaudio.com*. [Online]

Available at: <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-wirkungsgrad.htm>

Vorländer, M., 2008. *Auralization - Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic virtual Reality*. 1 Hrsg. Aachen: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Weinzierl, S., Lepa, S. & Ackermann, D., 2018. A measuring instrument for the auditory perception of rooms: The Room Acoustical Quality Inventory (RAQI). *The Journal of the Acoustical Society of America* 144, 1245, pp. 1245-1257.

EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

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

Berlin, 08.04.2022

Anton Kempe

ANHANGSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZ. DES ANHANGS.....	XII
TABELLENVERZ. DES ANHANGS	XIV
Anhang 1: Basisarchitektur der Veranstaltungsstätte	- 1 -
Anhang 2: Raumakustik 1 – mangelhaft	- 4 -
Anhang 3: Raumakustik 2 – befriedigend	- 6 -
Anhang 4: Raumakustik 3 – gut	- 8 -
Anhang 5: Beschallung 1 – mangelhaft	- 10 -
Anhang 6: Beschallung 2 – befriedigend.....	- 14 -
Anhang 7: Beschallung 3 – gut	- 18 -
Anhang 8: Übersichten zum Hörversuch	- 23 -
Anhang 9: Übersichten zur vierfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung	- 26 -
Anhang 10: Daten zur raumakustischen Messung der Referenzhalle.....	- 49 -
Anhang 11: Überschlägige Kostenaufstellung	- 51 -

ABBILDUNGSVERZ. DES ANHANGS

ABB. 1: GRUNDRISS DER VERANSTALTUNGSSTÄTTE. (HUXLEY'S NEUE WELT, 2017, P. 9).....	- 1 -
ABB. 2: PERSPEKTIVISCHE ANSICHT DER VIRTUELLEN VERANSTALTUNGSSTÄTTE – 1. (QUELLE: SOFTWARE EASE)	- 2 -
ABB. 3: PERSPEKTIVISCHE ANSICHT DER VIRTUELLEN VERANSTALTUNGSSTÄTTE – 2. (QUELLE: SOFTWARE EASE)	- 2 -
ABB. 4: PERSPEKTIVISCHE ANSICHT DER VIRTUELLEN VERANSTALTUNGSSTÄTTE – 3. (QUELLE: SOFTWARE EASE)	- 2 -
ABB. 5: ÜBERSICHT ZUR POSITION DER HÖRPOSITIONEN "SWEETSPOT" UND "DIFFUSFELD" (QUELLE: EASE)	- 3 -
ABB. 6: EIGENSCHAFTEN DER IDEALISIERTEN PUNKTSCHALLQUELLE SPHERE, DIE ZUR ANREGUNG DES RAUMES GENUTZT WIRD, UM DIE RAUMAKUSTISCHEN EIGENSCHAFTEN ZU ERMITTELN. (QUELLE: SOFTWARE EASE).....	- 3 -
ABB. 7: GEMITTELTE NACHHALLZEIT T30 DER RAUMAKUSTIK 1 – MANGELHAFT (QUELLE: EASE)	- 4 -
ABB. 8: GEMITTELTE NACHHALLZEIT T10 DER RAUMAKUSTIK 1 – MANGELHAFT (QUELLE: EASE)	- 4 -
ABB. 9: DARSTELLUNG DER KLARHEIT C50 DER RAUMAKUSTIK 1 AN DER POSITION "SWEETSPOT" (QUELLE: EASE)	- 5 -
ABB. 10: DARSTELLUNG DER KLARHEIT C50 DER RAUMAKUSTIK 1 AN DER POSITION "DIFFUSFELD" (QUELLE: EASE).....	- 5 -
ABB. 11: GEMITTELTE NACHHALLZEIT T30 DER RAUMAKUSTIK 2 – BEFRIEDIGEND (QUELLE: EASE).....	- 6 -
ABB. 12: GEMITTELTE NACHHALLZEIT T10 DER RAUMAKUSTIK 2 – BEFRIEDIGEND (QUELLE: EASE).....	- 6 -
ABB. 13: DARSTELLUNG DER KLARHEIT C50 DER RAUMAKUSTIK 2 AN DER POSITION "SWEETSPOT" (QUELLE: EASE)	- 7 -
ABB. 14: DARSTELLUNG DER KLARHEIT C50 DER RAUMAKUSTIK 2 AN DER POSITION "DIFFUSFELD" (QUELLE: EASE).....	- 7 -
ABB. 15: GEMITTELTE NACHHALLZEIT T30 DER RAUMAKUSTIK 3 – GUT (QUELLE: EASE)	- 8 -
ABB. 16: GEMITTELTE NACHHALLZEIT T10 DER RAUMAKUSTIK 3 – GUT (QUELLE: EASE)	- 8 -
ABB. 17: DARSTELLUNG DER KLARHEIT C50 DER RAUMAKUSTIK 3 AN DER POSITION "SWEETSPOT" (QUELLE: EASE)	- 9 -
ABB. 18: DARSTELLUNG DER KLARHEIT C50 DER RAUMAKUSTIK 3 AN DER POSITION "DIFFUSFELD" (QUELLE: EASE).....	- 9 -
ABB. 19: ÜBERSICHT DER EINGESTELLTEN PARAMETER ZUR BERECHNUNG DER LAUTSPRECHERDATEN (QUELLE: EASE).....	- 10 -
ABB. 20: DIRECTIVITY INDEX DES LAUTSPRECHERS DBTECHNOLOGIES DVA T8. (QUELLE: SOFTWARE EASE)	- 10 -
ABB. 21: DARSTELLUNG DES MINIMALEN, HORIZONTALEN ABSTRAHLWINKELS DES LAUTSPRECHERS DBTECHNOLOGIES DVA T8. (QUELLE: SOFTWARE EASE)	- 11 -
ABB. 22: POLARDIAGRAMM DES LAUTSPRECHERS DBTECHNOLOGIES DVA T8 BEI 300HZ. (QUELLE: SOFTWARE EASE).....	- 11 -
ABB. 23: POLARDIAGRAMM DES LAUTSPRECHERS DBTECHNOLOGIES DVA T8 BEI 400HZ. (QUELLE: SOFTWARE EASE).....	- 12 -
ABB. 24: POLARDIAGRAMM DES LAUTSPRECHERS DBTECHNOLOGIES DVA T8 BEI 500HZ. (QUELLE: SOFTWARE EASE).....	- 12 -
ABB. 25: SYSTEMDESIGN DER BESCHALLUNG 1 - MANGELHAFT: DBTECHNOLOGIES DVA T8 (QUELLE: EASE FOCUS)	- 13 -
ABB. 26: SEITLICHE ANSICHT DER BESCHALLUNG 1 - MANGELHAFT: DBTECHNOLOGIES DVA T8 (QUELLE: EASE FOCUS)	- 13 -
ABB. 27: GESAMTLAYOUT DER BESCHALLUNG 1 - MANGELHAFT: DBTECHNOLOGIES DVA T8 MIT DVA S30N (SUBS) (QUELLE: EASE).....	- 13 -
ABB. 28: DIRECTIVITY INDEX DES LAUTSPRECHERS SEEBURG GALEO C (QUELLE: EASE).....	- 14 -
ABB. 29: DARSTELLUNG DES MINIMALEN ABSTRAHLWINKELS DES LAUTSPRECHERS SEEBURG GALEO C (QUELLE: EASE)	- 14 -
ABB. 30: POLARDIAGRAMM DES DES LAUTSPRECHERS SEEBURG GALEO C BEI 300HZ (QUELLE: EASE)	- 15 -
ABB. 31: POLARDIAGRAMM DES LAUTSPRECHERS SEEBURG GALEO C BEI 400HZ (QUELLE: EASE).....	- 15 -
ABB. 32: POLARDIAGRAMM DES LAUTSPRECHERS SEEBURG GALEO C BEI 500HZ (QUELLE: EASE).....	- 16 -
ABB. 33: SYSTEMDESIGN DER BESCHALLUNG 2 - BEFRIEDIGEND: SEEBURG GALEO C (QUELLE: EASE FOCUS)	- 16 -
ABB. 34: SEITLICHE ANSICHT DER BESCHALLUNG 2 - SEEBURG GALEO C (QUELLE: EASE FOCUS).....	- 17 -

ABB. 35: GESAMTLAYOUT DER BESCHALLUNG 2 - SEEBURG GALEO C MIT GALEO SUB (QUELLE: EASE).....	- 17 -
ABB. 36: DIRECTIVITY INDEX DES LAUTSPRECHERS D&B AUDIOTECHNIK XSL8 (QUELLE: EASE)	- 18 -
ABB. 37: MINIMALER ABSTRAHLWINKEL DES LAUTSPRECHERS D&B AUDIOTECHNIK XSL8 (QUELLE: EASE).....	- 18 -
ABB. 38: POLARDIAGRAMM DES LAUTSPRECHERS D&B AUDIOTECHNIK XSL8 BEI 300HZ (QUELLE: EASE)	- 19 -
ABB. 39: POLARDIAGRAMM DES LAUTSPRECHERS D&B AUDIOTECHNIK XSL8 BEI 400HZ (QUELLE: EASE)	- 19 -
ABB. 40: POLARDIAGRAMM DES LAUTSPRECHERS D&B AUDIOTECHNIK XSL8 BEI 500HZ (QUELLE: EASE)	- 20 -
ABB. 41: SYSTEMDESIGN DER BESCHALLUNG 3 - GUT: D&B AUDIOTECHNIK XSL (QUELLE: D&B ARRAYCALC)	- 21 -
ABB. 42: SYSTEMDESIGN DER SYSTEMBÄSSE D&B AUDIOTECHNIK SL-SUB (QUELLE: D&B ARRAYCALC).....	- 21 -
ABB. 43: PHASENANPASSUNG ZWISCHEN D&B XSL UND D&B SL-SUB (QUELLE: D&B ARRAYCALC)	- 22 -
ABB. 44: GESAMTLAYOUT DER BESCHALLUNG 3 - D&B AUDIOTECHNIK XSL MIT SL-SUB (QUELLE: EASE).....	- 22 -
ABB. 45: BEISPIELBLATT DES BEWERTUNGSBOGENS FÜR DIE VERSUCHSTEILNEHMER	- 25 -
ABB. 46: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND BESCHALLUNG, AV: QUALITÄT (QUELLE: SPSS)	- 27 -
ABB. 47: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs BESCHALLUNG UND STIMULUS, AV: QUALITÄT (QUELLE: SPSS)	- 27 -
ABB. 48: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs STIMULUS UND HÖRPOSITION, AV: QUALITÄT (QUELLE: SPSS).....	- 28 -
ABB. 49: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND STIMULUS, AV: NACHHALL (QUELLE: SPSS).....	- 30 -
ABB. 50: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs BESCHALLUNG UND STIMULUS, AV: NACHHALL (QUELLE: SPSS).....	- 30 -
ABB. 51: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs BESCHALLUNG UND HÖRPOSITION, AV: NACHHALL (QUELLE: SPSS).....	- 31 -
ABB. 52: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs STIMULUS UND HÖRPOSITION, AV: NACHHALL (QUELLE: SPSS)	- 31 -
ABB. 53: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND BESCHALLUNG, AV: RÄUMLICHKEIT (QUELLE: SPSS) ..	- 33 -
ABB. 54: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND STIMULUS, AV: RÄUMLICHKEIT (QUELLE: SPSS)	- 33 -
ABB. 55: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs BESCHALLUNG UND STIMULUS, AV: RÄUMLICHKEIT (QUELLE: SPSS)	- 34 -
ABB. 56: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs BESCHALLUNG UND HÖRPOSITION, AV: RÄUMLICHKEIT (QUELLE: SPSS)....	- 34 -
ABB. 57: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs STIMULUS UND HÖRPOSITION, AV: RÄUMLICHKEIT (QUELLE: SPSS).....	- 35 -
ABB. 58: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs BESCHALLUNG UND STIMULUS, AV: KLARHEIT (QUELLE: SPSS)	- 37 -
ABB. 59: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs BESCHALLUNG UND HÖRPOSITION, AV: KLARHEIT (QUELLE: SPSS)	- 37 -
ABB. 60: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs STIMULUS UND HÖRPOSITION, AV: KLARHEIT (QUELLE: SPSS)	- 38 -
ABB. 61: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND BESCHALLUNG, AV: INTIMITÄT (QUELLE: SPSS)	- 40 -
ABB. 62: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs BESCHALLUNG UND STIMULUS, AV: INTIMITÄT (QUELLE: SPSS)	- 40 -
ABB. 63: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs BESCHALLUNG UND HÖRPOSITION, AV: INTIMITÄT (QUELLE: SPSS).....	- 41 -
ABB. 64: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs STIMULUS UND HÖRPOSITION, AV: INTIMITÄT (QUELLE: SPSS).....	- 41 -
ABB. 65: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND PA, AV: VERSTÄNDLICHKEIT (QUELLE: SPSS)	- 43 -
ABB. 66: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND STIMULUS, AV: VERSTÄNDLICHKEIT (QUELLE: SPSS)...	- 43 -
ABB. 67: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs BESCHALLUNG UND STIMULUS, AV: VERSTÄNDLICHKEIT (QUELLE: SPSS)...	- 44 -
ABB. 68: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs STIMULUS UND HÖRPOSITION, AV: VERSTÄNDLICHKEIT (QUELLE: SPSS)	- 44 -
ABB. 69: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND BESCHALLUNG, AV: KLANGFÄRBUNG (QUELLE: SPSS) -	46 -
ABB. 70: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs BESCHALLUNG UND STIMULUS, AV: KLANGFÄRBUNG (QUELLE: SPSS).....	- 46 -
ABB. 71: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs BESCHALLUNG UND HÖRPOSITION, AV: KLANGFÄRBUNG (QUELLE: SPSS) .	- 47 -
ABB. 72: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs RAUMAKUSTIK UND HÖRPOSITION, AV: KLANGFÄRBUNG (QUELLE: SPSS) .	- 47 -
ABB. 73: INTERAKTIONEN ZWISCHEN DEN UVs STIMULUS UND HÖRPOSITION, AV: KLANGFÄRBUNG (QUELLE: SPSS)	- 48 -

TABELLENVERZ. DES ANHANGS

TAB. 1: AUFLISTUNG DER VERWENDETEN OBERFLÄCHENMATERIALIEN DER RAUMAKUSTIK 1 – MANGELHAFT	- 4 -
TAB. 2: AUFLISTUNG DER VERWENDETEN OBERFLÄCHENMATERIALIEN DER RAUMAKUSTIK 2 - BEFRIEDIGEND	- 6 -
TAB. 3: AUFLISTUNG DER VERWENDETEN OBERFLÄCHENMATERIALIEN DER RAUMAKUSTIK 3 - GUT.....	- 8 -
TAB. 4: ÜBERSICHT DER VERSCHIEDENEN KOMBINATIONEN DER 36 HÖRPROBEN.....	- 23 -
TAB. 5: RANDOMISIERUNG UND ZUORDNUNGSTABELLE DER HÖRPROBEN FÜR DIE TEILNEHMENDEN	- 24 -
TAB. 6: ÜBERSICHT ZU SPHÄRIZITÄT UND RESULTIERENDE SIGNIFIKANZ ZUR AV: QUALITÄT	- 26 -
TAB. 7: ÜBERSICHT ZU SPHÄRIZITÄT UND RESULTIERENDE SIGNIFIKANZ ZUR AV: NACHHALL	- 29 -
TAB. 8: ÜBERSICHT ZU SPHÄRIZITÄT UND RESULTIERENDE SIGNIFIKANZ ZUR AV: RÄUMLICHKEIT	- 32 -
TAB. 9: ÜBERSICHT ZU SPHÄRIZITÄT UND RESULTIERENDE SIGNIFIKANZ ZUR AV: KLARHEIT.....	- 36 -
TAB. 10: ÜBERSICHT ZU SPHÄRIZITÄT UND RESULTIERENDE SIGNIFIKANZ ZUR AV: INTIMITÄT	- 39 -
TAB. 11: ÜBERSICHT ZU SPHÄRIZITÄT UND RESULTIERENDE SIGNIFIKANZ ZUR AV: VERSTÄNDLICHKEIT	- 42 -
TAB. 12: ÜBERSICHT ZU SPHÄRIZITÄT UND RESULTIERENDE SIGNIFIKANZ ZUR AV: KLANGFÄRBUNG.....	- 45 -
TAB. 13: DATEN DES MESSGERÄTS NTi XL2 DER RAUMAKUSTISCHEN MESSUNG DER REFERENZHALLE	- 49 -
TAB. 14: IN EASERA AUSGEWERTETE DATEN DER AUFGEZEICHNETEN IMPULSANTWORTEN DER REFERENZHALLE	- 50 -
TAB. 15: ÜBERSCHLÄGIGE KOSTENÜBERSICHT FÜR DIE ANPASSUNG DER RAUMAKUSTIK	- 51 -
TAB. 16: ÜBERSCHLÄGIGE KOSTENAUFSTELLUNG FÜR DIE BESCHALLUNGSTECHNIK	- 52 -

Anhang 1: Basisarchitektur der Veranstaltungstätte

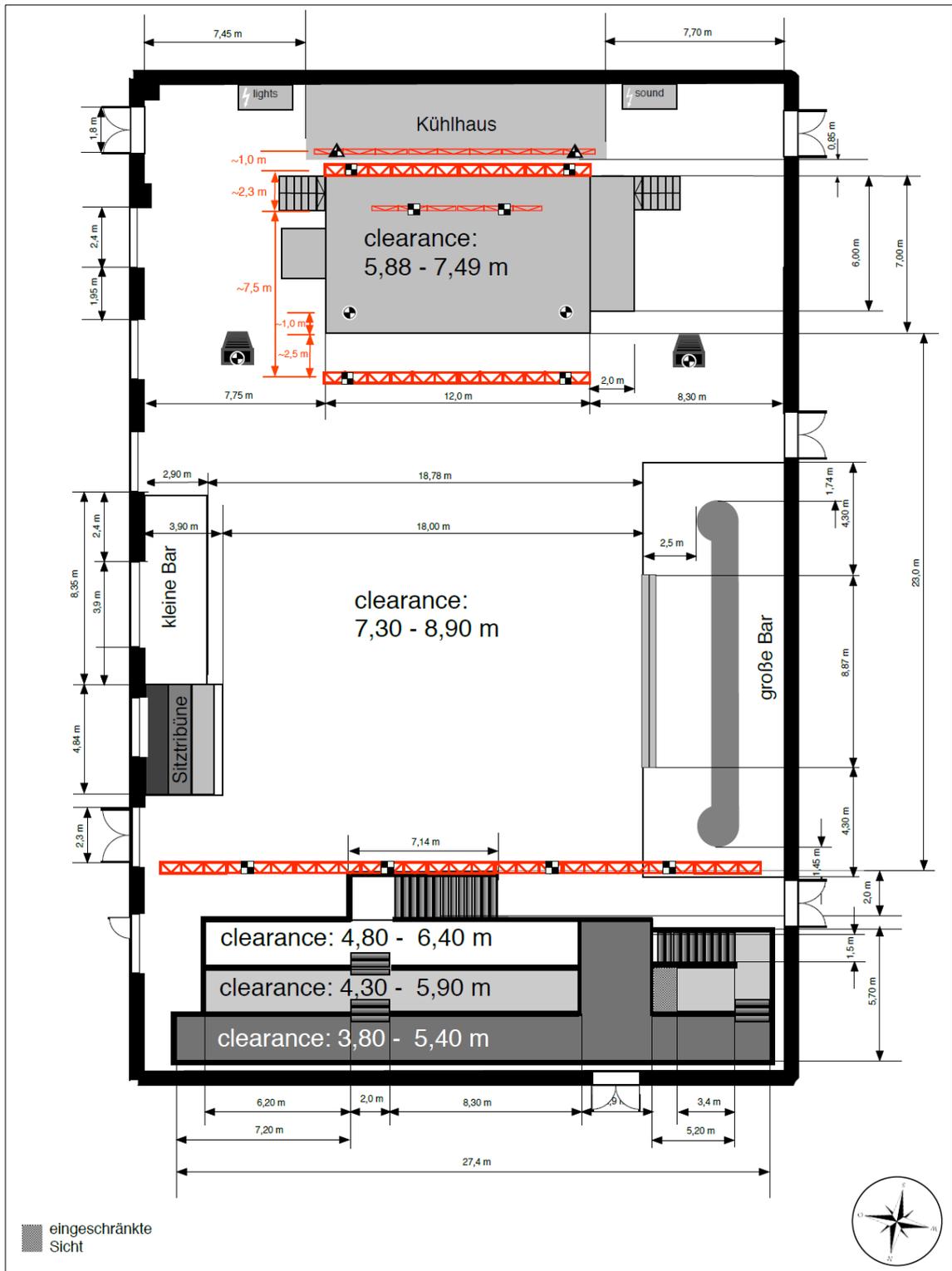


Abb. 1: Grundriss der Veranstaltungstätte. (Huxley's neue Welt, 2017, p. 9)

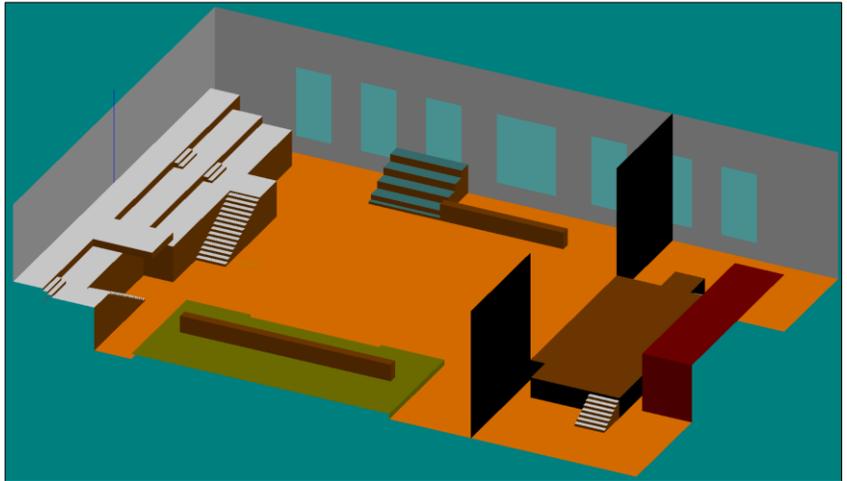


Abb. 2: perspektivische Ansicht der virtuellen Veranstaltungsstätte – 1. (Quelle: Software EASE)

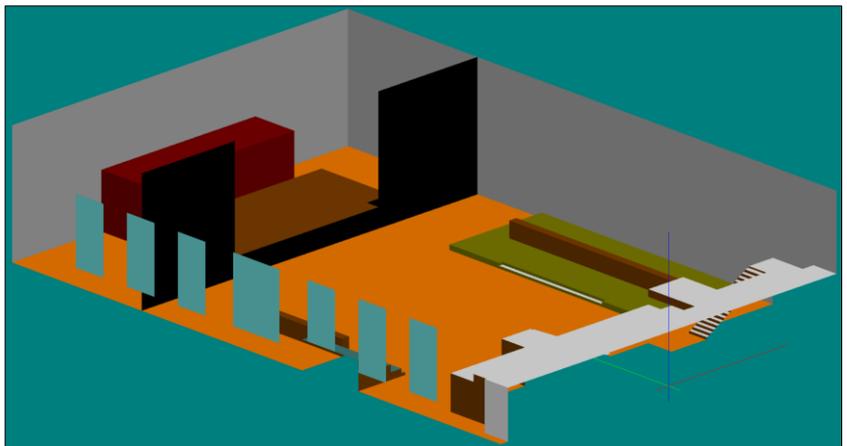


Abb. 3: perspektivische Ansicht der virtuellen Veranstaltungsstätte – 2. (Quelle: Software EASE)

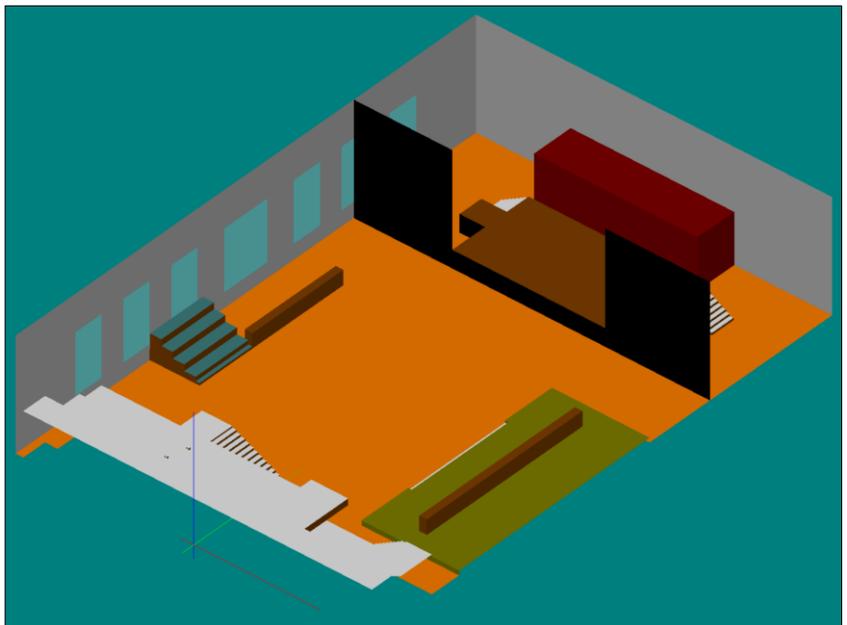


Abb. 4: perspektivische Ansicht der virtuellen Veranstaltungsstätte – 3. (Quelle: Software EASE)

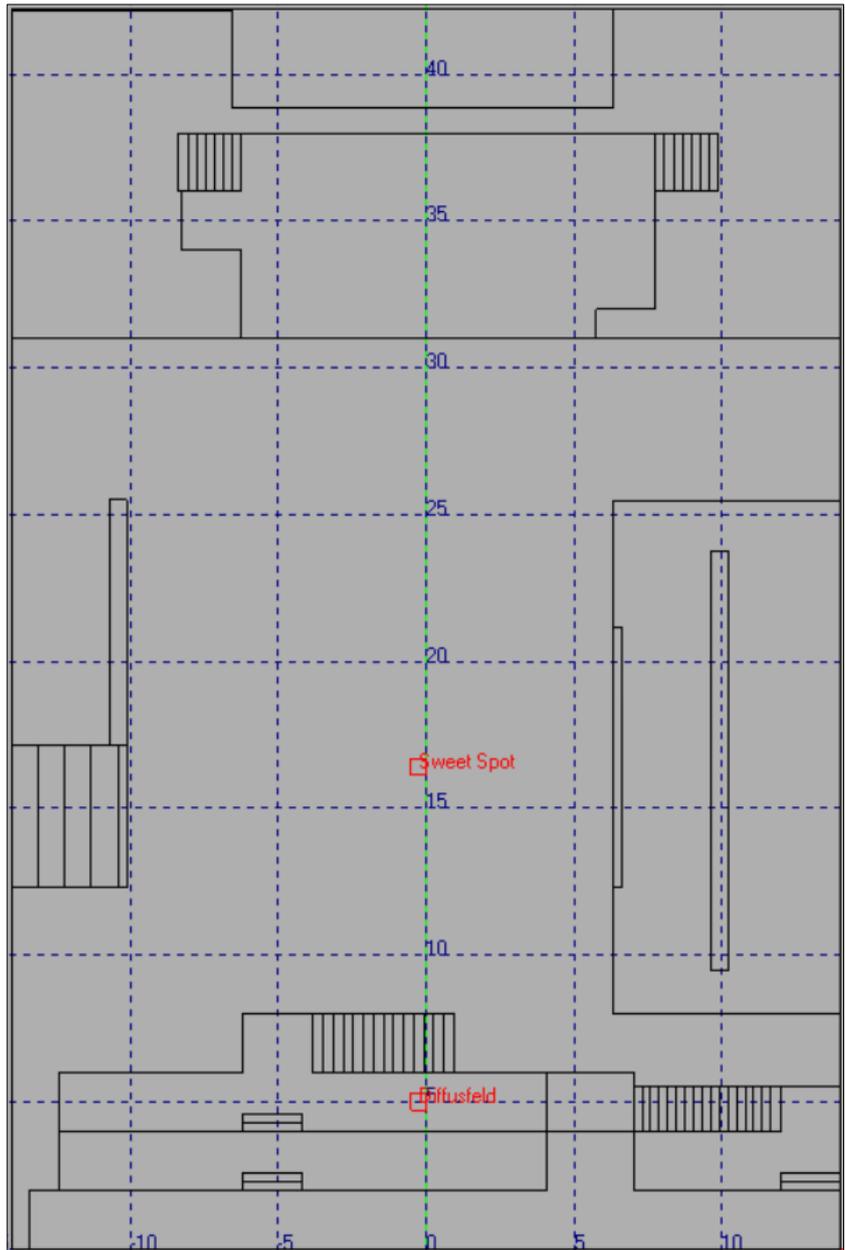


Abb. 5: Übersicht zur Position der Hörpositionen "SweetSpot" und "Diffusfeld" (Quelle: EASE)

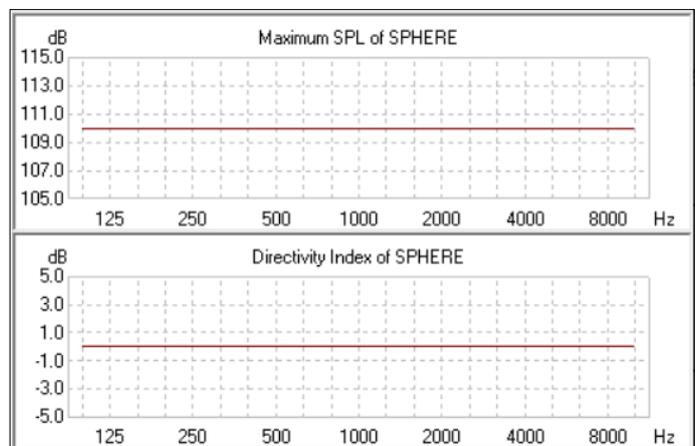


Abb. 6: Eigenschaften der idealisierten Punktschallquelle SPHERE, die zur Anregung des Raumes genutzt wird, um die raumakustischen Eigenschaften zu ermitteln. (Quelle: Software EASE)

Anhang 2: Raumakustik 1 – mangelhaft

Oberflächen	Material	Farbe
Podest (langer Tresen)	Hardwood Floor on Beams	dunkelgelb
Tresen	Spanplatte	braun
Bühnenboden	Spanplatte	braun
Bühnenumrandung	Bühnenvorhang	schwarz
Stehtribüne Boden	Riffelblech (Steel)	hellgrau
Treppenstufen	Riffelblech (Steel)	hellgrau
Sitztribüne Wand	Spanplatte	braun
Sitztribüne Sitzfläche	Holzstuhl	türkis
Bühnenhaus - Sichtbegrenzung	Bühnenvorhang	schwarz
Hallenboden	Parkett	orange
Kühlhaus	Tonziegel	dunkelrot
Hallenwand Fensterseite	Concrete Smooth	mittelgrau
Hallenwand langer Tresen	Concrete Smooth	mittelgrau
Hallenwand Stirnseite (Tribüne)	Concrete Smooth	mittelgrau
Hallenwand Stirnseite (Kühlhaus)	Concrete Smooth	mittelgrau
Hallendecke	Ceiling Baffle T200	dunkelgrau
Stehtribüne Wand	Velour Heavy	braun
Fenster	Window Glass	hellblau

Tab. 1: Auflistung der verwendeten Oberflächenmaterialien der Raumakustik 1 – mangelhaft

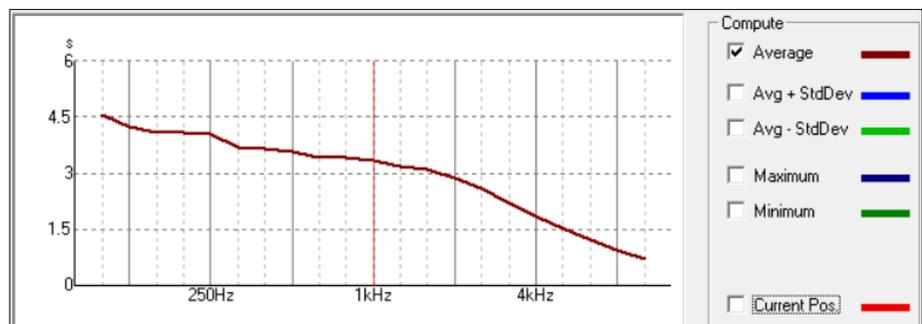


Abb. 7: gemittelte Nachhallzeit T_{30} der Raumakustik 1 – mangelhaft (Quelle: EASE)

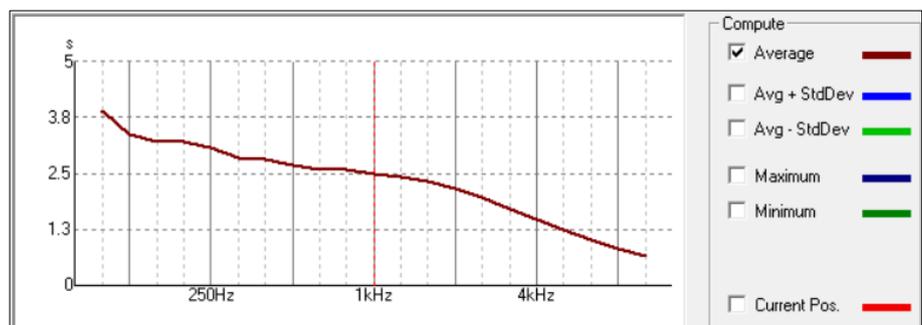


Abb. 8: gemittelte Nachhallzeit T_{10} der Raumakustik 1 – mangelhaft (Quelle: EASE)

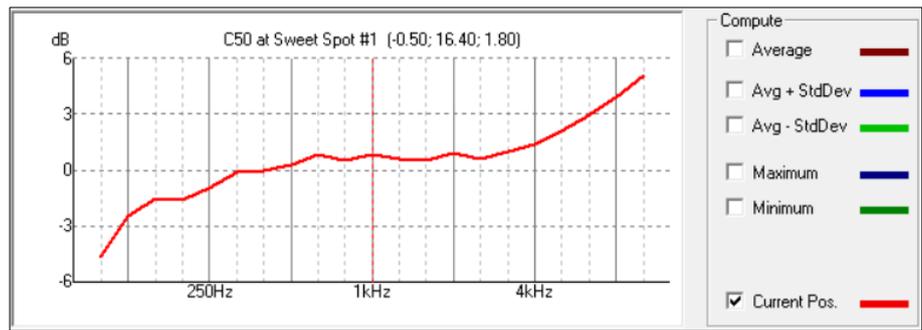


Abb. 9: Darstellung der Klarheit C50 der Raumakustik 1 an der Position "Sweetspot" (Quelle: EASE)

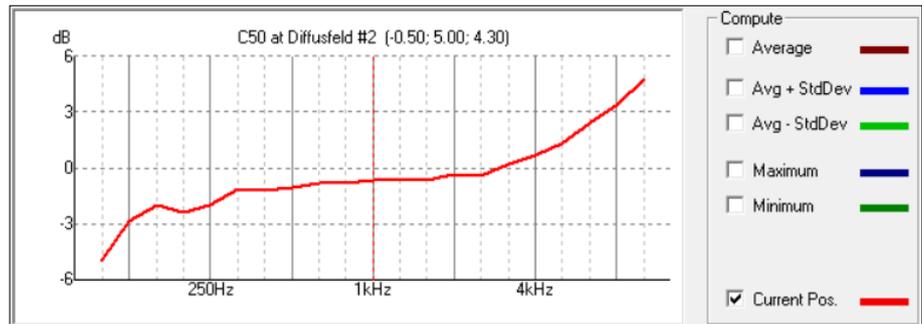


Abb. 10: Darstellung der Klarheit C50 der Raumakustik 1 an der Position "Diffusfeld" (Quelle: EASE)

Anhang 3: Raumakustik 2 – befriedigend

Oberflächen	Material	Farbe
Podest (langer Tresen)	Hardwood Floor on Beams	dunkelgelb
Tresen	Spanplatte	braun
Bühnenboden	Spanplatte	braun
Bühnenumrandung	Bühnenvorhang	schwarz
Stehtribüne Boden	Riffelblech (Steel)	hellgrau
Treppenstufen	Riffelblech (Steel)	hellgrau
Sitztribüne Wand	Spanplatte	braun
Sitztribüne Sitzfläche	Holzstuhl	türkis
Bühnenhaus - Sichtbegrenzung	Bühnenvorhang	schwarz
Hallenboden	Parkett	orange
Kühlhaus	Tonziegel	dunkelrot
Hallenwand Fensterseite	AK12-L-AB	mittelgrau
Hallenwand langer Tresen	Concrete Smooth	mittelgrau
Hallenwand Stirnseite (Tribüne)	Concrete Smooth	mittelgrau
Hallenwand Stirnseite (Kühlhaus)	Absorption and Diffuse Slot Board 29-3	mittelgrau
Hallendecke	Ceiling Baffle T200	dunkelgrau
Stehtribüne Wand	Velour Heavy	braun
Fenster	Window Glass	hellblau

Tab. 2: Auflistung der verwendeten Oberflächenmaterialien der Raumakustik 2 - befriedigend

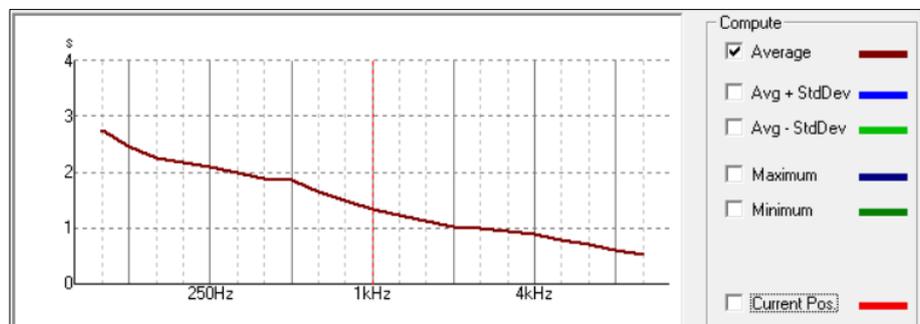


Abb. 11: gemittelte Nachhallzeit T30 der Raumakustik 2 – befriedigend (Quelle: EASE)

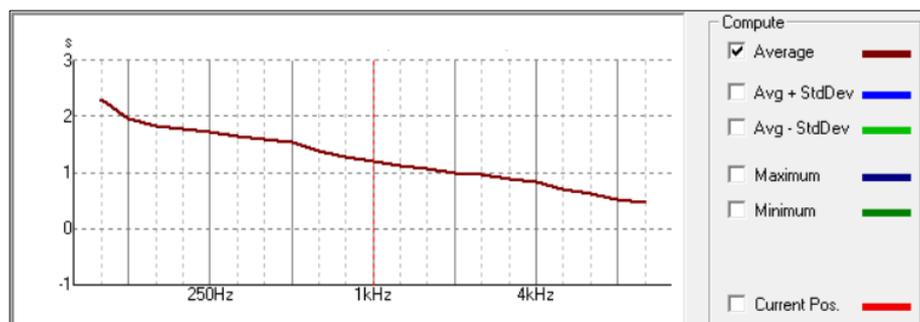


Abb. 12: gemittelte Nachhallzeit T10 der Raumakustik 2 – befriedigend (Quelle: EASE)

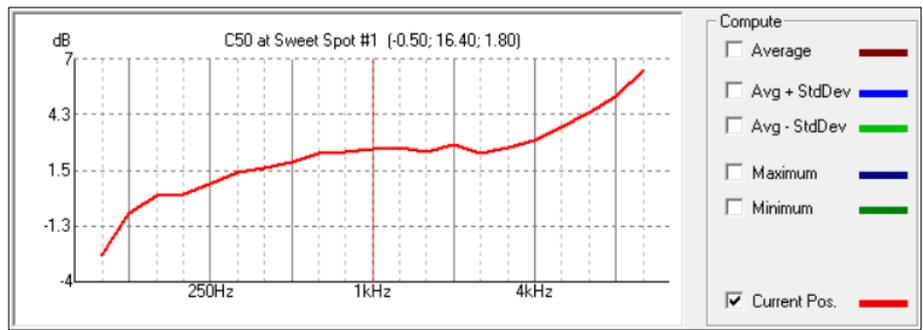


Abb. 13: Darstellung der Klarheit C50 der Raumakustik 2 an der Position "Sweetspot" (Quelle: EASE)

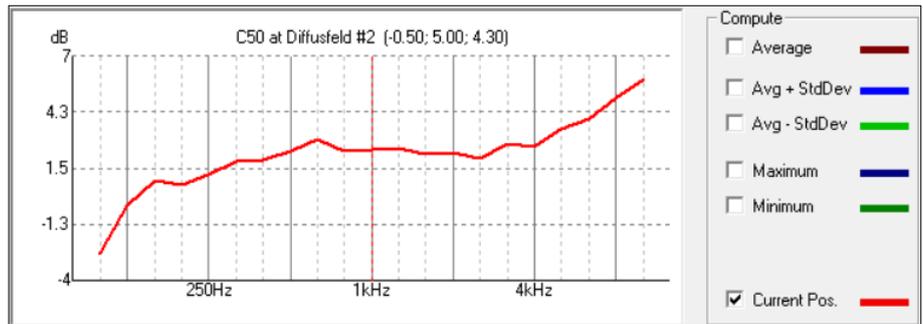


Abb. 14: Darstellung der Klarheit C50 der Raumakustik 2 an der Position "Diffusfeld" (Quelle: EASE)

Anhang 4: Raumakustik 3 – gut

Oberflächen	Material	Farbe
Podest (langer Tresen)	Hardwood Floor on Beams	dunkelgelb
Tresen	Spanplatte	braun
Bühnenboden	Spanplatte	braun
Bühnenumrandung	Bühnenvorhang	schwarz
Stehtribüne Boden	Riffelblech (Steel)	hellgrau
Treppenstufen	Riffelblech (Steel)	hellgrau
Sitztribüne Wand	Spanplatte	braun
Sitztribüne Sitzfläche	Holzstuhl	türkis
Bühnenhaus - Sichtbegrenzung	Bühnenvorhang	schwarz
Hallenboden	Parkett	orange
Kühlhaus	GYP5/8CEIL und HOLZ/AB20	dunkelrot
Hallenwand Fensterseite	AK12-L-AB	mittelgrau
Hallenwand langer Tresen	Absorption Perforated Panel CK16-16-10/3	mittelgrau
Hallenwand Stirnseite (Tribüne)	500HzPANEL	mittelgrau
Hallenwand Stirnseite (Kühlhaus)	Absorption and Diffuse Slot Board 29-3	mittelgrau
Hallendecke	Ceiling Baffle T200	dunkelgrau
Stehtribüne Wand 1	Velour Heavy	braun
Stehtribüne Wand 2	GYP5/8CEIL	braun
Fenster	Holz/AB30	hellblau

Tab. 3: Auflistung der verwendeten Oberflächenmaterialien der Raumakustik 3 - gut

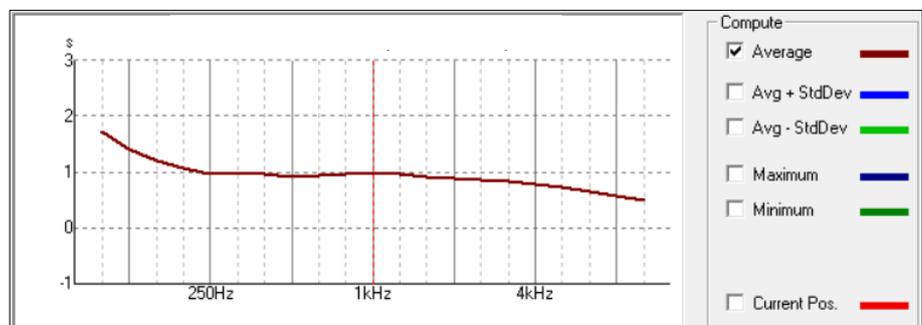


Abb. 15: gemittelte Nachhallzeit T30 der Raumakustik 3 – gut (Quelle: EASE)

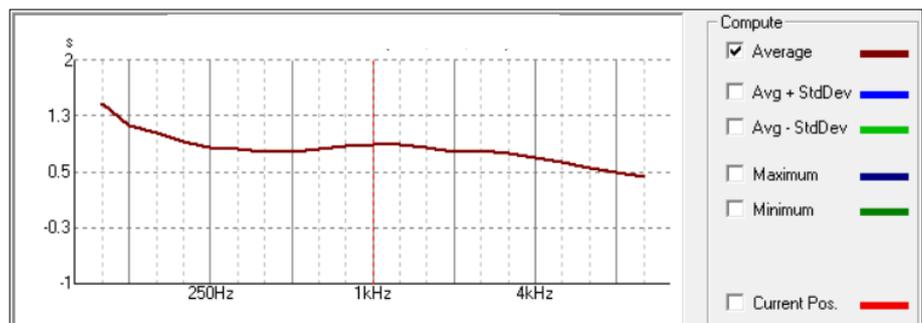


Abb. 16: gemittelte Nachhallzeit T10 der Raumakustik 3 – gut (Quelle: EASE)

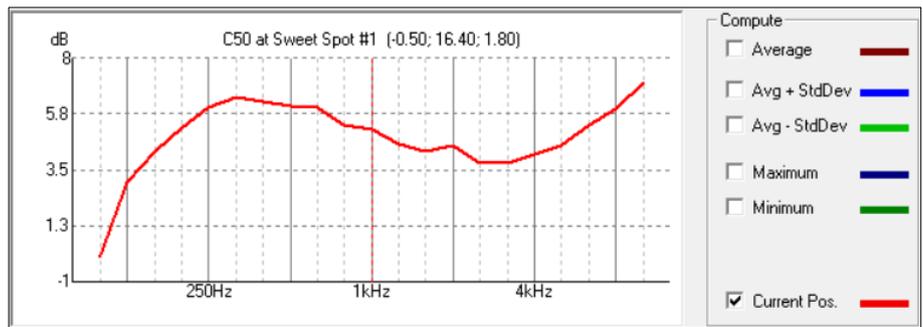


Abb. 17: Darstellung der Klarheit C50 der Raumakustik 3 an der Position "Sweetspot" (Quelle: EASE)

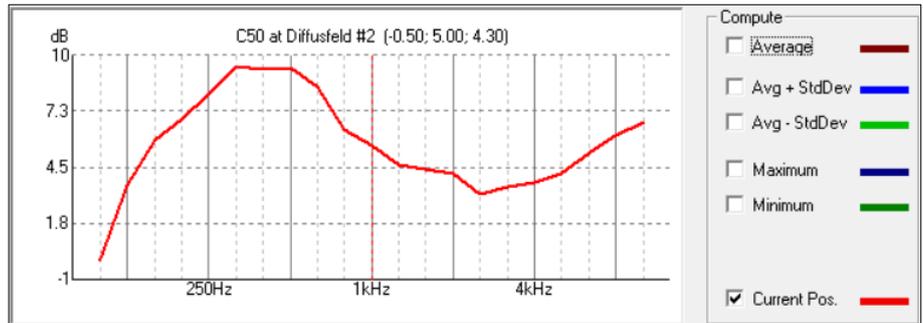


Abb. 18: Darstellung der Klarheit C50 der Raumakustik 3 an der Position "Diffusfeld" (Quelle: EASE)

Anhang 5: Beschallung 1 – mangelhaft

The screenshot shows the 'EASE Calculation Parameters' dialog box. It is divided into three main sections: 'Balloon Parameters', 'Air Properties', and 'Input Signal'.
- **Balloon Parameters:** Resolution is set to 'High (2.5°)' and Distance [m] is set to '10'.
- **Air Properties:** Temperature [°C] is '20', Humidity [%] is '60', and Pressure [kPa] is '101,3'. The 'Enable Air Attenuation' checkbox is unchecked.
- **Input Signal:** Frequency Response is set to 'AES2 Broadband'. The 'From' field is '20' and the 'To' field is '20000'. Other options like 'AES2 Band-Pass', 'IEC 60268-1', 'EIA-426B', and 'Custom' are unselected. A 'Load File' button is visible at the bottom right.

Abb. 19: Übersicht der eingestellten Parameter zur Berechnung der Lautsprecherdaten (Quelle: EASE)

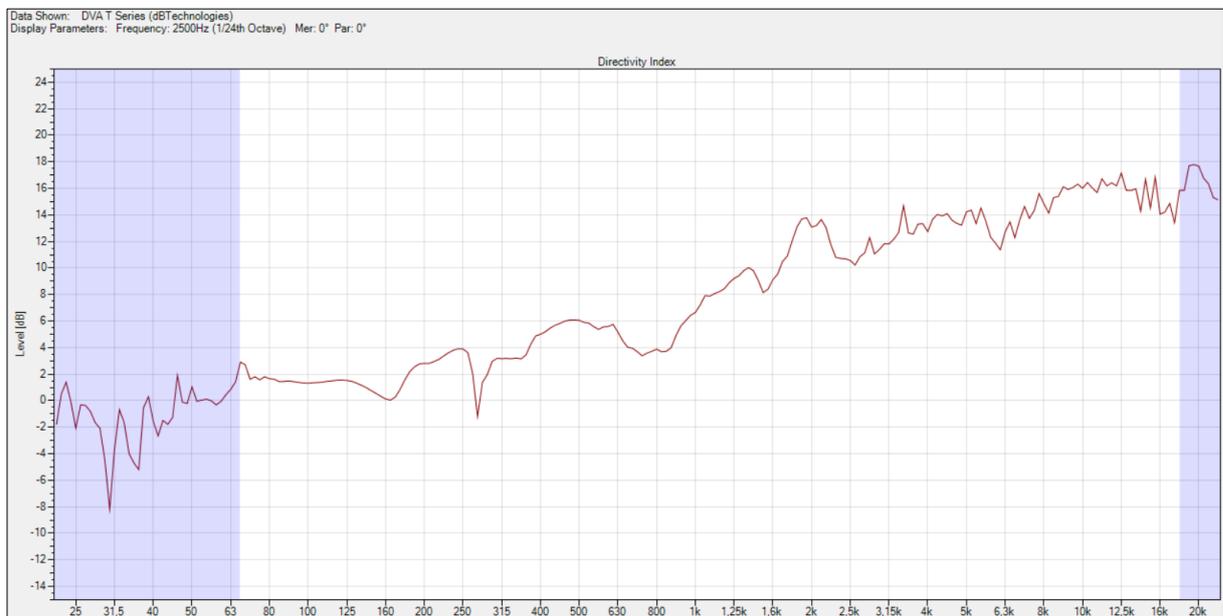


Abb. 20: Directivity Index des Lautsprechers dbTechnologies DVA T8. (Quelle: Software EASE)

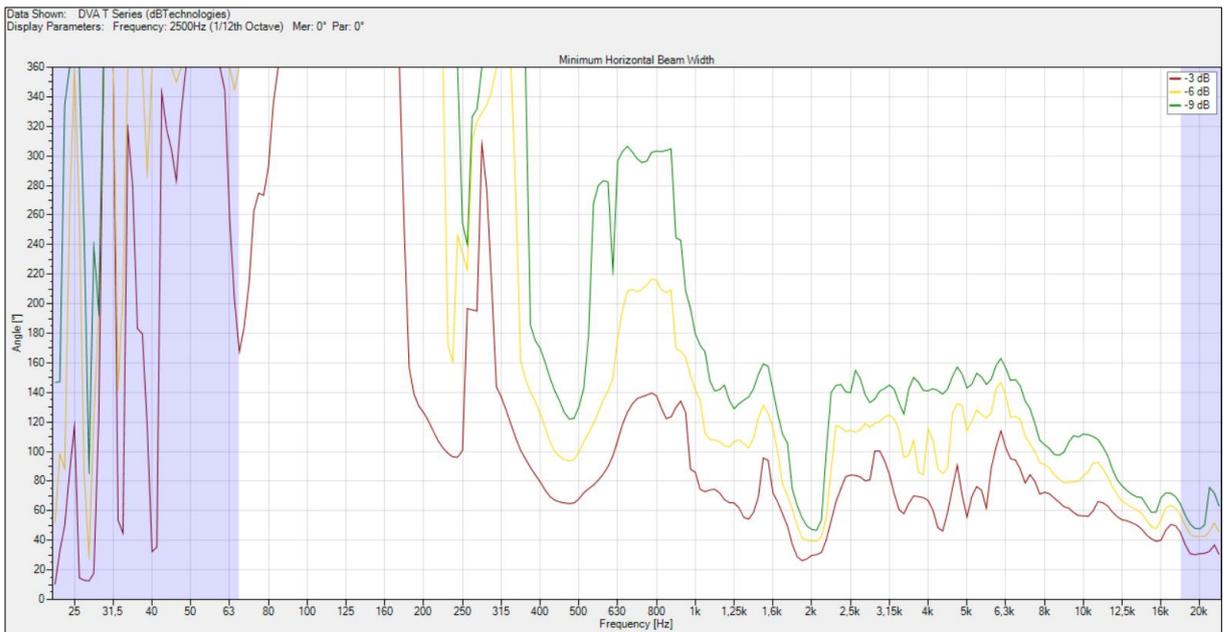


Abb. 21: Darstellung des minimalen, horizontalen Abstrahlwinkels des Lautsprechers dbTechnologies DVA T8. (Quelle: Software EASE)

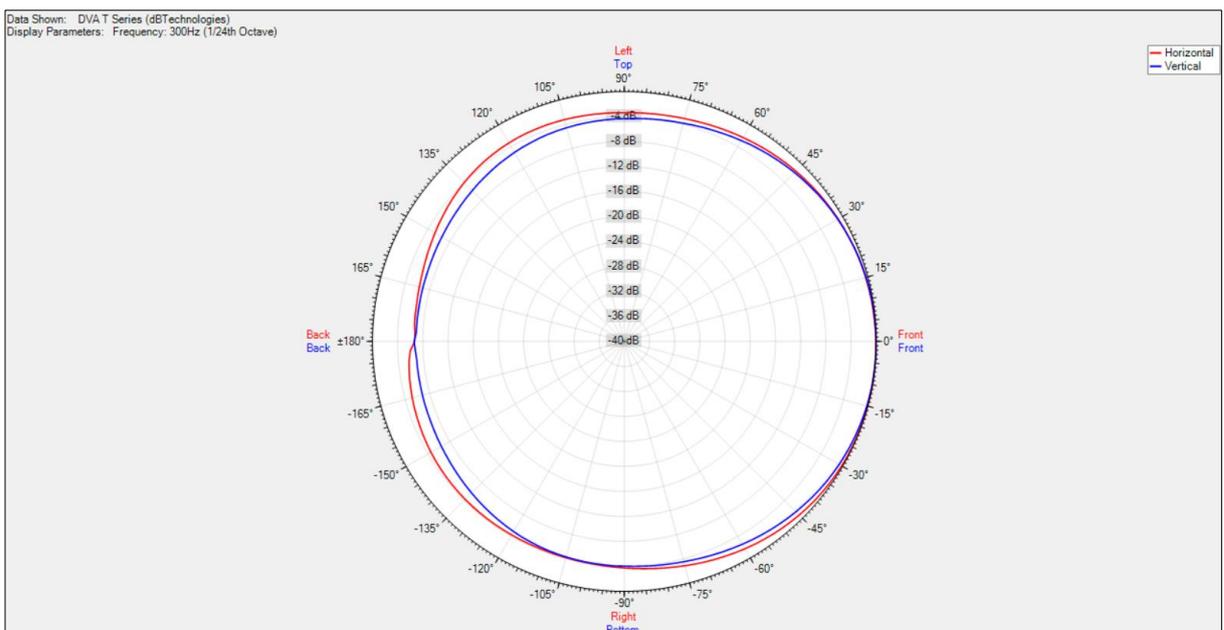


Abb. 22: Polardiagramm des Lautsprechers dbTechnologies DVA T8 bei 300Hz. (Quelle: Software EASE)

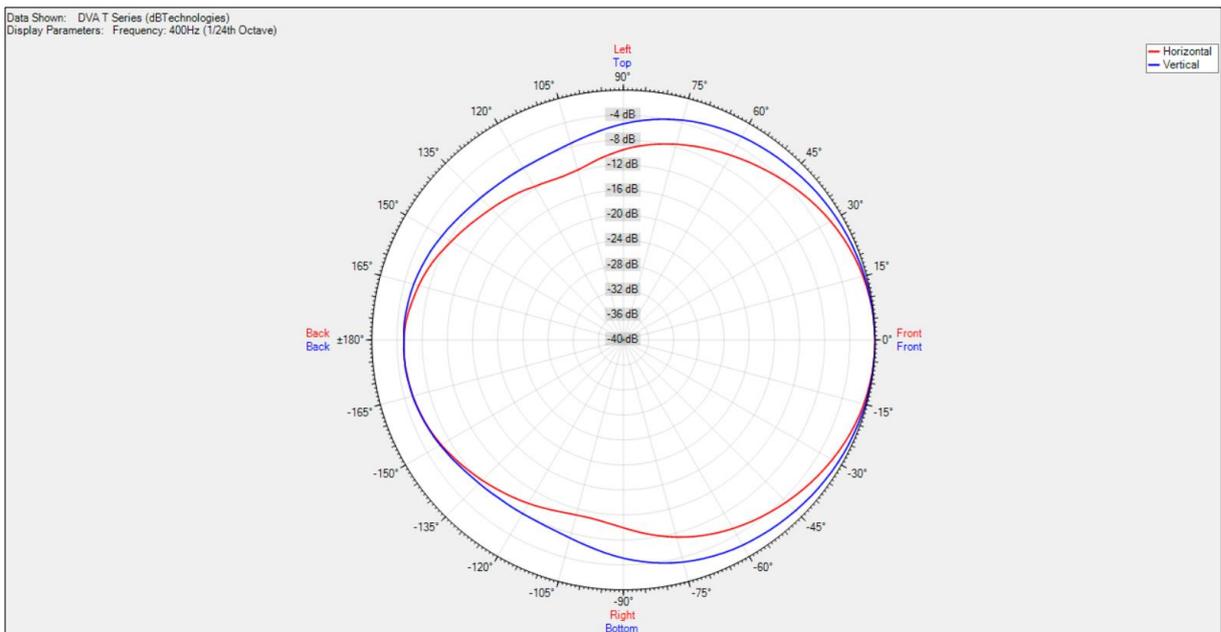


Abb. 23: Polardiagramm des Lautsprechers dbTechnologies DVA T8 bei 400Hz. (Quelle: Software EASE)

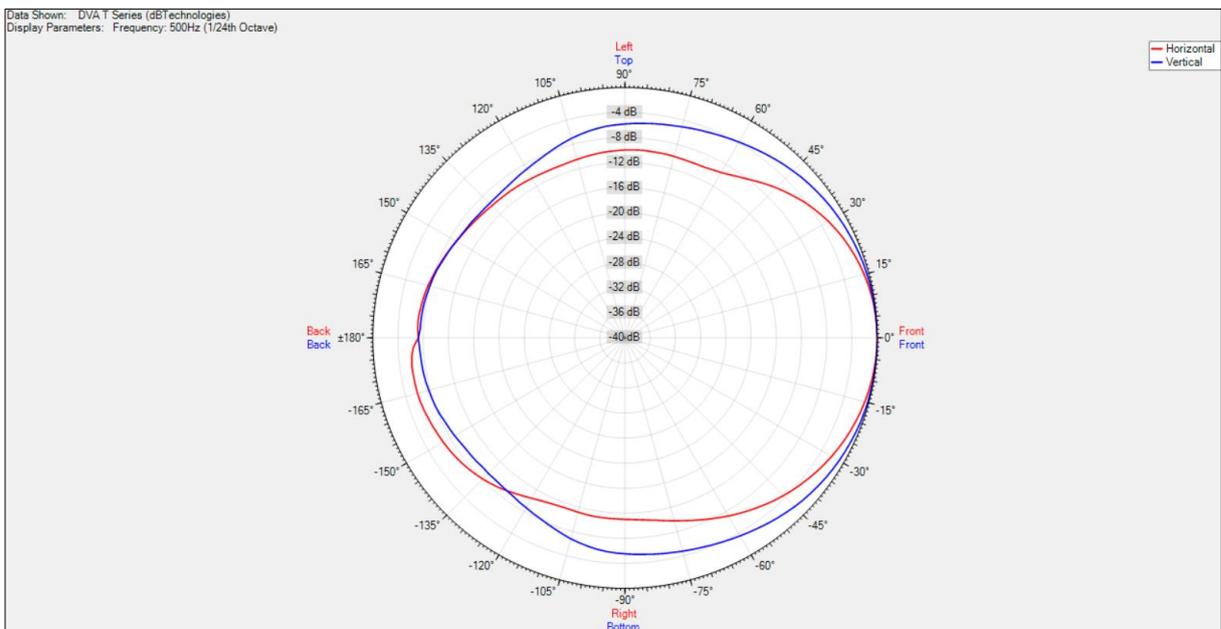


Abb. 24: Polardiagramm des Lautsprechers dbTechnologies DVA T8 bei 500Hz. (Quelle: Software EASE)

Die PA besteht aus je acht dbTechnologies DVA T8 pro PA-Seite mit dem nominellen Abstrahlwinkel von 100 Grad, weshalb die Arrays zur Mitte eingedreht sind, um die Schallenergie im Publikumsbereich zu konzentrieren. Das System ist so entworfen, dass jeweils die zwei obersten Lautsprecher auf die Tribüne im hinteren Teil der Halle gerichtet sind. Zusätzlich erhalten sie eine Pegelanhebung um 6dB, um die große Entfernung zu überbrücken. Die Topteile werden mit dem Preset 0 betrieben, also ohne jegliche Filterungen. Als Subbass-Erweiterung kommen 8 dbTechnologies DVA S30N (je 2x 18 Zoll) zum Einsatz, die mit dem

Preset TP 75Hz betrieben werden, die Trennfrequenz zwischen Topteilen und Subbässen also bei 75Hz liegt.

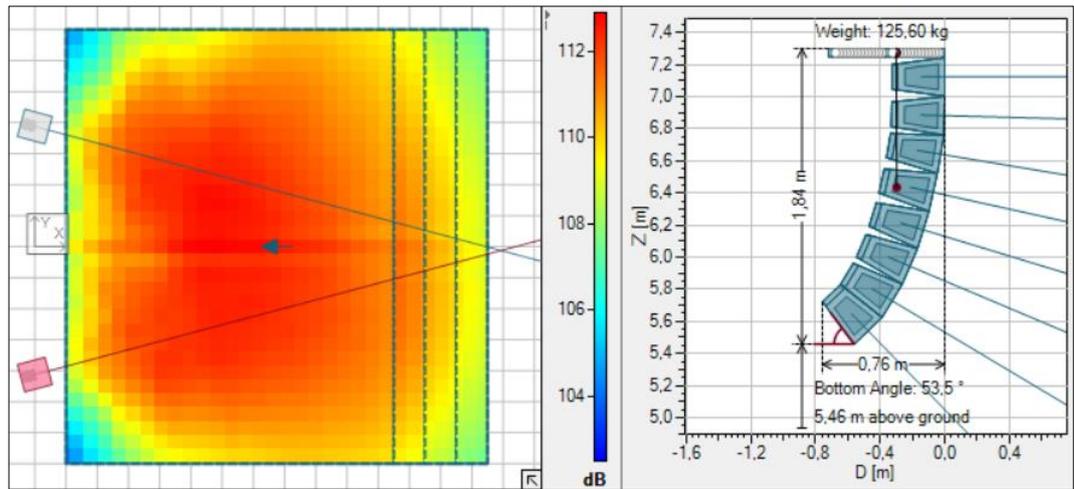


Abb. 25: Systemdesign der Beschallung 1 - mangelhaft: dbTechnologies DVA T8 (Quelle: EASE Focus)

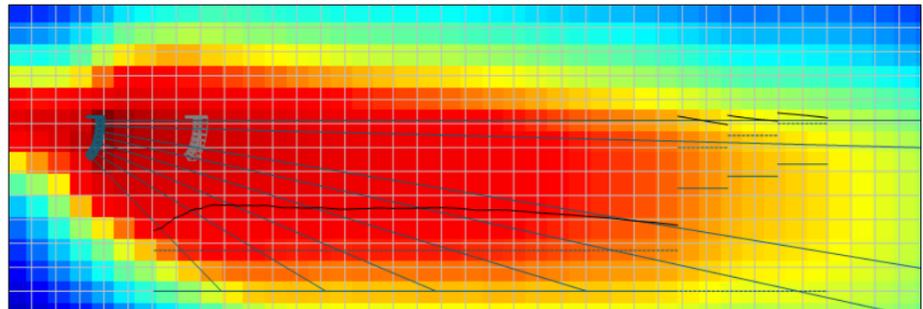


Abb. 26: seitliche Ansicht der Beschallung 1 - mangelhaft: dbTechnologies DVA T8 (Quelle: EASE Focus)

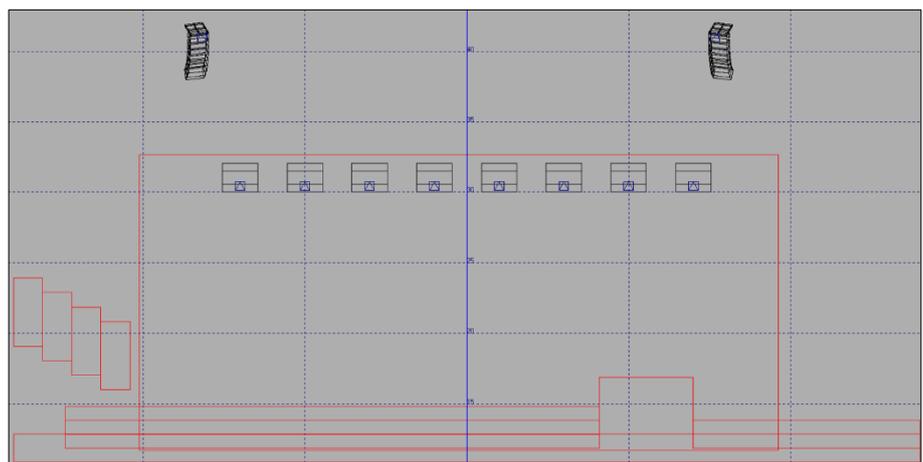


Abb. 27: Gesamtlayout der Beschallung 1 - mangelhaft: dbTechnologies DVA T8 mit DVA S30N (Subs) (Quelle: EASE)

Anhang 6: Beschallung 2 – befriedigend

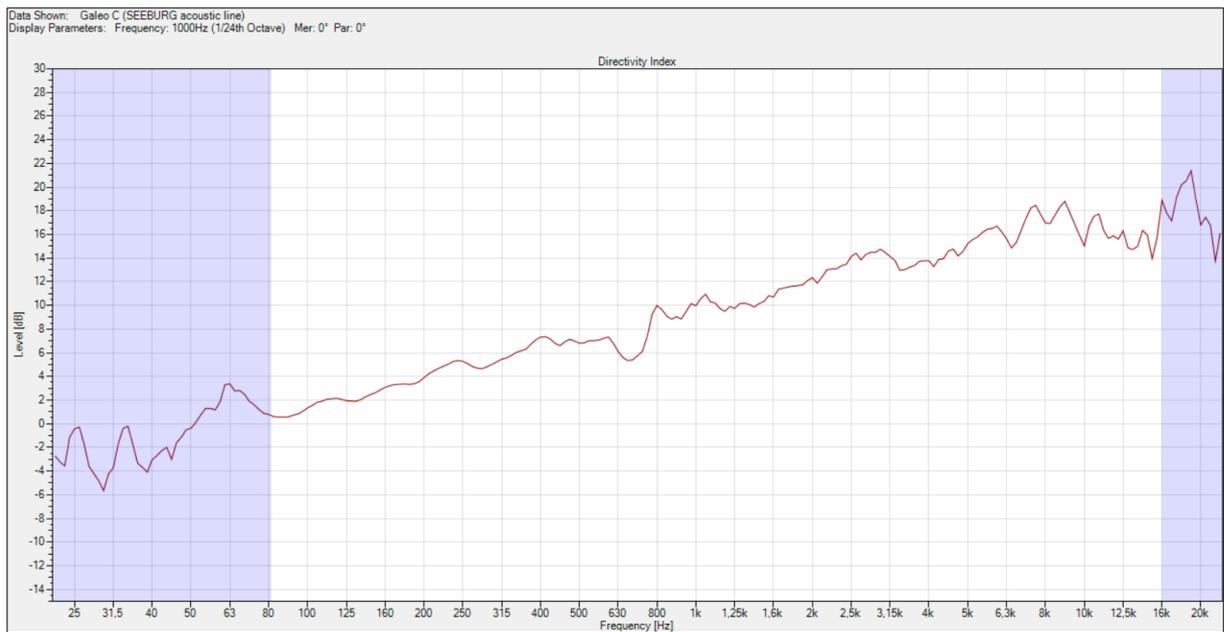


Abb. 28: Directivity Index des Lautsprechers Seeburg Galeo C (Quelle: EASE)

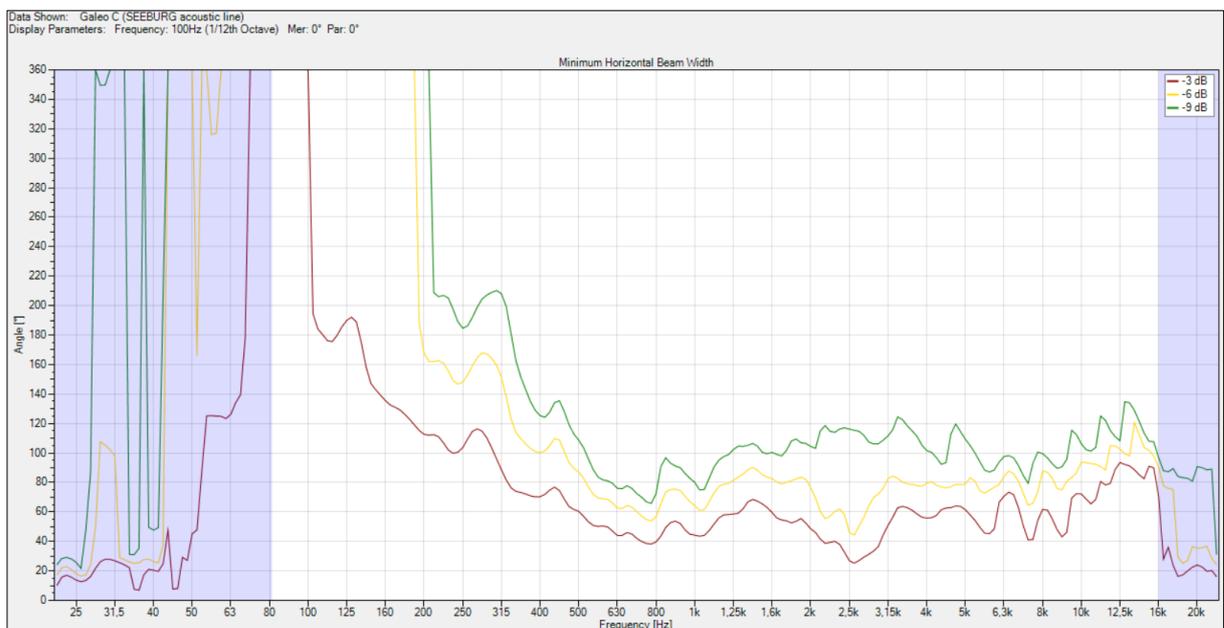


Abb. 29: Darstellung des minimalen Abstrahlwinkels des Lautsprechers Seeburg Galeo C (Quelle: EASE)

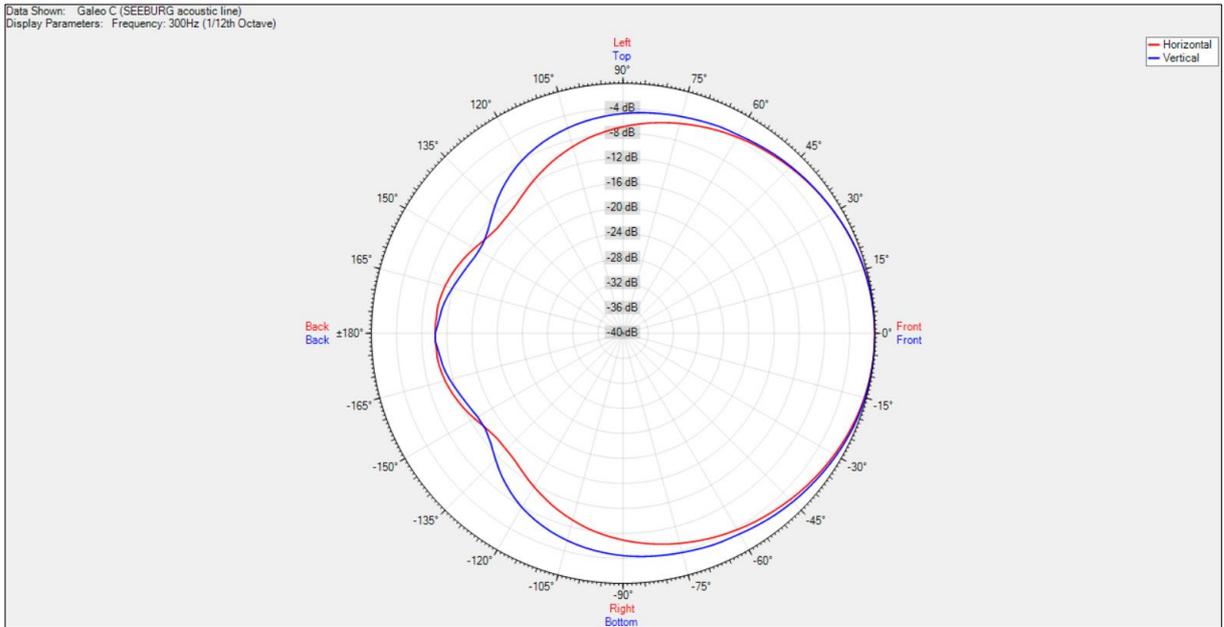


Abb. 30: Polardiagramm des des Lautsprechers Seeburg Galeo C bei 300Hz (Quelle: EASE)

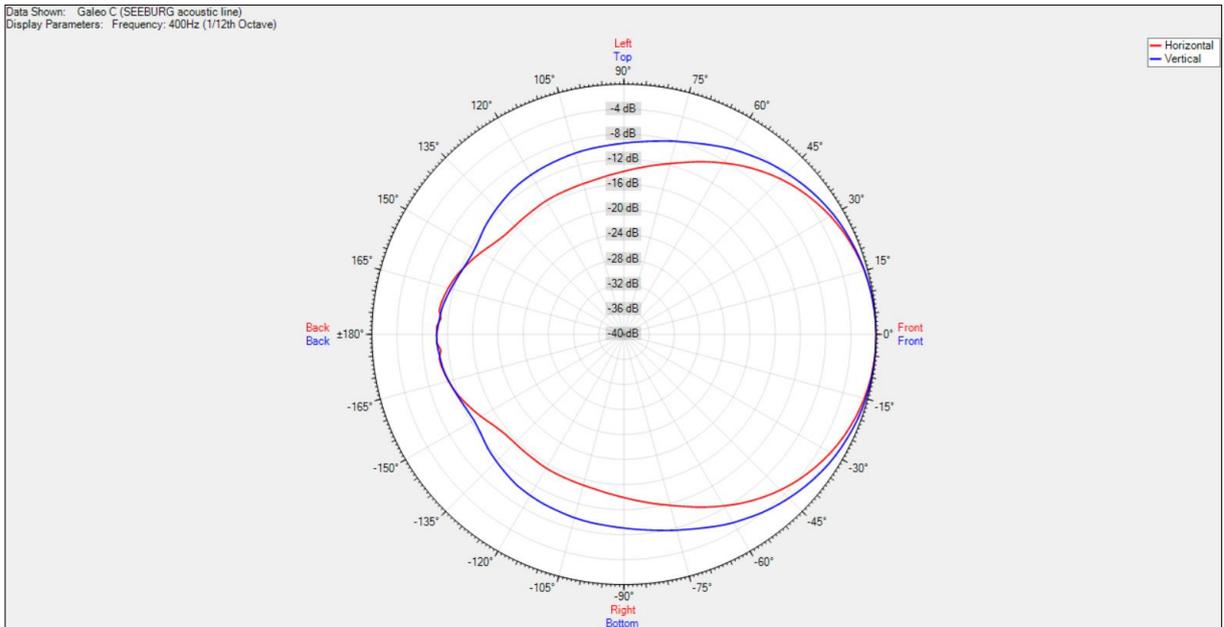


Abb. 31: Polardiagramm des Lautsprechers Seeburg Galeo C bei 400Hz (Quelle: EASE)

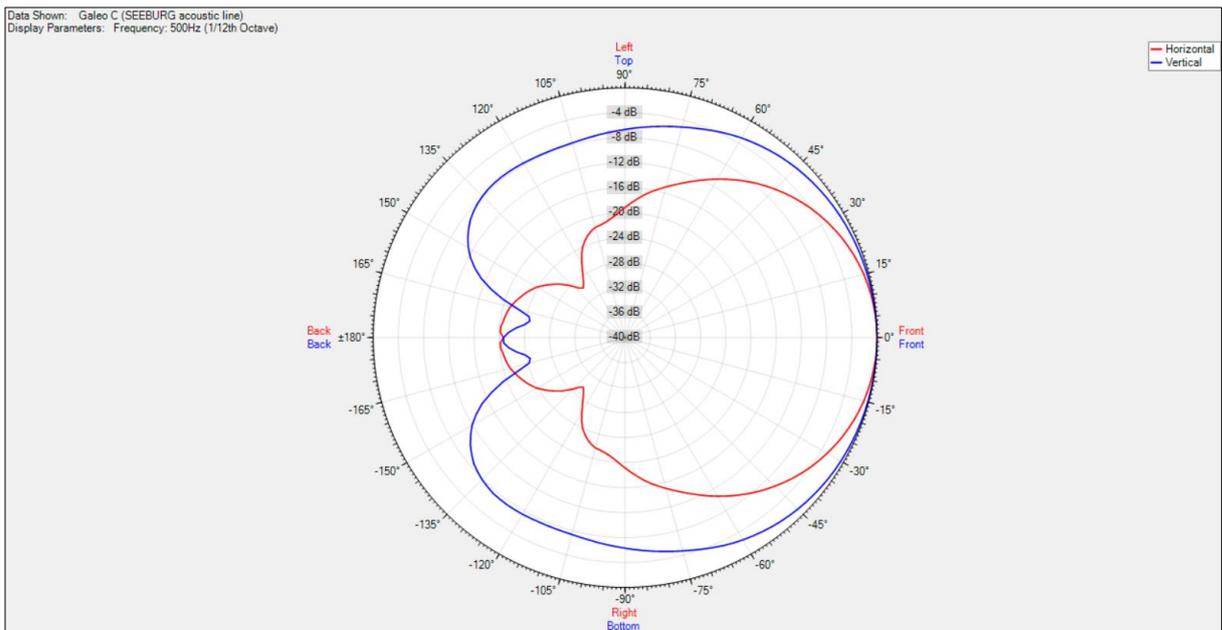


Abb. 32: Polardiagramm des Lautsprechers Seeburg Galeo C bei 500Hz (Quelle: EASE)

Hier besteht die PA aus 8 Seeburg GALEO C je PA-Seite. Der Hersteller bietet hier zwei verschiedene Modelle mit unterschiedlichem Abstrahlwinkel an. Die oberen 6 Topteile liefern einen Öffnungswinkel von 70 Grad und die unteren zwei einen Abstrahlwinkel von 100 Grad, um die Bereiche direkt vor der Bühne noch besser abdecken zu können. Deshalb sind die LineArrays bei diesem System auch nicht so weit zur Mitte eingedreht, wie bei der vorherigen PA. Gemein ist Ihnen jedoch, dass die obersten zwei Topteile mit einer Pegelanhebung von 6dB auf die Tribüne hinten im Raum zielen. Die zum System gehörigen Basslautsprecher GALEO C Sub sorgen mit insgesamt 16 Lautsprechern (je 1x 18 Zoll) für eine ausreichende Erweiterung im tiefrequenten Spektrum. Die Trennfrequenz zwischen Tops und Bässen liegt bei 80Hz.

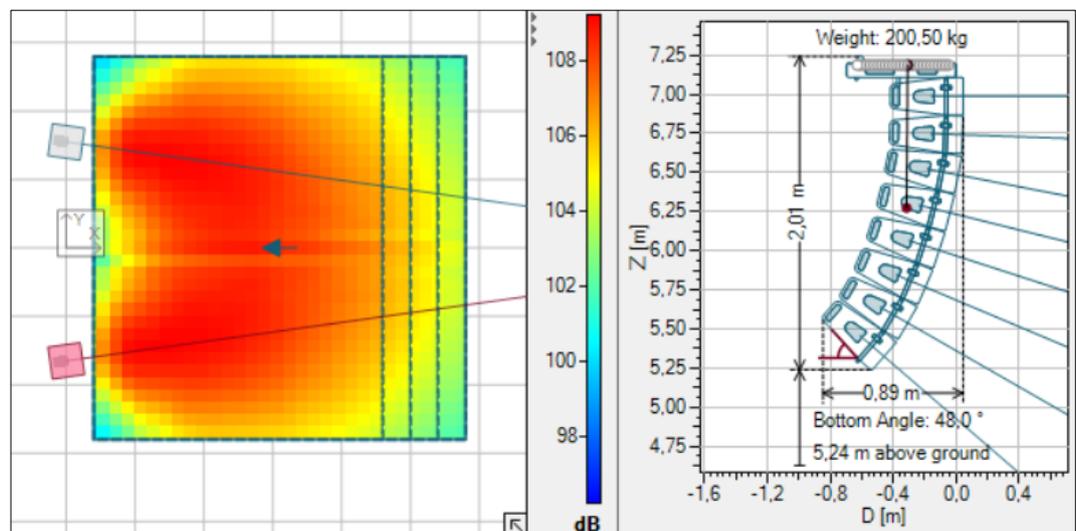


Abb. 33: Systemdesign der Beschallung 2 - befriedigend: Seeburg GALEO C (Quelle: EASE Focus)

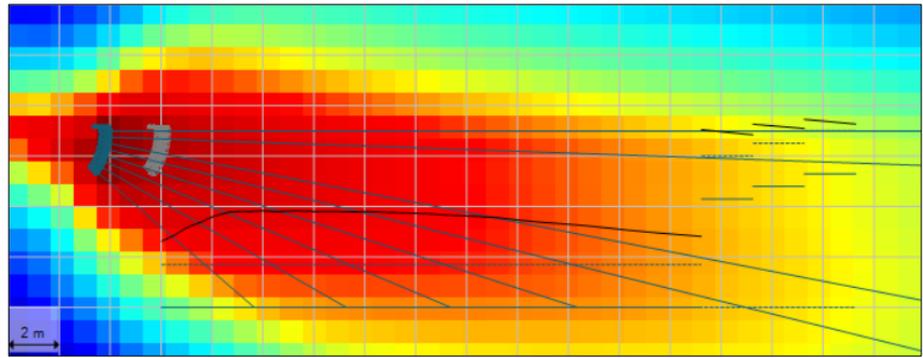


Abb. 34: seitliche Ansicht der Beschallung 2 - Seeburg GALEO C (Quelle: EASE Focus)

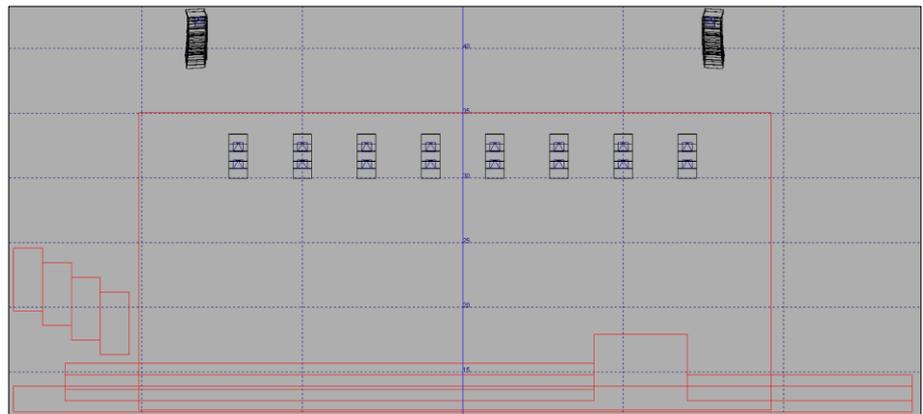


Abb. 35: Gesamtlayout der Beschallung 2 - Seeburg GALEO C mit GALEO Sub (Quelle: EASE)

Anhang 7: Beschallung 3 – gut

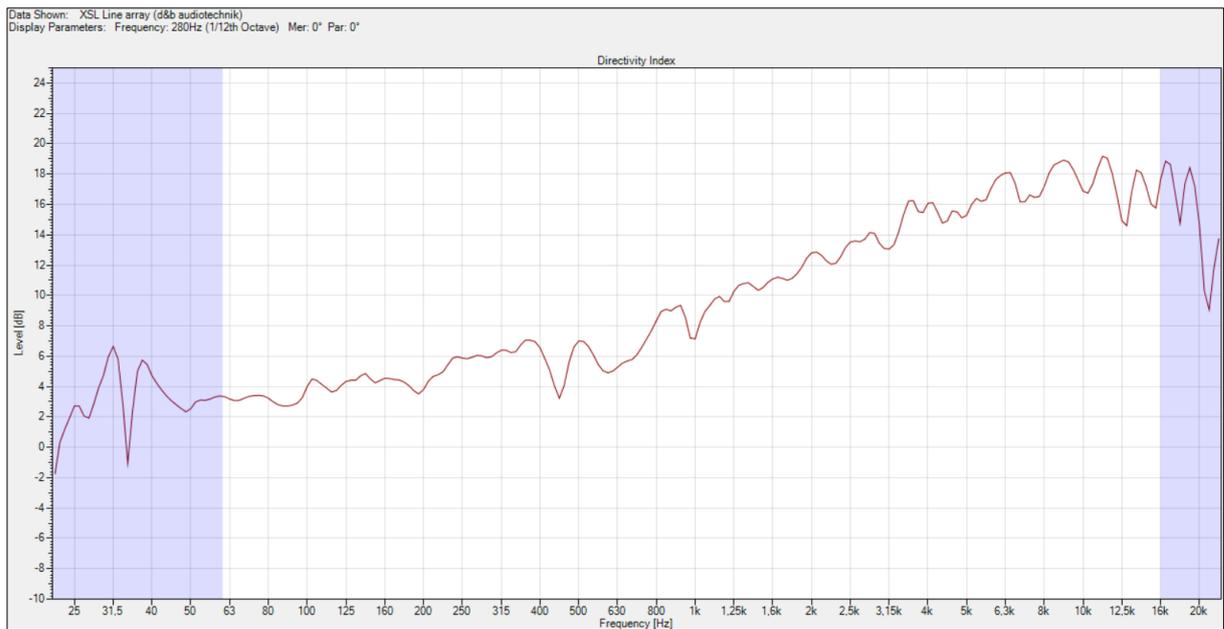


Abb. 36: Directivity Index des Lautsprechers d&b audiotechnik XSL8 (Quelle: EASE)

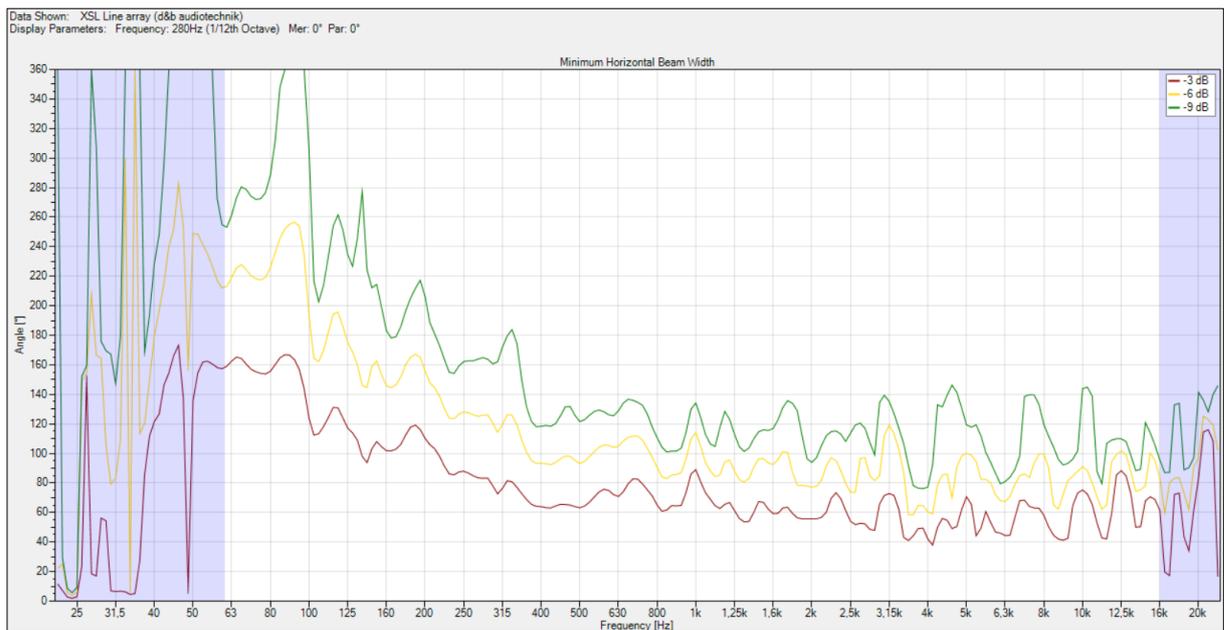


Abb. 37: minimaler Abstrahlwinkel des Lautsprechers d&b audiotechnik XSL8 (Quelle: EASE)

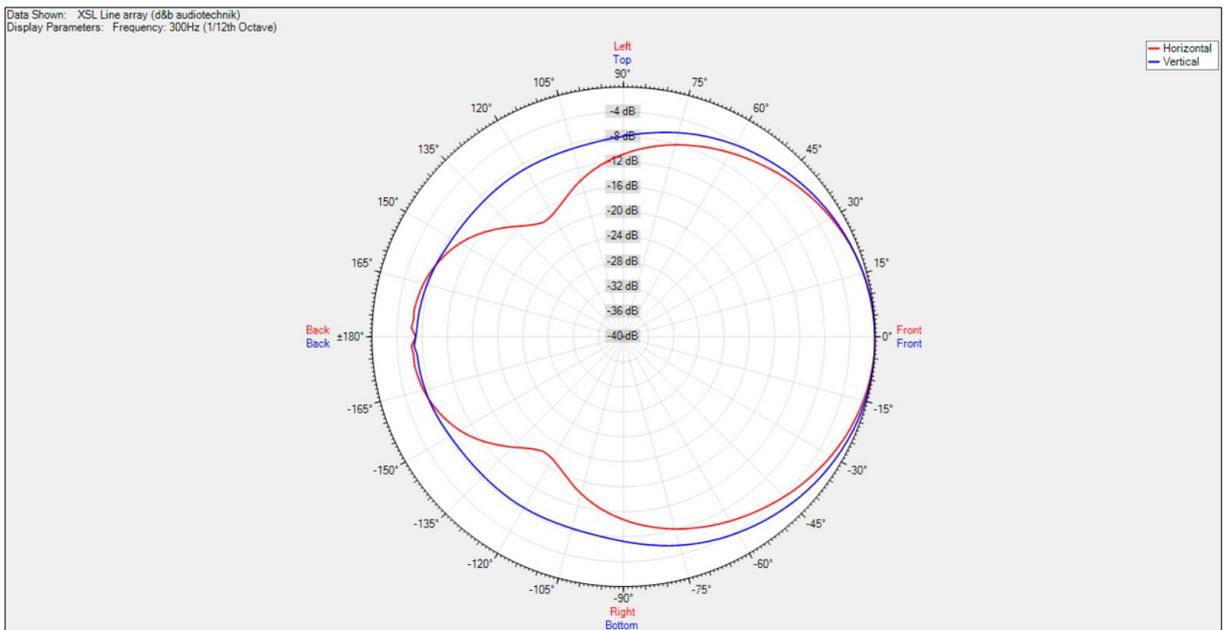


Abb. 38: Polardiagramm des Lautsprechers d&b audiotechnik XSL8 bei 300Hz (Quelle: EASE)

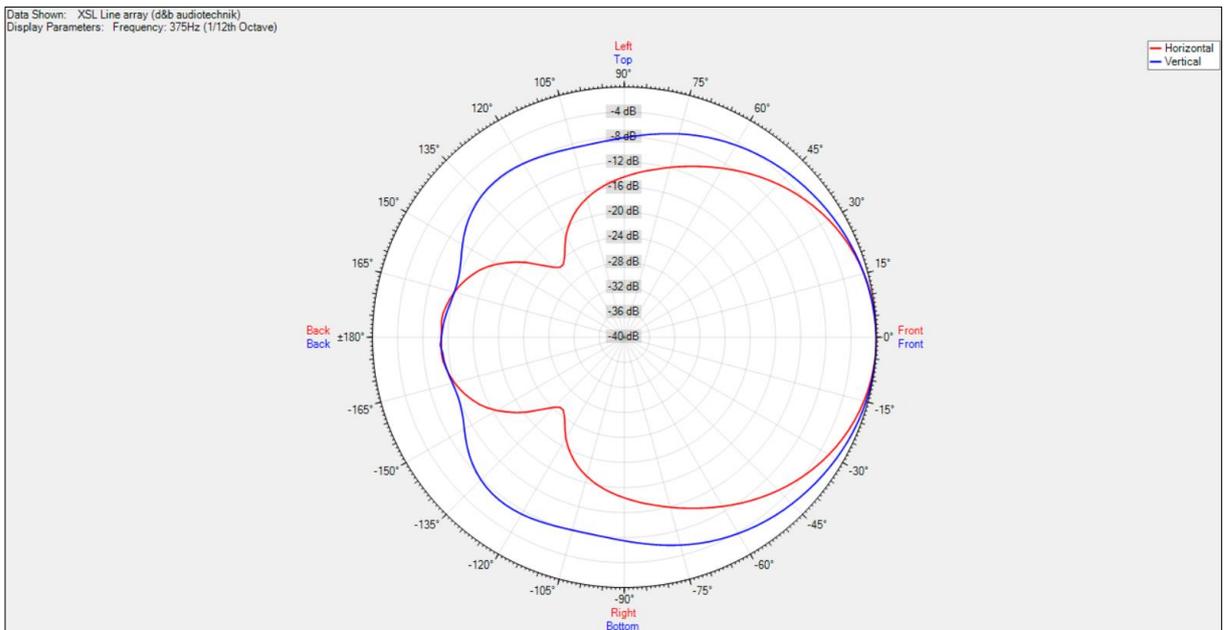


Abb. 39: Polardiagramm des Lautsprechers d&b audiotechnik XSL8 bei 400Hz (Quelle: EASE)

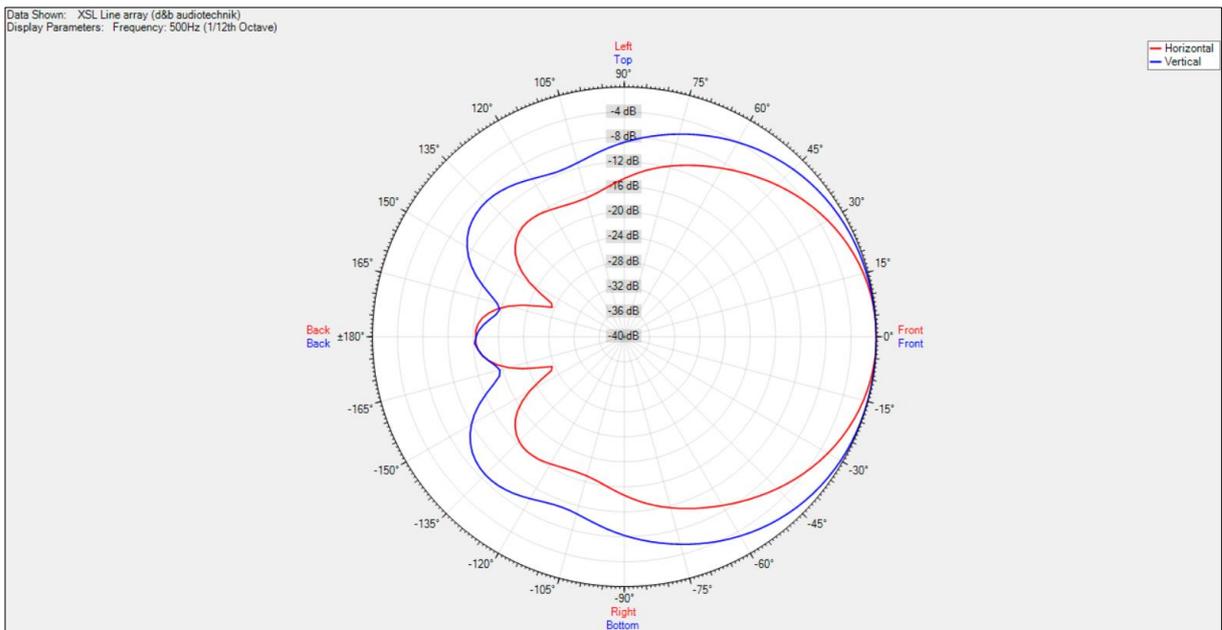


Abb. 40: Polardiagramm des Lautsprechers d&b audiotechnik XSL8 bei 500Hz (Quelle: EASE)

Der Hersteller besteht darauf, den Entwurf des Systems in seiner hauseigenen Software ArrayCalc anzufertigen, was einige Vorteile gegenüber EASE Focus bietet. Die LineArrays sind ähnlich wie die beiden Vorgänger aufgebaut. Jedes Array besteht aus 8 d&b audiotechnik XSL Lautsprechern von denen die obersten 6 einen Öffnungswinkel von 80 Grad, die jeweils untersten zwei einen Winkel von 120 Grad liefern. Wieder sind die jeweils obersten zwei Topteile mit +6dB auf die Tribüne gerichtet. Die Systembässe SL-SUB (3x 21 Zoll) von denen auch hier 8 Stück zum Einsatz kommen, bieten eine cardioide Schallausbreitung was eine gute rückwärtige Bedämpfung ermöglicht. Über die Einstellung bestimmter Delay-Zeiten für die einzelnen Bass-Lautsprecher lässt sich die horizontale Schallausbreitung im tieffrequenten Bereich besser steuern. Außerdem kann gleich in der Software der Phasengang der Topteile zu den Basslautsprechern angeglichen werden.

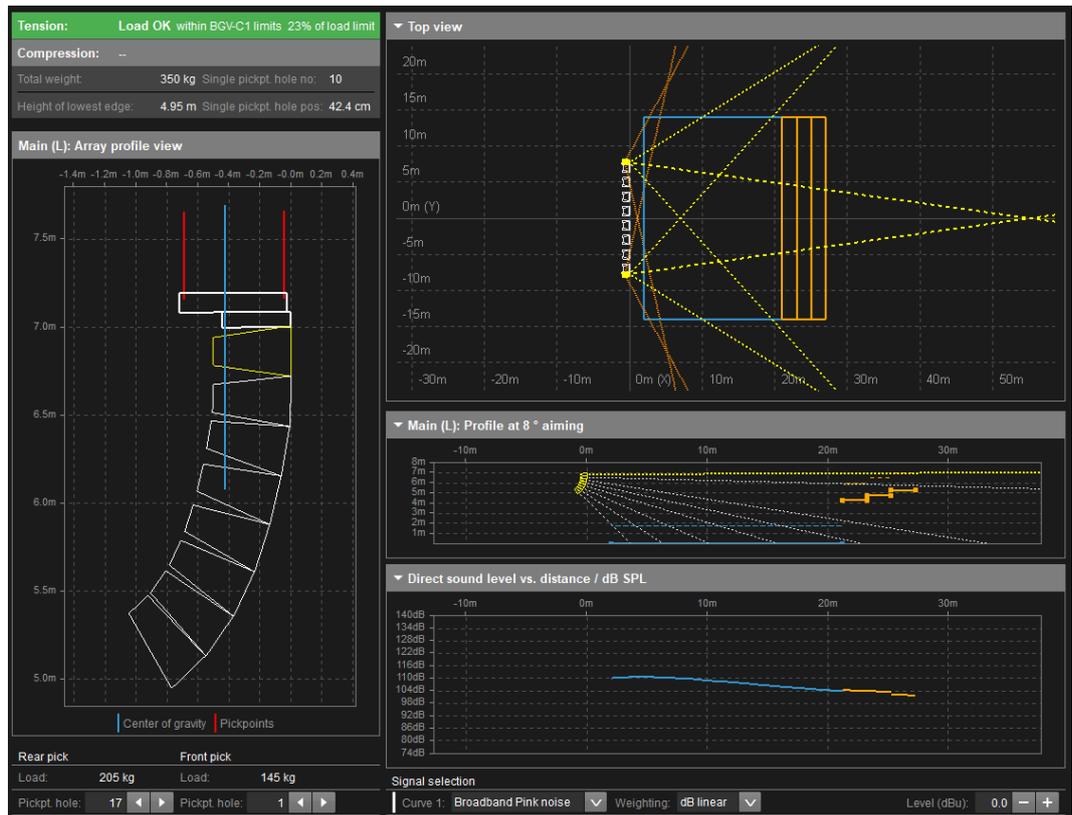


Abb. 41: Systemdesign der Beschallung 3 - gut: d&b Audiotechnik XSL (Quelle: d&b ArrayCalc)

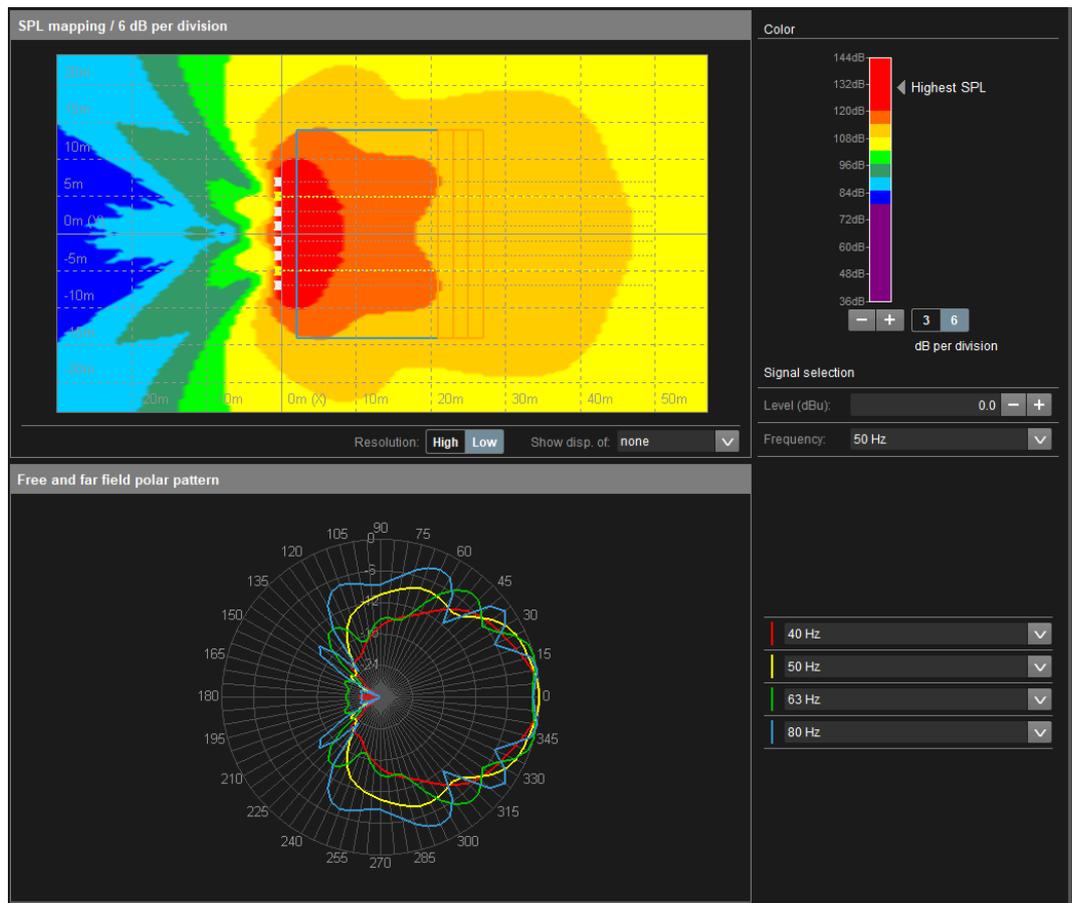


Abb. 42: Systemdesign der Systembässe d&b Audiotechnik SL-Sub (Quelle: d&b ArrayCalc)

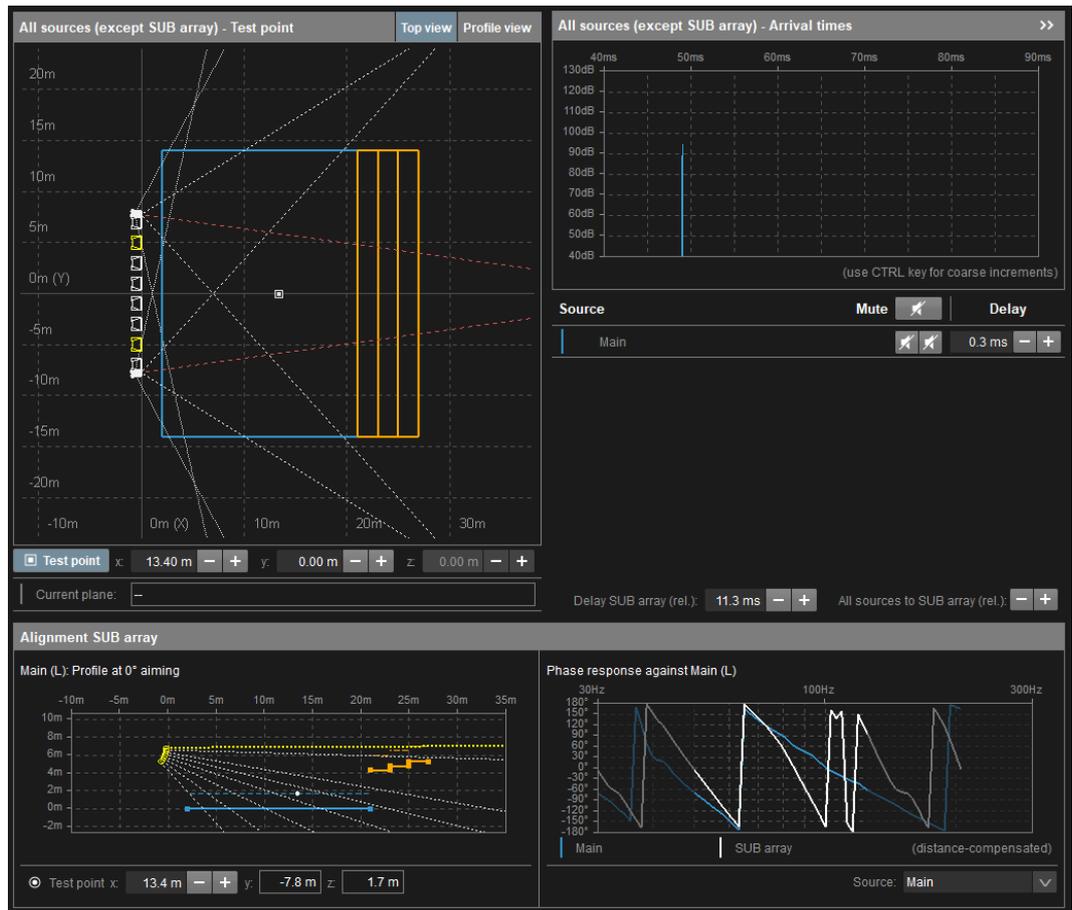


Abb. 43: Phasenanpassung zwischen d&b XSL und d&b SL-Sub (Quelle: d&b ArrayCalc)

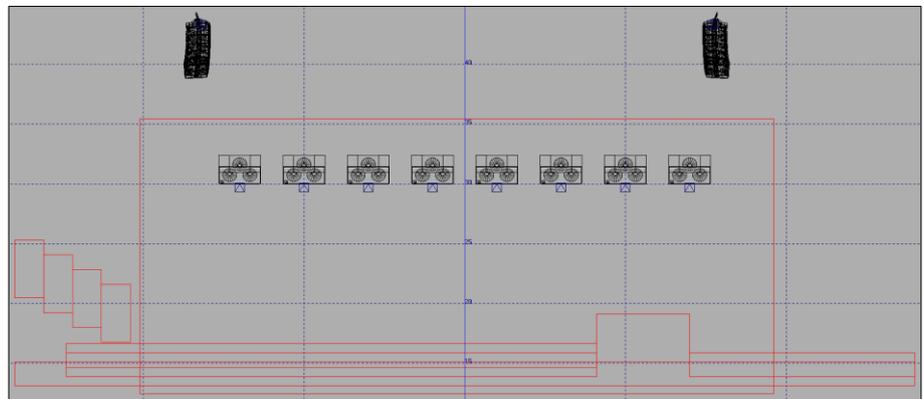


Abb. 44: Gesamtlayout der Beschallung 3 - d&b Audiotechnik XSL mit SL-Sub (Quelle: EASE)

Anhang 8: Übersichten zum Hörversuch

<u>TITEL</u>	<u>RAUM</u>	<u>PA</u>	<u>STIMULUS</u>	<u>HÖRPOSITION</u>
#A	mangelhaft	mangelhaft	Musik	SweetSpot
#B	mangelhaft	befriedigend	Musik	SweetSpot
#C	mangelhaft	gut	Musik	SweetSpot
#D	befriedigend	mangelhaft	Musik	SweetSpot
#E	befriedigend	befriedigend	Musik	SweetSpot
#F	befriedigend	gut	Musik	SweetSpot
#G	gut	mangelhaft	Musik	SweetSpot
#H	gut	befriedigend	Musik	SweetSpot
#I	gut	gut	Musik	SweetSpot
#J	mangelhaft	mangelhaft	Sprache	SweetSpot
#K	mangelhaft	befriedigend	Sprache	SweetSpot
#L	mangelhaft	gut	Sprache	SweetSpot
#M	befriedigend	mangelhaft	Sprache	SweetSpot
#N	befriedigend	befriedigend	Sprache	SweetSpot
#O	befriedigend	gut	Sprache	SweetSpot
#P	gut	mangelhaft	Sprache	SweetSpot
#Q	gut	befriedigend	Sprache	SweetSpot
#R	gut	gut	Sprache	SweetSpot
#AA	mangelhaft	mangelhaft	Musik	Diffusfeld
#BB	mangelhaft	befriedigend	Musik	Diffusfeld
#CC	mangelhaft	gut	Musik	Diffusfeld
#DD	befriedigend	mangelhaft	Musik	Diffusfeld
#EE	befriedigend	befriedigend	Musik	Diffusfeld
#FF	befriedigend	gut	Musik	Diffusfeld
#GG	gut	mangelhaft	Musik	Diffusfeld
#HH	gut	befriedigend	Musik	Diffusfeld
#II	gut	gut	Musik	Diffusfeld
#JJ	mangelhaft	mangelhaft	Sprache	Diffusfeld
#KK	mangelhaft	befriedigend	Sprache	Diffusfeld
#LL	mangelhaft	gut	Sprache	Diffusfeld
#MM	befriedigend	mangelhaft	Sprache	Diffusfeld
#NN	befriedigend	befriedigend	Sprache	Diffusfeld
#OO	befriedigend	gut	Sprache	Diffusfeld
#PP	gut	mangelhaft	Sprache	Diffusfeld
#QQ	gut	befriedigend	Sprache	Diffusfeld
#RR	gut	gut	Sprache	Diffusfeld

Tab. 4: Übersicht der verschiedenen Kombinationen der 36 Hörproben

		T E I L N E H M E R																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
H Ö R P R O B E N	A	36	4	27	7	13	1	34	23	16	6	2	3	14	15	5	11	32	22	17	8	9	19	29	10	33	28	18	12	24	20
	B	31	33	22	2	8	35	29	18	11	1	36	32	9	10	34	6	27	17	12	3	4	14	24	5	28	23	13	7	19	15
	C	26	28	17	36	3	30	24	13	6	35	31	27	4	5	29	1	22	12	7	32	33	9	19	34	23	18	8	2	14	10
	D	21	23	12	31	32	25	19	8	1	30	26	22	33	34	24	35	17	7	2	27	28	4	14	29	18	13	3	36	9	5
	E	16	18	7	26	27	20	14	3	35	25	21	17	28	29	19	30	12	2	36	22	23	33	9	24	13	8	32	31	4	34
	F	11	13	2	21	22	15	9	32	30	20	16	12	23	24	14	25	7	36	31	17	18	28	4	19	8	3	27	26	33	29
	G	6	8	36	16	17	10	4	27	25	15	11	7	18	19	9	20	2	31	26	12	13	23	33	14	3	32	22	21	28	24
	H	1	3	31	11	12	5	33	22	20	10	6	2	13	14	4	15	36	26	21	7	8	18	28	9	32	27	17	16	23	19
	I	35	32	26	6	7	34	28	17	15	5	1	36	8	9	33	10	31	21	16	2	3	13	23	4	27	22	12	11	18	14
	J	30	27	21	1	2	29	23	12	10	34	35	31	3	4	28	5	26	16	11	36	32	8	18	33	22	17	7	6	13	9
	K	25	22	16	35	36	24	18	7	5	29	30	26	32	33	23	34	21	11	6	31	27	3	13	28	17	12	2	1	8	4
	L	20	17	11	30	31	19	13	2	34	24	25	21	27	28	18	29	16	6	1	26	22	32	8	23	12	7	36	35	3	33
	M	15	12	6	25	26	14	8	36	29	19	20	16	22	23	13	24	11	1	35	21	17	27	3	18	7	2	31	30	32	28
	N	10	7	1	20	21	9	3	31	24	14	15	11	17	18	8	19	6	35	30	16	12	22	32	13	2	36	26	25	27	23
	O	5	2	35	15	16	4	32	26	19	9	10	6	12	13	3	14	1	30	25	11	7	17	27	8	36	31	21	20	22	18
	P	34	36	30	10	11	33	27	21	14	4	5	1	7	8	32	9	35	25	20	6	2	12	22	3	31	26	16	15	17	13
	Q	29	31	25	5	6	28	22	16	9	33	34	35	2	3	27	4	30	20	15	1	36	7	17	32	26	21	11	10	12	8
	R	24	26	20	34	1	23	17	11	4	28	29	30	36	32	22	33	25	15	10	35	31	2	12	27	21	16	6	5	7	3
	AA	19	21	15	29	35	18	12	6	33	23	24	25	31	27	17	28	20	10	5	30	26	36	7	22	16	11	1	34	2	32
	BB	14	16	10	24	30	13	7	1	28	18	19	20	26	22	12	23	15	5	34	25	21	31	2	17	11	6	35	29	36	27
CC	9	11	5	19	25	8	2	35	23	13	14	15	21	17	7	18	10	34	29	20	16	26	36	12	6	1	30	24	31	22	
DD	4	6	34	14	20	3	36	30	18	8	9	10	16	12	2	13	5	29	24	15	11	21	31	7	1	35	25	19	26	17	
EE	33	1	29	9	15	32	31	25	13	3	4	5	11	7	36	8	34	24	19	10	6	16	26	2	35	30	20	14	21	12	
FF	28	35	24	4	10	27	26	20	8	32	33	34	6	2	31	3	29	19	14	5	1	11	21	36	30	25	15	9	16	7	
GG	23	30	19	33	5	22	21	15	3	27	28	29	1	36	26	32	24	14	9	34	35	6	16	31	25	20	10	4	11	2	
HH	18	25	14	28	34	17	16	10	32	22	23	24	35	31	21	27	19	9	4	29	30	1	11	26	20	15	5	33	6	36	
II	13	20	9	23	29	12	11	5	27	17	18	19	30	26	16	22	14	4	33	24	25	35	6	21	15	10	34	28	1	31	
JJ	8	15	4	18	24	7	6	34	22	12	13	14	25	21	11	17	9	33	28	19	20	30	1	16	10	5	29	23	35	26	
KK	3	10	33	13	19	2	1	29	17	7	8	9	20	16	6	12	4	28	23	14	15	25	35	11	5	34	24	18	30	21	
LL	32	5	28	8	14	36	35	24	12	2	3	4	15	11	1	7	33	23	18	9	10	20	30	6	34	29	19	13	25	16	
MM	27	34	23	3	9	31	30	19	7	36	32	33	10	6	35	2	28	18	13	4	5	15	25	1	29	24	14	8	20	11	
NN	22	29	18	32	4	26	25	14	2	31	27	28	5	1	30	36	23	13	8	33	34	10	20	35	24	19	9	3	15	6	
OO	17	24	13	27	33	21	20	9	36	26	22	23	34	35	25	31	18	8	3	28	29	5	15	30	19	14	4	32	10	1	
PP	12	19	8	22	28	16	15	4	31	21	17	18	29	30	20	26	13	3	32	23	24	34	10	25	14	9	33	27	5	35	
QQ	7	14	3	17	23	11	10	33	26	16	12	13	24	25	15	21	8	32	27	18	19	29	5	20	9	4	28	22	34	30	
RR	2	9	32	12	18	6	5	28	21	11	7	8	19	20	10	16	3	27	22	13	14	24	34	15	4	33	23	17	29	25	

Tab. 5: Randomisierung und Zuordnungstabelle der Hörproben für die Teilnehmenden

B E W E R T U N G S B O G E N

HÖRPROBE

#1

Für den Versuch ist es von größter Wichtigkeit, dass deine Bewertungen gewissenhaft zur entsprechenden Audiodatei erfolgen, also die Nummerierungen von Audiodatei und Bewertungsbogen stets gleich sind.

Hier findest du die zu beurteilenden Kriterien in sieben Stufen. Bitte mache nur eine Auswahl je Kriterium. Bitte nutze zum Anhören der Audiodateien deinen Kopfhörer oder deine Ohrenstöpsel. Andernfalls ist eine Bewertung der Proben kaum möglich und würde das Versuchsergebnis stark verfälschen. Viel Spaß beim Hören und vielen Dank für die Teilnahme!

!!! DAS PDF BITTE SPEICHERN !!!

<u>Qualität</u>	sehr gut	<input type="checkbox"/>	gefällt nicht						
<u>Nachhall</u>	trocken	<input type="checkbox"/>	hallig						
<u>Räumlichkeit</u>	klein	<input type="checkbox"/>	groß						
<u>Klarheit</u>	transparent	<input type="checkbox"/>	verwaschen						
<u>Intimität</u>	intim	<input type="checkbox"/>	entfernt						
<u>Verständlichkeit</u>	verständlich	<input type="checkbox"/>	unverständlich						
<u>Klangfärbung</u>	dröhnt nicht	<input type="checkbox"/>	dröhnt stark						

Teilnehmer*in 20

Hörprobe #1

Abb. 45: Beispielblatt des Bewertungsbogens für die Versuchsteilnehmer

Anhang 9: Übersichten zur vierfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung

QUALITÄT

	Sphärizität angenommen?	Korrektur nach Greenhouse-Geisser	resultierende Signifikanz
Stimulus	-	-	Sig. 0,026
Raumakustik	Nein (Sig. 0,008)	Sig. < 0,001	Sig. < 0,001
Beschallung	Nein (Sig. 0,005)	Sig. 0,119	Sig. 0,119
Hörposition	-	-	Sig. 0,697
Raumakustik / Beschallung	Ja (Sig. 0,817)	-	Sig. 0,138
Raumakustik / Stimulus	Nein (Sig. 0,013)	Sig. 0,002	Sig. 0,002
Raumakustik / Hörposition	Nein (Sig. 0,041)	Sig. 0,005	Sig. 0,005
Beschallung / Stimulus	Ja (Sig. 0,633)	-	Sig. 0,099
Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,732)	-	Sig. 0,002
Stimulus / Hörposition	-	-	Sig. 0,069
Stimulus / Raumakustik / Beschallung	Ja (Sig. 0,133)	-	Sig. 0,653
Stimulus / Raumakustik / Hörposition	Ja (Sig. 0,630)	-	Sig. 0,404
Stimulus / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,293)	-	Sig. 0,936
Raumakustik / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,751)	-	Sig. 0,561
Stimulus / Raumakustik / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,284)	-	Sig. 0,949

Tab. 6: Übersicht zu Sphärizität und resultierende Signifikanz zur AV: Qualität

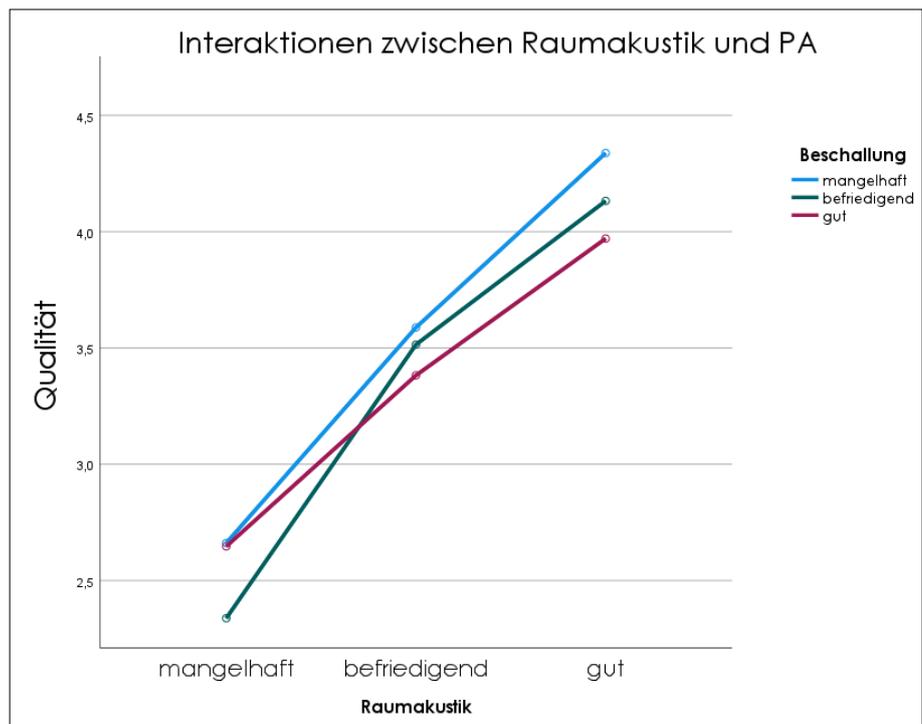


Abb. 46: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und Beschallung, AV: Qualität (Quelle: SPSS)

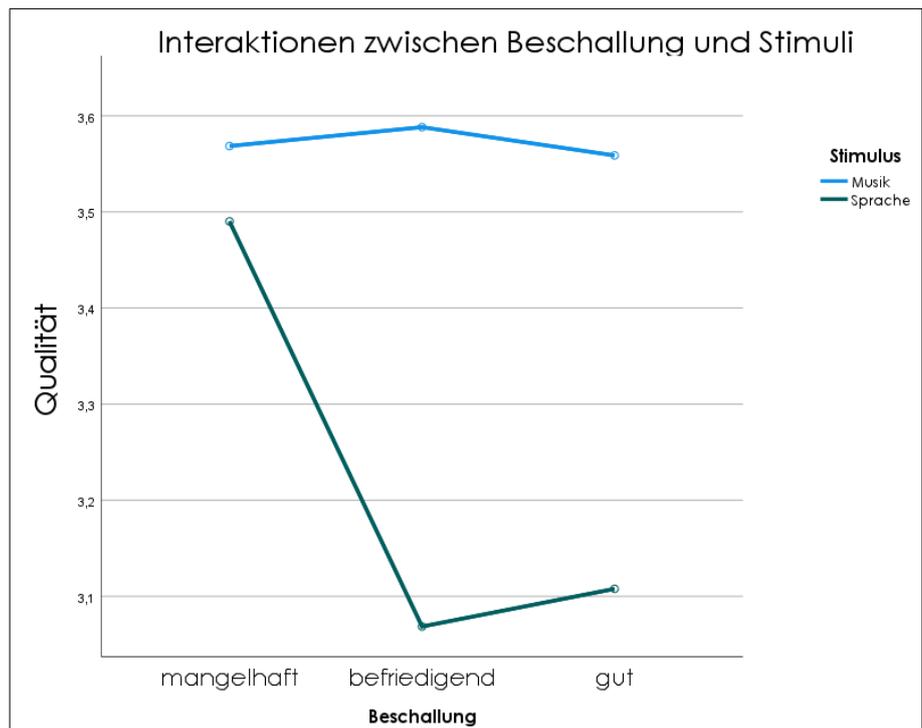


Abb. 47: Interaktionen zwischen den UVs Beschallung und Stimulus, AV: Qualität (Quelle: SPSS)

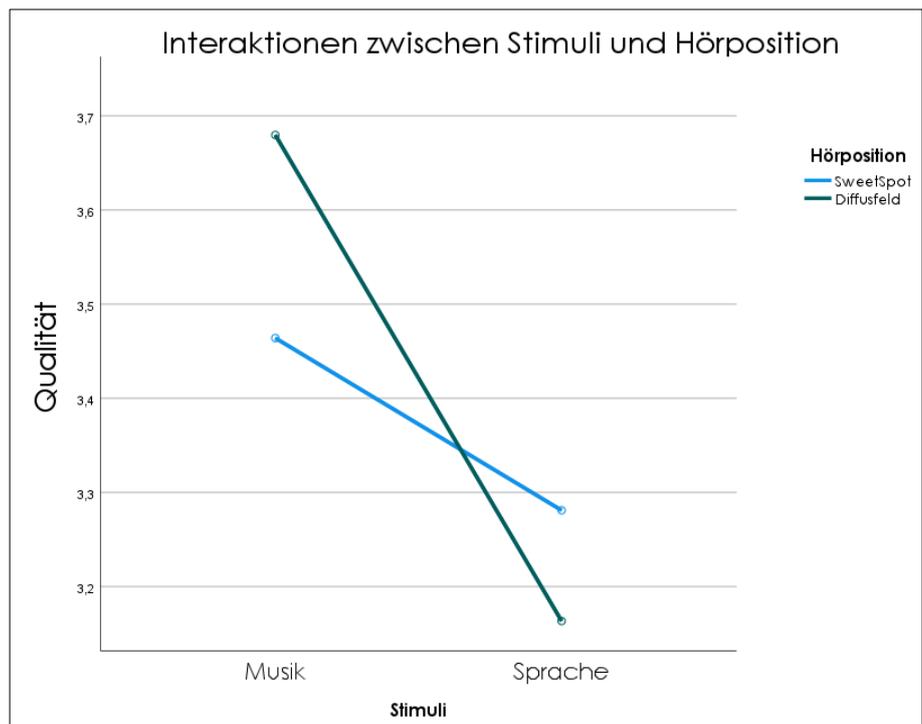


Abb. 48: Interaktionen zwischen den UVs Stimulus und Hörposition, AV: Qualität (Quelle: SPSS)

NACHHALL

	Sphärizität angenommen?	Korrektur nach Greenhouse-Geisser	resultierende Signifikanz
Stimulus	-	-	Sig. < 0,001
Raumakustik	Ja (Sig. 0,862)	-	Sig. < 0,001
Beschallung	Ja (Sig. 0,265)	-	Sig. 0,132
Hörposition	-	-	Sig. 0,069
Raumakustik / Beschallung	Ja (Sig. 0,052)	-	Sig. < 0,001
Raumakustik / Stimulus	Ja (Sig. 0,563)	-	Sig. 0,040
Raumakustik / Hörposition	Ja (Sig. 0,061)	-	Sig. < 0,001
Beschallung / Stimulus	Ja (Sig. 0,827)	-	Sig. 0,073
Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,685)	-	Sig. 0,454
Stimulus / Hörposition	-	-	Sig. 0,791
Stimulus / Raumakustik / Beschallung	Ja (Sig. 0,176)	-	Sig. 0,438
Stimulus / Raumakustik / Hörposition	Ja (Sig. 0,080)	-	Sig. 0,231
Stimulus / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,091)	-	Sig. 0,891
Raumakustik / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,182)	-	Sig. 0,486
Stimulus / Raumakustik / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,420)	-	Sig. 0,089

Tab. 7: Übersicht zu Sphärizität und resultierende Signifikanz zur AV: Nachhall

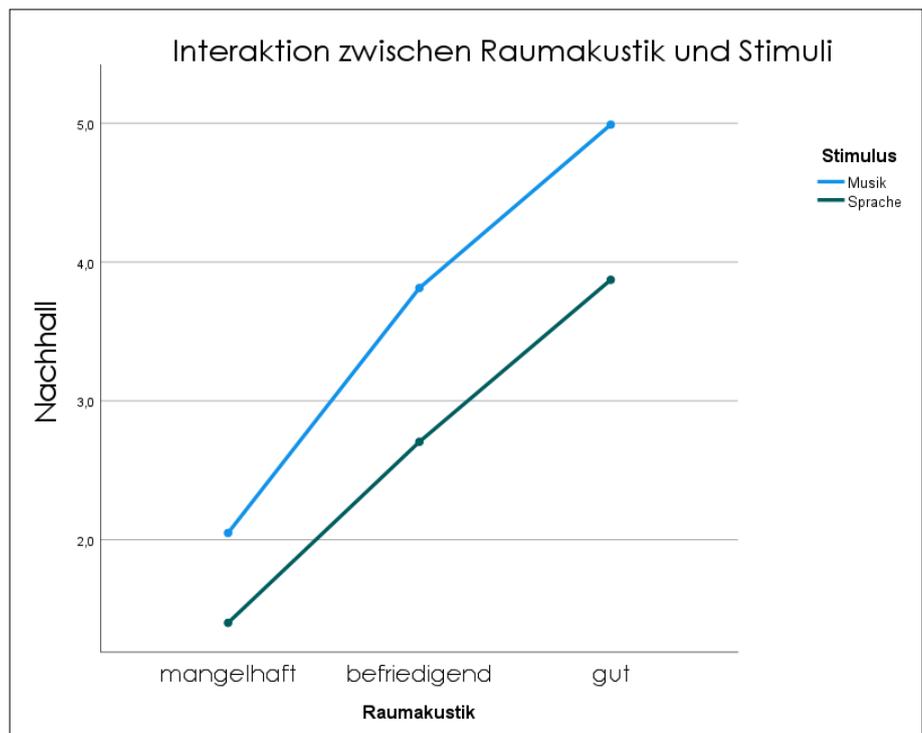


Abb. 49: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und Stimulus, AV: Nachhall (Quelle: SPSS)

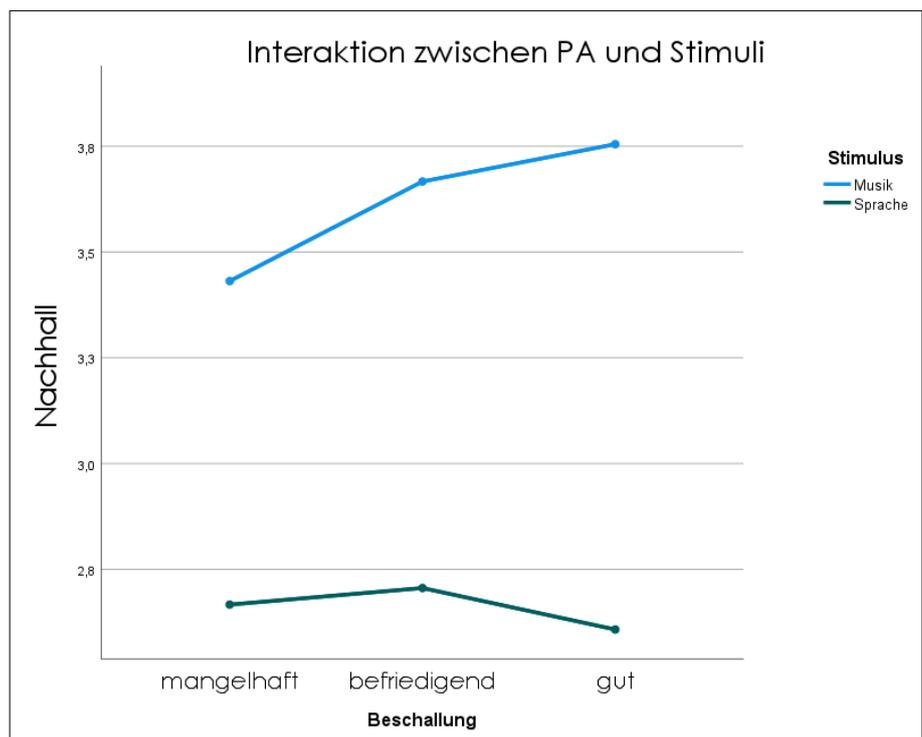


Abb. 50: Interaktionen zwischen den UVs Beschallung und Stimulus, AV: Nachhall (Quelle: SPSS)

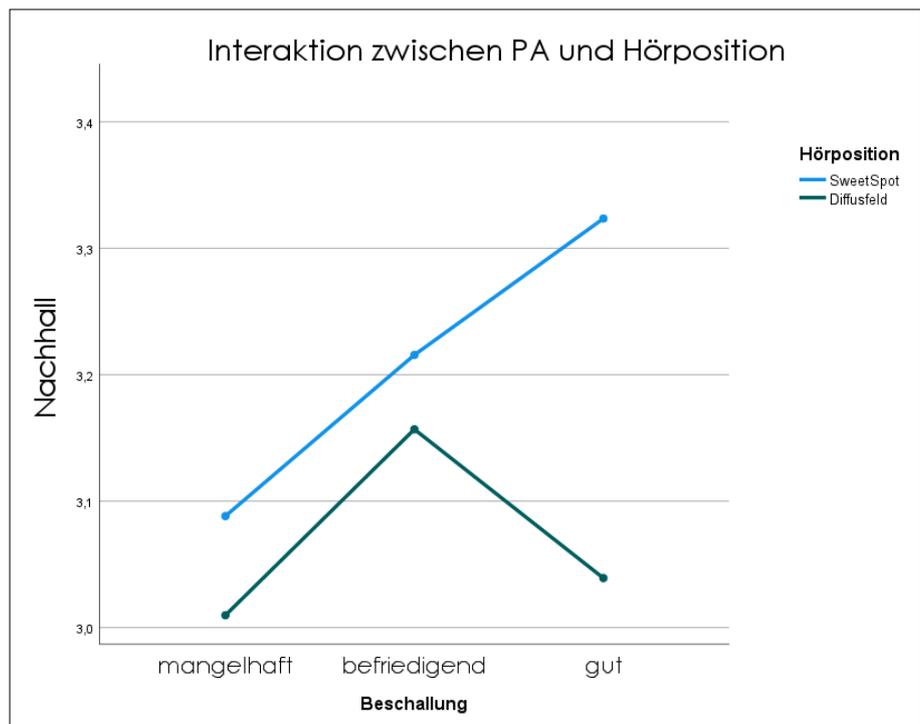


Abb. 51: Interaktionen zwischen den UVs Beschallung und Hörposition, AV: Nachhall (Quelle: SPSS)

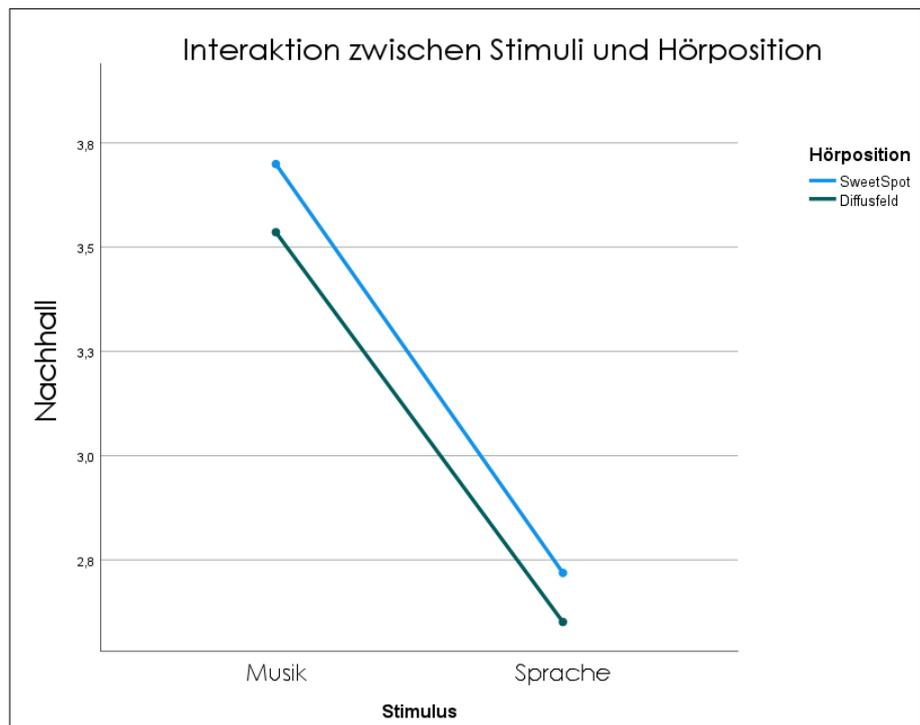


Abb. 52: Interaktionen zwischen den UVs Stimulus und Hörposition, AV: Nachhall (Quelle: SPSS)

RÄUMLICHKEIT

	Sphärizität angenommen?	Korrektur nach Greenhouse-Geisser	resultierende Signifikanz
Stimulus	-	-	Sig. < 0,001
Raumakustik	Ja (Sig. 0,052)	-	Sig. < 0,001
Beschallung	Ja (Sig. 0,071)	-	Sig. 0,951
Hörposition	-	-	Sig. 0,008
Raumakustik / Beschallung	Ja (Sig. 0,812)	-	Sig. 0,026
Raumakustik / Stimulus	Ja (Sig. 0,081)	-	Sig. 0,070
Raumakustik / Hörposition	Ja (Sig. 0,373)	-	Sig. < 0,001
Beschallung / Stimulus	Nein (Sig. 0,013)	Sig. 0,912	Sig. 0,912
Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,240)	-	Sig. 0,369
Stimulus / Hörposition	-	-	Sig. 0,790
Stimulus / Raumakustik / Beschallung	Ja (Sig. 0,117)	-	Sig. 0,656
Stimulus / Raumakustik / Hörposition	Ja (Sig. 0,572)	-	Sig. 0,706
Stimulus / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,303)	-	Sig. 0,096
Raumakustik / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,352)	-	Sig. 0,566
Stimulus / Raumakustik / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,464)	-	Sig. 0,828

Tab. 8. Übersicht zu Sphärizität und resultierende Signifikanz zur AV: Räumlichkeit

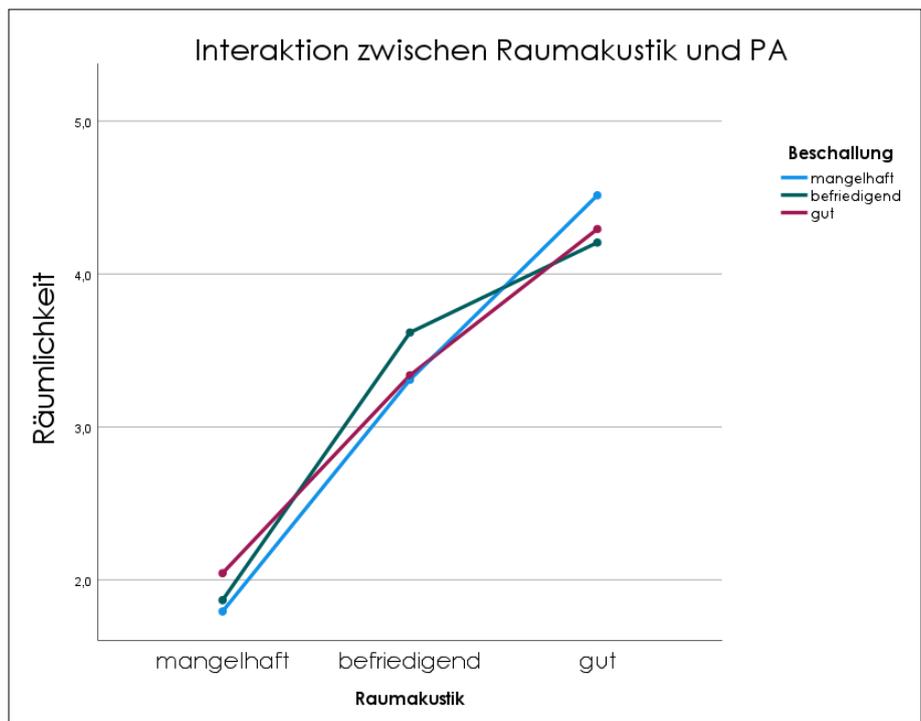


Abb. 53: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und Beschallung, AV: Räumlichkeit (Quelle: SPSS)

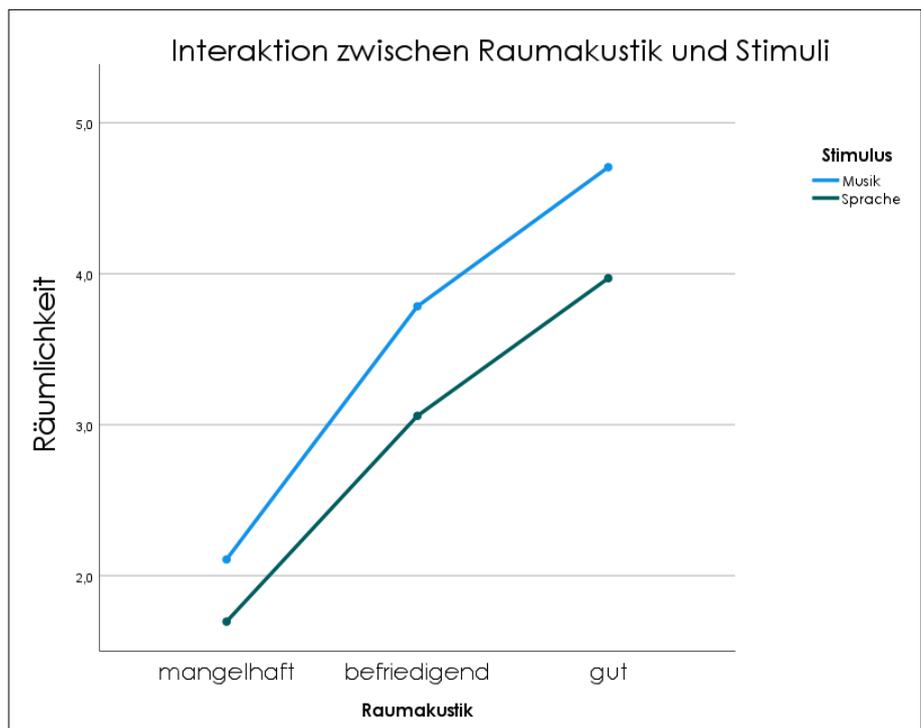


Abb. 54: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und Stimulus, AV: Räumlichkeit (Quelle: SPSS)

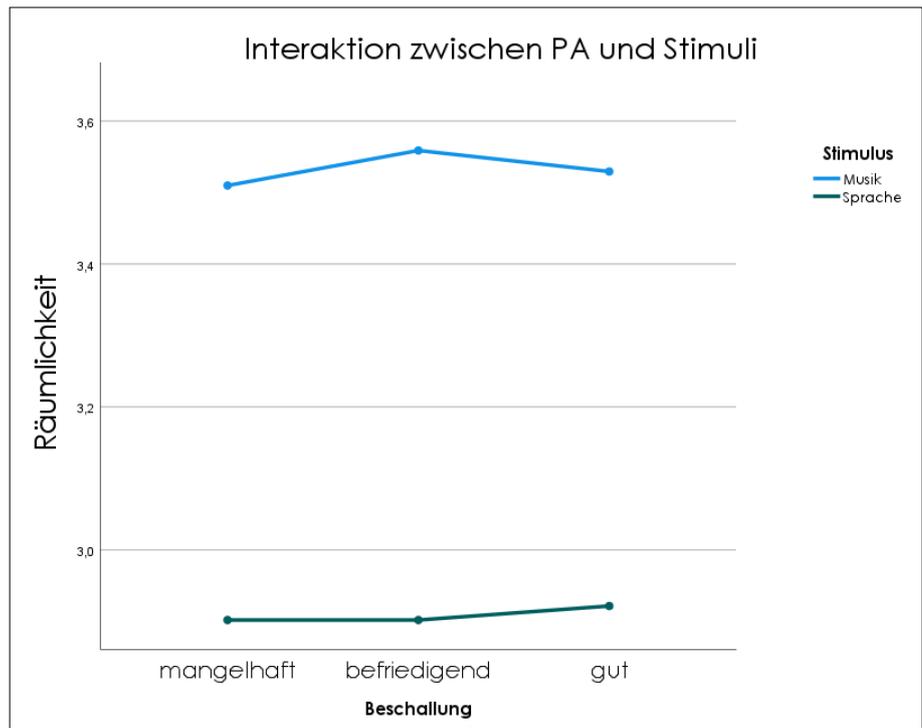


Abb. 55: Interaktionen zwischen den UVs Beschallung und Stimulus, AV: Räumlichkeit (Quelle: SPSS)

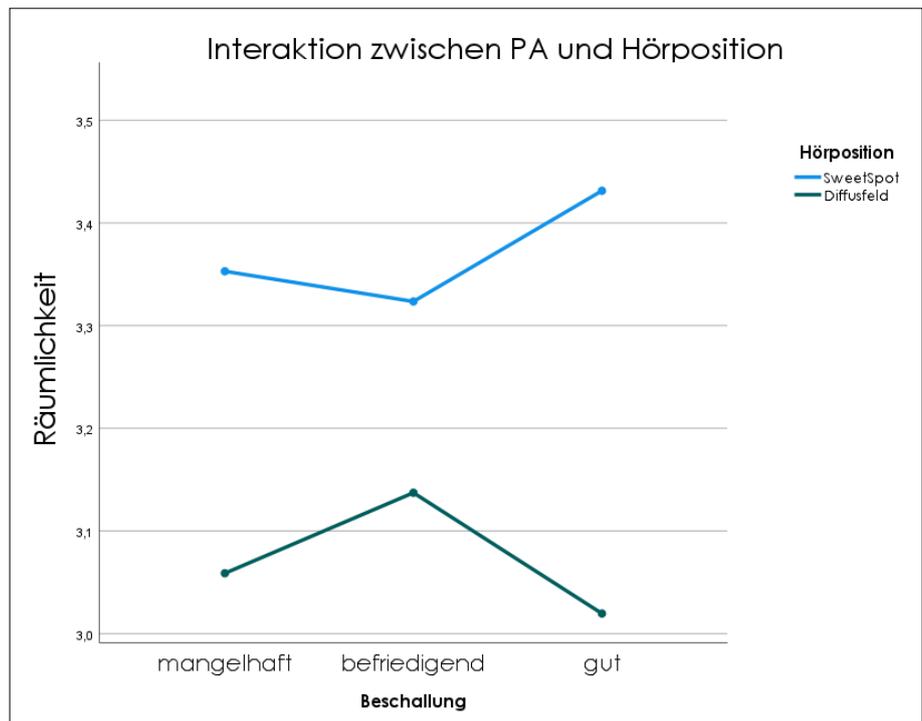


Abb. 56: Interaktionen zwischen den UVs Beschallung und Hörposition, AV: Räumlichkeit (Quelle: SPSS)

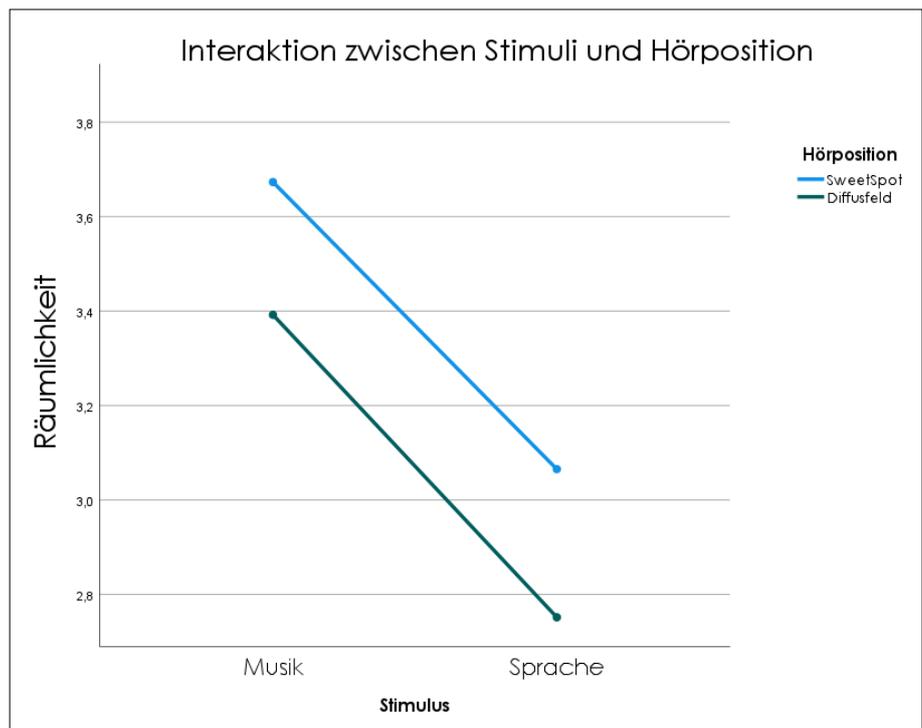


Abb. 57: Interaktionen zwischen den UVs Stimulus und Hörposition, AV: Räumlichkeit (Quelle: SPSS)

KLARHEIT

	Sphärizität angenommen?	Korrektur nach Greenhouse-Geisser	resultierende Signifikanz
Stimulus	-	-	Sig. 0,174
Raumakustik	Ja (Sig. 0,216)	-	Sig. < 0,001
Beschallung	Ja (Sig. 0,110)	-	Sig. 0,499
Hörposition	-	-	Sig. 0,247
Raumakustik / Beschallung	Ja (Sig. 0,940)	-	Sig. < 0,001
Raumakustik / Stimulus	Ja (Sig. 0,521)	-	Sig. < 0,001
Raumakustik / Hörposition	Ja (Sig. 0,129)	-	Sig. < 0,001
Beschallung / Stimulus	Ja (Sig. 0,973)		Sig. 0,366
Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,136)	-	Sig. 0,179
Stimulus / Hörposition	-	-	Sig. 0,359
Stimulus / Raumakustik / Beschallung	Nein (Sig. 0,004)	Sig. 0,725	Sig. 0,725
Stimulus / Raumakustik / Hörposition	Ja (Sig. 0,595)	-	Sig. 0,920
Stimulus / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,010)	-	Sig. 0,438
Raumakustik / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,311)	-	Sig. 0,826
Stimulus / Raumakustik / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,494)	-	Sig. 0,629

Tab. 9: Übersicht zu Sphärizität und resultierende Signifikanz zur AV: Klarheit

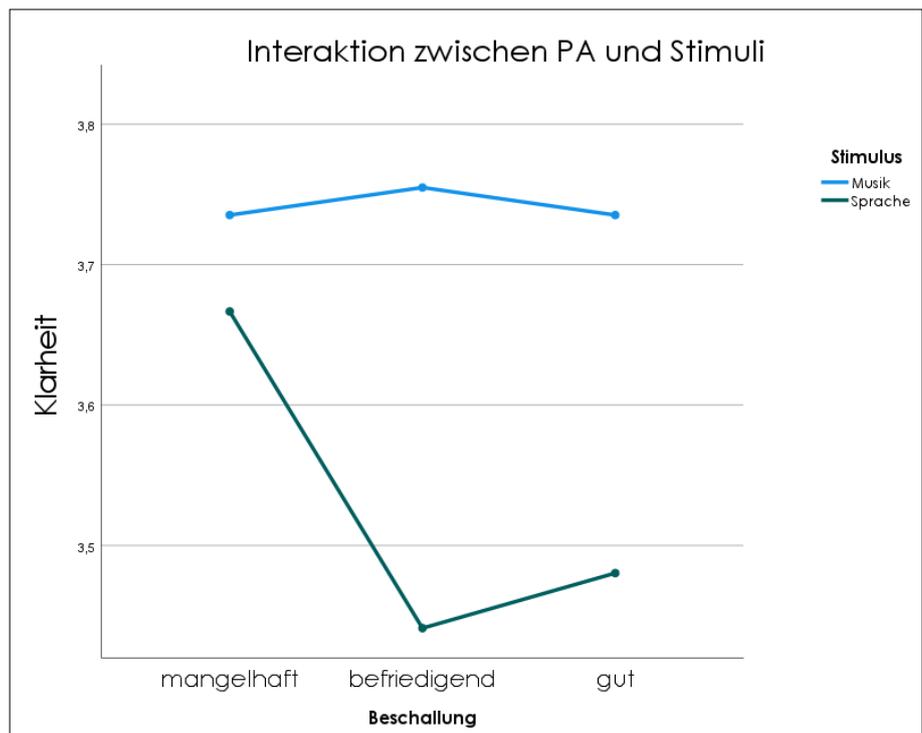


Abb. 58: Interaktionen zwischen den UVs Beschallung und Stimulus, AV: Klarheit (Quelle: SPSS)

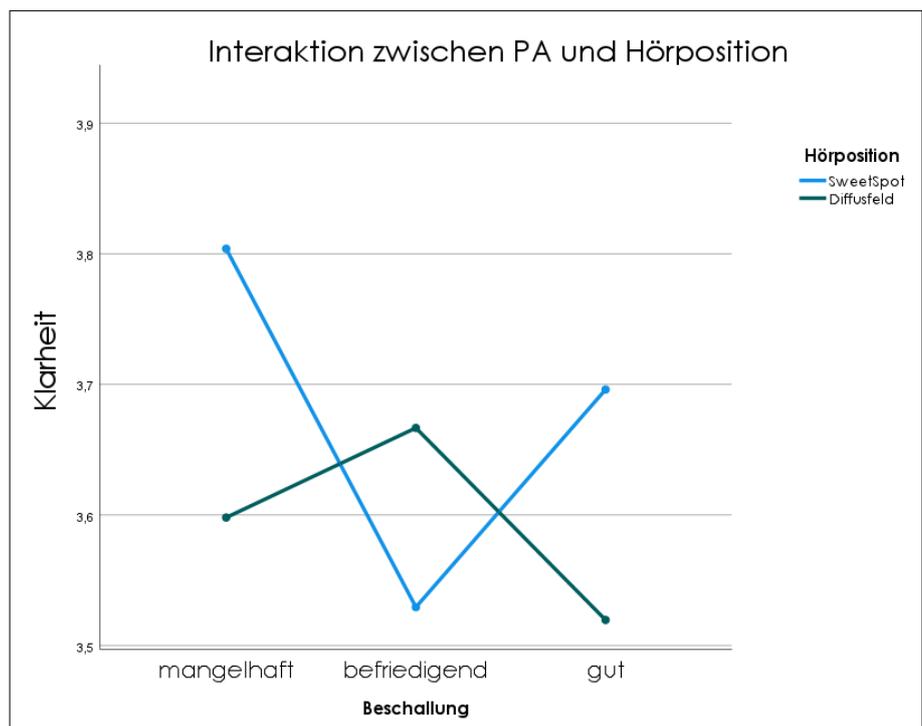


Abb. 59: Interaktionen zwischen den UVs Beschallung und Hörposition, AV: Klarheit (Quelle: SPSS)

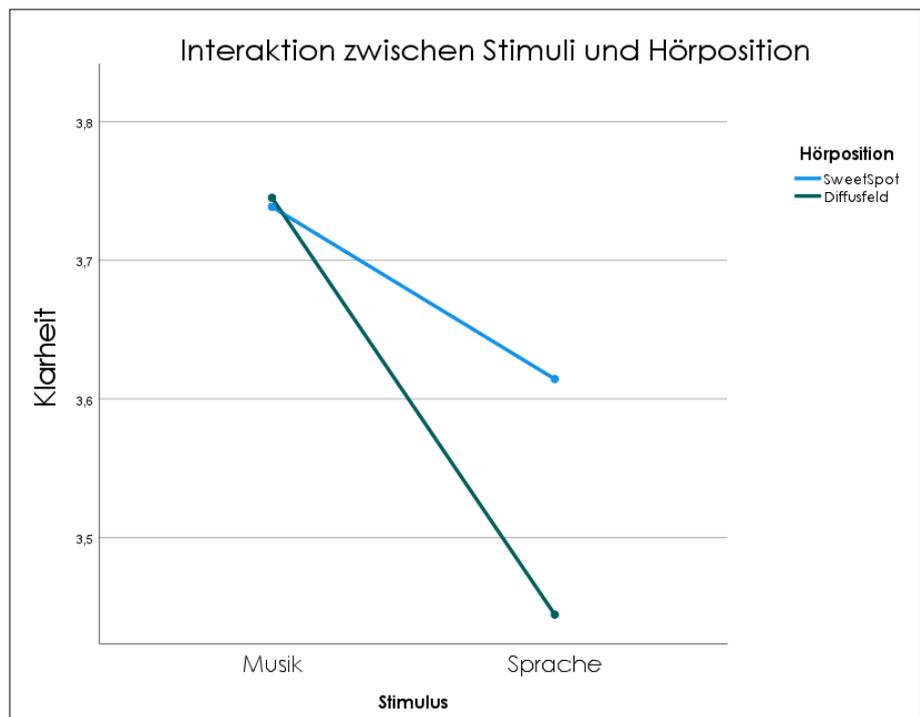


Abb. 60: Interaktionen zwischen den UVs Stimulus und Hörposition, AV: Klarheit (Quelle: SPSS)

INTIMITÄT

	Sphärizität angenommen?	Korrektur nach Greenhouse-Geisser	resultierende Signifikanz
Stimulus	-	-	Sig. 0,003
Raumakustik	Nein (Sig. 0,039)	Sig. < 0,001	Sig. < 0,001
Beschallung	Ja (Sig. 0,189)	-	Sig. 0,185
Hörposition	-	-	Sig. 0,004
Raumakustik / Beschallung	Ja (Sig. 0,051)	-	Sig. 0,021
Raumakustik / Stimulus	Ja (Sig. 0,384)	-	Sig. < 0,001
Raumakustik / Hörposition	Ja (Sig. 0,954)	-	Sig. 0,007
Beschallung / Stimulus	Ja (Sig. 0,532)	-	Sig. 0,673
Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,997)	-	Sig. 0,077
Stimulus / Hörposition	-	-	Sig. 0,802
Stimulus / Raumakustik / Beschallung	Ja (Sig. 0,339)	-	Sig. 0,223
Stimulus / Raumakustik / Hörposition	Ja (Sig. 0,348)	-	Sig. 0,691
Stimulus / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,998)	-	Sig. 0,088
Raumakustik / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,133)	-	Sig. 0,751
Stimulus / Raumakustik / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,249)	-	Sig. 0,434

Tab. 10: Übersicht zu Sphärizität und resultierende Signifikanz zur AV: Intimität

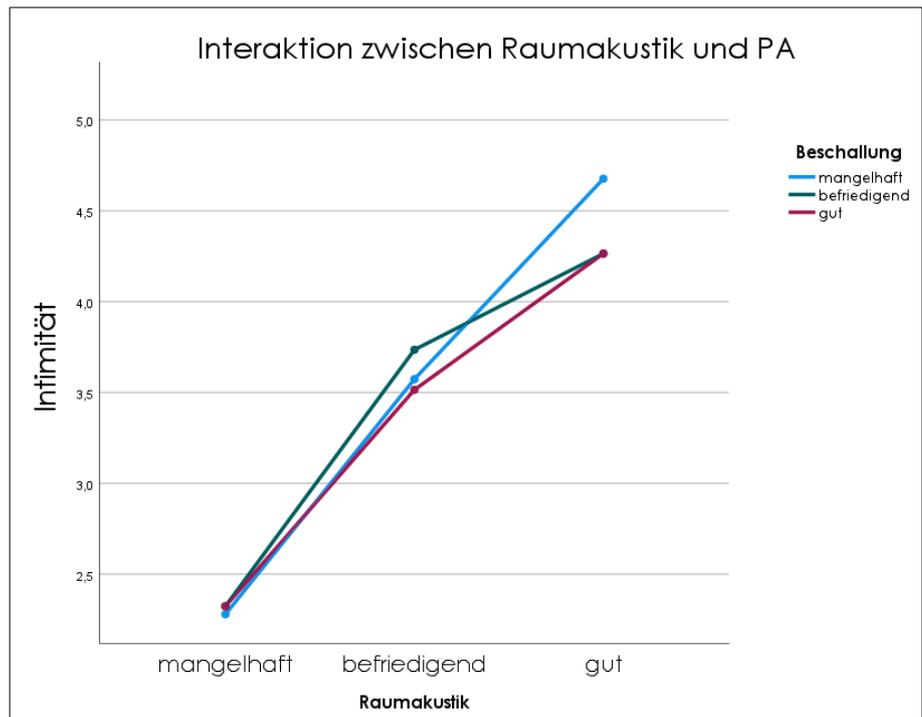


Abb. 61: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und Beschallung, AV: Intimität (Quelle: SPSS)

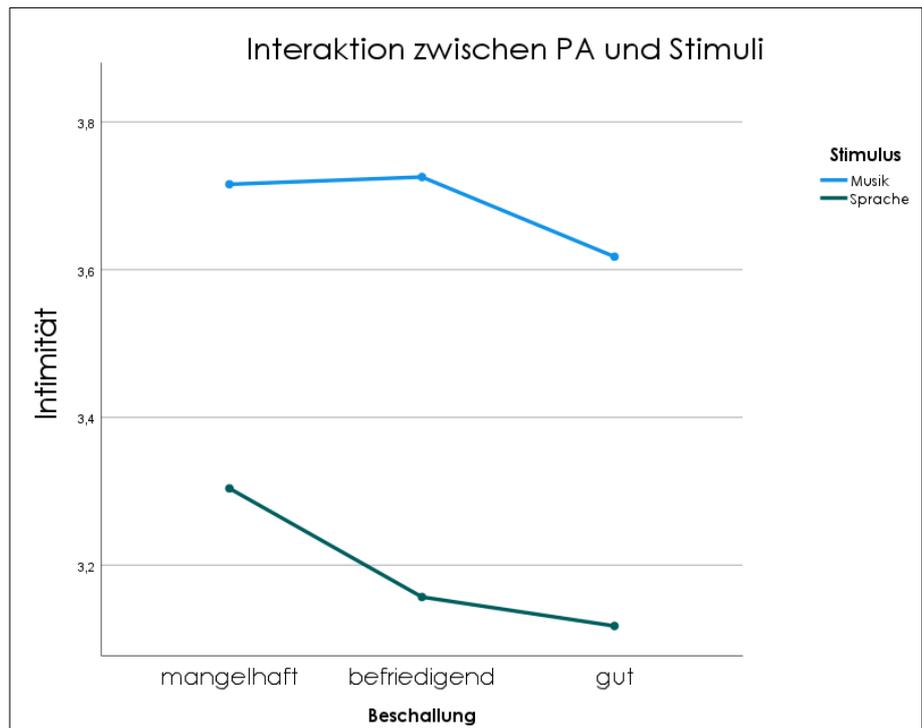


Abb. 62: Interaktionen zwischen den UVs Beschallung und Stimulus, AV: Intimität (Quelle: SPSS)

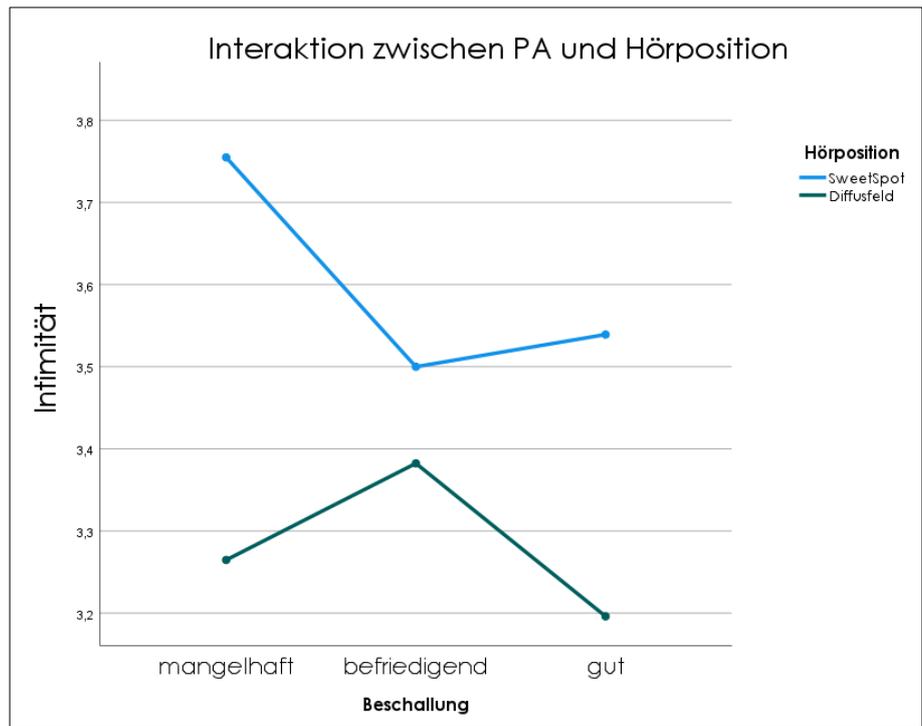


Abb. 63: Interaktionen zwischen den UVs Beschallung und Hörposition, AV: Intimität (Quelle: SPSS)

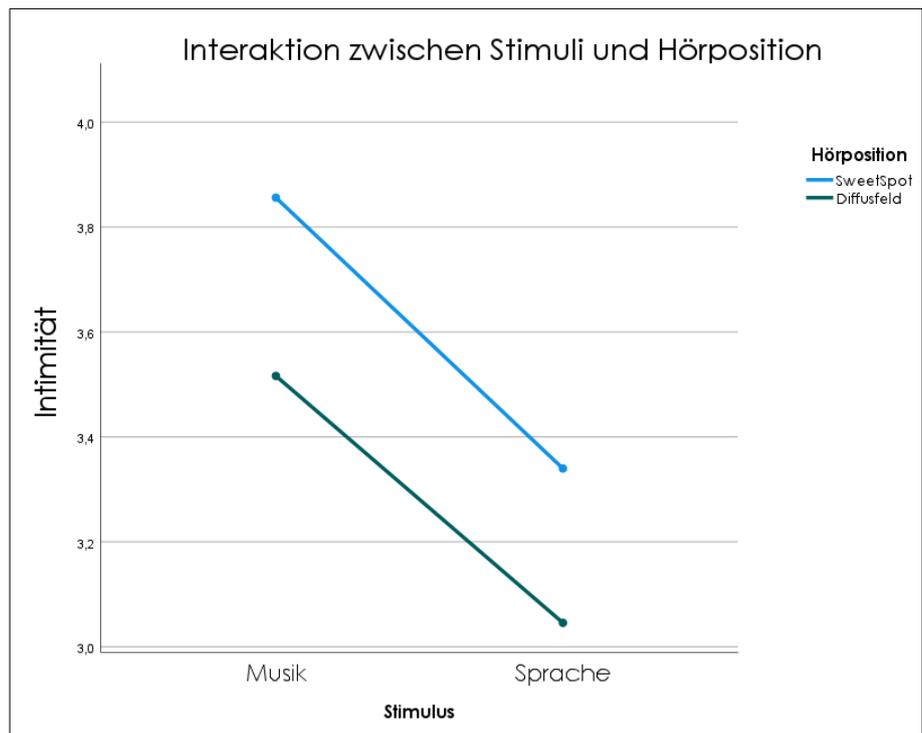


Abb. 64: Interaktionen zwischen den UVs Stimulus und Hörposition, AV: Intimität (Quelle: SPSS)

VERSTÄNDLICHKEIT

	Sphärizität angenommen?	Korrektur nach Greenhouse-Geisser	resultierende Signifikanz
Stimulus	-	-	Sig. 0,030
Raumakustik	Nein (Sig. 0,044)	Sig. < 0,001	Sig. < 0,001
Beschallung	Nein (Sig. 0,018)	Sig. 0,230	Sig. 0,230
Hörposition	-	-	Sig. 0,004
Raumakustik / Beschallung	Ja (Sig. 0,659)	-	Sig. 0,009
Raumakustik / Stimulus	Ja (Sig. 0,832)	-	Sig. 0,056
Raumakustik / Hörposition	Ja (Sig. 0,534)	-	Sig. < 0,001
Beschallung / Stimulus	Ja (Sig. 0,104)	-	Sig. 0,433
Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,280)	-	Sig. 0,002
Stimulus / Hörposition	-	-	Sig. 0,507
Stimulus / Raumakustik / Beschallung	Ja (Sig. 0,186)		Sig. 0,572
Stimulus / Raumakustik / Hörposition	Ja (Sig. 0,759)	-	Sig. 0,422
Stimulus / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,165)	-	Sig. 0,237
Raumakustik / Beschallung / Hörposition	Nein (Sig. 0,037)	Sig. 0,700	Sig. 0,700
Stimulus / Raumakustik / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,680)	-	Sig. 0,059

Tab. 11. Übersicht zu Sphärizität und resultierende Signifikanz zur AV: Verständlichkeit

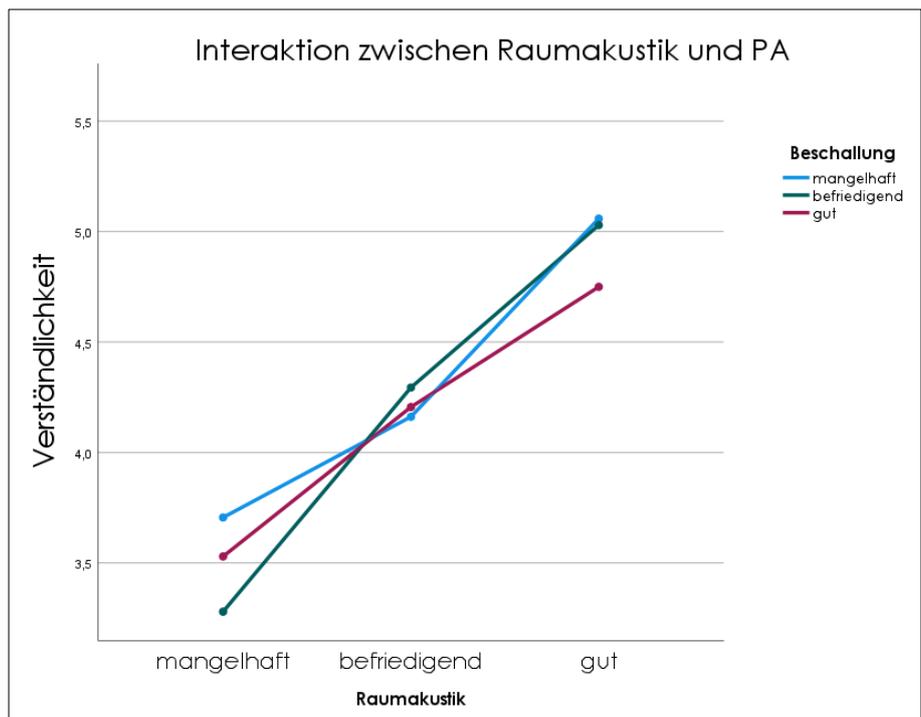


Abb. 65: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und PA, AV: Verständlichkeit (Quelle: SPSS)

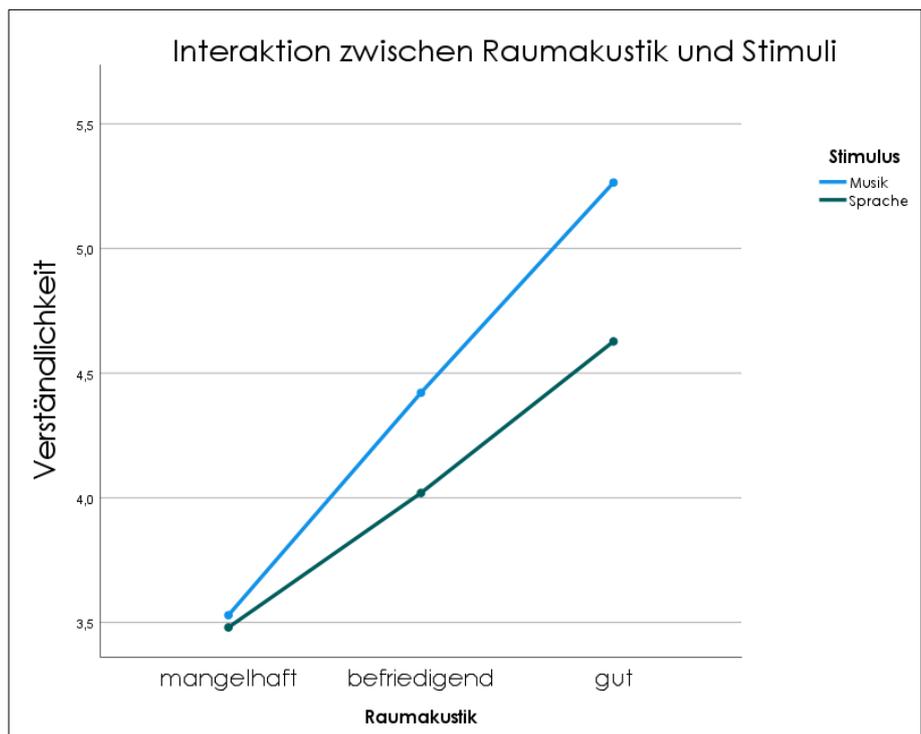


Abb. 66: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und Stimulus, AV: Verständlichkeit (Quelle: SPSS)

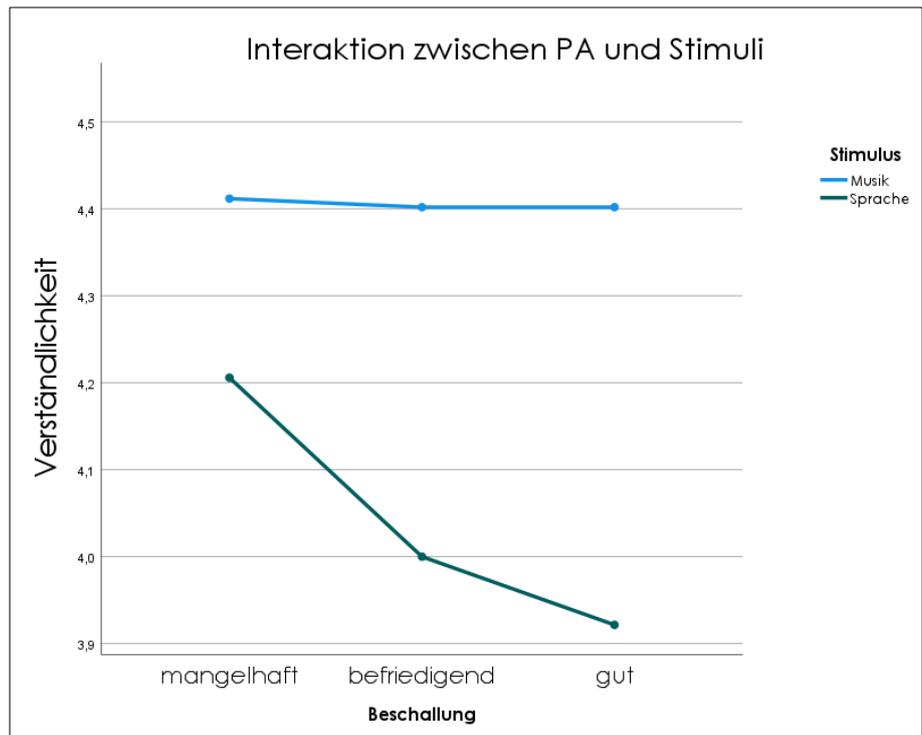


Abb. 67: Interaktionen zwischen den UVs Beschallung und Stimulus, AV: Verständlichkeit (Quelle: SPSS)

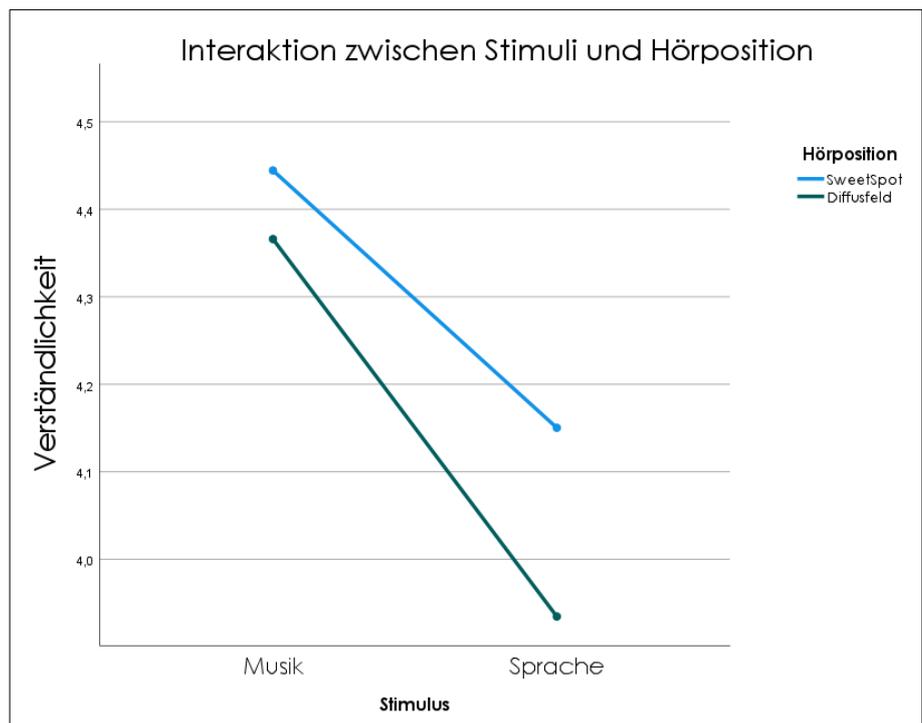


Abb. 68: Interaktionen zwischen den UVs Stimulus und Hörposition, AV: Verständlichkeit (Quelle: SPSS)

KLANGFÄRBUNG

	Sphärizität angenommen?	Korrektur nach Greenhouse-Geisser	resultierende Signifikanz
Stimulus	-	-	Sig. 0,019
Raumakustik	Nein (Sig. 0,006)	Sig. < 0,001	Sig. < 0,001
Beschallung	Ja (Sig. 0,812)	-	Sig. < 0,001
Hörposition	-	-	Sig. 0,798
Raumakustik / Beschallung	Ja (Sig. 0,254)	-	Sig. 0,010
Raumakustik / Stimulus	Ja (Sig. 0,188)	-	Sig. 0,001
Raumakustik / Hörposition	Ja (Sig. 0,725)	-	Sig. 0,016
Beschallung / Stimulus	Ja (Sig. 0,471)	-	Sig. 0,050
Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,649)	-	Sig. 0,058
Stimulus / Hörposition	-	-	Sig. 0,014
Stimulus / Raumakustik / Beschallung	Ja (Sig. 0,428)	-	Sig. 0,685
Stimulus / Raumakustik / Hörposition	Ja (Sig. 0,627)	-	Sig. 0,328
Stimulus / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,502)	-	Sig. 0,823
Raumakustik / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,410)	-	Sig. 0,661
Stimulus / Raumakustik / Beschallung / Hörposition	Ja (Sig. 0,168)	-	Sig. 0,537

Tab. 12. Übersicht zu Sphärizität und resultierende Signifikanz zur AV: Klangfärbung

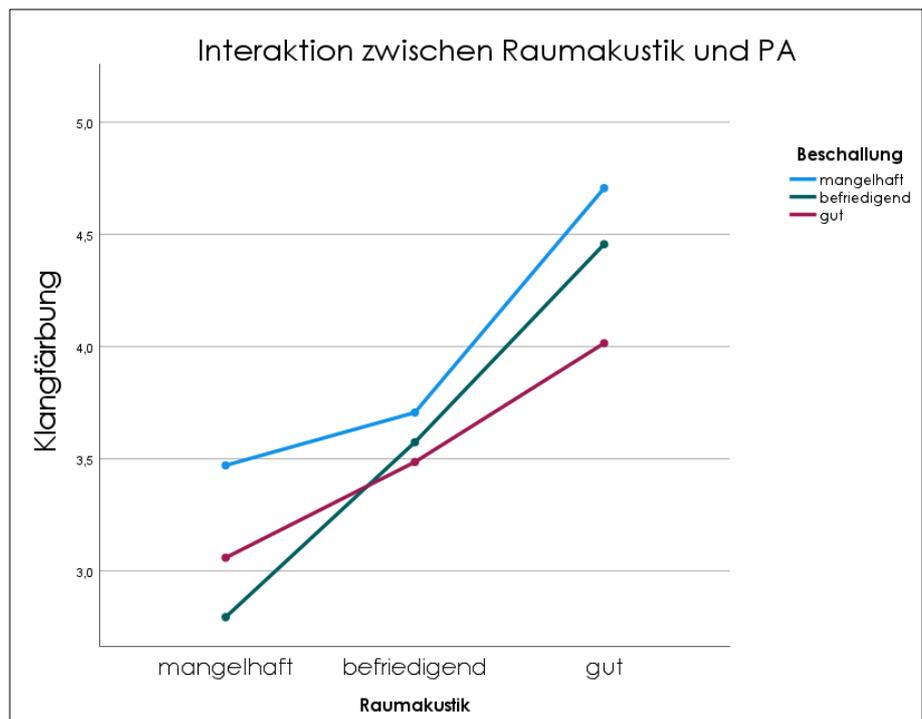


Abb. 69: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und Beschallung, AV: Klangfärbung (Quelle: SPSS)

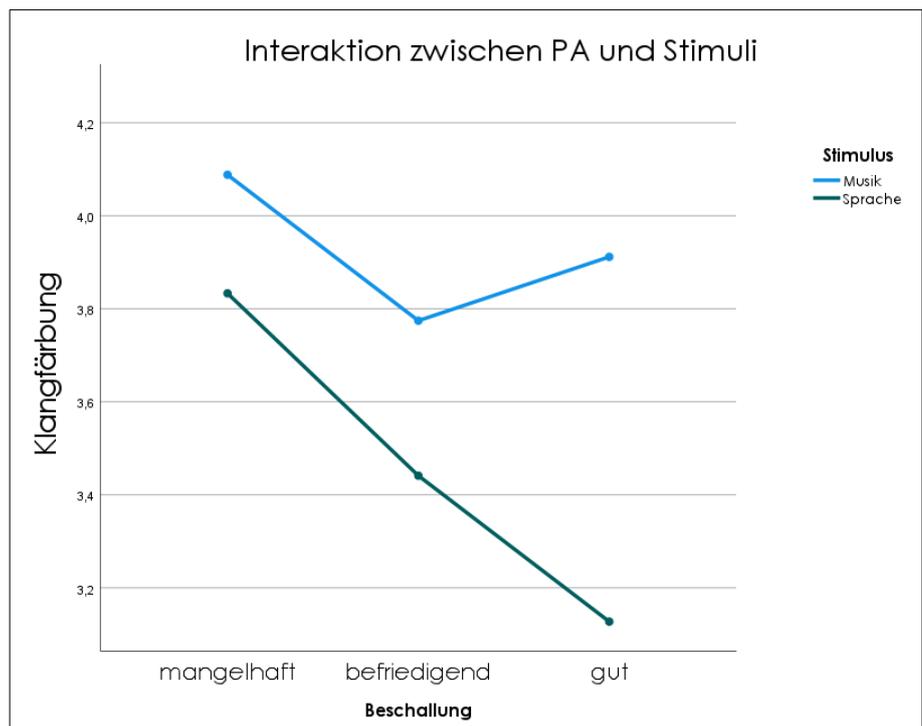


Abb. 70: Interaktionen zwischen den UVs Beschallung und Stimulus, AV: Klangfärbung (Quelle: SPSS)

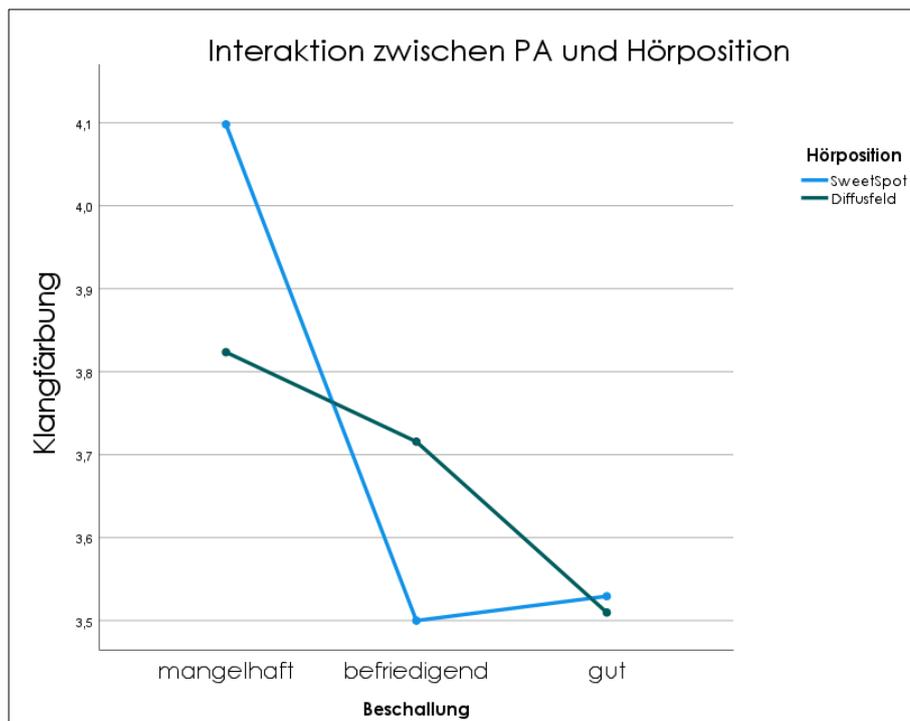


Abb. 71: Interaktionen zwischen den UVs Beschallung und Hörposition, AV: Klangfärbung (Quelle: SPSS)

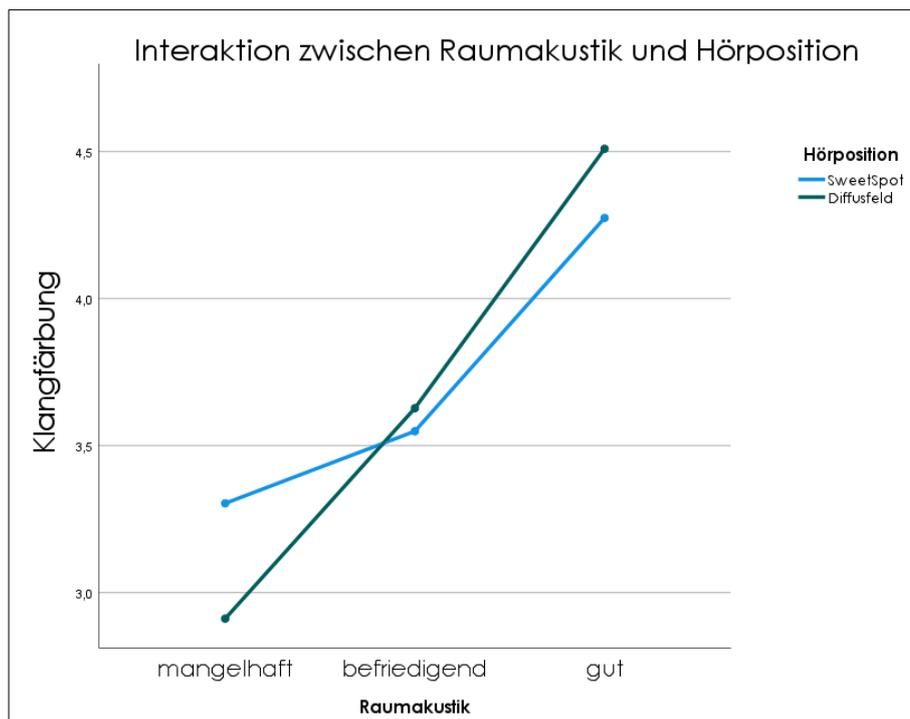


Abb. 72: Interaktionen zwischen den UVs Raumakustik und Hörposition, AV: Klangfärbung (Quelle: SPSS)

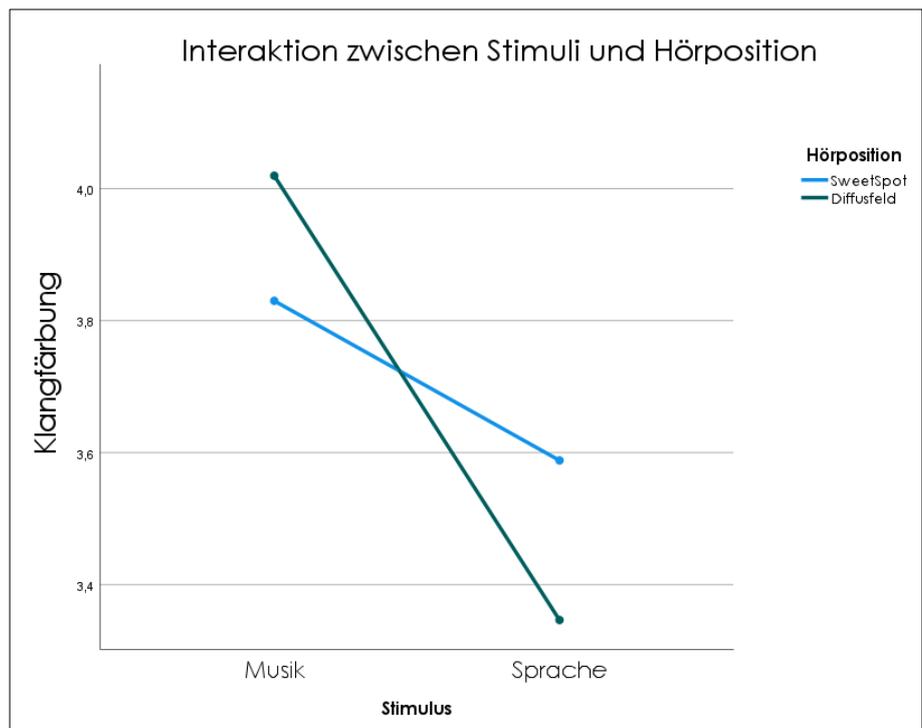


Abb. 73: Interaktionen zwischen den UVs Stimulus und Hörposition, AV: Klangfärbung (Quelle: SPSS)

Anhang 10: Daten zur raumakustischen Messung der Referenzhalle

Frequenz [Hz]	Messung 1 [s]	Messung 2 [s]	Messung 3 [s]	<u>Mittelwert</u> [s]
50	1,95	2,14	2,05	<u>2,05</u>
63	2,56	2,28	2,48	<u>2,44</u>
80	2,31	2,43	2,29	<u>2,34</u>
100	2,17	2,09	2,27	<u>2,18</u>
125	2,15	2,17	2,08	<u>2,13</u>
160	1,74	1,63	1,77	<u>1,71</u>
200	1,56	1,65	1,55	<u>1,59</u>
250	1,51	1,50	1,36	<u>1,46</u>
315	1,17	1,46	1,13	<u>1,25</u>
400	1,56	1,54	1,19	<u>1,43</u>
500	1,58	1,51	1,39	<u>1,49</u>
630	1,51	1,52	1,24	<u>1,42</u>
800	1,33	1,41	1,27	<u>1,34</u>
1000	1,40	1,43	1,06	<u>1,30</u>
1250	1,36	1,41	1,29	<u>1,35</u>
1600	1,34	1,38	1,24	<u>1,32</u>
2000	1,36	1,34	1,26	<u>1,32</u>
2500	1,21	1,10	0,99	<u>1,10</u>
3150	1,06	1,05	1,59	<u>1,23</u>
4000	0,94	0,95	0,79	<u>0,89</u>
5000	0,81	0,82	1,54	<u>1,06</u>
6300	0,65	0,65	0,60	<u>0,63</u>
8000	0,54	0,55	0,48	<u>0,52</u>
10000	0,43	0,41	0,47	<u>0,44</u>

Tab. 13: Daten des Messgeräts NTi XL2 der raumakustischen Messung der Referenzhalle

f	Impulsantwort 1			Impulsantwort 2			Impulsantwort 3			Impulsantwort 4			Impulsantwort 5			Impulsantwort 6			Mittelwerte		
	[Hz]	T10 [s]	T30 [s]	C50 [dB]	T10 [s]	T30 [s]	C50 [dB]	T10 [s]	T30 [s]												
100	2,89	3,10	-1,0	2,86	2,36	-3,0	1,76	1,85	-2,7	2,28	2,15	-2,3	2,45	2,22	-4,3	2,19	2,12	-1,5	2,41	2,30	-2,47
125	1,27	2,01	-4,8	2,19	2,08	0,8	1,23	1,92	-3,4	1,85	1,99	2,2	2,38	1,78	-0,2	2,92	2,42	-5,3	1,97	2,03	-1,78
160	1,75	1,57	-0,4	1,34	1,64	-4,5	1,92	1,59	1,9	2,08	1,79	0,1	1,91	1,71	-1,6	1,45	1,60	-4,4	1,74	1,65	-1,48
200	1,43	1,54	-1,0	0,84	1,59	-9,2	1,63	1,56	0,0	1,57	1,70	-5,6	1,17	1,55	-3,0	1,91	1,66	8,4	1,43	1,60	-1,73
250	1,86	1,50	-2,6	1,55	1,49	-3,5	1,72	1,48	-1,2	1,75	1,62	-5,7	1,24	1,50	-5,2	1,28	1,54	10,9	1,57	1,52	-1,22
315	1,27	1,48	-3,9	1,10	1,35	1,2	1,34	1,41	-3,3	1,22	1,36	2,1	1,71	1,39	0,2	1,59	1,34	8,6	1,37	1,39	0,82
300	1,43	1,50	-4,8	1,36	1,64	6,7	1,37	1,30	-6,1	1,27	1,54	1,8	1,16	1,42	-3,2	1,77	1,39	3,9	1,39	1,47	-0,28
500	1,65	1,53	-3,0	1,63	1,46	-0,2	1,53	1,58	-1,0	1,53	1,53	3,0	0,78	1,42	-1,5	1,17	1,47	1,6	1,38	1,50	-0,18
630	1,50	1,47	1,9	1,61	1,53	-2,9	1,76	1,44	1,0	1,62	1,46	-5,1	1,29	1,34	1,8	1,36	1,48	1,3	1,52	1,45	-0,33
800	1,32	1,42	-3,3	1,25	1,45	-0,4	1,62	1,43	3,6	1,42	1,46	-1,1	1,17	1,37	-1,3	1,42	1,34	5,3	1,37	1,41	0,47
1000	1,39	1,45	-4,4	1,62	1,49	1,3	1,19	1,42	0,4	1,39	1,42	-3,1	1,30	1,24	0,3	1,07	1,35	1,5	1,33	1,40	-0,67
1250	1,21	1,43	0,4	1,42	1,54	0,7	1,27	1,50	0,6	1,57	1,54	-0,7	1,27	1,25	5,0	1,10	1,29	3,7	1,31	1,43	1,62
1600	1,21	1,30	1,2	1,23	1,39	2,3	1,34	1,38	-0,5	1,47	1,35	-4,3	1,34	1,30	2,8	1,10	1,29	4,8	1,28	1,34	1,05
2000	1,31	1,38	-1,3	1,22	1,37	-1,0	1,25	1,39	0,0	1,31	1,38	-1,0	1,20	1,16	7,0	0,87	1,17	5,1	1,19	1,31	1,47
2500	1,08	1,27	-0,1	1,14	1,30	-0,3	1,09	1,27	-0,3	1,21	1,24	1,8	1,13	1,14	2,0	0,94	1,10	6,8	1,10	1,22	1,65
3150	1,02	1,10	0,8	1,08	1,13	5,5	1,01	1,15	1,5	1,14	1,11	3,6	1,01	1,08	0,2	0,93	1,07	4,2	1,03	1,11	2,63
4000	0,91	1,00	3,5	0,96	0,99	4,6	0,86	0,96	5,1	0,92	1,00	5,2	0,78	0,90	7,8	0,79	0,93	8,0	0,87	0,96	5,70
5000	0,69	0,80	2,3	0,84	0,81	3,6	0,85	0,84	7,0	0,85	0,81	8,2	0,69	0,78	6,1	0,67	0,75	6,5	0,77	0,80	5,62
6300	0,57	0,69	1,5	0,66	0,69	5,4	0,69	0,67	4,8	0,69	0,69	6,5	0,62	0,64	4,6	0,53	0,64	7,9	0,63	0,67	5,12
8000	0,60	0,54	4,0	0,52	0,55	6,5	0,49	0,55	8,8	0,53	0,54	9,8	0,50	0,51	4,9	0,49	0,48	11,0	0,52	0,53	7,50
10000	0,48	0,44	8,4	0,40	0,45	8,6	0,38	0,41	11,9	0,40	0,46	13,1	0,20	0,40	13,4	0,51	0,41	13,1	0,40	0,43	11,42

Tab. 14: in EASERA ausgewertete Daten der aufgezeichneten Impulsantworten der Referenzhalle

Anhang 11: Überschlägige Kostenaufstellung

Raumakustik 1 - mangelhaft						
Oberflächen	Material	Fläche [m ²]	Materialkosten	Installation	Architektin	Ingenieurin
Kühlhaus	Tonziegel	78,1				
Hallenwand Fensterseite	Concrete Smooth	279,4				
Hallenwand langer Tresen	Concrete Smooth	351,6				
Hallenwand Stirnseite (Tribüne)	Concrete Smooth	153,3				
Hallenwand Stirnseite (Kühlhaus)	Concrete Smooth	197,8				
Hallendecke	Ceiling Baffle T200	1181,4	82.698,00 €	20.674,50 €	7.442,82 €	5.788,86 €
Stehtribüne Wand	Velour Heavy	99	6.930,00 €	1.732,50 €	623,70 €	485,10 €
Fenster	Window Glass	86,4				
Total			89.628,00 €	22.407,00 €	8.066,52 €	6.273,96 €
Gesamt						126.375,48 €
Raumakustik 2 - befriedigend						
Oberflächen	Material	Fläche [m ²]	Materialkosten	Installation	Architektin	Ingenieurin
Kühlhaus	Tonziegel	78,1				
Hallenwand Fensterseite	AK12-L-AB	279,4	19.558,00 €	4.889,50 €	1.760,22 €	1.369,06 €
Hallenwand langer Tresen	Concrete Smooth	351,6				
Hallenwand Stirnseite (Tribüne)	Concrete Smooth	153,3				
Hallenwand Stirnseite (Kühlhaus)	Absorption and Diffuse Slot Board 29-3	197,8	13.846,00 €	3.461,50 €	1.246,14 €	969,22 €
Hallendecke	Ceiling Baffle T200	1181,4	82.698,00 €	20.674,50 €	7.442,82 €	5.788,86 €
Stehtribüne Wand	Velour Heavy	99	6.930,00 €	1.732,50 €	623,70 €	485,10 €
Fenster	Window Glass	86,4				
Total			123.032,00 €	30.758,00 €	11.072,88 €	8.612,24 €
Gesamt						173.475,12 €
Raumakustik 3 - gut						
Oberflächen	Material	Fläche [m ²]	Materialkosten	Installation	Architektin	Ingenieurin
Kühlhaus	GYPS/8CEIL und HOLZ/AB20	78,1	5.467,00 €	1.366,75 €	492,03 €	382,69 €
Hallenwand Fensterseite	AK12-L-AB	279,4	19.558,00 €	4.889,50 €	1.760,22 €	1.369,06 €
Hallenwand langer Tresen	Absorption Perforated Panel CK16-16-10/3	351,6	24.612,00 €	6.153,00 €	2.215,08 €	1.722,84 €
Hallenwand Stirnseite (Tribüne)	500HzPANEL	153,3	10.731,00 €	2.682,75 €	965,79 €	751,17 €
Hallenwand Stirnseite (Kühlhaus)	Absorption and Diffuse Slot Board 29-3	197,8	13.846,00 €	3.461,50 €	1.246,14 €	969,22 €
Hallendecke	Ceiling Baffle T200	1181,4	82.698,00 €	20.674,50 €	7.442,82 €	5.788,86 €
Stehtribüne Wand	Velour Heavy	99	6.930,00 €	1.732,50 €	623,70 €	485,10 €
Fenster	Holz/AB30	86,4	6.048,00 €	1.512,00 €	544,32 €	423,36 €
Total			169.890,00 €	42.472,50 €	15.290,10 €	11.892,30 €
Gesamt						239.544,90 €

Tab. 15: überschlägige Kostenübersicht für die Anpassung der Raumakustik

Beschallung 1, mangelhaft: dbTechnologies				
Artikel	Beschreibung	Stk	Stückpreis (brutto)	Total
DVA T8	LineArray Element	16	2.356,00 €	37.696,00 €
DVA S30N	Subwoofer	8	5.422,00 €	43.376,00 €
Flugrahmen	Aufhängung des LineArrays	2	1.572,00 €	3.144,00 €
Anschlussleitungen	Strom		pauschal	300,00 €
	Signal		pauschal	520,00 €
	Netzwerk		pauschal	200,00 €
Planung und Installation	Aufwand in Mannstunden	32	70,00 €	2.240,00 €
			Gesamt:	87.476,00 €
Beschallung 2, befriedigend: Seeburg Acoustic Line				
Artikel	Beschreibung	Stk	Stückpreis (brutto)	Total
GALEO C	LineArray Element	16	3.558,10 €	56.929,60 €
GALEO C Sub	Subwoofer	16	3.320,10 €	53.121,60 €
Flugrahmen	Aufhängung des LineArrays	2	904,00 €	1.808,00 €
Connection Panel CP4.8	Anschlussfeld	2	738,00 €	1.476,00 €
Seeburg S10	4-Kanal DSP-Amp	4	5.105,00 €	20.420,00 €
19 Zoll 7HE Rack	Einbaurack	2	565,00 €	1.130,00 €
Anschlussleitungen	Strom		pauschal	100,00 €
	Signal		pauschal	2.333,00 €
	Netzwerk		pauschal	200,00 €
Planung und Installation	Aufwand in Mannstunden	32	70,00 €	2.240,00 €
			Gesamt:	139.758,20 €
Beschallung 3, gut: d&b audiotechnik				
Artikel	Beschreibung	Stk	Stückpreis (brutto)	Total
XSL8	LineArray Element 80 Grad	12	11.067,00 €	132.804,00 €
XSL12	LineArray Element 120 Grad	4	11.067,00 €	44.268,00 €
XSL-SUB	Subwoofer	16	10.597,00 €	169.552,00 €
Flugrahmen	Aufhängung des LineArrays	2	1.666,00 €	3.332,00 €
d&b D40	DSP-Amp 4-Kanal	8	9.032,00 €	72.256,00 €
19 Zoll 7HE Rack	Einbaurack	2	580,00 €	1.160,00 €
Anschlussleitungen	Strom		pauschal	100,00 €
	Signal		pauschal	2.333,00 €
	Netzwerk		pauschal	200,00 €
Planung und Installation	Aufwand in Mannstunden	32	70,00 €	2.240,00 €
			Gesamt:	428.245,00 €

Tab. 16: überschlägige Kostenaufstellung für die Beschallungstechnik