



Linda Thornton, BA

KULTUR HOF LINZ LIVE:  
RAUMAKUSTISCHE PLANUNG  
EINES VERANSTALTUNGSSAALS

BACHELORARBEIT

eingereicht an der  
Technischen Universität Graz

Betreuer

DI Julian Koch, BSc

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation

Graz, Februar, 2025



## Eidesstattliche Erklärung

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

---

Graz, am

---

(Unterschrift)



## **Abstract (English)**

Room acoustics are of great importance for music and speaking performances and require thorough planning. The standards differ depending on the specific purpose of a room and whether a public-address system is used. This bachelor's thesis provides a design to enhance the room acoustics of a multi-purpose hall, both with and without the use of a sound system. To this end, the target values of objective quality criteria were determined, and their effectiveness was validated by applying geometrical acoustics prediction software. Finally, the electroacoustics were planned based on optimised room acoustics.



## **Kurzfassung**

Die Raumakustik spielt bei Musik- und Sprachdarbietungen eine wichtige Rolle und bedarf sorgfältiger Planung. Die Anforderungen sind je nach Nutzung unterschiedlich und auch abhängig davon, ob eine Beschallungsanlage zum Einsatz kommt. In dieser Bachelorarbeit wurde die Raumakustik für einen Veranstaltungssaal zur Mehrzwecknutzung sowohl mit als auch ohne elektroakustischer Verstärkung geplant. Dazu wurden die Zielwerte objektiver Gütemaße für die vorgesehene Nutzung festgelegt und die Wirksamkeit der Maßnahmen mittels strahlenakustischer Simulation des 3D-Modells überprüft. Anschließend wurde die Elektroakustik für den optimierten Saal geplant.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>III</b>
<b>Abstract (English)</b>	<b>V</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>11</b>
<b>2 Aufgabenstellung und Zielsetzung</b>	<b>13</b>
<b>3 Beschreibung des Raumes</b>	<b>15</b>
<b>4 Methodik</b>	<b>17</b>
4.1 Systematische Vorgangsweise im Planungsprozess . . . . .	17
4.2 Computersimulation - Geometrische Raumakustik . . . . .	18
4.2.1 Grenzen der Anwendung und Lösungsansätze . . . . .	19
4.3 Ermittlung von Schröderfrequenz und Raummoden - Wellentheoretische Raumakustik . . . . .	20
<b>5 Raumakustische Gütemaße</b>	<b>21</b>
5.1 Nachhallzeit $T_{30}$ . . . . .	21
5.2 Anfangsnachhallzeit $EDT$ (Early Decay Time) . . . . .	21
5.3 Bassverhältnis $BR$ (Bass Ratio) . . . . .	22
5.4 Schalldruckpegelverteilung $SPL$ (Sound Pressure Level) . . . . .	22
5.5 Deutlichkeitsmaß $C_{50}$ . . . . .	22
5.6 Seitenschallgrad $LF$ (Lateral Energy Fraction) . . . . .	22
5.7 Sprachübertragungsindex $STI$ (Speech Transmission Index) . . . . .	23
5.8 Stage Support $ST$ . . . . .	23
<b>6 Zielwerte für den Saal</b>	<b>25</b>
6.1 Zielwerte für die Nachhallzeit $T_{30}$ . . . . .	25
6.2 Zielwerte für die Anfangsnachhallzeit $EDT$ . . . . .	27
6.3 Zielwerte für das Bassverhältnis $BR$ . . . . .	27
6.4 Zielwerte für die Schalldruckpegelverteilung $SPL$ . . . . .	27
6.5 Zielwerte für das Deutlichkeitsmaß $C_{50}$ . . . . .	27
6.6 Zielwerte für den Seitenschallgrad $LF$ . . . . .	28
6.7 Zielwerte für den Sprachübertragungsindex $STI$ . . . . .	28
6.8 Zielwerte für den Stage Support $ST$ . . . . .	28
6.9 Zusammenfassung der angestrebten Wertebereiche . . . . .	28
<b>7 Erläuterungen zur Modellbildung</b>	<b>29</b>
7.1 Schallquellen . . . . .	29
7.2 Hörpositionen und Publikumsfläche . . . . .	29
7.3 Modellierung der Materialeigenschaften . . . . .	30
7.4 Berechnungsparameter . . . . .	30
<b>8 Simulationsergebnisse und Ableitung der Maßnahmen</b>	<b>31</b>
8.1 V0: Simulation des Raumentwurfs . . . . .	31
8.2 Ableitung von raumakustischen Maßnahmen . . . . .	38
8.3 V1: Simulation des Raumes mit Maßnahmen . . . . .	39

8.4	Ableitungen für die Elektroakustik . . . . .	46
8.5	V2: Simulation mit raum- und elektroakustischer Optimierung . . . . .	49
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>53</b>
<b>Anhang</b>		<b>LXI</b>
1	Absorptions- und Diffusionskoeffizienten . . . . .	LXI
2	Definition der Quellen . . . . .	LXII
3	Definition der Empfangspositionen . . . . .	LXIV
4	MATLAB-Code zur Berechnung von $LF$ für mehrere Quellen . . . . .	LXV
5	V2: Frequenzabhängige Schalldruckpegelverteilung $SPL$ . . . . .	LXVII

# 1

## Einleitung

Die westliche Kulturgeschichte und das reiche Angebot an Musik- und Kunstvorführungen, die wir heute live miterleben können, zeigen: Es besteht ein besonderer Reiz und Genuss darin, als Zuhörende im hier und jetzt, im Moment des Entstehens mit den Kunstschaffenden anwesend zu sein. Auch wenn es der technische Fortschritt erlaubt, Klangwiedergabe in sehr hoher Qualität praktisch unabhängig vom Aufenthaltsort und Aufführungszeitpunkt zu genießen, ist das gemeinsame Erleben einer Bühnenshow für unzählige Menschen von beachtlichem Wert. Neben dem, was die Künstler\*innen zu bieten haben, wirkt auch der Raum mit, in dem eine Vorstellung stattfindet [1]. Die gelungene Gestaltung der Raumakustik kann ein Hörerlebnis besonders berührend und erinnerungswürdig machen. Umgekehrt können sich akustische Bedingungen auch negativ auf die Wahrnehmung des Gehörten auswirken und mitunter dazu führen, dass der Funke zwischen Darbietenden und Publikum schwer überspringt. Vor dem Hintergrund dieser sehr eindrücklichen Erfahrungen ist ein ausgeprägtes Interesse daran entstanden, die vorliegende Bachelorarbeit als Form des Studiums der akustischen Phänomene, die hierbei eine Rolle spielen, zu verfassen. Die raum- und elektroakustische Planung eines Veranstaltungssaals für Musik- und Sprachdarbietungen bildet dabei den Forschungsgegenstand.

In Kapitel 2 sind die Aufgabenstellung und Zielsetzung beschrieben, in Kapitel 3 der untersuchte Raum. Die Methodik, die dabei zum Einsatz kommt, wird in Kapitel 4 erläutert. Anschließend folgt in Kapitel 5 die Vorstellung von objektiven Kriterien, anhand derer die Qualität der Raumakustik beurteilt werden kann. In Kapitel 6 werden die angestrebten Wertebereiche dieser Gütemaße, die von Volumen und Nutzungszweck des Raumes abhängig sind, ermittelt. Nach Erläuterungen zur Modellbildung in Kapitel 7, die der Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse dienen sollen, werden ebendiese im Kapitel 8 präsentiert und diskutiert. Die Zusammenfassung und der Ausblick in Kapitel 9 bilden den Abschluss der Bachelorarbeit.



## 2

## Aufgabenstellung und Zielsetzung

**In the end, any study of performance hall acoustics has one goal:  
to perfect the audience's enjoyment.**

Leo Beranek

Inhalt dieser Bachelorarbeit ist die raumakustische Planung eines Veranstaltungssaals, der im Zuge der Sanierung eines Kulturzentrums neu errichtet wird. Das Ziel raumakustischer Planung ist es im Allgemeinen, die Wirkung eines Raumes auf den Klang von Sprache und Musik derart zu gestalten, dass dieser den Hörerwartungen der Teilhabenden gerecht wird [2]. Dabei kann es naturgemäß nicht darum gehen, sehr spezifische, individuelle Erwartungen zu erfüllen. Vielmehr soll einer Gruppe aus Darbietenden und Zuhörenden ein akustisches Erlebnis ermöglicht werden und die Qualität des Klangs soll dazu beitragen, vom Inhalt des Dargebotenen erreicht zu werden.

In Forschungsarbeiten konnten Zusammenhänge zwischen subjektiven Wahrnehmungen und Qualitätsbeschreibungen wie z.B. Halligkeit, Deutlichkeit oder Lautstärke, und objektiven Parametern, die ein Schallfeld physikalisch beschreiben, hergestellt werden. Daraus wurden objektive Gütemaße abgeleitet und die Aufgabe in der raumakustischen Planung besteht nun darin, hinsichtlich der Funktion eines Raumes optimale Werte dieser Gütemaße zu gewährleisten [2]. Viele dieser Kriterien haben gemeinsam, dass sie das Verhältnis zwischen „früh“ und „spät“ eintreffender Schallenergie an einem Ort ausdrücken, wobei die zeitlichen Grenzen unterschiedlich definiert sind.

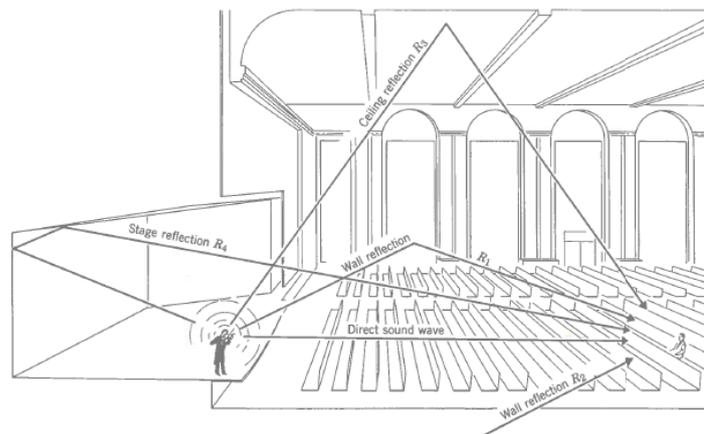


Abbildung 2.1: Illustration der Übertragungswege von Schall zwischen Klangquelle und Empfänger\*in in einem Raum, in Form von Direktschall und frühen Reflexionen, Quelle: [1]

Während im Freien die Stärke einer Schallwelle mit zunehmendem Abstand von der Quelle kontinuierlich abnimmt, werden Schallwellen von Raumbegrenzungsflächen reflektiert und somit wiederholt in den Raum zurückgeworfen. Bei gleicher Entfernung zur Quelle nimmt die Schallenergie daher in einem Raum langsamer ab als im Freien. Abb. 2.1 zeigt, wie an einer Position

in einem Raum sowohl Direktschall als auch mehrere Reflexionen desselben Schallereignisses eintreffen. Aufgrund der längeren Wegstrecken treffen die Reflexionen zeitlich verzögert ein und je nach Beschaffenheit der reflektierenden Oberfläche werden sie nur wenig oder aber stark abgeschwächt.

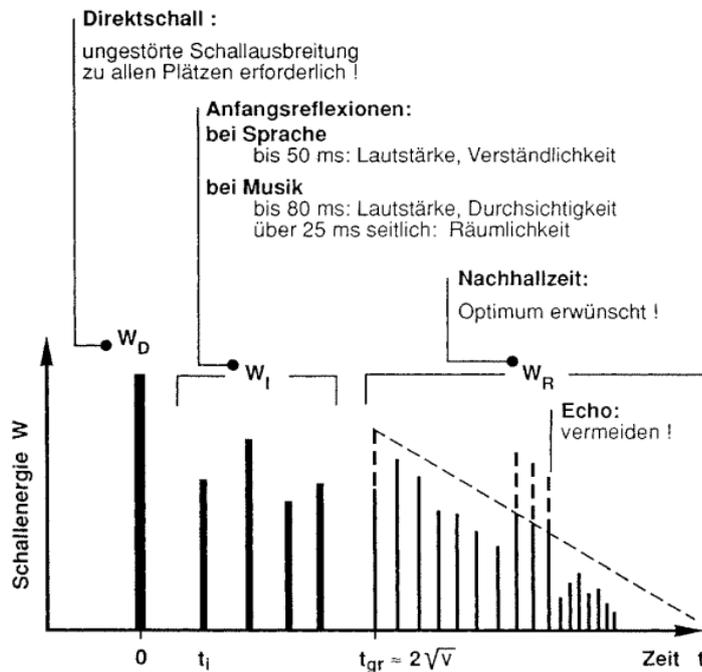


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung eines Reflektogramms, Quelle: [2]

Der zeitliche Verlauf, in dem direkter und reflektierter Schall an einer Position im Raum eintreffen, wird als Raumimpulsantwort (für den Schalldruck  $p$ ) oder Reflektogramm (für die Schallenergie  $W$ ) bezeichnet. In Abb. 2.2 ist ein Reflektogramm schematisch dargestellt. Schallimpulsfolgen, deren Zeitabstände sehr kurz sind (unter 5 bis 10 ms), können vom menschlichen Gehör nicht als getrennte Ereignisse wahrgenommen werden. Hingegen werden laute, stark verzögerte Reflexionen als störend empfunden [2]. In der Literatur sind als „Verwischungsschwelle“ Angaben von 50 ms zu finden - das entspricht bei gewöhnlicher Raumtemperatur in etwa einem Wegunterschied von 17 m (vgl. [3], [4]) - bzw. als Echoschwelle 100 ms bzw. rund 34 m Wegdifferenz [2]. Echos sind durch die Gestaltung des Raumes unbedingt zu vermeiden. Später eintreffende, zeitlich sehr dichte Reflexionen höherer Ordnung vermischen sich in der Wahrnehmung zu einem Nachhall. Der zeitliche Verlauf des Nachhalls ist eines der bedeutendsten akustischen Merkmale eines Raumes. Andere der später genannten Qualitätskriterien beschreiben das Verhältnis von früher zu gesamter Schallenergie.

Das Mittel der raumakustischen Planung ist die Gestaltung der Raumstruktur, um die Reflexionen zu allen Hörorten auf die gewünschte Art zu lenken und eine entsprechende Verteilung der Schallenergie zu erreichen. Jede Hörposition soll mit Direktschall versorgt werden und die Schallreflexionen, die zeitlich verzögert am Hörort eintreffen, sollen vor allem kurz nach dem Direktschall energiereich sein. Dies kann über die „Primärstruktur“, d.h. die Raumform und die „Sekundärstruktur“, also Oberflächengestaltung und Innenausbau erreicht werden [2]. Im vorliegenden Projekt ist die Primärstruktur vorgegeben. Aufgabe ist daher, die Sekundärstruktur auf geeignete Weise zu gestalten, um einen gewünschten Raumklang zu erreichen. Dieser lässt sich objektiv durch die Form der (ortsabhängigen) Raumimpulsantworten und die erzielten Werte der Gütemaße beschreiben.

## 3

## Beschreibung des Raumes

Die raumakustische Planung wird für den zukünftigen Veranstaltungssaal des „Kultur Hof“ in Linz durchgeführt. Er wird sich im Erdgeschoß eines neuen Gebäudeteils befinden, der die bestehende Struktur ergänzt. Das vielfältige Angebot des „Kultur Hof“ beinhaltet u.a. Konzerte, Kleinkunst, Kabarett, Theater, Lesungen und Poetry Slams und ist darauf ausgerichtet, „dem Neuen, Unbekannten und weniger Etablierten eine Chance zu geben“ [5]. Die Musikrichtungen, die im bisher genutzten Veranstaltungsraum für ein Publikum von ca. 80 Personen live zu hören waren, sind vielfältiger Natur. Im Programm sind Pop und Rock verschiedenster Genres, Jazz, Blues, Musical, A-Capella-Ensembles und Chormusik zu finden.

Der neue Saal soll ein Sitzpublikum von bis zu 160 Personen und ein Stehpublikum von bis zu 300 Personen beherbergen. Er ist quaderförmig mit einer fixen Bühnenposition geplant und wird mit einer faltbaren Tribüne für fünf überhöhte Sitzreihen ausgestattet sein. Die Bestuhlung ist mit leicht bepolsteter Sitzfläche geplant. Der Zubau, in dem sich der Veranstaltungssaal befindet, wird in Holzbauweise ausgeführt und alle opaken Raumbooberflächen bestehen aus Holz. Der Bodenbelag im Auditorium ist aus Terrazzo geplant, für die Bühne werden Bühnenelemente mit Kunststoffboden angenommen. Entlang der Seitenwände sind 3 m hohe Fenster bzw. Glastüren vorgesehen und der Raum soll durch innenliegende Rollläden vollständig abgedunkelt werden können. Eine Beschallungsanlage wird ausgeführt und ein mobiles Ton- und Lichttechnikpult von ca. 1,5 m Breite soll zum Einsatz kommen. Zur Befestigung der Bühnenbeleuchtung sind Stahlrohre an der Unterseite des Deckenträgers vorgesehen. Weiters sind seitens der Haustechnik Klimageräte an der Decke sowie zwei textile Zuluftrohre entlang der Seitenwände und ein Abluftrohr aus Metall entlang der Bühnenrückwand geplant.

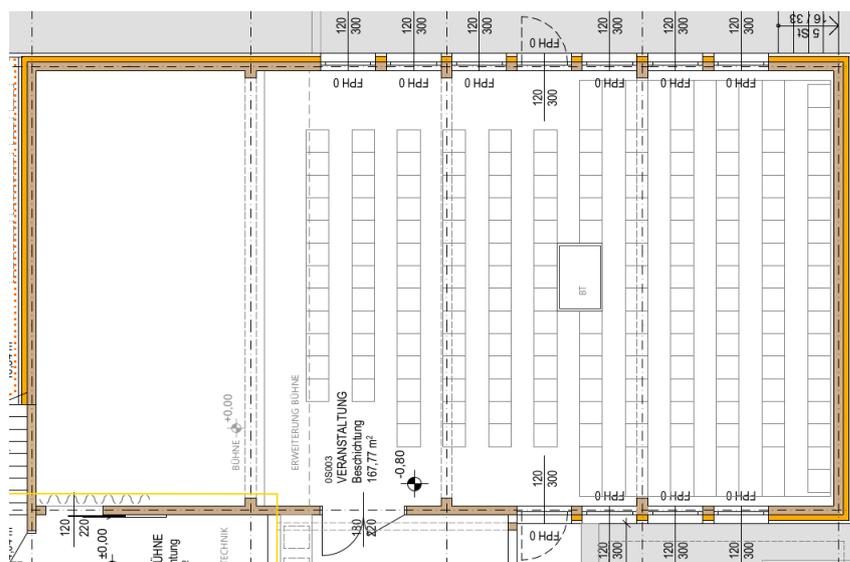


Abbildung 3.1: Grundriss des Saals mit geplanter Bestuhlung, Quelle: Entwurfsplanung [6]

Der Grundriss ist in Abb. 3.1 zu sehen und die Raummaße sind in Tab. 3.1 zusammengefasst. Im Sinne der Übersichtlichkeit sind die Angaben zur Raumausstattung und -nutzung noch einmal stichwortartig aufgelistet:

- Boden Auditorium: Terrazzo
- Boden Bühne: Kunststoff
- Decke: Holz
- Wände: Holz, Großflächenfenster, Rollos
- Bestuhlung: leicht gepolstert, Teleskoptribüne für fünf überhöhte Sitzreihen
- Bühnentechnik: Beschallungsanlage, Ton- und Lichtpult im Publikumsraum, Bühnenscheinwerfer
- Haustechnik: Klima-Deckengeräte, Zuluftkanäle entlang der Seitenwände (Textil), Abluftkanal entlang der Bühnenrückseite (Metall)
- Publikumsgröße: 160 Personen sitzend, 300 Personen stehend
- Art der Darbietungen: Musik (Pop, Rock, Jazz, Blues u.a.), Kabarett/Kleinkunst, Theater, Lesungen, Poetry Slams

Dimension	Abmessung
Raumtiefe $T$	17,4 m
Raubbreite $B$	9,6 m
Raumhöhe $H$	4,5 m
Bühnentiefe $T_{St}$	5 m
Bühnenniveau $N_{St}$	0,8 m
Höhe Bühnenraum $H_{St}$	3,7 m
Bühnenfläche $S_{St}$	48 m <sup>2</sup>
Auditoriumfläche $S_{Aud}$	119 m <sup>2</sup>
Raumoberfläche $S$	567,4 m <sup>2</sup>
Raumvolumen $V$	717,6 m <sup>3</sup>

Tabelle 3.1: Raummaße des Veranstaltungssaals

In dieser Bachelorarbeit wird die Nutzungsvariante für Sitzpublikum ohne Verwendung der Rollläden untersucht.

# 4

## Methodik

Hinsichtlich der Methodik zur Bearbeitung der Aufgabenstellung wird im Folgenden die konzeptionelle Herangehensweise erläutert - dies betrifft die einzelnen Planungsschritte. Anschließend werden Theorie und Rechenmodell zur Ermittlung der Prognosewerte beschrieben und auf einige Spezifikationen der Software-Lösung eingegangen, mit der die Berechnungen durchgeführt werden.

### 4.1 Systematische Vorgangsweise im Planungsprozess

In Anlehnung an den Leitfaden für Raumakustische Planung in [2] wird die Aufgabenstellung in einem iterativen Prozess bearbeitet. Zuerst werden die Zielwerte der Gütemaße definiert und dann mit den Simulationsergebnissen für den unbehandelten Raum abgeglichen. Auf dieser Grundlage werden die raumakustischen Maßnahmen gezielt abgestimmt und ihre Wirksamkeit durch erneute Simulation validiert. Daraus ergeben sich für das vorliegende Projekt sieben Schritte, die nachfolgend erläutert werden.

#### 1. Auswahl geeigneter raumakustischer Gütemaße

Zur akustischen Gütebeurteilung müssen gleichzeitig mehrere Kriterien herangezogen werden [7]. Abhängig von der gewünschten Nutzung gibt es unterschiedliche Gütemaße, anhand derer die Eignung eines Raumes für den beabsichtigten Zweck bestimmt werden kann. Im vorliegenden Fall der Mehrzwecknutzung gilt es, eine überschaubare Auswahl an etablierten Kriterien zu treffen, mit denen die wesentlichen Eigenschaften des Raumklanges ausreichend Beachtung finden.

#### 2. Ermittlung optimaler Wertebereiche für die geplante Nutzung

Wenngleich es Gütemaße gibt, die sowohl für Sprach- als auch für Musikdarbietungen relevant sind, gelten dabei unterschiedliche Wertebereiche als optimal. Dies betrifft z.B. die Nachhallzeit  $T$ : Eine kurze Nachhallzeit trägt zur Sprachverständlichkeit bei, aber dieselbe Dauer der Nachhallzeit kann die Wirkung von Musik unzufriedenstellend beeinträchtigen und wird i.d.R. für ein gegebenes Raumvolumen länger angesetzt als für Sprache. Bei der Mehrzwecknutzung eines Raumes ist es somit erforderlich, einen Kompromiss zu finden [2]. Hinzu kommt, dass die Empfehlungen an die Nachhallzeit nach ÖNORM B 8115-3 für Darbietungen ohne elektroakustische Verstärkung gelten. Da dieser Fall deutlich geringere Nachhallzeiten erfordert (vgl. [2], [3], [8] und [9]), die Norm jedoch keine Empfehlungen dafür bietet, besteht eine wesentliche Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit darin, geeignete Wertebereiche für die Nachhallzeit  $T$  aus der Literatur zu begründen.

#### 3. Simulation des Raumentwurfs, Vergleich mit Zielwerten

Nach Festlegung der angestrebten Wertebereiche für die raumakustischen Gütemaße wird zunächst ein Modell des Raumes, wie er von den Architekt\*innen entworfen wurde, mit der Software CATT-Acoustic simuliert. Anhand des Vergleichs der Ergebnisse mit den Zielwerten wird beurteilt, welche Werte in welchem Ausmaß durch geeignete Maßnahmen zu verbessern sind.

#### 4. Design von Maßnahmen zur Optimierung für unverstärkte Darbietung

Auch wenn Darbietungen ohne elektroakustische Verstärkung (z.B. Sprechtheater) im geplanten Kultursaal die Ausnahme darstellen, ist es erforderlich, den Raum zunächst für diese Situation akustisch zu optimieren. Dies liegt u.a. daran, dass eine zu lange Nachhallzeit in einem Raum nicht durch Maßnahmen der Tontechnik kompensiert werden kann [3]. Weiters muss zur Fehlervermeidung bei der Wahl der Anbringungsorte und Größen der Lautsprecher die Raumakustik zuerst sorgfältig geplant werden [10]. Auf Basis ausgewählter Fachliteratur werden geeignete raumakustische Maßnahmen zur Verbesserung jener Raumeigenschaften entwickelt, die in Schritt 3 als unzulänglich erkannt wurden.

#### 5. Simulation des Raumes mit Maßnahmen, Vergleich mit Zielwerten

Die Variante des Saals mit den ausgewählten Maßnahmen wird der Simulation unterzogen und die Ergebnisse wieder den Zielwerten gegenübergestellt. Da es sich bei dem betrachteten Raum um ein reales Projekt handelt, für das die raumakustische Planung in Auftrag gegeben wurde, werden für die empfohlenen Maßnahmen Produkte recherchiert, die derzeit von Hersteller\*innen angeboten werden. Wenngleich diese Produkte nicht genannt werden (abgesehen von Quellenverweisen im Anhang zu den im Modell eingegebenen Materialeigenschaften) und auch für die Kundin nur als Empfehlung gelten, sei darauf hingewiesen, dass die Recherche von konkret einsetzbaren, im Handel erhältlichen Materialien ein wichtiger Bestandteil der raumakustischen Planung ist.

#### 6. Dimensionierung und Ausrichtung der elektroakustischen Anlage

Nachdem die raumakustische Optimierung des Raumes für unverstärkte Darbietung anhand der Simulationsergebnisse nachgewiesen ist und der entsprechend gestaltete Saal die definierten Kriterien (besser) erfüllt, wird die elektroakustische Anlage geplant. Im vorliegenden Saal dient diese v.a. zur Herstellung eines Gleichgewichts zwischen unterschiedlich lauten Schallquellen (z.B. Gesang und Schlagzeug) und zu einer ausgewogeneren Verteilung der Schallenergie im Auditorium [9]. Es gilt, die für den gegebenen Raum erforderliche bzw. angemessene Leistung der Anlage sowie die Anzahl, Position und Ausrichtung der Lautsprecher zu bestimmen.

#### 7. Simulation des raumakustisch optimierten Saals mit elektroakustischen Quellen, Vergleich mit Zielwerten und Ausgangssituation

Abschließend wird die Variante des Saals mit raumakustischen Maßnahmen bei Betrieb der elektroakustischen Anlage simuliert. Die Ergebnisse werden wiederum mit den definierten Zielwerten verglichen um die Eignung des gewählten Ausführungsvorschlages zu überprüfen. Weiters wird diese Raumvariante mit der Ausgangssituation verglichen, um die Wirksamkeit der gewählten Maßnahmen und Gestaltungsparameter zu veranschaulichen.

## 4.2 Computersimulation - Geometrische Raumakustik

Um die Raumakustik für das noch nicht realisierte Bauvorhaben planen zu können, werden auf Basis eines 3D-Modells Computersimulationen mit CATT-Acoustic durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine Software, mit der u.a. Raumimpulsantworten auf Grundlage der geometrischen Raumakustik berechnet werden können [11]. Nach dieser Theorie wird der Wellencharakter von Schall vernachlässigt und die vereinfachende Annahme getroffen, Schall würde sich strahlenförmig ausbreiten. Eine Weiterentwicklung der Strahlentheorie ist die Annahme von „Schallkegeln“, um die tatsächliche, diffuse Schallausbreitung besser anzunähern [12]. Die wesentliche Einschränkung, die sich aus den Modellvorstellungen der geometrischen Akustik ergibt, ist, dass die Berechnungen nur für jene Frequenzbereiche Gültigkeit haben, deren Wellenlängen kleiner sind als die Abmessungen der Flächen, von denen sie reflektiert werden. Prognosen für tiefe Frequenzbereiche gehen deshalb mit größeren Näherungsfehlern einher (vgl. [7], [12], [13]). CATT-Acoustic

berechnet über die Raumdimensionen und Flächenabmessungen die Grenzfrequenz, oberhalb derer akurate Berechnungsergebnisse erwartet werden können. Typische Wellenphänomene für tiefe Frequenzbereiche, wie z.B. Raummoden, werden für die vorliegende Bachelorarbeit zusätzlich berechnet. Maßnahmen, die sich daraus ableiten, können jedoch nicht in der Simulation validiert werden.

Aus den mittels CATT-Acoustic berechneten Reflektogrammen (Verlauf der Schallenergie  $W(t)$ ) und Raumimpulsantworten (Verlauf des Schalldrucks  $p(t)$  über die Zeit) werden die raumakustischen Gütemaße ermittelt. In der vorliegenden Bachelorarbeit werden die Ergebnisse der Simulationen für bestimmte Hörpositionen in Zahlenwerten, sowie auch flächenüberspannend als Farbraster im Publikumsbereich dargestellt.

Der Urheber von CATT-Acoustic urgiert, das Raumdesign nicht alleine von den prognostizierten Messwerten abhängig zu machen, sondern immer auch davon, welche Phänomene zu den Ergebnissen führen. Er vertritt den Standpunkt, das Wesentlichste in der Raumakustik sei der Verlauf der Raumimpulsantwort über die Zeit. Nur in Kombination damit hätten die Zahlenwerte von Qualitätskriterien überhaupt eine Aussagekraft darüber, wie ein Raum klingt. Für sich allein stehend seien sie keine ausreichende Voraussetzung für gute Akustik [13]. Bei der Analyse der Simulationsergebnisse wurden die Impulsantworten an allen betrachteten Hörpositionen und in allen Frequenzbändern darauf kontrolliert, dass keine Echos auftreten.

#### 4.2.1 Grenzen der Anwendung und Lösungsansätze

Die Anwendung von Modellen der geometrischen Akustik erfordert das Bewusstsein, dass der Wellencharakter von Schall nicht berücksichtigt wird. Das Konzept gründet auf der Annahme, dass die Schallausbreitung in Form von Strahlen erfolgt, welche von einer Quelle ausgesandt werden. Diese Annahme gilt für hohe Frequenzen, bei denen die Wellenlänge im Vergleich zu den Abmessungen von Oberflächen und Objekten im Raum klein ist [12]. Wellenphänomene wie Beugung oder Raummoden, die bei vergleichsweise tiefen Frequenzen auftreten, wirken sich jedoch in der Realität wesentlich auf die Eigenschaften von Schallfeldern aus. Bei Berechnungsergebnissen für tiefe Frequenzen kommt es daher zu größeren Näherungsfehlern [12].

Nachfolgend wird diskutiert, mit welchen Vereinfachungen, Einschränkungen und somit Abweichungen von der physischen Realität die Rechenmodelle der geometrischen Akustik einhergehen und welche Ansätze zu einer Verbesserung der Prognose führen können. Die Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, vielmehr werden die für das vorliegende Projekt wesentlichen Aspekte thematisiert.

##### **Beugung wird nicht einkalkuliert**

Beugung, als Wellenphänomen, wird in der strahlenakustischen Simulation nicht erfasst. Daher können Reflexionen von Flächen, deren Abmessungen klein im Vergleich zur Wellenlänge sind, nicht gut vorhergesagt werden. Dies betrifft vor allem Materialien mit unebenen Oberflächen, die bei - im Verhältnis zu den Dimensionen der Oberflächenstruktur - vergleichsweise kleinen Wellenlängen zu diffuser Streuung und bei großen Wellenlängen zu gerichteter Reflexion führen.

**Ansatz:** Als praktikabel erweist sich, das Raummodell nur wenig bis mäßig detailliert zu gestalten und den Materialien frequenzabhängige Streukoeffizienten zuzuweisen, die mit der Frequenz ansteigen. Des Weiteren muss eine Unschärfe bei den Ergebnissen für tiefe Frequenzen akzeptiert werden [13].

**Raummoden können nicht vorhergesagt werden**

**Ansatz:** In Frequenzbändern mit tiefen Mittenfrequenzen, in denen einige wenige stehende Wellen einzeln hervortreten, ist zusätzlich eine wellentheoretische Betrachtung erforderlich.

**Vorhänge und Absorber mit einem Luftspalt vor Wänden verursachen keine Absorptionsmaxima für Abstände  $d = (2n + 1) \cdot \lambda/4$ ,  $n \in \mathbb{N}$** 

**Ansatz:** Diese Flächen müssen ohne Luftspalt modelliert werden und der Effekt der  $(2n+1) \cdot \lambda/4$  Absorptionsmaxima bei der Frequenz mit der entsprechenden Wellenlänge  $\lambda$  muss in die Absorptionskoeffizienten  $\alpha_s$  einfließen.

**Winkelunabhängige Absorption**

Je nach Material ist der Schallabsorptionsgrad abhängig vom Einfallswinkel des Schalls. Bei der Simulation wird dieselbe Absorption für alle Einfallswinkel angenommen.

**Flächen- und formunabhängige Absorptionskoeffizienten**

Wenn Materialien mit sehr hohen Absorptionskoeffizienten  $\alpha_s$  großflächig und zugleich ungleichmäßig in den Raum eingebracht werden (z.B. absorbierende Decke als einzige oder hauptwirksame Maßnahme), ist die Aussagekraft der prognostizierten Nachhallzeit  $T_{30}$  begrenzt. Dies liegt daran, dass die Absorptionseigenschaften in einem diffusen Schallfeld (Hallraum) ermittelt werden, aber Schallfelder in Aufenthaltsräumen i.A. nicht diffus sind. Ein diffuses Schallfeld ist dadurch gekennzeichnet, dass der Schall an einem beliebigen Punkt aus allen Richtungen einfällt. Die Absorptionwirkung der Seitenflächen von vermessenen Materialproben ist daher stärker als in einem weniger diffusen Schallfeld, wo Schall in höherem Maße streifend einfällt. Letzteres kann außerdem zu unerwünschten Phänomenen wie Flatterechos und Raummoden führen.

**Ansatz:** Andere Kriterien, wie  $SPL$ ,  $EDT$ ,  $T_{15}$ ,  $D_{50}$ ,  $STI$ , bei denen der spätere Anteil der Schallenergie weniger zum Tragen kommt, liefern eine verlässlichere Aussage [13].

**4.3 Ermittlung von Schröderfrequenz und Raummoden - Wellentheoretische Raumakustik**

Durch Reflexion an schallharten, parallelen Oberflächen bilden sich sogenannte Raummoden aus, wenn die halbe Wellenlänge (oder ihr ganzzahliges Vielfaches) dem Abstand zwischen den reflektierenden Flächen entspricht. Raummoden sind stehende Wellen bei den Eigenfrequenzen geschlossener Räume und weisen ortsfeste Schalldruckmaxima und -minima auf. Wenn Moden nicht sehr dicht in geringen Frequenzabständen auftreten, sondern in einzelnen Frequenzen hervortreten, ist das Schallfeld in einem Raum sehr inhomogen. Das ist v.a. im tiefen Frequenzbereich der Fall [14]. Die Schröder-Frequenz  $f_S$  beschreibt jene Frequenz, unterhalb welcher ein Schallfeld von einzelnen Moden dominiert wird. Sie kann wie folgt ermittelt werden [3]:

$$f_S = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (4.1)$$

Aus dieser Formel ist ersichtlich, dass bei gegebenem Raumvolumen  $V$  die Schröder-Frequenz  $f_S$  durch Verkürzung der Nachhallzeit gesenkt werden kann. Als Grenzfrequenz  $f_{gA}$ , oberhalb der verlässliche Ergebnisse mittels geometrischer Akustik berechnet werden können, gilt das Vierfache der Schröder-Frequenz [11]:

$$f_{gA} = 4 \cdot f_S \quad (4.2)$$

## 5

## Raumakustische Gütemaße

In diesem Kapitel sind die raumakustischen Gütemaße beschrieben, die in der vorliegenden Bachelorarbeit ausgewertet werden. Sie alle können von der Raumimpulsantwort  $p(t)$  abgeleitet werden. Die Raumimpulsantwort  $p(t)$  ist der ortsbezogene, zeitliche Schalldruckpegelverlauf in einem Raum nach Anregung mit einem impulshaften Geräusch.

### 5.1 Nachhallzeit $T_{30}$

Die Nachhallzeit  $T$  ist die Zeitspanne, innerhalb welcher der Schalldruck  $p(t)$  nach Beenden der Schallabstrahlung in einem Raum auf ein Tausendstel absinkt [2]. Dies entspricht einer Pegelveränderung um -60 dB. Da die Höhe des Ruhepegels in einem Raum häufig keine Pegeldifferenz von 60 dB zulässt, ist es üblich, den Pegelabfall von 30 dB oder 20 dB zu extrapolieren. Die auf diese Weise ermittelten Werte können sich voneinander unterscheiden, da der Abklingvorgang zumeist nicht linear verläuft. Zur Kennzeichnung werden die Angaben mit Indizes versehen:  $T_{60}$ ,  $T_{30}$  (entspricht dem Doppelten der Zeit, die bei einem Pegelabfall von 30 dB verstreicht) bzw.  $T_{20}$  (entspricht der dreifachen Zeitspanne, die ein Pegelabfall von 20 dB ausfüllt). Im vorliegenden Projekt wird  $T_{30}$  ausgewertet.

Unter anderem kann  $T$  aus der Rückwärtsintegration der quadrierten Impulsantwort ermittelt werden, dies entspricht der Energie der Abklingkurve als Funktion der Zeit  $E(t)$ :

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau \quad (5.1)$$

Für die Bestimmung von  $T_{30}$  wird die Abklingkurve  $E(t)$  im Bereich von 5 dB bis 35 dB unterhalb des Gesamtpegels der integrierten Impulsantwort ausgewertet. Innerhalb des Auswertungsbereichs ist für die Kurve rechnerisch eine Gerade nach der Anpassung mit Hilfe des Verfahrens der kleinsten Fehlerquadrate zu bestimmen. Die Neigung der Geraden ergibt die Abklingrate  $d$  in Dezibel je Sekunde, woraus die Nachhallzeit als  $T_{30} = 60 \text{ dB}/d$  berechnet wird. Die Nachhallzeit ist frequenzabhängig und wird in Terz- oder Oktavbändern ermittelt [15].

### 5.2 Anfangsnachhallzeit $EDT$ (Early Decay Time)

Der anfängliche Teil des (meist ungleichmäßig verlaufenden) Abklingvorgangs ist subjektiv besser wahrnehmbar als ein Pegelabfall um 60 dB [2]. Deshalb wird mit der Anfangsnachhallzeit bzw. Early Decay Time  $EDT$  der Schalldruckpegelabfall von 0 dB auf -10 dB, extrapoliert auf -60 dB, beschrieben. Die  $EDT$  ist stark ortsabhängig und eignet sich daher nicht, um die akustische Qualität eines Raumes zu beschreiben. Jedoch ist sie eine wichtige Zielgröße bei der Gestaltung des Bühnenraums, da sie den geeignetsten objektiven Parameter darstellt, um die subjektiv empfundene Nachhallzeit während einer Musikdarbietung zu beschreiben (vgl. [2] und [3]).

### 5.3 Bassverhältnis $BR$ (Bass Ratio)

Das Bassverhältnis bzw. die Bass Ratio  $BR$  beschreibt das Verhältnis der Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen zu jener bei mittleren Frequenzen. Dabei werden die Nachhallzeiten der Oktavbänder mit den Mittenfrequenzen von 125 Hz und 250 Hz als tief betrachtet und jene mit den Mittenfrequenzen von 500 Hz und 1 kHz als mittig [2]. Im Bereich der Pop- und Rockmusik wird das Oktavband um 250 Hz tendenziell nicht als Bass, sondern im mittleren Frequenzbereich liegend wahrgenommen [3]. Um die Nachhallzeiten jeweils zweier Oktavbänder zueinander in Beziehung setzen zu können, müsste dazu das Oktavband um 63 Hz ausgewertet werden. Dies ist jedoch nur bei einer realen Messung möglich und kann mittels geometrischer Akustik nicht akkurat prognostiziert werden. Deshalb wird die gängige Definition angewandt:

$$BR = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1000}} \quad (5.2)$$

Die Indizes von  $T$  beschreiben hierbei die Mittenfrequenzen der Oktavbänder. In Abschnitt 6.1 wird näher darauf eingegangen, warum im vorliegenden Projekt auf dieses Kriterium besonderer Wert gelegt wird.

### 5.4 Schalldruckpegelverteilung $SPL$ (Sound Pressure Level)

Eine grundlegende Erwartung an das Hören bei Musik- und Sprachdarbietungen betrifft die ausreichende Lautstärke am Hörort. Während mit zunehmender Entfernung zur Quelle eine gewisse Pegelabnahme der Erwartung entspricht (auch bei Einsatz von elektroakustischer Verstärkung), ist es eine Qualitätsanforderung an einen Veranstaltungsort, dass die Schalldruckpegelunterschiede  $\Delta L_{p,max}$  an den Plätzen nicht zu groß sind [2].

### 5.5 Deutlichkeitsmaß $C_{50}$

Die Schallenergie, die in den ersten 50 ms nach dem Direktschall am Hörort eintrifft, ist neben einem genügend hohen Schalldruckpegel und einer angemessenen Nachhallzeit für die Silbenverständlichkeit maßgeblich [2]. Das Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  drückt den Pegelunterschied zwischen der Schallenergie der anfänglichen 50 ms und der nachfolgenden Schallenergie aus:

$$C_{50} = 10 \cdot \log_{10} \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \text{ dB} \quad (5.3)$$

Im Vergleich zu Sprache spielen in der Musik kommunikative Informationen eine geringere Rolle. Eine größere Bedeutung wird der Erkennbarkeit zeitlich aufeinanderfolgender Töne sowie der Unterscheidbarkeit gleichzeitig von verschiedenen Instrumenten erzeugter Klänge beigemessen. Dazu ist es üblich, die Energieverteilung zwischen den anfänglichen 80 ms und der restlichen Zeit in ein Verhältnis zu stellen (Klarheitsmaß  $C_{80}$ ) [2]. Diese Zeitunterteilung macht Sinn für Orchestermusik, für Pop- und Rockmusik wäre nach Meinung des Autors von [3] sogar eine noch kürzere Zeitspanne als 50 ms angebracht. In der vorliegenden Bachelorarbeit wird  $C_{50}$  sowohl hinsichtlich der Eignung des Raumes für Sprach- als auch Musikdarbietungen herangezogen.

### 5.6 Seitenschallgrad $LF$ (Lateral Energy Fraction)

Die Durchsichtigkeit der Musik, die durch das Klarheitsmaß  $C_{80}$  (bzw. hier: Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$ ) beschrieben wird, sollte den Klangeindruck nicht dominieren. Für ein „gelungenes“ Konzerterlebnis ist auch das Gefühl, in die Musik eingehüllt zu sein, von Bedeutung. Dabei spielt der

Raumeindruck eine wesentliche Rolle, der stark von der Wahrnehmbarkeit der seitlichen Reflexionen geprägt wird (vgl. [2], [3] und [16]). Die seitlichen Reflexionen tragen außerdem dazu bei, dass die Schallquelle als räumlich weiter ausgedehnt wahrgenommen wird. Der Raumeindruck ist ein wesentliches Merkmal von Konzertsälen, deren Akustik gut bewertet wird. Mitunter sind solche Säle verhältnismäßig schmal mit einer hohen Raumhöhe beschaffen, sodass die seitlichen Reflexionen das Publikum vor den Deckenreflexionen erreichen [2]. Auch wenn es bisher keine Studien gibt, die belegen, dass diese Klangeigenschaft auch von Darbietenden und Publikum bei Pop- und Rockmusik ausdrücklich erwünscht ist, kann dies angenommen werden [3]. Messtechnisch werden die seitlichen Reflexionen mit einem Mikrophon mit Achter-Richtcharakteristik ermittelt, rechnerisch durch die Gewichtung der Schallenergie mit dem Sinus des Einfallswinkels  $\theta$  (wobei  $0^\circ$  der Einfallrichtung von vorne entspricht). Dieser seitlich einfallende Energieanteil wird ins Verhältnis zur Gesamtenergie gestellt, die mit einem Mikrophon mit Kugelcharakteristik ermittelt wird. Betrachtet wird dabei der Zeitraum der anfänglichen 80 ms und für die seitlichen Reflexionen werden davon die ersten 5 ms ausgeschlossen, da diese den Direktschall enthalten [11]:

$$LF = 100 \cdot \frac{\int_5^{80\text{ms}} p^2(t) \sin^2(\theta) dt}{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt} \% \quad (5.4)$$

## 5.7 Sprachübertragungsindex *STI* (Speech Transmission Index)

Der Sprachübertragungsindex *STI* ist eine Größe zur Beurteilung der Verständlichkeit von Sprache [2]. Bei der messtechnischen Ermittlung wird ein Quellsignal verwendet, das zwei Eigenschaften der menschlichen Sprache modelliert: Zum einen wird das mittlere Frequenzspektrum von Sprache über die Oktavbänder mit den Mittenfrequenzen von 125 Hz bis 8 kHz abgebildet, zum anderen wird durch Modulation mit Frequenzen von 0,63 Hz bis 12,5 Hz im Terzbandabstand dem Umstand Rechnung getragen, dass die Intensität des Gesprochenen zeitlich variiert. Durch Hintergrundgeräusche (Ruhepegel) und Nachhall in einem Raum wird der Modulationsgrad verringert. Der *STI* liefert eine Aussage darüber, in welchem Ausmaß die für eine gute Sprachverständlichkeit bedeutsame Modulation bei gegebenem Ruhepegel und Nachhall erhalten bleibt. [10]

Alternativ zur aufwändigen Messung aller 98 Modulationsübertragungsfaktoren (14 Modulationsfrequenzen je Oktavband) können diese aus der oktavbandgefilterten Raumimpulsantwort berechnet werden. Zur Ermittlung des *STI* werden nach IEC 60268-16 [17] unterschiedliche Gewichtungsfaktoren für „männliche“ und „weibliche“ Stimmen verwendet sowie der Verdeckungseffekt benachbarter Oktavbänder berücksichtigt. Der Wertebereich des *STI* liegt zwischen 0 für unverständliche Sprache bis 1 für vollkommen verständliche Sprache.

## 5.8 Stage Support *ST*

Eine Messgröße zur Beschreibung der akustischen Qualität auf der Bühne ist der Stage Support *ST*. Eine Studie und ein Praxisbeispiel, die in [3] beschrieben sind, zeigen: Musizierende fühlen sich in ihre eigene Musik eingehüllt und können zugleich gut einschätzen, wie die Musik im Auditorium klingt, wenn auf der Bühne die frühen Reflexionen aus dem Bühnenraum energiereicher sind als die späten Reflexionen aus dem Auditorium. Wenn dies nicht der Fall ist und beispielsweise der Rückhall aus dem Publikum lauter ist, erschwert dies das präzise Timing beim Spielen und verursacht das Gefühl, von der eigenen Musik entrückt zu sein. Es ist hervorzuhe-

ben, dass unzulängliche Energieverhältnisse zwischen frühen Reflexionen vom Bühnenraum und späten Reflexionen vom Publikum nicht durch Aussteuerung der Bühnenmonitore kompensiert werden können. Jedoch kann bei passenden Verhältnissen die Beschallung des Publikums gegebenenfalls noch verstärkt werden, ohne den Klang auf der Bühne zu maskieren, d.h. ohne das Monitoring für die Musizierenden zu beeinträchtigen. In beiden Bereichen wird also die Hörsamkeit verbessert. Dieser Parameter ist sowohl für verstärkte, als auch unverstärkte Musik relevant.

Die Messvorschrift für  $ST_{early}$  und  $ST_{late}$  ist im Anhang der *ÖNORM EN ISO 3382-1 Akustik — Messung von raumakustischen Parametern. Teil 1: Aufführungsplätze* informativ beschrieben [15]. Die frühen bzw. späten Reflexionen werden messtechnisch im Abstand von 1 m zu einer omnidirektionalen Quelle ermittelt und jeweils ins Verhältnis zum Direktschall gestellt (die Schallenergie in den anfänglichen 10 ms):

$$ST_{early} = 10 \cdot \log_{10} \frac{\int_{20}^{100\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{10\text{ms}} p^2(t) dt} \text{ dB} \quad (5.5)$$

$$ST_{late} = 10 \cdot \log_{10} \frac{\int_{100}^{1000\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{10\text{ms}} p^2(t) dt} \text{ dB} \quad (5.6)$$

## 6

## Zielwerte für den Saal

6.1 Zielwerte für die Nachhallzeit  $T_{30}$ 

Die ÖNORM B 8115-3 bietet Empfehlungen an die Nachhallzeit  $T$  in Räumen für Musik- und Sprachdarbietungen. Die Angaben sollen eine gute Hörsamkeit gewährleisten und beziehen sich für Musik auf den Fall ohne elektroakustische Verstärkung. Während darauf hingewiesen wird, dass bei Einsatz von Elektroakustik ein reduzierter Nachhall ausulegen sei, wird nicht erläutert, in welchem Maße eine Reduktion empfehlenswert ist. Für Sprachnutzung wird bei Verwendung einer Beschallungsanlage die Nachhallzeit von zumindest Klasse B empfohlen. Des Weiteren wird angemerkt, dass bei Mehrzwecknutzung ein Kompromiss zwischen den unterschiedlichen Empfehlungen für Sprach- und Musikdarbietungen zu finden sei [8]. Nachfolgend werden zunächst die vom Raumvolumen abhängigen, empfohlenen Wertebereiche laut Norm ermittelt. Diese gelten für einen besetzten Raum und unterscheiden sich für Musik (keine Einteilung in Klassen) und Sprachdarbietung (hier: Klasse B). Anschließend werden, unter Einbeziehung von Studienergebnissen zur Akustik an Veranstaltungsorten für Rock- und Popmusik mit elektroakustischer Verstärkung, die angestrebten Werte für die Nachhallzeit im Veranstaltungssaal definiert.

Die Empfehlungen an die Nachhallzeit beim gegebenen Volumen lauten:

$$T_{ref} = 0,37 \text{ s} \cdot \log_{10} \left( \frac{V}{\text{m}^3} \right) - 0,14 \text{ s} = 0,37 \text{ s} \cdot \log_{10}(717) - 0,14 \text{ s} = 0,92 \text{ s} \quad (6.1)$$

$$T_{soll,Musik} = T_{ref} \cdot 1,2 + 0,25 \text{ s} = 1,35 \text{ s} \quad (6.2)$$

$$T_{soll,Sprache,B} = T_{ref} \cdot 0,8 = 0,73 \text{ s} \quad (6.3)$$

Die Norm sieht frequenzabhängige Toleranzbereiche vor. Diese sind in Abb. 6.1 dargestellt.

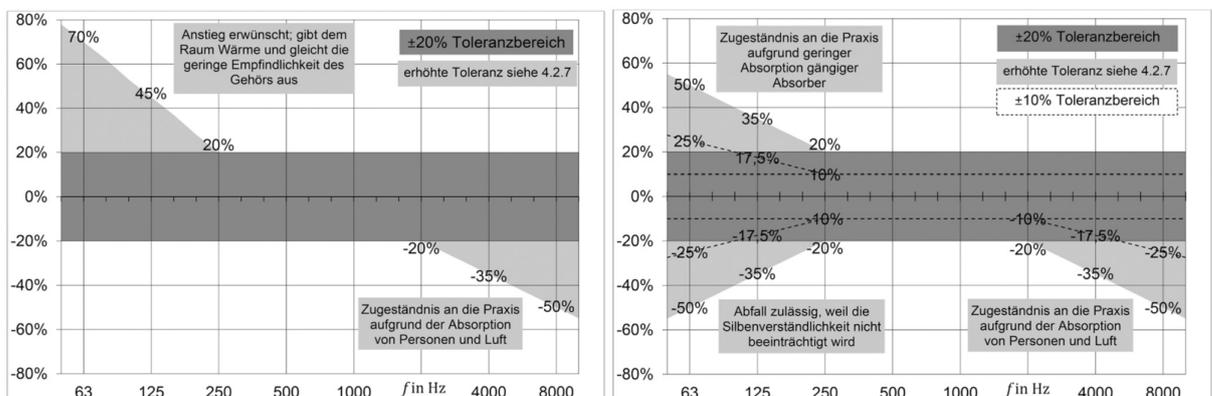


Abbildung 6.1: Toleranzbereiche für die empfohlene Nachhallzeit für Musik (links) und Sprachdarbietung (rechts) nach ÖNORM B 8115-3 [8]

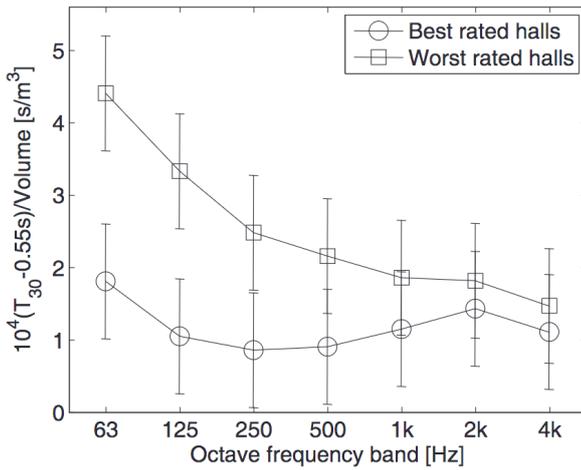


Abbildung 6.2: Mittlere Nachhallzeit beurteilter Veranstaltungsorte geteilt durch das Raumvolumen aus [3]

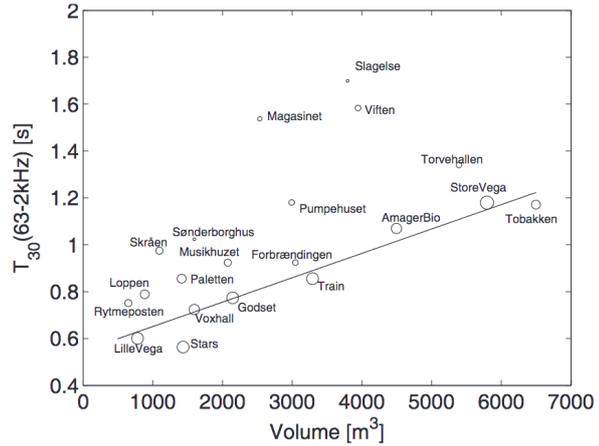


Abbildung 6.3: Regressionsgerade zu den bestbewerten Veranstaltungsorten aus [3]

In [3] wird auf Basis einer Studie, in der Musizierende und Tontechniker\*innen die Akustik von Veranstaltungsorten bewertet haben, eine vom Raumvolumen unabhängige Auswertung der Nachhallzeit angeführt. Die Funktionsgraphen dieser Kennzahlen sind in Abb. 6.2 über die Frequenz aufgetragen, und zwar für die zehn bestbewerteten und zehn schlechtestbewerteten Lokalisationen. Die Berechnung, wie auf der Ordinate angegeben, ergibt sich aus der Regressionsgerade für die bestbewerteten Veranstaltungsorte in der nebenstehenden Abb. 6.3. Sie ist eine Darstellung der folgenden Gleichung:

$$T_{30} = 0,55 \text{ s} + 1,04 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{V}{\text{m}^3} \cdot \text{s} \quad (6.4)$$

Die Nachhallzeiten  $T_{30}$  wurden jeweils in den leeren Räumen bzw. Hallen gemessen und  $V$  steht für deren Volumen. Aufgrund der Überlappung der statistischen Konfidenzintervalle bei den Frequenzbändern ab 500 Hz ist im höheren Frequenzbereich keine klare Differenzierung zwischen den beiden Gruppen möglich. Der Autor betont, dass das entscheidende Merkmal der gut bewerteten Lokalisationen die geringere Nachhallzeit bei den tiefen Frequenzen ist. Daher soll für Pop- und Rockmusik, im Gegensatz zu Veranstaltungsorten für symphonische Musik, eine Anhebung der Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen dezidiert vermieden werden. Wird nun über das Volumen des hier behandelten Saals auf jene Nachhallzeit  $T_{30}$  zurückgerechnet, mit der er zu den bestbewerteten Veranstaltungsorten nach [3] zählte, so ergäbe dies ein  $T_{soll,Pop}$  zwischen 0,63 und 0,66 s im unbesetzten Zustand. Zur Vergleichbarkeit mit den oben angeführten Empfehlungen aus der Norm für besetzte Räume ist anzumerken: Die Absorption des Publikums ist v.a. in den Frequenzbändern ab 500 Hz sehr wirksam und würde in diesem Frequenzbereich zu einer Glättung der in Abb. 6.2 dargestellten Kurve führen.

Um die Diskussion nun mit der Festlegung der angestrebten Zielwerte abzuschließen, sei noch auf die in [3] zitierte Empfehlung von Barron verwiesen, für elektroakustisch verstärkte Musik eine Nachhallzeit von max. 1 s zu gewährleisten. Nun ist es im vorliegenden Fall so, dass bei Nutzung ohne elektroakustische Verstärkung wie z.B. bei Sprechtheater ( $T_{soll,Sprache,B}$ ) oder Chormusik ( $T_{soll,Musik}$ ) mehr Nachhall gewünscht ist, als bei elektroakustischer Verstärkung ( $T_{soll,Pop}$ ). Unter Berücksichtigung der Empfehlung,  $T$  im tiefen Frequenzbereich nicht anzuheben, wird bei einem Toleranzbereich von max. +20 % über alle Frequenzbänder und gleichzeitiger Unterschreitung von 1 s ein Kompromiss von  $T_{soll} = 0,8 \text{ s}$  angestrebt. Der untere Toleranzbereich wird gemäß ÖNORM B 8115-3 für Musik- und Sprachdarbietungen übernommen. Der angestrebte Wertebereich für  $T_{30}$  ist in Abb. 6.4 graphisch dargestellt.

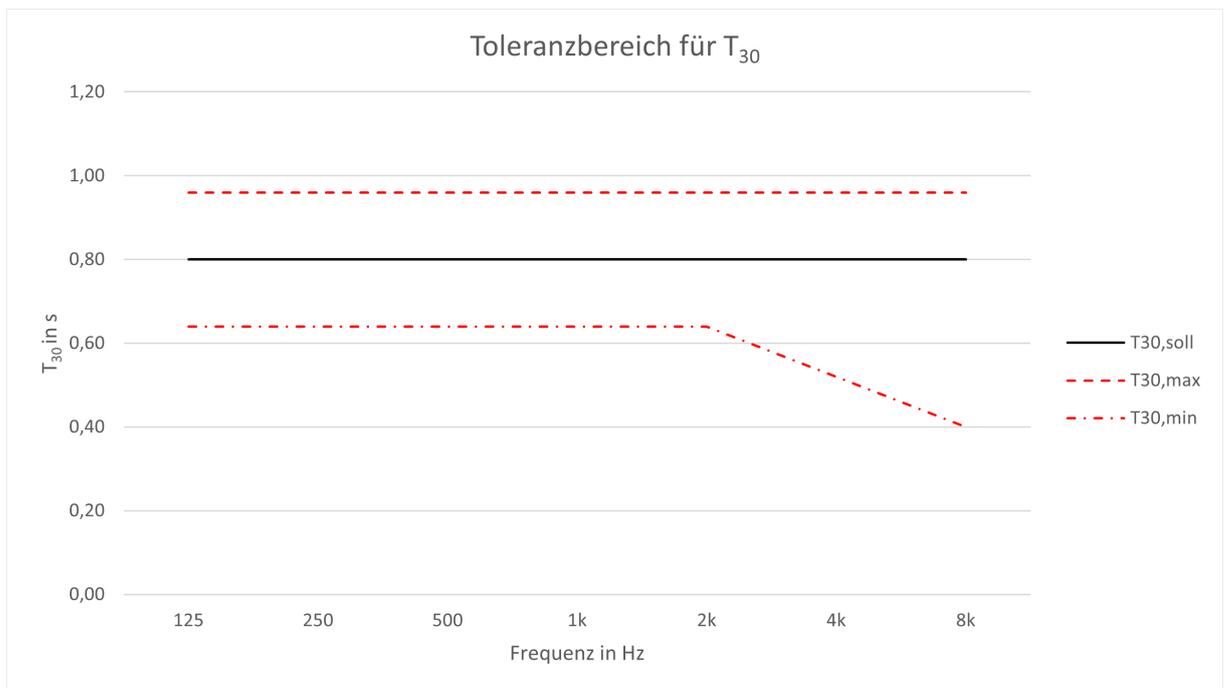


Abbildung 6.4: Toleranzbereich für  $T_{30}$  in vorliegender Saal bei Mehrzwecknutzung für Musik und Sprache in unverstärkter und elektroakustisch verstärkter Darbietung

## 6.2 Zielwerte für die Anfangsnachhallzeit $EDT$

Die  $EDT$  wird an Bühnenpositionen ausgewertet und soll dort in allen Frequenzbereichen kürzer als  $T_{30}$  ausfallen, um den Musikzierenden das präzise Hören zu erleichtern. Es wird daher angestrebt:

$$EDT < T_{30}$$

## 6.3 Zielwerte für das Bassverhältnis $BR$

Wie bereits in Abschnitt 6.1 ausführlich erläutert, wird eine möglichst frequenzunabhängige Nachhallzeit angestrebt. Bei gleichen Zielwerten für  $T_{30}$  in den Oktavbändern von 125 Hz bis 1 kHz ergibt sich die Forderung:

$$BR = 1$$

## 6.4 Zielwerte für die Schalldruckpegelverteilung $SPL$

Gemäß [2] soll die Schalldruckpegelminderung zwischen den ersten Reihen und den entferntesten Plätzen max. 5 dB betragen:

$$\Delta L_{p,max} \leq 5 \text{ dB}$$

## 6.5 Zielwerte für das Deutlichkeitsmaß $C_{50}$

Wie oben beschrieben, wird  $C_{50}$  hier nicht nur im Hinblick auf die Sprachverständlichkeit, sondern auch hinsichtlich der Durchsichtigkeit der Musik betrachtet, da in [3] nahegelegt wird, für Pop- und Rockmusik eine kurze Zeitspanne zu betrachten. Gemäß [2] wird mit  $C_{50} > 0$  dB

eine sehr gute Silbenverständlichkeit von mehr als 70 % gewährleistet. Dies wird als Zielwert angestrebt:

$$C_{50} > 0 \text{ dB}$$

## 6.6 Zielwerte für den Seitenschallgrad $LF$

Gemäß [2] ist für einen Konzertsaal ein  $LF$  von 25 bis 40 % wünschenswert. Dies wird hier übernommen:

$$25 \% \leq LF \leq 40 \%$$

## 6.7 Zielwerte für den Sprachübertragungsindex $STI$

In ÖNORM B 8115-3 [8] wird angeführt, dass eine gute Sprachverständlichkeit durch einen  $STI \geq 0,6$  gekennzeichnet ist, siehe Tab. 6.1. Für Räume mit besonderen Anforderungen an die Sprachkommunikation, wie z.B. Theater, wird empfohlen, noch höhere Werte anzustreben. Da der vorliegende Raum für Mehrzwecknutzung vorgesehen ist, wird davon jedoch abgesehen:

$$STI > 0,6$$

STI	Sprachverständlichkeit
0,75 bis 1,00	sehr gut
0,60 bis 0,75	gut
0,45 bis 0,60	befriedigend
0,30 bis 0,45	schlecht
0,00 bis 0,30	sehr schlecht

Tabelle 6.1: Zuordnung  $STI$  und Sprachverständlichkeit, Quelle: ÖNORM B 8115-3 [8]

## 6.8 Zielwerte für den Stage Support $ST$

Wie bereits in Abschnitt 5.8 dargestellt, soll  $ST_{early} > ST_{late}$  erreicht werden.

## 6.9 Zusammenfassung der angestrebten Wertebereiche

Höreindruck	Bereich	Kriterium	Zielwert
Nachhall	Auditorium	Nachhallzeit $T_{30}$	0,8 s ( $\pm 20 \%$ )
Nachhall	Bühnenraum	Early Decay Time $EDT$	$< T_{30}$
Klangfarbe	beide	Bass Ratio $BR$	1
Lautstärke	Auditorium	Schalldruckpegel $SPL$	$\Delta L_{p,max} \leq 5 \text{ dB}$
Durchsichtigkeit	Auditorium	Deutlichkeitsmaß $C_{50}$	$> 0 \text{ dB}$
Raumeindruck	Auditorium	Seitenschallgrad $LF$	25 ... 40 %
Sprachverständlichkeit	Auditorium	Sprachübertragungsindex $STI$	$> 0,6$
Ensemble vs Halligkeit	Bühnenraum	Stage Support $ST$	$ST_{early} > ST_{late}$

Tabelle 6.2: Angestrebte Wertebereiche für die Gütemaße im Veranstaltungssaal

## 7

## Erläuterungen zur Modellbildung

In diesem Abschnitt werden einige wesentliche Parameter des Modells, das der Simulation der akustischen Gegebenheiten zugrunde liegt, beschrieben. Ziel ist es nicht, das Modell vollständig nachzuzeichnen oder eine genaue Anleitung zur Nachbildung zu geben. Vielmehr sollen wichtige Spezifikationen nachvollziehbar gemacht werden bzw. die Wahl gewisser Parameter begründet werden. Neben der Beschreibung in diesem Abschnitt sind die entsprechenden Eingabedaten in die Software im Anhang (siehe Abschnitte 1, 2 und 3) zu finden.

### 7.1 Schallquellen

Aus der Aufgabenstellung, die Eignung des Saals für Sprach- und Musikdarbietungen mit und ohne elektroakustischer Verstärkung zu beurteilen, sowie neben der Betrachtung der Sitzplätze im Publikumsbereich auch die Situation für die Darbietenden auf der Bühne zu untersuchen, ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften und Positionen für Schallquellen, die zu modellieren sind. Aufgrund der Messvorschrift für den Stage Support in [15] bzw. der strikten Definition, welche durch die Software zur Berechnung dieses Kriteriums vorgegeben ist, wurde die Position für die Repräsentation von Musik (A0) auf der Bühne vorgenommen. Diese Quelle ist mit einem Rosa Spektrum modelliert, der Pegel wurde aus der Literatur [18] abgeleitet. Da für die Berechnung der Schalldruckpegel in 1 m Abstand anzugeben ist, wurde für eine Band mit Schlagzeug im hinteren Bereich der Bühne ein Wert von 90 dB(A) angesetzt.

Wie bereits bei der Beschreibung des  $STI$  angeführt, erfordert die Messung bzw. Berechnung dieses Gütemaßes ein normativ festgelegtes „sprachähnliches“ Signal (A5). Für die Berechnung des  $STI$  wurde daher eine Quelle mit ebendieser spektralen Zusammensetzung, auf derselben Bühnenposition wie das Signal für Musik, jedoch in 1,5 m Höhe (Stehposition), definiert. Neben diesen natürlichen Quellen, deren Positionen aus Abb. 7.1 hervorgehen, wurden später weitere Quellen zur Modellierung der Lautsprecher eingegeben (B0 - B2 für Musik bzw. B5 - B7 für Sprache), siehe Abb. 8.16 in Abschnitt 8.4.

### 7.2 Hörpositionen und Publikumsfläche

Die Hörpositionen, an denen die Auswertungen erstellt werden, sind in drei Gruppen unterteilt: Gruppe 0 - Auditorium (01-06) für alle Gütemaße, Gruppe 1 - Bühne (10-13) für  $ST_{early}$  und  $ST_{late}$  sowie Gruppe 2 - Bühne (20-22) für  $T_{30}$  und EDT. Die Positionen in Gruppe 1 sind durch [15] und [11] vorgegeben. Die Positionen der Gruppen 0 und 2 wurden mit der Absicht gewählt, eine möglichst breite Streuung in der Klangqualität zu erreichen, um die zu erwartenden Unterschiede in der Qualität der Hörplätze gut abschätzen zu können.

Weiters wurde zur Darstellung des Schalldruckpegels als Farbraster eine Fläche im Publikumsraum definiert, die sich auf 1,2 m relativ zum Boden und somit auf durchschnittlicher Ohrhöhe des sitzenden Publikums befindet.

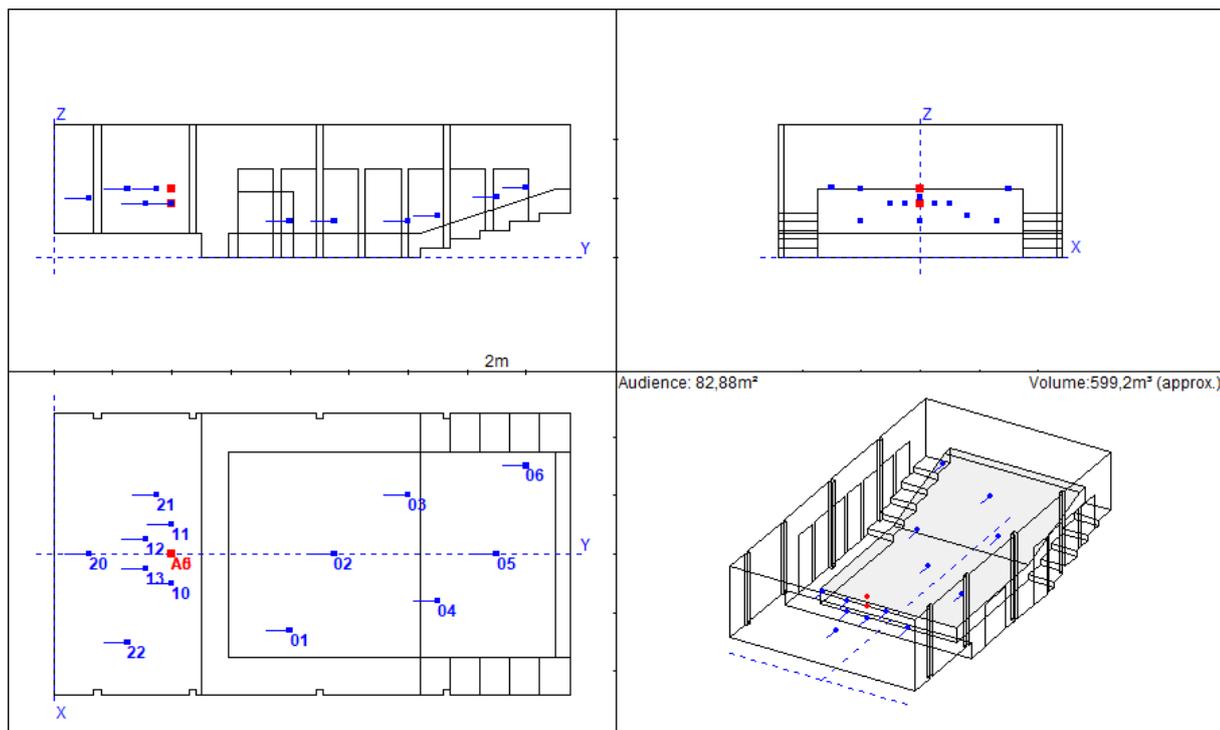


Abbildung 7.1: Quellen (rot) und Empfangspositionen (blau) im Modell. Quelle A0 (Musik) in rel. Höhe von 1,00 m - Quelle A5 (Sprache) in rel. Höhe von 1,50 m - Empfängergruppe 0 (01-06) in rel. Höhe von 1,20 m - Empfängergruppe 1 (10-13) in rel. Höhe von 1,00 m - Empfängergruppe 2 (20-21) in rel. Höhen von 1,20 m und 1,50 m

### 7.3 Modellierung der Materialeigenschaften

Die frequenzabhängigen Absorptionseigenschaften der Materialien im Raum wurden teils der ÖNORM B 8115-3 [8] entnommen, teils wurden gezielt im Handel erhältliche Produkte recherchiert und die verfügbaren Hersteller\*innenangaben übernommen. In einigen Fällen wurden davon Werte abgeleitet, z.B. für die Faltenzugaben von 50 % beim Bühnenvorhang oder die Wirkung der Textillüftungsschläuche, die mit einem gewissen Abstand unter der Decke angebracht sind. Wesentlich sind auch die frequenzabhängigen Streukoeffizienten, die entsprechend [11] für die Publikumsfläche und einige andere Materialien abgeschätzt wurden. Unter den möglichen Einstellungen wurde die Lambert-Distribution gewählt (Eingabe „L“ vor den Streukoeffizienten, siehe Abschnitt 1 im Anhang. Da das Publikum nicht als einzelne, ebene Fläche, sondern in den Raum ragend mit entsprechenden Seitenflächen modelliert wurde, wurden die flächenbezogenen Absorptionswerte angepasst, um die Gesamtabsorption bei entsprechender Personenanzahl richtig abzubilden. Weiters wurde eine Auslastung von 80 % der Sitzplätze angenommen.

### 7.4 Berechnungsparameter

Die Simulationsergebnisse an den Hörpositionen wurden mit dem Algorithmus 2 [19] und einer Anzahl von 30.000 Strahlen bzw. Kegeln für eine Impulsantwort mit der Länge von 2.500 ms berechnet. Die Farbraster wurden mit einer Schrittweite von 0,5 m erstellt (Abstand zwischen zwei Hörpositionen). Dazu wurden 50.000 Strahlen/Kegel berechnet. Weiters wurde die Absorption durch Luft berücksichtigt sowie jene Einstellungen gewählt, die eine teilweise Simulation von Beugungsphänomenen zulassen (Sd: „specular to diffraction“ und dS: „diffraction to specular“). Der Störgeräuschpegel zur Berechnung des *STI* wurde mit 35 dB(A) festgelegt.

## 8

## Simulationsergebnisse und Ableitung der Maßnahmen

Im vorliegenden Kapitel sind die Ergebnisse der drei Simulationsdurchläufe aufbereitet. Die Auswertung erfolgt an einzelnen Hörpositionen, die im vorigen Kapitel beschrieben wurden, sowie zum Teil als Farbraster über die gesamte Fläche des sitzenden Publikums. Die Berechnungen wurden mit Ausnahme des *STI* auf eine für Musik repräsentative Quelle bezogen - zuerst als natürliche Quelle vom Bühnenraum, dann als Musik über Lautsprecher. Die Ergebnisse für den *STI* wurden mit einem Signal ermittelt, das normgemäß [17] für entsprechende Messungen zu verwenden ist.

### 8.1 V0: Simulation des Raumentwurfs

Die nachfolgenden Abbildungen 8.1 bis 8.7 zeigen die berechneten Werte der jeweiligen Güte- maße an den definierten Hörpositionen sowie die in Kapitel 6 definierten Zielwerte.

Die Nachhallzeit  $T_{30}$  übersteigt in allen Oktavbändern den Toleranzbereich und ist von ausgeprägter Dauer bei tiefen Frequenzen, wo sie deutlich über 2 s liegt. Daraus ergibt sich eine mittlere *BR* von 1,56.

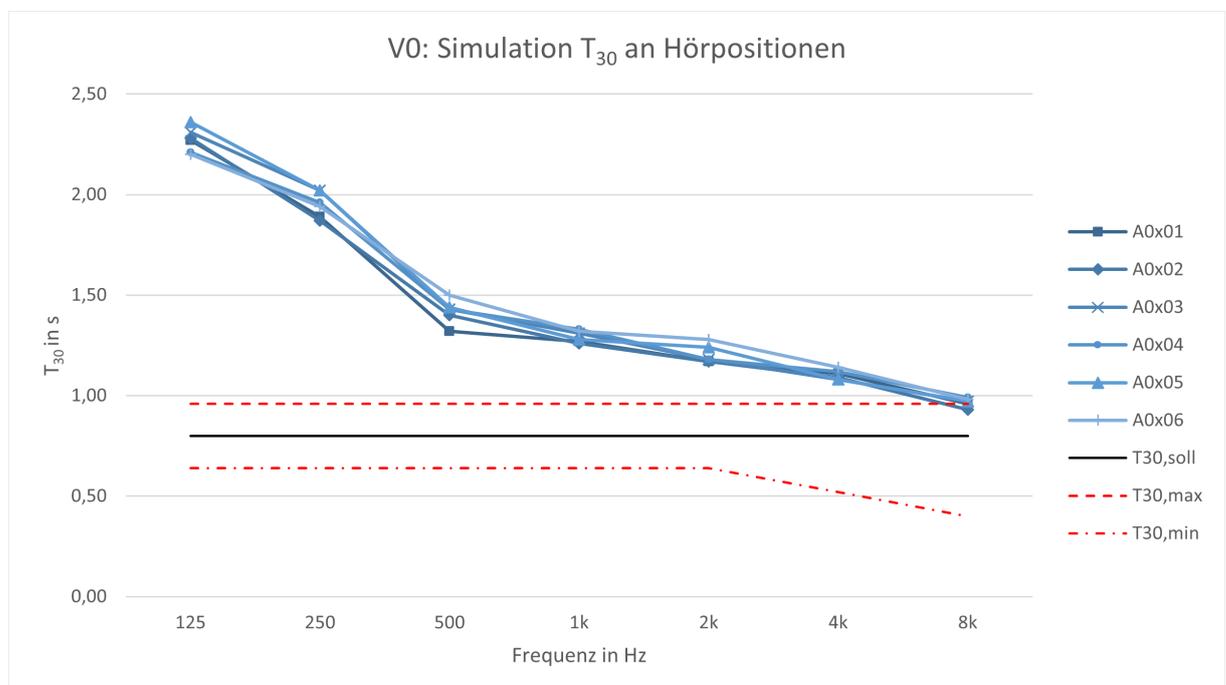


Abbildung 8.1: V0 - Nachhallzeit  $T_{30}$  in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A0x01 bis A0x06

Im Bühnenbereich übersteigt die Anfangsnachhallzeit  $EDT$  im Oktavband um 125 Hz die Nachhallzeit  $T_{30}$  sogar um rund 1 s. Dies stellt eine denkbar ungünstige Situation für die Darbietenden dar und erfordert wirkungsvolle Maßnahmen zur Verkürzung des tieffrequenten Nachhalls auf der Bühne.

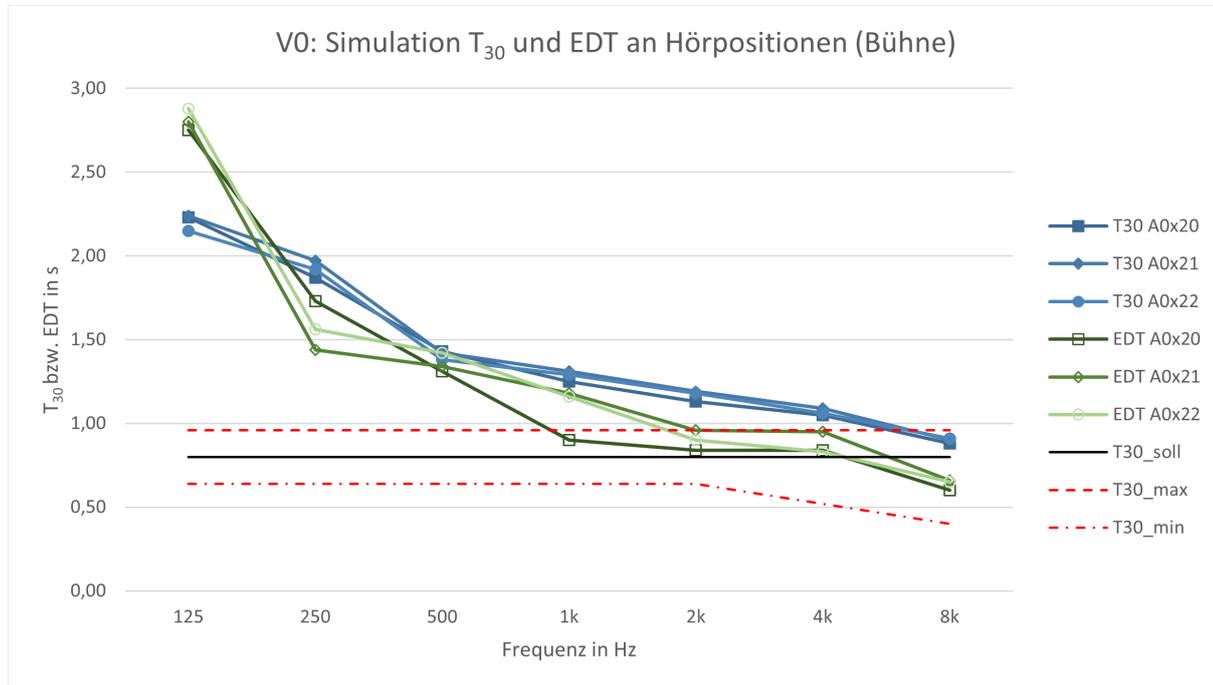


Abbildung 8.2: V0 - Nachhallzeit  $T_{30}$  und Anfangsnachhallzeit  $EDT$  in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A0x20 bis A0x22

Die Schalldruckpegelverteilung in Abb. 8.3 zeigt für den A-bewerteten Summenpegel eine relativ gleichmäßige Verteilung um einen Mittelwert von 92,5 dB(A) mit einer Standardabweichung von 1 dB. Der größte Pegelunterschied zwischen zwei Hörplätzen beträgt 3,7 dB. Eine frequenzabhängige Analyse dieses Kriteriums wird später, bei der Planung der elektroakustischen Anlage, vorgenommen. Zunächst besteht aufgrund der Auswertungsergebnisse eine klare Priorität darin, den Frequenzgang der Nachhallzeit zu verbessern.

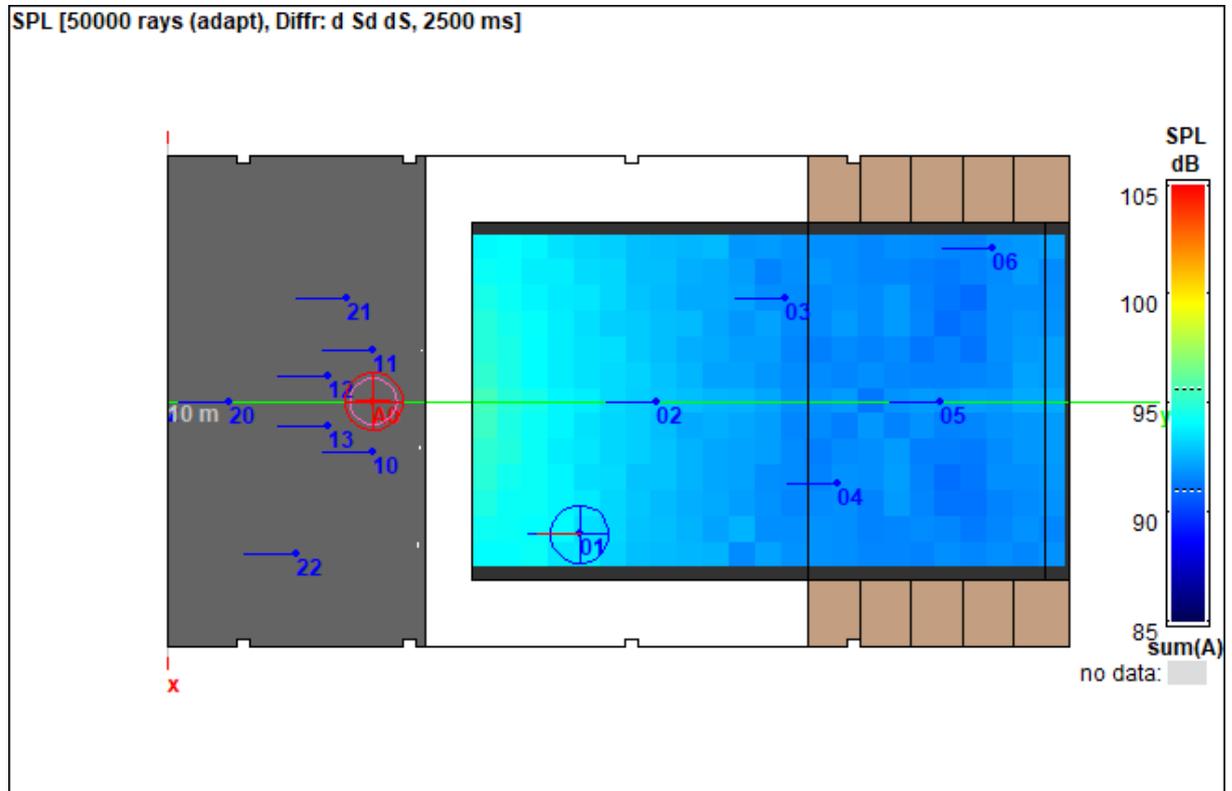


Abbildung 8.3: V0 - Schalldruckpegelverteilung SPL als A-bewerteter Summenpegel für A0, dargestellt als Farbraster im Publikumsbereich in 1,20 m Höhe über den Sitzreihen, im Raumentwurf ohne raumakustische Maßnahmen

Die lange Nachhallzeit im Bassbereich führt zu geringer Deutlichkeit bzw. Durchsichtigkeit im Klangempfinden. Dies zeigt sich objektiv in den Ergebnissen für  $C_{50}$ , die zwar in den Frequenzbändern ab 2 kHz positiv sind, aber Mittelwerte zwischen -2,1 dB und -0,2 dB ergeben und somit allesamt unter dem Soll liegen.

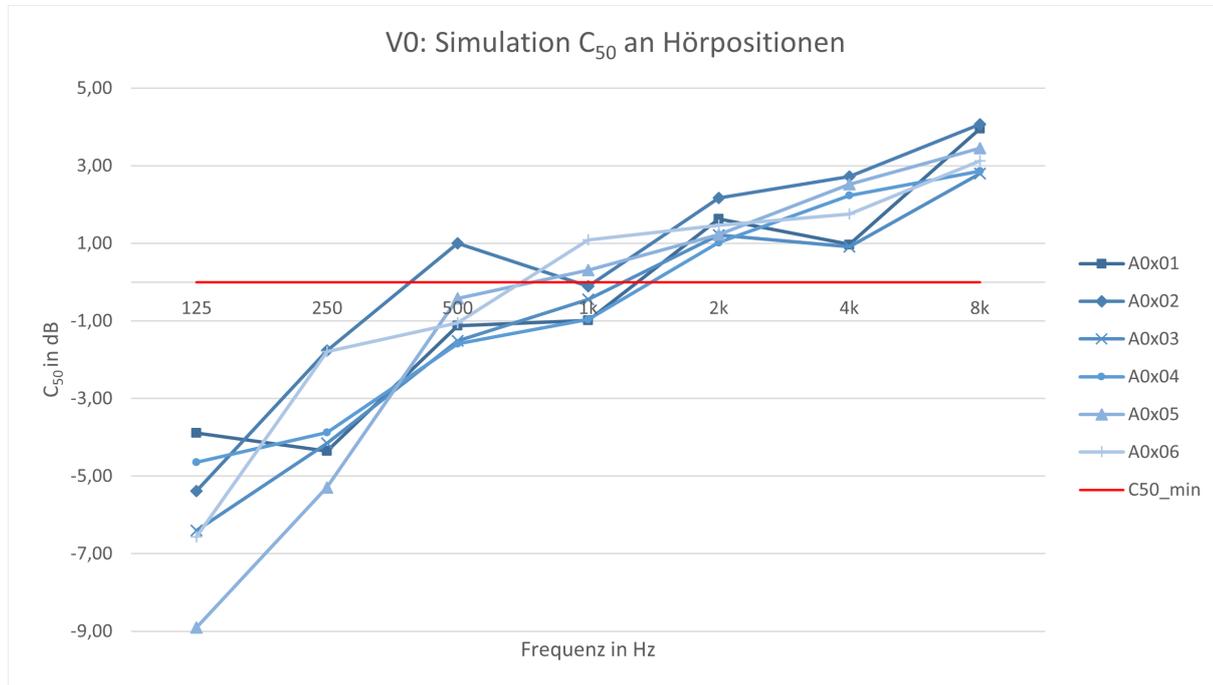


Abbildung 8.4: V0 - Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A0x01 bis A0x06

Der Raumeindruck, der anhand des Seitenschallmaßes  $LF$  beurteilt wird, wird nur an der Hälfte der Hörpositionen wie gewünscht erreicht. Die über die Frequenzen gemittelten Einzählwerte sind mit 10 bis 29 % - wenn überhaupt - im unteren Wertebereich der angestrebten Ergebnisse angesiedelt.

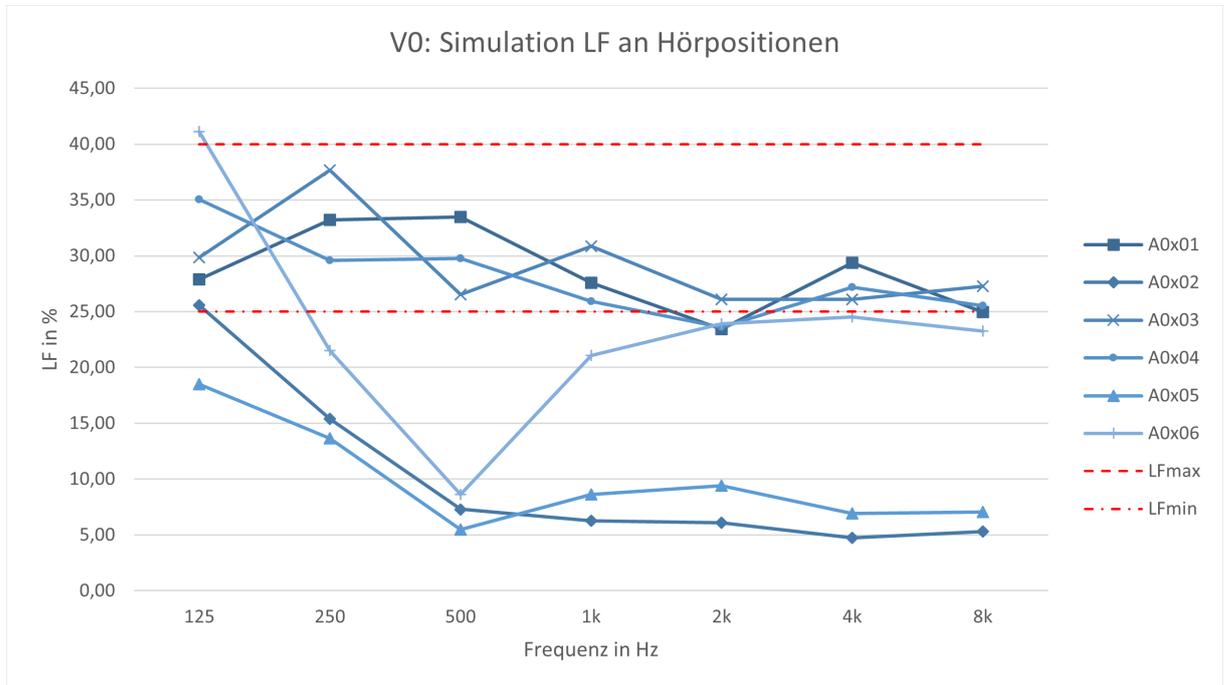


Abbildung 8.5: V0 - Seitenschallgrad  $LF$  in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A0x01 bis A0x06

Die Auswertung des *STI* ergibt an keiner der betrachteten Positionen einen Einzahlwert  $> 0,6$ . Erwartungsgemäß liegen die Werte für tiefe Frequenzen deutlich darunter, denn auch bei diesem Gütemaß wirkt sich die lange Nachhallzeit negativ auf die Ergebnisse aus.

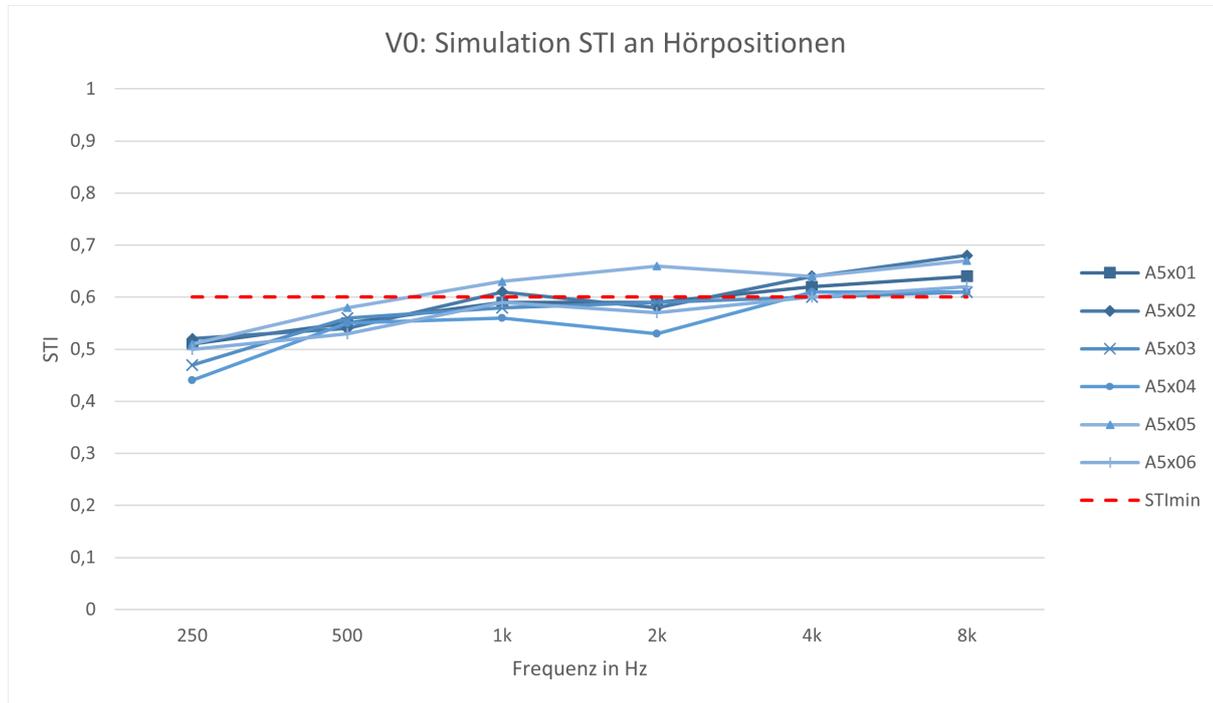


Abbildung 8.6: V0 - Sprachübertragungsindex *STI* in Oktavbändern von 250 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A5x01 bis A5x06

Bei Betrachtung der Pegeldifferenzen an den Messpunkten für den Stage Support wird ein weiteres Mal die Problematik der unausgewogenen Energieverteilung deutlich. Auch wenn im Mittel die frühen Reflexionen aus dem Bühnenraum um 2 bis 3 dB lauter sind als die späten Reflexionen aus dem Auditorium, ist der Unterschied um 250 Hz verschwindend gering und an einer Position überwiegt sogar  $ST_{late}$ .

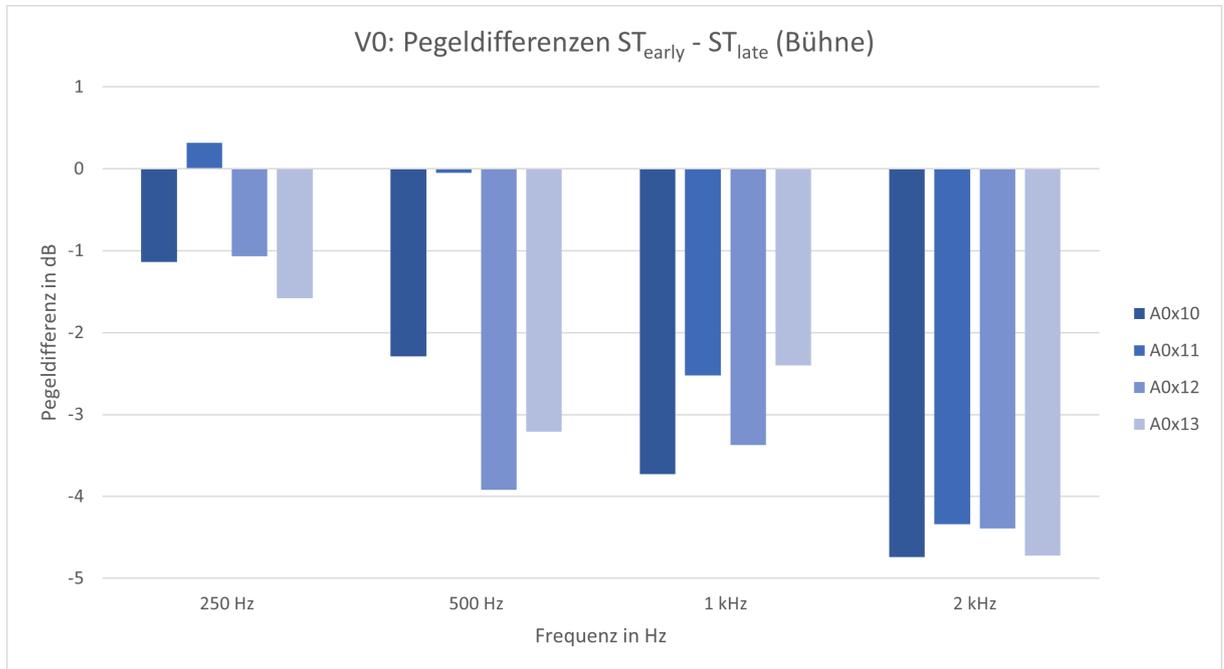


Abbildung 8.7: V0 - Pegeldifferenzen von  $ST_{early}$  und  $ST_{late}$  in Oktavbändern von 250 Hz bis 2 kHz an den Empfangspositionen A0x10 bis A0x13

## 8.2 Ableitung von raumakustischen Maßnahmen

Um die Nachhallzeit zu verkürzen, muss erreicht werden, dass der Schall von den Raumbegrenzungsflächen weniger stark reflektiert wird. Wie die Auswertung im Abschnitt 8.1 eindrücklich zeigt, ist dabei in erster Linie der tieffrequente Schall gezielt zu bedämpfen. Dazu wird auf der Saalrückwand hinter dem Publikum ein tiefenwirksamer Absorber mit einer perforierten Holzoberfläche eingebracht. Dasselbe Material wird als vollflächige Akustikdecke eingesetzt. Weiters soll durch die einheitliche Deckengestaltung erreicht werden, dass die akustischen Verhältnisse im Bühnenraum nicht zu stark von jenen im Publikumsbereich abweichen. Zur Schalllenkung aus dem Bühnenraum ist es zwar eher üblich, mit Reflektoren zu arbeiten, jedoch kann diese Maßnahme aufgrund der geringen Deckenhöhe nicht eingesetzt werden. Um die Schallenergie ins Auditorium zu lenken und Flatterechos auf der Bühne zu vermeiden, werden die Seitenwände um  $8^\circ$  schrägestellt. Dies entspricht einer Verkürzung der Bühnenrückseite von 9,6 m auf 8,3 m. Der von den Nutzer\*innen gewünschte Vorhang an allen drei Bühnenwänden wird aufgrund der stark absorbierenden Wirkung von Bühnenmolton bei hohen Frequenzen nicht in diesem Material ausgeführt. Dies würde zu einer Verschärfung des bestehenden Ungleichgewichts der Schallenergieverteilung beitragen, indem hohe Frequenzanteile im Bühnenraum stark bedämpft würden und somit in noch geringerem Verhältnis im Schallfeld vorhanden wären. Gewählt wurde ein Produkt, das als "reflektierender Bühnenvorhang" beworben wird, wobei objektiv gesehen bloß eine geringere Absorptionswirkung als bei Bühnenmolton vorliegt. Abgerundet wird das Maßnahmenbündel mit einem Reflektor in der Deckenkante hinter dem Publikum, der zur Versorgung der hinteren Hörplätze mit Schallenergie beiträgt. Wird der Reflektor aus hinreichend schwerem Material ausgeführt [7], bewirkt dies eine Reflexion auch von tieffrequenter Schallenergie. Dadurch kann der Modenbildung im Bereich dieser Raumkante entgegengewirkt werden. Die Neigung und Größe des Reflektors ist durch die abgehängten Lüftungsschläuche begrenzt. Bei der Dimensionierung wurde unter Berücksichtigung dieser Tatsache und mittels geometrischer Strahlenverfolgung ein Neigungswinkel von rund  $30^\circ$  von der Decke bzw. rund  $60^\circ$  von der Wand sowie eine Breite von rund 1 m gewählt.

Zum Überblick sind die gewählten raumakustischen Maßnahmen noch einmal aufgezählt:

- tieffrequent wirksame Akustikdecke und Wandabsorber hinter dem Publikum
- Schrägstellung der seitlichen Bühnenwände um  $8^\circ$  zur Schalllenkung und zur Vermeidung von Flatterechos
- Bühnenvorhang aus gering absorbierendem Material
- Reflektor in der Deckenkante hinter dem Publikum

### 8.3 V1: Simulation des Raumes mit Maßnahmen

Die Simulation des Raummodells, das um die genannten Maßnahmen erweitert wurde, führt zu den nachfolgend beschriebenen Ergebnissen.

$T_{30}$  liegt für alle betrachteten Hörpositionen im Sitzpublikum innerhalb des Toleranzbereiches, wie in Abb. 8.8 zu erkennen ist. Der gemittelte Wert über alle Positionen und Oktavbänder beträgt genau 0,8 s und entspricht somit dem Sollwert. Das Bassverhältnis konnte durch die gewählten Maßnahmen deutlich verbessert werden. Es liegt nunmehr bei min. 0,93 und max. 0,98 sowie im Mittel bei 0,96. Der angestrebte Wert von  $BR = 1$  wird somit in der Prognose zielgenau erreicht.

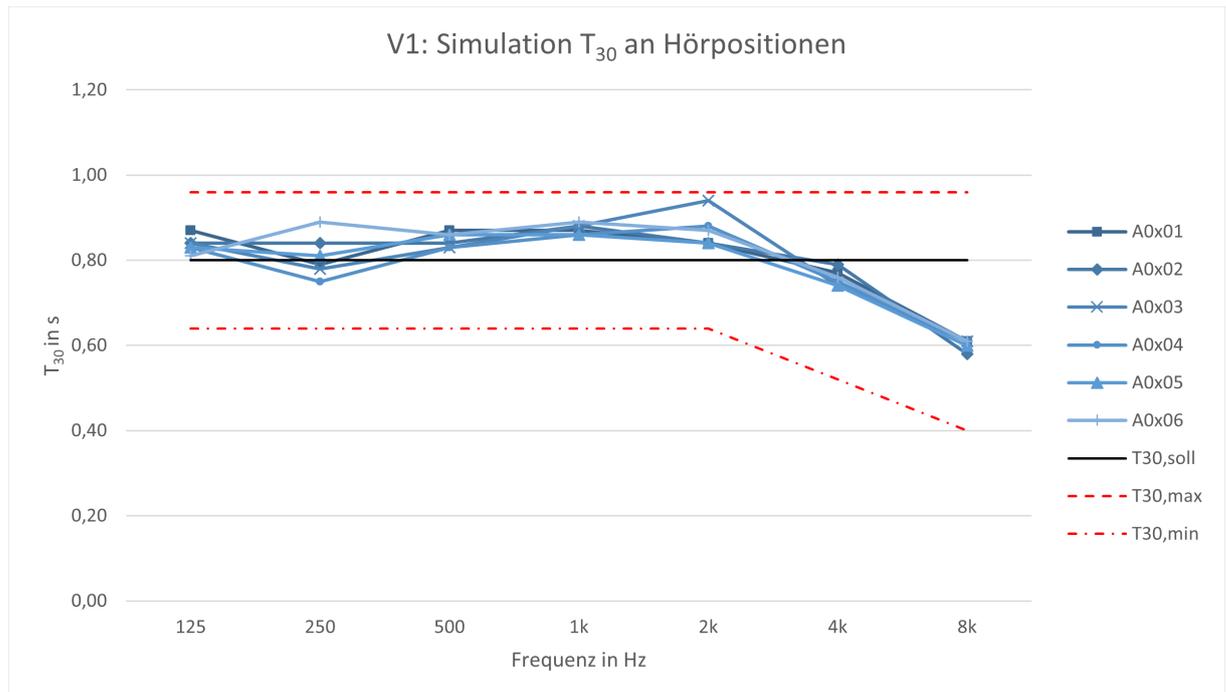


Abbildung 8.8: V1 - Nachhallzeit  $T_{30}$  in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A0x01 bis A0x06, im Saal mit raumakustischen Maßnahmen

Die Auswertung für die *EDT* im Bühnenbereich ist in Abb. 8.9 mit  $T_{30}$  zusammengefasst. Die Berechnung der Nachhallzeit auf der Bühne ergibt für alle Positionen über alle Frequenzbänder Ergebnisse im Sollbereich. Zudem konnte die Zielsetzung, dass EDT kürzer als  $T_{30}$  ausfällt, erfüllt werden.

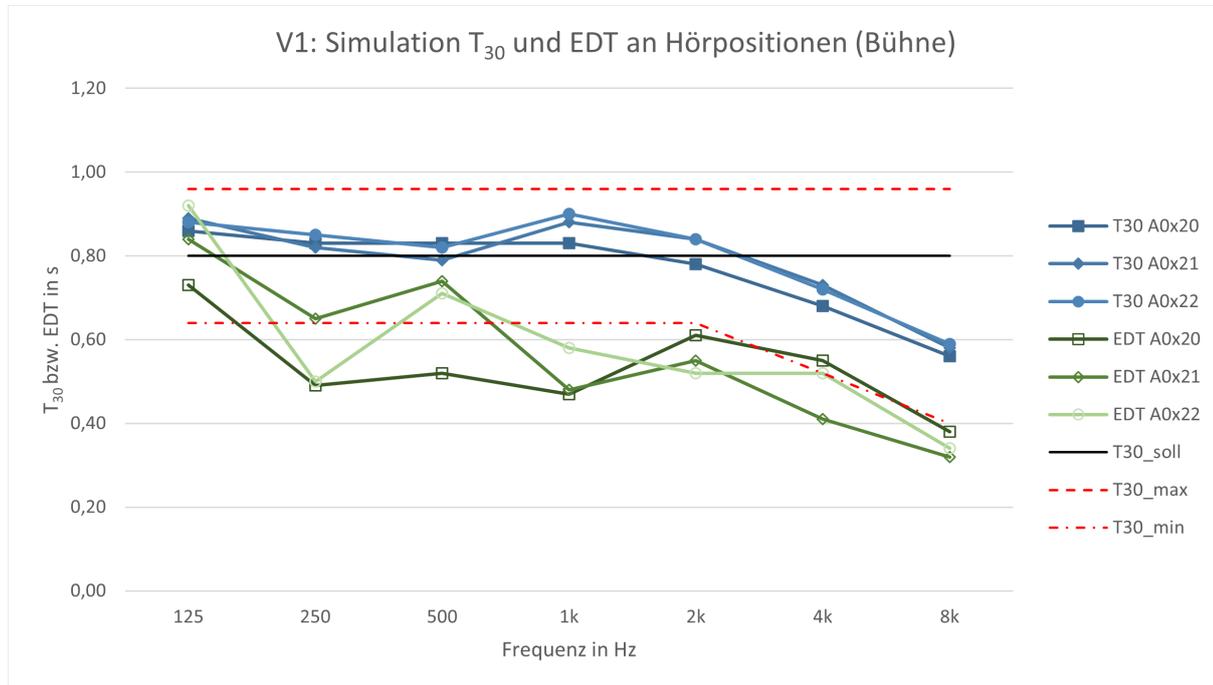


Abbildung 8.9: V1 - Nachhallzeit  $T_{30}$  und Anfangsnachhallzeit *EDT* in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A0x20 bis A0x22, im Saal mit raumakustischen Maßnahmen

Die Schalldruckpegelverteilung zeigt in der statistischen Auswertung einen Mittelwert von rund 91 dB(A) bei einer Standardabweichung von 1,2 dB. Der größte Pegelunterschied zwischen zwei Sitzplätzen beträgt 5,5 dB und hat sich somit nicht nur gegenüber dem raumakustisch unbehandelten Saal verschlechtert, sondern liegt nun auch über dem angestrebten Wert von max. 5 dB. Dieser Umstand kann darauf zurückgeführt werden, dass der Raum durch die vollflächig absorbierende Decke sowie den Bühnenvorhang relativ stark bedämpft wird und dadurch Schallenergie entzogen wird. Die Rasterauswertung der Schalldruckpegelverteilung, zu sehen in Abb. 8.10, ist in weiterer Folge eine maßgebliche Grundlage, auf der die Dimensionierung der elektroakustischen Anlage geplant wird. Sie stellt ein hilfreiches Tool dar, um zu erkennen, welche Publikumsbereiche gezielt mit Schallenergie zu versorgen sind und dadurch eine bessere Pegelverteilung über alle Hörplätze zu schaffen.

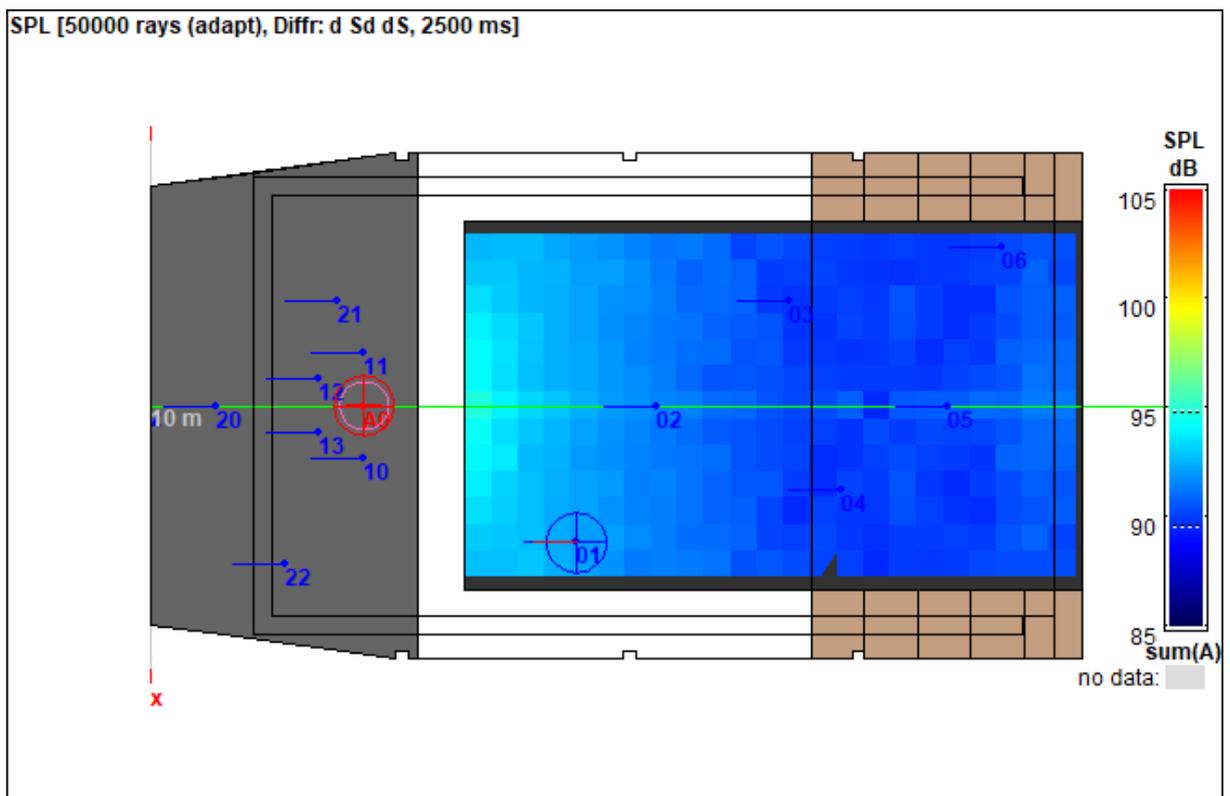


Abbildung 8.10: V1 - Schalldruckpegelverteilung SPL für A0, dargestellt als Farbraster im Publikumsbereich in 1,20 m Höhe über den Sitzreihen, im Saal mit raumakustischen Maßnahmen

Die erreichte Verkürzung von  $T_{30}$  bringt auch eine Erhöhung von  $C_{50}$  mit sich, zumal dieses Kriterium das Verhältnis der frühen Schallenergie zur späten, nach 50 ms am Hörort eintreffenden Schallenergie, beschreibt. An allen betrachteten Positionen im Auditorium konnte bewirkt werden, dass  $C_{50}$  nun im Sollbereich über 0 dB liegt, und zwar über alle Frequenzbänder hinweg. Der frequenzabhängige Verlauf von  $C_{50}$  ist in Abb. 8.11 dargestellt. Die Einzahlwerte liegen bei min. 2,4 dB und max. 4,2 dB sowie im Mittel bei rund 3 dB.

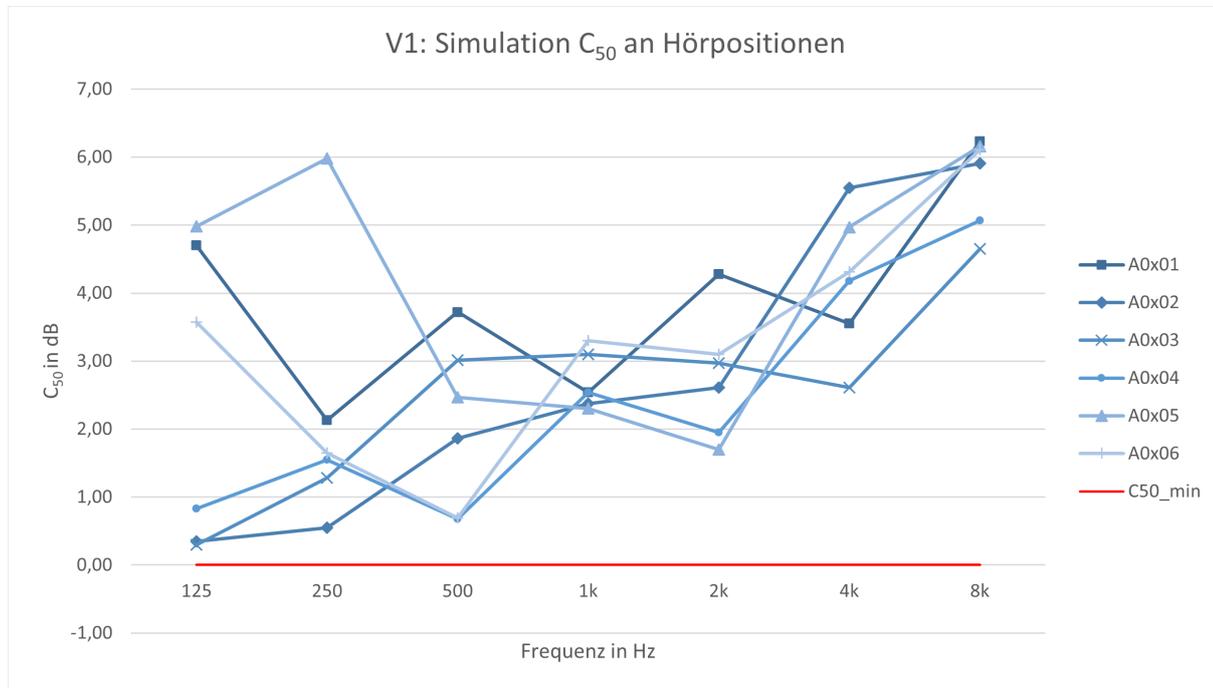


Abbildung 8.11: V1 - Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A0x01 bis A0x06, im Saal mit raumakustischen Maßnahmen

Der Seitenschallgrad  $LF$  konnte an den betrachteten Hörpositionen kaum verändert werden. Die über die Frequenzbänder gemittelten Einzählwerte liegen bei max. 31 % im Vergleich zu max. 29 % im Raum ohne Maßnahmen. Gemäß [2] kann in gut bewerteten Konzertsälen ein entsprechender  $LF$  durch verhältnismäßig schmale und hohe Raumabmessungen erreicht werden. Da im vorliegenden Projekt die Primärstruktur und damit die Raumhöhe bereits fixiert ist und diesbezüglich keine Gestaltungsvorschläge im Sinne der Raumakustik in Frage kommen, sind der Erhöhung von  $LF$  Grenzen gesetzt. In Abb. 8.12 ist deutlich zu sehen, wie die beiden Hörpositionen 02 und 05 in der Saalmitte besonders niedrige  $LF$ -Werte aufweisen. Der seitlich einfallende Schall wird auf seinem Weg zu diesen Positionen vom Publikum teilweise absorbiert und liefert im Verhältnis zur Gesamtschallenergie einen kleineren Anteil als an den Sitzplätzen am Rand.

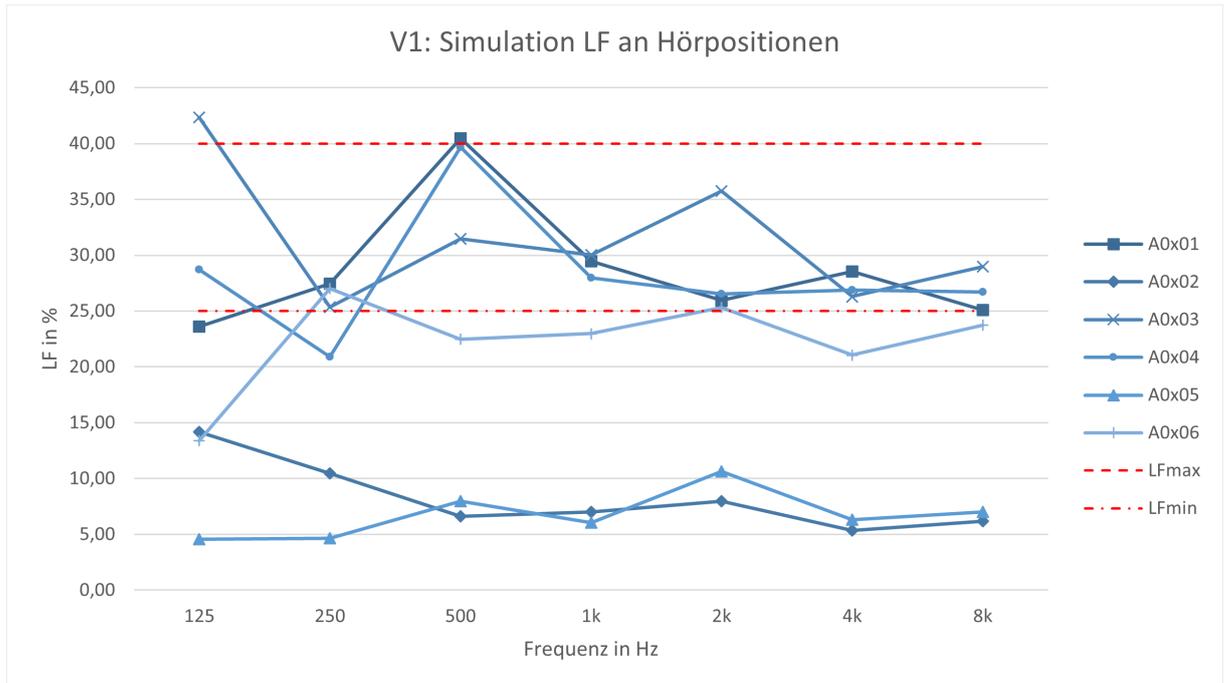


Abbildung 8.12: V1 - Seitenschallgrad  $LF$  in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A0x01 bis A0x06, im Saal mit raumakustischen Maßnahmen

Ein weiteres Kriterium, das durch die Verkürzung der Nachhallzeit positiv beeinflusst wird, ist der *STI*. Abb. 8.13 veranschaulicht, dass die Ergebnisse über praktisch alle Frequenzbänder im Sollbereich oberhalb von 0,6 liegen. Die über die Oktavbänder gemittelten Werte liegen für die einzelnen Positionen bei min. 0,63 und max. 0,70 sowie im Durchschnitt bei 0,66 und entsprechen somit einer „guten“ Sprachverständlichkeit.

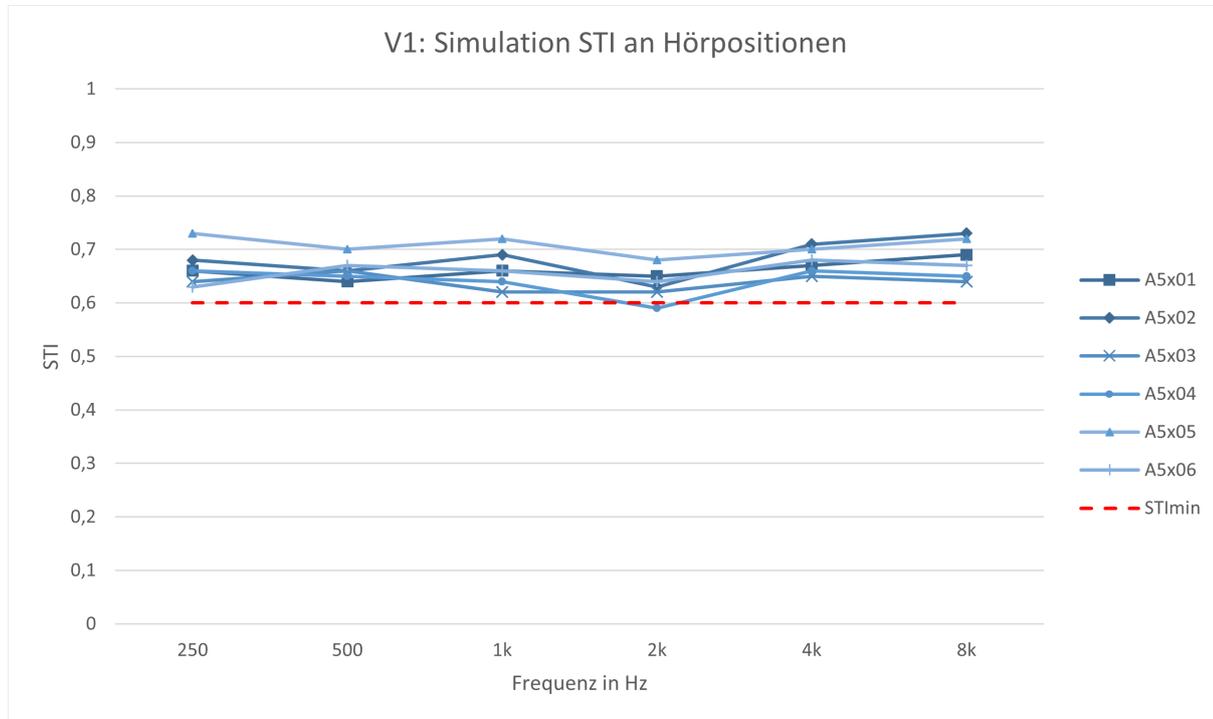


Abbildung 8.13: V1 - Sprachübertragungsindex *STI* in Oktavbändern von 250 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A5x01 bis A5x06, im Saal mit raumakustischen Maßnahmen

Die Ergebnisse für den Stage Support  $ST$  sind in Abb. 8.14 dargestellt. Der angestrebte, höhere Pegel von  $ST_{early}$  gegenüber  $ST_{late}$  wurde unter Einsatz der raumakustischen Maßnahmen erreicht. Im Vergleich zum unbehandelten Raum haben sich die Pegelunterschiede erhöht und bilden nun ein Verhältnis von 2:1 ab. Werden an jeder Position für sich die frequenzabhängigen Pegeldifferenzen miteinander verglichen, zeigt sich, dass diese an den Positionen 11, 12 und 13 weniger stark divergieren als in der Ausgangssituation. Für die abschließende Beurteilung, ob bzw. wie sehr die Situation für die Darbietenden hinsichtlich dieses Kriteriums verbessert wurde, fehlen wissenschaftlich validierte, ideale Werte für  $ST_{early} - ST_{late}$ . An dieser Stelle sei auf die in [3] beschriebenen Erfahrungswerte verwiesen, wonach der niedrigere Pegel der späten Reflexionen auf der Bühne es erlaubt, die Aussteuerung für das Publikum weiter zu erhöhen und dabei das Monitoring nicht so sehr zu beeinträchtigen, wie es bei ungünstigen Verhältnissen des  $ST$  der Fall wäre. Da elektroakustisch verstärkte Darbietungen mit Bühnenmonitoring den Regelfall im untersuchten Saal darstellen, wird die erreichte Erhöhung des Pegelunterschieds zwischen  $ST_{early}$  und  $ST_{late}$  als tendenziell positiv eingeschätzt.

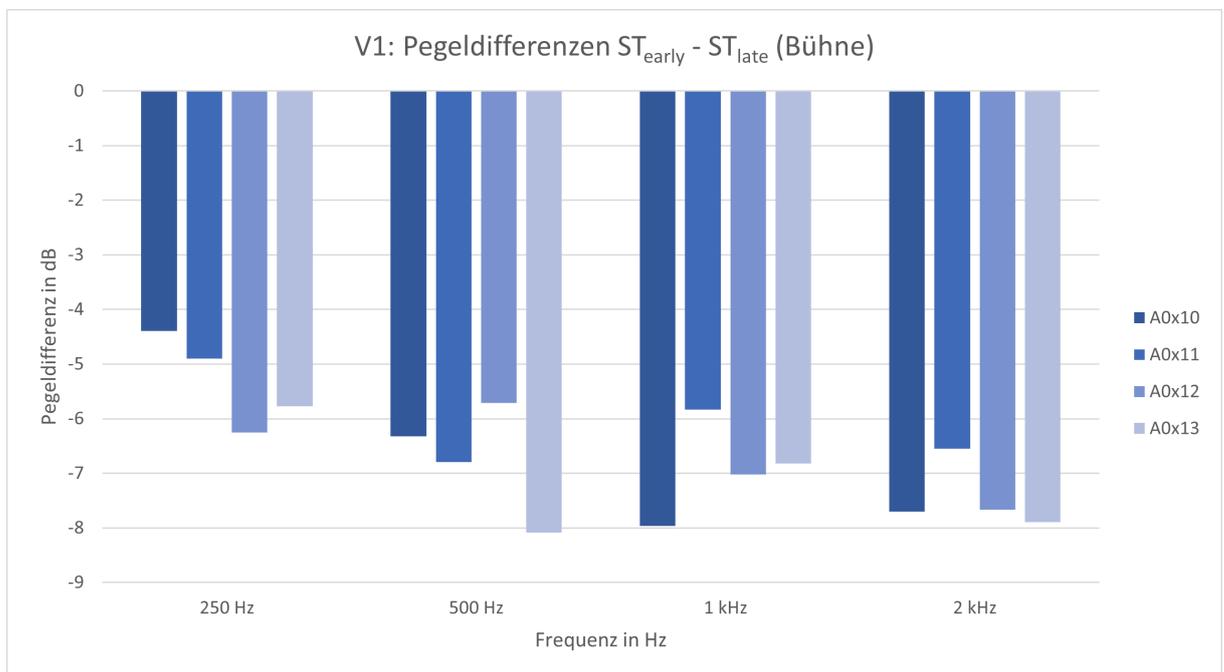


Abbildung 8.14: V1 - Pegeldifferenzen von  $ST_{early}$  und  $ST_{late}$  in Oktavbändern von 250 Hz bis 2 kHz an den Empfangspositionen A0x10 bis A0x13, im Saal mit raumakustischen Maßnahmen

## 8.4 Ableitungen für die Elektroakustik

Für den raumakustisch optimierten Saal wird nun untersucht, wie die Beschallungsanlage zu dimensionieren ist, um im gesamten Publikumsbereich eine ausreichende Lautstärke und eine gleichmäßige Schalldruckpegelverteilung zu gewährleisten [16]. Gemäß [9] sind folgende Parameter zu ermitteln:

- a) am Hörort wirksamer Störschallpegel
- b) Erwartungswert des Schallpegels
- c) erforderlicher Signal-Stör-Abstand der Anlage
- d) Schalleistung von Schallquellen, die mit der Anlage zusammenwirken
- e) zu installierende Leistung, mit welcher der am Hörort notwendige Schallpegel erreicht wird

ad a) Der am Hörort wirksame Störschallpegel wird im vorliegenden Projekt zum einen von der Haustechnik (Lüftungs- und Klimatechnik) und zum anderen vom Publikum verursacht. Von einem sitzenden Publikum ist eine geringere Lärmentwicklung als von einem Stehpublikum, z.B. bei einem Rockkonzert zu erwarten. Ein leises Gespräch wird nach [9] mit einem Schalldruckpegel von ca. 50 dB abgeschätzt.

ad b) Auf Grundlage der Angaben in [3], [9], [10] und [16] wird in Folge von einem Erwartungswert des Schallpegels zwischen 100 und 105 dB(A) bei Pop- und Rockmusik ausgegangen, sowie von 80 bis 85 dB(A) bei Jazz-Konzerten und rund 70 dB(A) für verstärkte Sprache.

ad c) In der betrachteten Situation mit sitzendem Publikum kann daher ein Signal-Stör-Abstand von zumindest 20 dB erwartet werden, mit dem bei einer Nachhallzeit von 1 s noch eine sehr hohe Silbenverständlichkeit erreicht wird [9].

ad d) In der Simulation der elektroakustischen Quellen wird auch die entsprechende natürliche Quelle für Musik oder Sprache mitberücksichtigt.

ad e) Nach [16] kann die erforderliche Schalleistung wie folgt ermittelt werden:

$$P_{ak} \approx 4 \cdot 10^{-14} \cdot \frac{V}{T} \cdot 10^{\frac{L}{10 \text{ dB}}} \quad (8.1)$$

Für einen gewünschten Schalldruckpegel von  $L = 105$  dB ergibt dies bei einem Volumen  $V = 717 \text{ m}^3$  und einer Nachhallzeit  $T = 0,8$  s eine erforderliche akustische Leistung von  $P_{ak} = 120$  dB.

Für die Simulation wurden die Spezifikationen eines im Handel erhältlichen Lautsprechers verwendet, der ein achssymmetrisches Abstrahlverhalten bei einem Winkel von  $100^\circ$  zur Hauptabstrahlrichtung aufweist. In Abb. 8.15 sind die Isobarendiagramme für die Quer- und Längsachse des Lautsprechers abgebildet. Sie geben Aufschluss über die frequenzabhängige Richtwirkung, da sie die Schalldruckpegelabnahme in Bezug auf den Winkelabstand zur Hauptachse darstellen.

Zunächst wurden zwei Lautsprecher ins Modell übernommen, jedoch zeigte sich bei der Auswertung, dass die vorderen Sitzplätze in der Mitte unzureichend mit Schallenergie in höheren Frequenzbereichen versorgt werden. Daher wurde ein dritter Lautsprecher als Center Fill auf der Bühnenkante ergänzt. Die Positionen der akustischen Zentren der Lautsprecher wurden wie folgt festgelegt: Bei den seitlichen Lautsprechern befinden sich diese in 1 m Abstand zu den

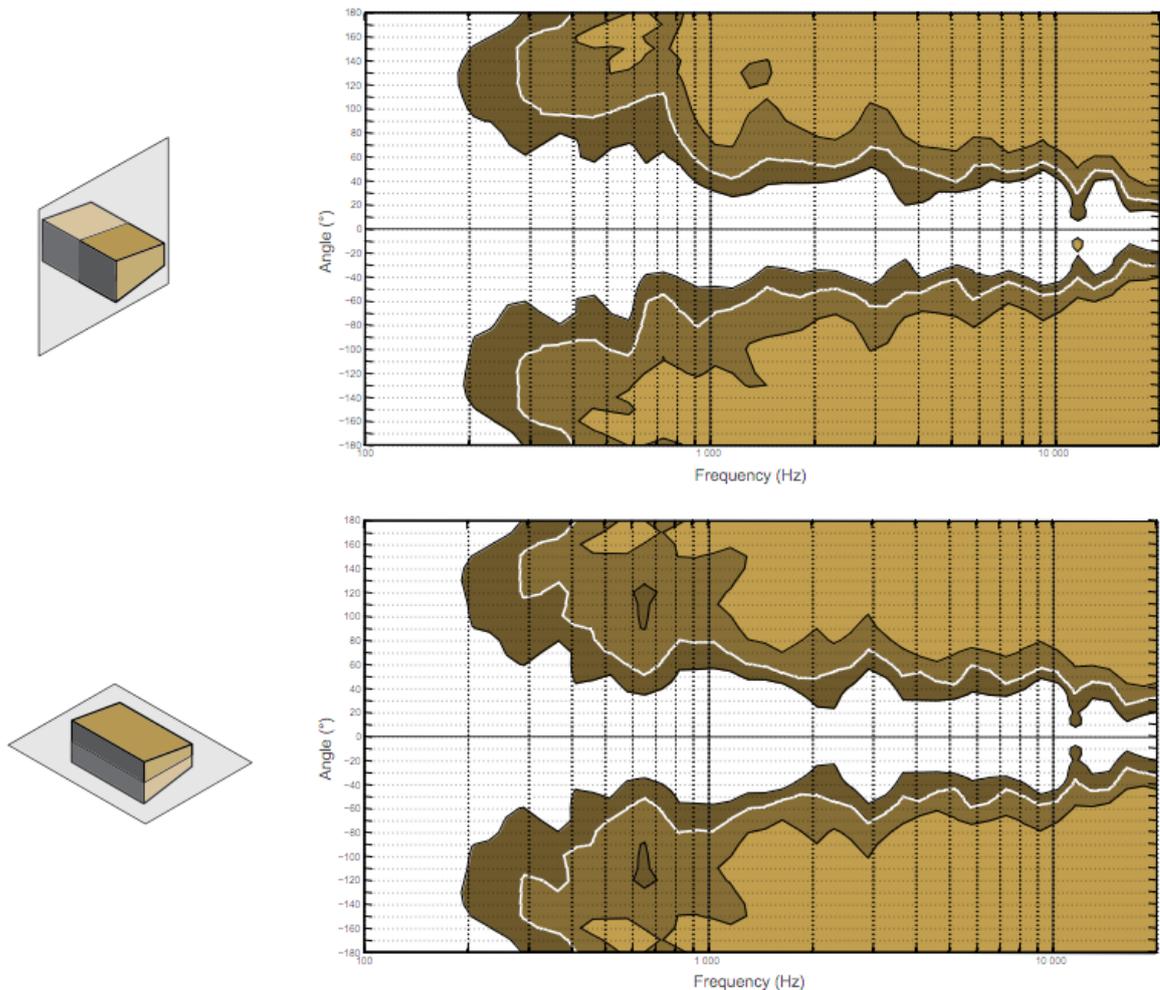


Abbildung 8.15: Isobarendiagramme des in der Simulation verwendeten Lautsprechers für die Querachse (oben) und Längsachse (unten) mit Linien gleichen Schalldrucks bei -3 dB, -6 dB und -12 dB, Quelle: [20]

Seitenwänden und der höchstmöglichen Positionierung unter den Lüftungsschläuchen. In der Längsachse des Raumes wurde die Bühnenkante gewählt, um Rückkopplungen über die Mikrophone auf der Bühne zu vermeiden. Der mittlere Lautsprecher befindet sich 20 cm hinter der Bühnenkante in einer liegenden Position. Die Abstrahlwinkel wurden von den Ergebnissen der Schalldruckpegelverteilung im raumakustisch optimierten Saal abgeleitet. In Abb. 8.16 sind die Positionen und Hauptabstrahlrichtung der Lautsprecher ersichtlich. Um gleichzeitig die natürliche Quelle auf der Bühne in den Berechnungen zu berücksichtigen, war es erforderlich, diese als kohärente Quelle zu definieren (in der Version ohne elektroakustische Verstärkung entfiel dieser Befehl und die Quellen wurden gemäß Voreinstellung als inkohärent behandelt, s. [19]). Die in der Simulation verwendeten Parameter der Quellen sind im Anhang angeführt.

Weiters wurden an den Seitenwänden neben den Lautsprechern Wandabsorber eingefügt, um die Reflexion von tiefen Frequenzen, die sich ungerichtet von der Quelle ausbreiten, zu reduzieren. Dadurch gelangt auch etwas weniger tieffrequenter Schall von den Lautsprechern in den Bühnenbereich. Die Oberfläche des Reflektors wurde dahingehend geändert, dass hohe Frequenzen diffus gestreut werden. In Abb. 8.17 ist das 3D-Modell mit allen bisher genannten Maßnahmen zu sehen.

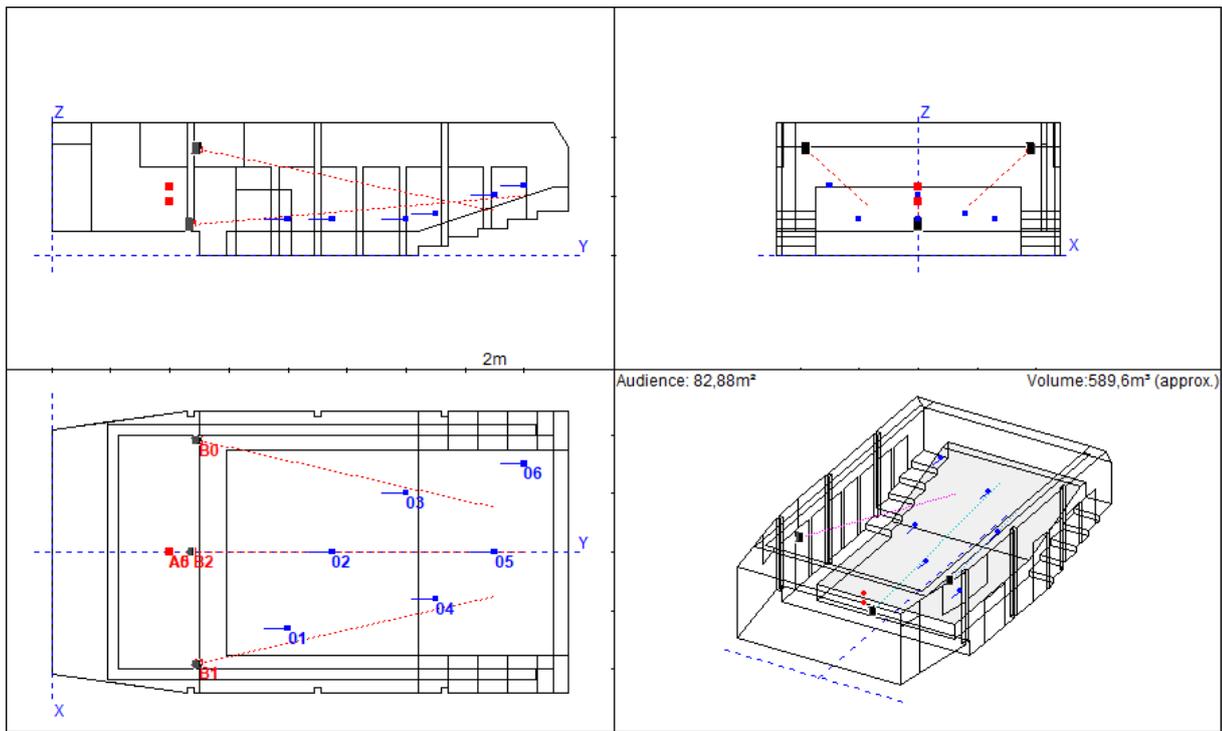


Abbildung 8.16: Position und Hauptabstrahlrichtungen der Lautsprecher (B0 - B2) im Veranstaltungssaal

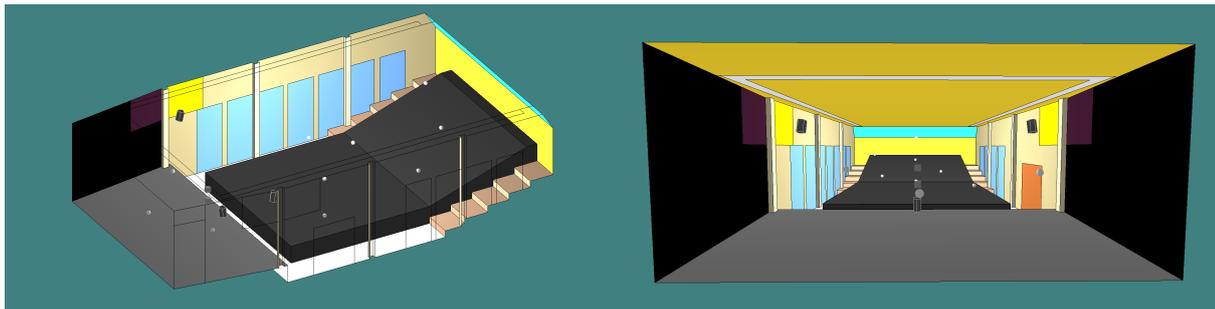


Abbildung 8.17: 3D-Modell des Raumes: Perspektive (links) und Sicht von der Bühne in den Saal (rechts). Akustisch wirksame Materialien: Wand- und Deckenabsorber (gelb bzw. weinrot hinter dem Bühnenvorhang); Reflektor, schallstreuend für hohe Frequenzen (türkis)

## 8.5 V2: Simulation mit raum- und elektroakustischer Optimierung

Hinsichtlich der Schalldruckpegelverteilung über die Publikumsfläche konnte ein Mittelwert von 101,3 dB(A) mit einer Standardabweichung von 0,5 dB erreicht werden. Der größte Pegelunterschied zwischen zwei Hörplätzen beträgt rund 3 dB. Somit ist der Schalldruckpegel gleichmäßiger verteilt als in der Ausgangssituation. Die Schalldruckpegelverteilung in den einzelnen Frequenzbändern kann dem Anhang (siehe Abschnitt 5) entnommen werden. Es ist positiv zu bemerken, dass ein Gleichgewicht im gesamten Spektrum erzielt werden konnte. Dies ist daran erkennbar, dass die Differenz zwischen den mittleren Schalldruckpegeln in den Oktavbändern weniger als 6 dB beträgt und die Standardabweichung  $\sigma$  in allen Oktavbändern unterhalb von 1 dB liegt.

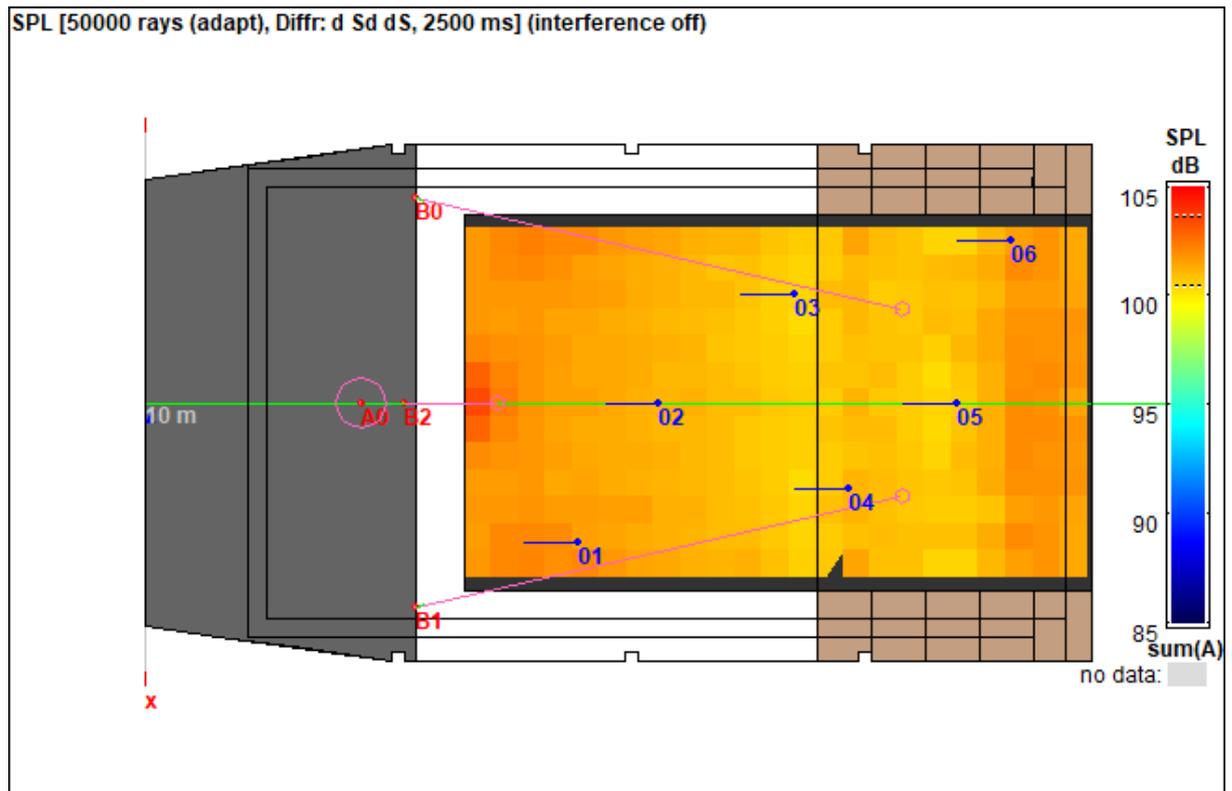


Abbildung 8.18: V2 - Schalldruckpegelverteilung SPL für A0 + B0 + B1 + B2, dargestellt als Farbraster im Publikumsbereich in 1,20 m Höhe über den Sitzreihen, im raumakustisch optimierten Saal mit elektroakustischer Beschallung

Die Simulation mit den drei elektroakustischen Quellen zusätzlich zur natürlichen Quelle auf der Bühne ergab für  $C_{50}$  Werte zwischen 3,4 dB und 6,5 dB sowie im Mittel 4,6 dB an den betrachteten Hörpositionen. Im Vergleich zum mittleren Wert von -1,3 dB im Saal ohne raum- und elektroakustische Maßnahmen konnte eine deutliche Erhöhung des Klarheitsmaßes erreicht werden. Zu bemerken sind die hohen Werten in den Oktavbändern ab 1 kHz an den Positionen 05 und 06. Diese kommen vermutlich durch den Reflektor an der Publikumsrückwand zustande.

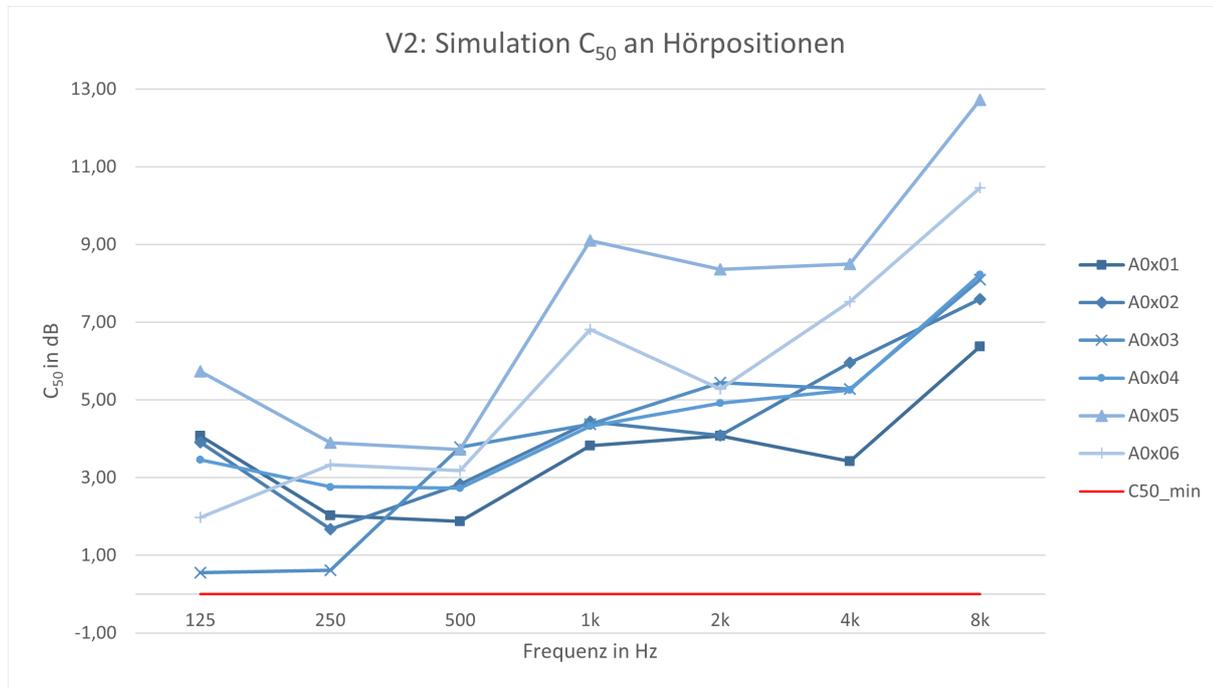


Abbildung 8.19: V2 - Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen \*x01 bis \*x06 (\* = A0 + B0 + B1 + B2), im raumakustisch optimierten Saal mit elektroakustischer Beschallung

Der Seitenschallgrad  $LF$  wird von CATT-Acoustic nur für eine einzelne Quelle berechnet, bei Vorhandensein mehrerer Quellen stehen keine Ergebnisse zur Verfügung. Um die Situation im Saal mit der Beschallungsanlage hinsichtlich dieses Kriteriums einschätzen zu können, wurde in Anlehnung an [21] eine alternative Lösung gefunden, die nachfolgend beschrieben ist. Eine Auswertung in einzelnen Oktavbändern wie für V0 und V1 konnte jedoch nicht durchgeführt werden. Die Vergleiche beziehen sich nunmehr auf die A-bewerteten Mittelwerte von  $LF$  an den einzelnen Hörpositionen.

Für jede untersuchte Hörposition wurden mit dem TUCT-Modul von CATT-Acoustic ambisonische (First Order Ambisonics B-Format) Impulsantworten generiert, wobei diese die Summe aller Quellen in V3 abbilden. Von den exportierten WAV-Dateien wurde dann  $LF$  mithilfe von MATLAB entsprechend Formel 5.4 berechnet. Das verwendete Skript ist im Anhang, Abschnitt 4, zu finden. Zuerst wurden die Berechnungen für den Raumentwurf ohne Maßnahmen (V0) durchgeführt und mit den Simulationsergebnissen verglichen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der berechneten Werte mit den entsprechenden A-bewerteten Ergebnissen für  $LF$  aus der Simulation, vgl. Tab. 8.1. Die Abweichungen liegen bei max. zwei Prozentpunkten. Unter Einbeziehung der Hörpositionen in die Analyse (vgl. Abb. 7.1) kann festgestellt werden, dass die Abweichungen an den Randpositionen 01 und 06 am höchsten (max. 2 %) und an den Positionen 02 und 05 in der Saalmitte am geringsten (0%) sind. Der Vergleich der mit MATLAB berechneten Werte von  $LF$  für V0 und V2 liefert nun im Hinblick auf die Ausrichtung der Lautsprecher (vgl. Abb. 8.16) wenig überraschende Ergebnisse. An den Positionen 01 und 04 sind die Werte am deutlichsten gesunken (um 7 bzw. 8 Prozentpunkte). Diese Sitzplätze befinden sich in der Hauptabstrahlrichtung von Quelle B1, wobei für Position 01 der Abstand zur Seitenwand nun nicht mehr geringer als der Abstand zur Quelle ist (wie es in V0 der Fall war). Anders ausgedrückt: Aufgrund der nun verhältnismäßig nahen, lauten Quelle verringert sich der Anteil der seitlich eintreffenden Schallenergie an der Gesamtschallenergie. Vergleichsweise moderat sind die Werte an den Positionen 02, 03 und 05 gesunken (um 3 bis 4 Prozentpunkte). Auch diese Plätze befinden sich in den Hauptabstrahlrichtungen der Quellen B2 bzw. B0, allerdings bleiben an diesen Sitzpositionen die Verhältnisse der Weglängen Quelle-Empfänger\*in bzw. Seitenfläche-Empfänger\*in vergleichbar wie bei der natürlichen Quelle in V0. An Position 06 bleibt  $LF$  praktisch unverändert. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass sich dieser Sitzplatz ganz außen am Rand, nahe der Seitenwand, vergleichsweise weit entfernt von den Quellen und außerhalb der Hauptabstrahlrichtungen aller Lautsprecher befindet.

$LF$ (A-bewertet) im Vergleich			
Position	V0 CATT-A	V0 MATLAB	V2 MATLAB
01	27 %	25%	17%
02	6 %	6%	3%
03	27 %	26%	22%
04	26 %	26%	19%
05	8 %	8%	4%
06	21 %	23%	22%

Tabelle 8.1: Vergleich des Seitenschallgrades  $LF$ , A-bewerteter Mittelwert über alle Frequenzen, für die Hörpositionen 01 bis 06 und die Varianten V0 - Simulation mit CATT-Acoustic, V0 - Berechnung mit MATLAB und V2 - Berechnung mit MATLAB

Der *STI* liegt an den untersuchten Hörplätzen bei min. 0,71 und max. 0,79 sowie im Mittel bei 0,73. Somit konnten Ergebnisse erreicht werden, die teilweise in oder nur knapp unter der Zuordnung zu einer „sehr guten“ Sprachverständlichkeit liegen. Gegenüber der Ausgangssituation, bei der ein mittlerer *STI* von 0,59 erzielt wurde und an den meisten Positionen bloß eine „befriedigende“ Sprachverständlichkeit nachgewiesen wurde, ist dies eine zufriedenstellende Verbesserung.

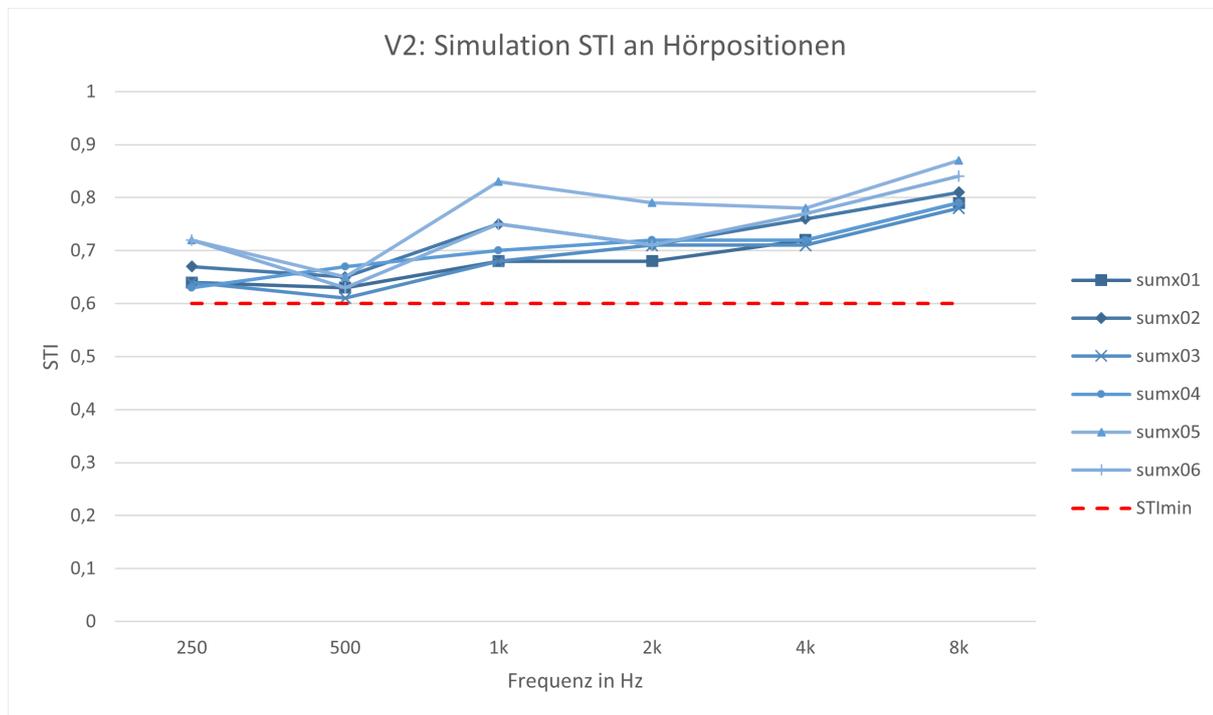


Abbildung 8.20: V2 - Sprachübertragungsindex *STI* in Oktavbändern von 250 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen \*x01 bis \*x06 (\* = A5 + B5 + B6 + B7), im raumakustisch optimierten Saal mit elektroakustischer Beschallung

## 9

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Aufgabenstellung in dieser Bachelorarbeit bestand darin, die Raumakustik für einen Veranstaltungssaal zu planen, in dem Musik- und Sprachdarbietungen mit und ohne elektroakustischer Verstärkung stattfinden werden. Von den verschiedenen gewünschten Nutzungsvarianten wurde jene mit sitzendem Publikum und Vollauslastung untersucht. Zudem wurde dem Forschungsinteresse der akustischen Optimierung des Bühnenraums nachgegangen.

Da die ÖNORM B 8115-3 keine konkreten Empfehlungen an die Nachhallzeit bei Musikdarbietungen mit elektroakustischer Verstärkung vorsieht, wurde ein Wert aus der Literatur abgeleitet. Anschließend wurde die angestrebte Nachhallzeit unter Berücksichtigung der verschiedenen Anforderungen bei Musik und Sprache als Kompromiss festgelegt und weitere Kriterien zur Beurteilung der raumakustischen Qualität ausgewählt. In einem iterativen Prozess wurden die raumakustischen Gütemaße durch Simulation eines 3D-Modells auf Grundlage der geometrischen Raumakustik ermittelt und aus der Analyse der Ergebnisse Maßnahmen zur Verbesserung abgeleitet, deren Wirksamkeit wiederum durch Simulation validiert wurde.

Zunächst wurde der vorliegende Raumentwurf ohne Maßnahmen betrachtet. Da die berechnete Nachhallzeit  $T_{30}$  v.a. im Bassbereich signifikant höher als der angestrebte Wertebereich ausfiel, konnten auch die Zielwerte für das Bassverhältnis  $BR$ , das Klarheitsmaß  $C_{50}$  und den Sprachverständlichkeitsindex  $STI$  nicht erreicht werden, zumal diese mit  $T_{30}$  zusammenhängen. Um die frequenzabhängige Nachhallzeit gezielt zu verringern, wurden als raumakustische Maßnahmen tieffrequent wirksame Absorber an der Decke und der Publikumsrückwand angebracht. Zur Schalllenkung sowie zur Vermeidung von Flatterechos auf der Bühne wurden die Seitenwände um  $8^\circ$  schräggestellt. Für den von den Nutzer\*innen gewünschten Bühnenvorhang wurde ein Material gewählt, das in höheren Frequenzbändern geringer absorbiert als gewöhnlicher Bühnenmolton, um die Unausgewogenheit der Nachhallzeit nicht durch starke Dämpfung von hohen Frequenzen weiter zu verschärfen. Zudem wurde ein Reflektor in der Deckenkante hinter dem Publikum eingebracht, um dem Schallpegelabfall zu den hinteren Plätzen hin entgegenzuwirken.

Die Simulation des mit diesen Adaptierungen versehenen Saals führte für fast alle Gütemaße zu Ergebnissen in den angestrebten Wertebereichen. Die Anfangsnachhallzeit  $EDT$  auf der Bühne konnte auch im Bassbereich unter  $T_{30}$  abgesenkt werden und die Pegeldifferenzen zwischen  $ST_{early}$  und  $ST_{late}$  in den verschiedenen Frequenzbändern wurden ausgeglichener. Lediglich das Seitenschallmaß  $LF$  konnte nicht verbessert werden und die Schalldruckpegelverteilung fiel - aufgrund der stark dämpfenden Oberflächen - etwas ungünstiger aus als in der Ausgangssituation.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden im nächsten Schritt die Anzahl, Position und Ausrichtung der Lautsprecher definiert, um das Publikum gleichmäßig mit ausreichend Schallenergie zu versorgen. Kleine Anpassungen an der Raumakustik wurden vorgenommen: an den Seitenwänden neben den Lautsprechern wurden Wandabsorber eingebracht und die Oberfläche des Reflektors wurde für hohe Frequenzen schallstreuend ausgeführt. Anhand der abschließend durchgeführten Simulation konnte festgestellt werden, dass eine gleichmäßige Schalldruckpegelverteilung mit ge-

ringer Standardabweichung ( $< 1$  dB) über alle Frequenzbänder hinweg erzielt wurde. Weiters wurde der *STI* sowohl gegenüber der Ausgangssituation als auch verglichen mit dem für unverstärkte Darbietung optimierten Raum erhöht.

Mit der gewählten Anwendung ist es nicht möglich, *LF* bei Einsatz mehrerer Schallquellen zu berechnen. Um für die Saalvariante mit raumakustischer Optimierung und Beschallungsanlage dennoch eine Einschätzung hinsichtlich dieses Kriteriums treffen zu können, wurde *LF* nach Formel 5.4 mit MATLAB auf Basis der simulierten Impulsantworten ermittelt. Eine mögliche Fortsetzung der bisher durchgeführten Untersuchungen wäre die Modellierung einer Delay Line und die rechnerische Überprüfung, inwiefern dies zur Verbesserung von *LF* beitragen kann.



# Literatur

- [1] L. Beranek, *Concert halls and opera houses : music, acoustics, and architecture*, eng, 2. ed.. 2004, ISBN: 9780387955247.
- [2] W. Fasold und E. Veres, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis : Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen*, ger, 1. Aufl. 1998, ISBN: 3345005492.
- [3] N. W. Adelman-Larsen, *Rock and pop venues : acoustic and architectural design*, eng, 2014, ISBN: 9783642452352.
- [4] L. Cremer, *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band I - Geometrische Raumakustik - Statistische Raumakustik - Psychologische Raumakustik* (Physik und Technik der Gegenwart : Abt. Akustik), ger. 1978.
- [5] „Website des KULTUR HOF LINZ.“ (<https://kultur-hof.at/>), Adresse: <https://kultur-hof.at/> (besucht am 04.10.2024).
- [6] C. Außerlechner und C. Rieder-Hillinger, „Entwurfsplanung Kulturhof Linz, Grundriss Erdgeschoß, 14.06.2024.“
- [7] W. Fasold, W. Kraak und W. Schirmer, *Taschenbuch Akustik. Teil 2*, ger, 1. Aufl. 1984.
- [8] ÖNORM B 8115-3 Schallschutz und Raumakustik im Hochbau. Teil 3: Raumakustik. Ausgabe 2023-07-01.
- [9] W. Ahnert, *Beschallungstechnik: Grundlagen und Praxis*, ger. 1993, ISBN: 3777604968.
- [10] W. Ahnert, A. Goertz und S. Weinzierl, „Beschallungstechnik, Beschallungsplanung und Simulation,“ ger, in *Handbuch der Audiotechnik*, Ser. VDI-Buch, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 491–549, ISBN: 9783540343004.
- [11] *CATT-Acoustic v8g. Room Acoustics Prediction and Walkthrough Auralization. User's Manual*, 2007.
- [12] L. Savioja und U. P. Svensson. „Overview of geometrical room acoustic modeling techniques.“ (10. Aug. 2015), Adresse: <https://doi.org/10.1121/1.4926438> (besucht am 27.09.2024).
- [13] B.-I. Dalenbäck. „Whitepaper: What is Geometrical Acoustics (GA)?“ (8. Aug. 2021), Adresse: [http://www.catt.se/What\\_is\\_Geometrical\\_Acoustics\\_Generic.pdf](http://www.catt.se/What_is_Geometrical_Acoustics_Generic.pdf) (besucht am 27.09.2024).
- [14] P. Maier und S. Weinzierl, „Studioakustik,“ ger, in *Handbuch der Audiotechnik*, Ser. VDI-Buch, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 267–311, ISBN: 9783540343004.
- [15] ÖNORM EN ISO 3382-1 Akustik — Messung von raumakustischen Parametern Teil 1: Aufführungsplätze. Ausgabe 2009-09-01.
- [16] W. Fasold, E. Sonntag und H. Winkler, Hrsg., *Bauphysikalische Entwurfslehre. Bau- und Raumakustik: mit 89 Tabellen / Wolfgang Fasold ; Ernst Sonntag ; Helgo Winkler*, ger, 1. Aufl.. 1987, ISBN: 348112421X.
- [17] ÖNORM EN 60268-16 Elektroakustische Geräte. Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex. Ausgabe 2004-02-01.
- [18] J. Meyer, *Acoustics and the performance of music: Manual for acousticians, audio engineers, musicians, architects and musical instrument makers*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [19] *CATT-A v9.1. User's Manual*, 2016.
- [20] *L-Acoustics X8 owner's manual (EN) version 2.0, Distribution date: October 29, 2024.*
- [21] S. Ziesemer, „High resolution soundfield analysis with directional room impulse responses,“ Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2020.



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Illustration der Übertragungswege von Schall zwischen Klangquelle und Empfänger*in in einem Raum, in Form von Direktschall und frühen Reflexionen, Quelle: [1] . . . . .	13
2.2	Schematische Darstellung eines Reflektogramms, Quelle: [2] . . . . .	14
3.1	Grundriss des Saals mit geplanter Bestuhlung, Quelle: Entwurfsplanung [6] . . .	15
6.1	Toleranzbereiche für die empfohlene Nachhallzeit für Musik (links) und Sprachdarbietung (rechts) nach ÖNORM B 8115-3 [8] . . . . .	25
6.2	Mittlere Nachhallzeit beurteilter Veranstaltungsorte geteilt durch das Raumvolumen aus [3] . . . . .	26
6.3	Regressionsgerade zu den bestbewerteten Veranstaltungsorten aus [3] . . . . .	26
6.4	Toleranzbereich für $T_{30}$ im vorliegenden Saal bei Mehrzwecknutzung für Musik und Sprache in unverstärkter und elektroakustisch verstärkter Darbietung . . . .	27
7.1	Quellen (rot) und Empfangspositionen (blau) im Modell. Quelle A0 (Musik) in rel. Höhe von 1,00 m - Quelle A5 (Sprache) in rel. Höhe von 1,50 m - Empfängergruppe 0 (01-06) in rel. Höhe von 1,20 m - Empfängergruppe 1 (10-13) in rel. Höhe von 1,00 m - Empfängergruppe 2 (20-21) in rel. Höhen von 1,20 m und 1,50 m . . . .	30
8.1	V0 - Nachhallzeit $T_{30}$ in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A0x01 bis A0x06 . . . . .	31
8.2	V0 - Nachhallzeit $T_{30}$ und Anfangsnachhallzeit $EDT$ in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A0x20 bis A0x22 . . . . .	32
8.3	V0 - Schalldruckpegelverteilung $SPL$ als A-bewerteter Summenpegel für A0, dargestellt als Farbraster im Publikumsbereich in 1,20 m Höhe über den Sitzreihen, im Raumentwurf ohne raumakustische Maßnahmen . . . . .	33
8.4	V0 - Deutlichkeitsmaß $C_{50}$ in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A0x01 bis A0x06 . . . . .	34
8.5	V0 - Seitenschallgrad $LF$ in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A0x01 bis A0x06 . . . . .	35
8.6	V0 - Sprachübertragungsindex $STI$ in Oktavbändern von 250 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A5x01 bis A5x06 . . . . .	36
8.7	V0 - Pegeldifferenzen von $ST_{early}$ und $ST_{late}$ in Oktavbändern von 250 Hz bis 2 kHz an den Empfangspositionen A0x10 bis A0x13 . . . . .	37
8.8	V1 - Nachhallzeit $T_{30}$ in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A0x01 bis A0x06, im Saal mit raumakustischen Maßnahmen . . . . .	39
8.9	V1 - Nachhallzeit $T_{30}$ und Anfangsnachhallzeit $EDT$ in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A0x20 bis A0x22, im Saal mit raumakustischen Maßnahmen . . . . .	40
8.10	V1 - Schalldruckpegelverteilung $SPL$ für A0, dargestellt als Farbraster im Publikumsbereich in 1,20 m Höhe über den Sitzreihen, im Saal mit raumakustischen Maßnahmen . . . . .	41
8.11	V1 - Deutlichkeitsmaß $C_{50}$ in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A0x01 bis A0x06, im Saal mit raumakustischen Maßnahmen . .	42
8.12	V1 - Seitenschallgrad $LF$ in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A0x01 bis A0x06, im Saal mit raumakustischen Maßnahmen . .	43
8.13	V1 - Sprachübertragungsindex $STI$ in Oktavbändern von 250 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen A5x01 bis A5x06, im Saal mit raumakustischen Maßnahmen	44

8.14	V1 - Pegeldifferenzen von $ST_{early}$ und $ST_{late}$ in Oktavbändern von 250 Hz bis 2 kHz an den Empfangspositionen A0x10 bis A0x13, im Saal mit raumakustischen Maßnahmen . . . . .	45
8.15	Isobarendiagramme des in der Simulation verwendeten Lautsprechers für die Querachse (oben) und Längsachse (unten) mit Linien gleichen Schalldrucks bei -3 dB, -6 dB und -12 dB, Quelle: [20] . . . . .	47
8.16	Position und Hauptabstrahlrichtungen der Lautsprecher (B0 - B2) im Veranstaltungssaal . . . . .	48
8.17	3D-Modell des Raumes: Perspektive (links) und Sicht von der Bühne in den Saal (rechts). Akustisch wirksame Materialien: Wand- und Deckenabsorber (gelb bzw. weinrot hinter dem Bühnenvorhang); Reflektor, schallstreuend für hohe Frequenzen (türkis) . . . . .	48
8.18	V2 - Schalldruckpegelverteilung $SPL$ für A0 + B0 + B1 + B2, dargestellt als Farbraster im Publikumsbereich in 1,20 m Höhe über den Sitzreihen, im raumakustisch optimierten Saal mit elektroakustischer Beschallung . . . . .	49
8.19	V2 - Deutlichkeitsmaß $C_{50}$ in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen *x01 bis *x06 (* = A0 + B0 + B1 + B2), im raumakustisch optimierten Saal mit elektroakustischer Beschallung . . . . .	50
8.20	V2 - Sprachübertragungsindex $STI$ in Oktavbändern von 250 Hz bis 8 kHz an den Empfangspositionen *x01 bis *x06 (* = A5 + B5 + B6 + B7), im raumakustisch optimierten Saal mit elektroakustischer Beschallung . . . . .	52
1	V2 - Schalldruckpegelverteilung $SPL$ für A0 + B0 + B1 + B2 in den Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz und als A-bewerteter Summenpegel, dargestellt als Farbraster im Publikumsbereich in 1,20 m Höhe über den Sitzreihen . . . . .	LXVII

# Tabellenverzeichnis

3.1	Raummaße des Veranstaltungssaals . . . . .	16
6.1	Zuordnung STI und Sprachverständlichkeit, Quelle: ÖNORM B 8115-3 [8] . . . . .	28
6.2	Angestrebte Wertebereiche für die Gütemaße im Veranstaltungssaal . . . . .	28
8.1	Vergleich des Seitenschallgrades $LF$ , A-bewerteter Mittelwert über alle Frequenzen, für die Hörpositionen 01 bis 06 und die Varianten V0 - Simulation mit CATT-Acoustic, V0 - Berechnung mit MATLAB und V2 - Berechnung mit MATLAB . . . . .	51
1	Frequenzabhängige Absorptions- und Diffusionskoeffizienten der Materialien im Modell für die Oktavbänder von 125 Hz bis 4 kHz mit Quellenangaben, TKH: Totale Konstruktionshöhe . . . . .	LXI



## Anhang

## 1 Absorptions- und Diffusionskoeffizienten

Frequenzabhängige Absorptionskoeffizienten $\alpha_s$ bzw. Streukoeffizienten ( <i>kursiv</i> )							Quelle
Frequenz in Hz	125	250	500	1000	2000	4000	
Boden beschichtet	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	Beton, glatt, gestrichen, ÖNORM B 8115-3:2023, Tab. A.3
Bühne	0,10	0,07	0,05	0,04	0,06	0,05	Kunststoff auf Hohlraum, ÖNORM B 8115-3:2023, Tab. A.
Fenster	0,20	0,15	0,10	0,05	0,03	0,02	Isolierglas, ÖNORM B 8115-3:2023, Tab. A.3
Holzoberfläche	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	Holz, glatt, ÖNORM B 8115-3:2023, Tab. A.3
Holztür	0,15	0,10	0,05	0,05	0,06	0,06	Holztür, ÖNORM B 8115-3:2023, Tab. A.3
Reflektor	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	Holz, glatt, ÖNORM B 8115-3:2023, Tab. A.3, Streukoeffizienten: Bluetone QRD N11
<i>Streuung</i>	<i>0,10</i>	<i>0,20</i>	<i>0,44</i>	<i>0,77</i>	<i>0,80</i>	<i>0,80</i>	
Publikum	0,17	0,34	0,46	0,51	0,62	0,62	80 %-Belegung Personen, sitzend auf ungepolsterter Bestuhlung, angepasst an Fläche, DIN 18041:2016, Tab. A.1
<i>Streuung</i>	<i>0,40</i>	<i>0,46</i>	<i>0,52</i>	<i>0,58</i>	<i>0,64</i>	<i>0,70</i>	
Textil	0,25	0,50	0,40	0,55	0,55	0,50	Lüftungsschlauch, Abschätzung für 300 mm Deckenabstand auf Basis Gerriets GERRA CS
<i>Streuung</i>	<i>0,10</i>	<i>0,10</i>	<i>0,10</i>	<i>0,40</i>	<i>0,50</i>	<i>0,60</i>	
Tribüne	0,11	0,08	0,07	0,06	0,06	0,06	Holz glatt auf Hohlraum. ÖNORM B 8115-3:2023, Tab. A.3
Vorhang refl.	0,03	0,15	0,25	0,30	0,30	0,45	Gerriets Clivia Echo, Abschätzung für 50 % Faltenzugabe, Wandabstand 100 mm, $\alpha_{125}$ = Holzoberfläche
<i>Streuung</i>	<i>0,10</i>	<i>0,10</i>	<i>0,10</i>	<i>0,40</i>	<i>0,50</i>	<i>0,60</i>	
Vorhang refl. WA	0,55	0,50	0,40	0,35	0,35	0,50	Gerriets Clivia Echo, Abschätzung für 50 % Faltenzugabe, Wandabstand 100 mm, vor Trikustik Mikroform L1, TKH 116 mm, 100 mm Hinterfüllung
<i>Streuung</i>	<i>0,10</i>	<i>0,10</i>	<i>0,10</i>	<i>0,40</i>	<i>0,50</i>	<i>0,60</i>	
Wand-/Deckenabsorber	0,50	0,40	0,25	0,15	0,10	0,05	Triakustik Mikroform L1, TKH 200 mm, Hinterfüllung 180 mm
Wandabsorber LS	0,55	0,45	0,25	0,15	0,10	0,10	Triakustik Mikroform L1, TKH 116 mm, Hinterfüllung 100 mm

Tabelle 1: Frequenzabhängige Absorptions- und Diffusionskoeffizienten der Materialien im Modell für die Oktavbänder von 125 Hz bis 4 kHz mit Quellenangaben, TKH: Totale Konstruktionshöhe

## 2 Definition der Quellen

;Converted from SRC.LOC for TUCT2 use.  
;Natural sources are fully converted

```
SOURCE A0 ;Musik (zur Bestimmung von ST: 4 m Abstand zu Wänden. Höhe: 1 m auf Bühne)
DIRECTIVITY = "OMNI.SD0"
POS = 0,000 4,000 1,800
AIMPOS = 0,000 12,000 1,800
Lp1m_a = Lp_pink 90
[COHERENT] ;Befehl nur für el.ak. Simulation
END
```

```
Source A5 ;Sprache (zur Bestimmung von STI. Höhe: 1,5m auf Bühne)
DIRECTIVITY = "OMNI.SD0"
POS = 0,000 4,000 2,300
AIMPOS = 0,000 12,000 1,200
Lp1m_a = Lp_voice_IECfemale 60
[COHERENT] ;Befehl nur für el.ak. Simulation
END
```

```
Source B0 ;LS links Musik
DIRECTIVITY = "L-Acoustics-X8.CBA"
POS = -3,800 5,000 3,600
AIMPOS = -1,5 15 1,5
Lp1m_a = Lp_pink 90
MICSSENSITIVITY = 0
GAIN = <0 0 0 0 0 0>
DELAY = 0
END
```

```
Source B1 ;LS rechts Musik
DIRECTIVITY = "L-Acoustics-X8.CBA"
POS = 3,800 5,000 3,600
AIMPOS = 1,5 15 1,5
Lp1m_a = Lp_pink 90
MICSSENSITIVITY = 0
GAIN = <0 0 0 0 0 0>
DELAY = 0
END
```

```
Source B2 ;frontfill Musik
DIRECTIVITY = "L-Acoustics-X8.CBA"
POS = 0,000 4,800 1,0500
AIMANGLES = 0 -5
Lp1m_a = Lp_pink 90
MICSSENSITIVITY = 0
GAIN = <-6 -6 -6 -6 -6 -6>
DELAY = 0
END
```

Source B5 ;LS links Sprache  
DIRECTIVITY = "L-Acoustics-X8.CBA"  
POS = -3,800 5,000 3,600  
AIMPOS = -1,5 15 1,5  
Lp1m\_a = Lp\_voice\_IECfemale 60  
MICSSENSITIVITY = 0  
GAIN = <3 3 3 3 3 3>  
DELAY = 0  
END

Source B6 ;LS rechts Sprache  
DIRECTIVITY = "L-Acoustics-X8.CBA"  
POS = 3,800 5,000 3,600  
AIMPOS = 1,5 15 1,5  
Lp1m\_a = Lp\_voice\_IECfemale 60  
MICSSENSITIVITY = 0  
GAIN = <3 3 3 3 3 3>  
DELAY = 0  
END

Source B7 ;frontfill Sprache  
DIRECTIVITY = "L-Acoustics-X8.CBA"  
POS = 0,000 4,800 1,0500  
AIMANGLES = 0 -5  
Lp1m\_a = Lp\_voice\_IECfemale 60  
MICSSENSITIVITY = 0  
GAIN = <-3 -3 -3 -3 -3 -3>  
DELAY = 0  
END

### 3 Definition der Empfangspositionen

;PROJECT=KHL

;links: x-Achse neg, rechts: x-Achse pos

RECEIVERS

;PUBLIKUM

1 2.60 8.00 1.2

2 0.00 9.50 1.2

3 -2.00 12.00 1.2

4 1.60 13.00 lock(173 174 175)

5 0.00 15.00 lock(173 174 175)

6 -3.00 16.00 lock(173 174 175)

;BÜHNE

;recwalk() erstellt Empfänger #10-13 in kreisförmiger Anordnung um Quelle zur Messung von ST

recwalk(10, 0.0, 4.0, 60, 1.0, -1.5, 2.5, 1.5, 4.0, 1.8)

;Sitz- und Stehpositionen für andere Kriterien auf der Bühne

20 0.00 1.20 2.00

21 -2.00 3.50 2.30

22 3.00 2.50 2.30

## 4 MATLAB-Code zur Berechnung von $LF$ für mehrere Quellen

```

% THIS CODE WAS PARTLY ADOPTED FROM THE WORK OF STEFAN ZIESEMER FOR HIS MASTER'S THESIS
% "High resolution soundfield analysis with directional room impulse responses" (2020)
%
% -----
%
% prep: export binaural IRs for sum of sources from CATT-A/TUCT as .wav
%
% -----
%
% save file names of IRs in struct arrays, omni and lateral separately:

w_files = dir('KHL_V3_W'); % from omni IR folder
y_files = dir('KHL_V3_Y'); % from lateral IR folder (CATT: y=lateral)

w_files = w_files(3:end); % remove fields 1+2 from struct bc isdir
y_files = y_files(3:end);

fs = 44100; % see audioinfo('IR.wav')
t0 = 1;
t5 = floor(5e-3 * fs); % 5 ms = 220.5 samples (@ 44.1 kHz)
t80 = 80e-3 * fs; % 80 ms

threshold = 0.01; % for detection of initial sound
len = length(w_files);
lf_rec = zeros(len,1);

for item = 1:len
    [w,~] = audioread(w_files(item).name);
    [y,~] = audioread(y_files(item).name);

    % remove time before initial sound:
    ir_n = w.^2;
    ir_n_max = max(ir_n);
    start = find(ir_n >= threshold*ir_n_max,1);
    n = length(w);
    w = w(start:n-1);
    y = y(start:n-1);

    W_y = sum(y(t5:t80-1).^2);
    W_w = sum(w(t0:t80-1).^2);

    LF = W_y./W_w;
    lf_rec(item) = LF;
end

```



## 5 V2: Frequenzabhängige Schalldruckpegelverteilung *SPL*

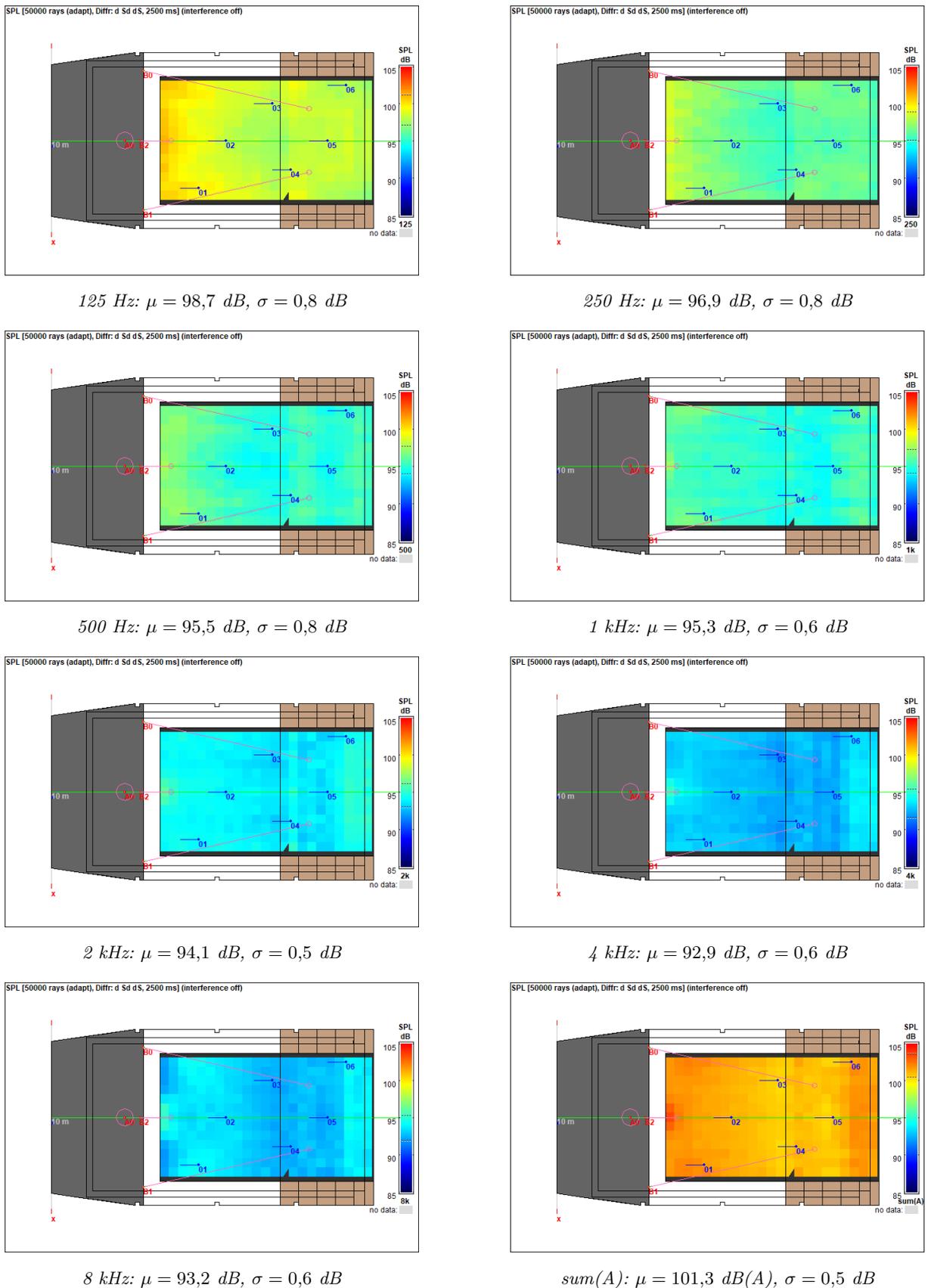


Abbildung 1: V2 - Schalldruckpegelverteilung *SPL* für  $A_0 + B_0 + B_1 + B_2$  in den Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz und als A-bewerteter Summenpegel, dargestellt als Farbraster im Publikumsbereich in 1,20 m Höhe über den Sitzreihen

