
Bachelorarbeit

Herr
Augustin Hellmut Standke

**Vergleich von
Orchestergräben anhand der
objektiven Bühnenparameter
nach Gade und subjektive
Bewertung der Güte anhand
von Nutzerbefragung**

Mittweida, 2023

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen	2
2.1 <i>Vorangegangene Untersuchungen von Orchestergräben und Bühnen.....</i>	<i>2</i>
2.2 <i>Bühnenparameter nach Gade</i>	<i>3</i>
2.2.1 ST _{early}	3
2.2.2 ST _{late}	4
2.2.3 Early Ensemble Level.....	4
2.3 <i>Die Early Decay Time.....</i>	<i>5</i>
2.4 <i>Programmierung eines Auswertungsprogrammes in Python</i>	<i>5</i>
2.4.1 Python als Programmiersprache	5
2.4.2 Funktionsweise des Auswertungsprogramms.....	5
2.5 <i>Befragung von Musikern mittels eines Fragebogens</i>	<i>7</i>
2.6 <i>Korrelation.....</i>	<i>8</i>
3 Messungen	11
3.1 <i>Messtechnik</i>	<i>11</i>
3.2 <i>Messaufbau.....</i>	<i>11</i>
3.3 <i>Gräben</i>	<i>13</i>
3.3.1 Graben 1	13
3.3.2 Graben 2	13
3.3.3 Graben 3	14
3.3.4 Graben 4	15
3.4 <i>Bühnen.....</i>	<i>16</i>
3.4.1 Bühne 1.....	16
3.4.2 Bühne 2.....	16
3.4.3 Bühne 3.....	17

BACHELORARBEIT

Vergleich von Orchestergräben anhand der objektiven Bühnenparameter nach Gade und subjektive Bewertung der Güte anhand von Nutzerbefragung

Autor:
Herr

Augustin Hellmut Standke

Studiengang:
Media and Acoustical Engineering

Seminargruppe:
MG19wC-B

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

Zweitprüfer:
Dr.-Ing. Hans-Jörg Ederer

Einreichung:
Mittweida, 07.05.2023

Verteidigung/Bewertung:
Mittweida, 2023

3.5	<i>Probenräume</i>	18
3.5.1	Probenraum 1	18
3.5.2	Probenraum 2	19
3.5.3	Probenraum 3	20
4	Auswertung	22
4.1	ST_{early}	22
4.2	ST_{late}	25
4.3	<i>Early Ensemble Level</i>	29
4.4	<i>Ergebnisse der Fragebögen</i>	31
4.5	<i>Korrelationen der Bühnenmaße mit Ergebnissen der Fragebögen</i>	37
4.6	<i>Korrelation mit weiteren Parametern</i>	40
4.7	<i>Effektivität von Bühnenparametern und Orchesterbefragungen</i>	43
4.8	<i>Erkenntnisse und mögliche weitere Schritte</i>	44
5	Fazit	46
	Danksagung	47
	Literaturverzeichnis	48
	Anlagen	I
	<i>Anlage 1, Bühnenmaße nach Gade</i>	<i>II</i>
	<i>Anlage 2, Korrelationsmatrix</i>	<i>X</i>
	<i>Anlage 3, Fragebogen</i>	<i>XI</i>
	Selbstständigkeitserklärung	XII

Faculty Media

BACHELOR THESIS

Comparison of orchestra pits utilizing objective stage parameters by Gade and subjective judgement via user surveys

author:

Mr.

Augustin Hellmut Standke

course of studies:

Media and Acoustical Engineering

seminar group:

MG19wC-B

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

second examiner:

Dr.-Ing Hans-Jörg Ederer

submission:

Mittweida, 07.05.2023

defence/ evaluation:

Mittweida, 2023

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messung von 30° Schritten in 1 m Entfernung	12
Abbildung 2: Messung der Quelle an den anderen Quellpositionen und beim Dirigenten	12
Abbildung 3: Messpositionen in Graben 1	13
Abbildung 4: Messpositionen in Graben 2	14
Abbildung 5: Messpositionen in Graben 3	15
Abbildung 6: Messpositionen in Graben 4	15
Abbildung 7: Messpositionen auf Bühne 1	16
Abbildung 8: Messpositionen auf Bühne 2.....	17
Abbildung 9: Messpositionen auf Bühne 3.....	18
Abbildung 10: Messpositionen in Probenraum 1.....	19
Abbildung 11: Deckenabwicklung von Probenraum 2.....	19
Abbildung 12: Messpositionen in Probenraum 2.....	20
Abbildung 13: Messpositionen in Probenraum 3.....	21
Abbildung 14: Mittlerer ST_{early} der Orchesterspielstätten mit jeweiliger Standardabweichung	23
Abbildung 15: Mittlerer ST_{late} der Orchesterspielstätten mit jeweiliger Standardabweichung	26
Abbildung 16: Mittleres EEL der Orchesterspielstätten mit jeweiliger Standardabweichung	30
Abbildung 17: OAI in der jeweiligen Orchesterspielstätten.....	32
Abbildung 18: Hören des eigenen Instruments in der jeweiligen Orchesterspielstätte	33

Bibliografische Beschreibung:

Standke, Augustin Hellmut:

Vergleich von Orchestergräben anhand der objektiven Bühnenparameter nach Gade und subjektive Bewertung der Güte anhand von Nutzerbefragung. - 2023. - <5>, <11>, <59> S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2023

Referat:

Die Bühnenparameter ST_{early} und ST_{late} sind in der DIN EN ISO 3382-1 beschrieben. Für ihre Ergebnisse wurde ein üblicher Wertebereich festgelegt. Dieser Bereich sagt jedoch nicht aus, ob ein hoher oder niedriger Wert der jeweiligen Bühnenparameter anzustreben ist. Diese Arbeit versucht durch einen Vergleich mehrerer Orchesterspielstätten anhand der Bühnenparameter und mehrerer Orchesterbefragungen eine Abhängigkeit des Höreindrucks der Musiker von den Bühnenparametern festzustellen. Dazu wurden drei Bühnen, vier Orchestergräben und drei Probenräume akustisch vermessen. Zu 9 der 10 Spielstätten konnte eine Orchesterbefragung durchgeführt werden. In der Auswertung wurden zunächst die Spielstätten bezüglich ihrer Bühnenparameter und der Antworten auf die Fragebögen verglichen. Um die Bühnenparameter und Fragebögen in Relation zueinander zu setzen, wurde eine Korrelation der Mittelwerte und Standardabweichungen der Bühnenparameter mit den Mittel- und Medianwerten der Fragebogenantworten durchgeführt. Dabei konnte keine Erkenntnis gebende Korrelation mit den Mittelwerten und Medianen der Orchesterbefragung nachgewiesen werden. Parallel dazu wurden die Bühnenmaße und Antworten der Fragebögen mit dem Volumen und der EDT korreliert. Es konnten moderate bis hohe Korrelationen vor allem mit Teilen der Orchesterbefragung sowie dem ST_{early} erzielt werden.

Abbildung 19: Hören der anderen Instrumente in der jeweiligen Orchesterspielstätte	34
Abbildung 20: Empfundene Halligkeit in der jeweiligen Orchesterspielstätte	35
Abbildung 21: Empfundene Lautstärke in der jeweiligen Orchesterspielstätte	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Korrelationsgrenzen nach Jacob Cohen 1988	9
Tabelle 2: Änderung der 80% Grenzen des Korrelationskoeffizienten für steigende Stichprobengrößen.....	9
Tabelle 3: Grenzen zur Festlegung der Korrelation für die Arbeitsspezifische Stichprobengröße.....	10
Tabelle 4: Anzahl der Antworten je Orchesterspielstätte	32
Tabelle 5: Legende für die Farbcodierung der Ergebnisse nach Korrelationsgrad.....	37
Tabelle 6: Korrelation des ST_{early} und dessen Standardabweichung mit den Antworten auf den Fragebogen.....	38
Tabelle 7: Korrelation des ST_{early} mit den Antworten der Fragebögen für Graben 1	38
Tabelle 8: Korrelation des ST_{late} und dessen Standardabweichung mit den Antworten auf den Fragebogen.....	38
Tabelle 9: Korrelation des ST_{late} mit den Antworten der Fragebögen für Graben 1	39
Tabelle 10: Korrelation des EEL und dessen Standardabweichung mit den Antworten auf den Fragebogen.....	39
Tabelle 11: Korrelation der mittleren Bühnenmaße und deren Standardabweichung mit dem Median der Musikerantworten	40
Tabelle 12: Korrelation der Bühnenmaße mit raumbeschreibenden Parametern.....	41
Tabelle 13: Korrelation der Musikerantworten mit raumbeschreibenden Parametern	42
Tabelle 14: Korrelation zwischen s EEL und s ST_{late}	43

Abkürzungsverzeichnis

EDT	Early Decay Time in s
ST_{early}	Early Support in dB
ST_{late}	Late Support in dB
EEL	Early Ensemble Level in dB
OAI	Overall Acoustical Impression
DIR	Direktschall
E_e	Energie der Impulsantwort in 1 m Entfernung
E_r	Energie der Impulsantwort an einer anderen Mikrofonposition
s	Standardabweichung einer Stichprobe

1 Einleitung

In der Raumakustik sind bereits verschiedene Maße definiert, die die akustischen Eigenschaften von Konzertsälen aus der Sicht des Zuhörers beschreiben. Diese Maße wurden durch unzählige Messungen und Auswertungen verifiziert und sind deshalb weltweit etabliert. Nachdem sich schon zuvor Barron und Marshall mit dem Höreindruck von Musikern beschäftigt hatten, stellte A. C. Gade 1988 im Rahmen seiner Promotion das erste Mal die von ihm entwickelten Bühnenparameter vor. Diese sollen mittels eines Pegels, das Hören des eigenen Instruments, die empfundene Halligkeit und das Hören anderer abbilden. Zwei dieser Parameter wiesen in Gades Versuchen eine hohe Korrelation mit dem Empfinden der Probanden auf. Jedoch wurde nach mehreren Versuchen Dritter bis heute keine Wertung für diese Parameter festgelegt. In der DIN EN ISO 3382-1 (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009) ist bis heute nur ein üblicher Bereich für beide korrelierenden Parameter angegeben. Dieser ermöglicht es jedoch nur eine Plausibilitätsprüfung durchzuführen. Er gibt keine Auskunft über die Güte der Orchesterspielstätten.

An diesem Punkt soll folgende Arbeit ansetzen. Das Ziel dieser Arbeit ist es eine Bewertungsrichtlinie für die Bühnenmaße nach Gade zu finden. In Kooperation mit dem Akustik Bureau Dresden werden mehrere Orchesterspielstätten anhand der objektiven Bühnenparameter untersucht und deren jeweilige Orchester bezüglich ihres subjektiven Höreindrucks befragt. Daraufhin wird untersucht, ob eine Abhängigkeit zwischen den Bühnenparametern und den Orchesterantworten besteht. Eine solche Abhängigkeit würde es möglich machen die untersuchten Spielstätten anhand ihrer gemessenen Bühnenparameter miteinander zu vergleichen und zu bewerten, da jedem gemessenen Wert eine subjektive Musikermeinung zugeordnet werden kann. Die Ergebnisse der beschriebenen Untersuchungen werden im Folgenden beschrieben.

2 Grundlagen

In folgendem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen dieser Arbeit beschrieben. Dabei wird auf die Geschichte der Bühnenakustik, der Bühnenparameter, deren Berechnung, die Erstellung eines Berechnungsprogrammes in Python und die Erarbeitung eines Fragebogens eingegangen. Es wird ebenfalls die EDT beschrieben, da sie als Korrelationsparameter gewählt wurde.

2.1 Vorangegangene Untersuchungen von Orchestergräben und Bühnen

In der Konzerthallenakustik liegt der Fokus auf dem Höreindruck im Publikumsbereich, zu welchem viele Veröffentlichungen und Erkenntnisse existieren. Doch für ein gutes Konzert muss auch die Akustik im Orchestergraben oder auf der Bühne stimmig sein, damit das Spiel der Musiker miteinander harmoniert. Mit dieser Thematik haben sich schon vor A. C. Gade (Kapitel 2.2) die Akustiker Marshall und Barron befasst. Marshall untersuchte 1978 experimentell die Einfachheit des Zusammenspiels eines Streichertrios. Dazu setzte er jeweils einen Musiker in einen reflexionsarmen Raum, welcher dann mit einer Aufnahme der anderen Musiker ein Lied spielen sollte. Der Aufnahme waren durch den Einsatz von Verzögerung, Pegelveränderung und Änderung des Spektrums künstliche Erstreflexionen beigefügt, welche durch die genannten Parameter angepasst werden konnten, (Gade, *Acoustics for Symphony Orchestras; Status After Three*, 2011). Barron stellte im Gegensatz dazu im Konzerthaus Gulbenkian praktische Untersuchungen an. Das Gulbenkian zeichnet sich durch eine variable Bühne aus, welche es Barron ermöglichte, mit einer kleinen Gruppe von Musikern verschiedene Bühnenzustände zu erproben und akustisch zu vermessen. Die Musikergruppe setzte sich aus Blasinstrumenten und Streichern zusammen. Für jeden Zustand mussten sie und 6 Zuhörer im Publikumsbereich einen Fragebogen zu ihren akustischen Eindrücken beantworten, (Barron, 1978). Die Veröffentlichungen von Barron und Marshall fanden beide Hinweise darauf, dass sich frühe Reflexionen positiv auf das akustische Empfinden der Musiker auswirken. Marshall fand bei seinen experimentellen Versuchen ebenfalls heraus, wie die Zeitgrenzen für spielverbessernde Erstreflexionen liegen und deren Lautstärke gepegelt sein müssen. Diese Erkenntnisse, vor allem die von Marshall, bildeten die Grundlage für Gades Erarbeitung der Bühnenparameter, welche heutzutage Teil der DIN EN ISO 3382-1 sind.

2.2 Bühnenparameter nach Gade

Die objektiven Bühnenparameter nach Gade setzen sich zusammen aus dem Early Support (ST_{early}), dem Late Support (ST_{late}) und dem Early Ensemble Level (EEL). Bei allen drei Parametern handelt es sich um Pegel, die aus einem Energieverhältnis einer Impulsantwort gebildet werden. Sie unterscheiden sich darin voneinander, dass die Integrationsgrenzen für die Berechnung der Energien verschieden angesetzt sind und im Falle des Early Ensemble Levels Impulsantworten aus verschiedenen Entfernungen in die Berechnung einbezogen werden.

Die objektiven Bühnenparameter wurden 1988 in einer Veröffentlichung von A. C. Gade als Support (ST), bestehend aus ST1, ST2 und Early Ensemble Level (EEL) beschrieben. In ihrer späteren Form wurden ST1 und ST2 als ST_{early} und ST_{late} in die DIN EN ISO 3382-1 (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009) übernommen. Die DIN EN ISO 3382-1 legt die Rahmenbedingungen für Aufführungsräume fest und geht in Anhang C auf die dafür zu ermittelnden Bühnenparameter ein. Das EEL wird dabei nicht aufgeführt, da es von Gade, nach einer fehlenden Korrelation mit dem subjektiven Empfinden der Musiker, zurückgezogen wurde. Grund für die fehlende Korrelation sind Unterschiede in der Abstrahlcharakteristik von Orchesterinstrumenten und der für die Impulsantworten benutzten Kugelquelle. Die Kugelquelle regt durch ihre allseitig homogene Abstrahlung Reflexionswege an, welche von einem Instrument durch seine Abstrahlcharakteristik nur schwächer bedient würden. Die Folge dessen sind dominante Schallwege, die sich nicht mit den subjektiven Empfindungen des Orchesters decken. Zudem kommt es durch die Messung ohne Orchester zu fehlenden Abschattungen seitens der Musiker und ihrer Instrumente. Weiterhin ist auch keine Nachbildung der Balance zwischen den Pegeln der Instrumentengruppen gegeben, da die Kugelquelle für eine belastbare Messung immer die gleiche Schallleistung aufweisen sollte. Dessen ungeachtet soll das EEL in dieser Arbeit dennoch untersucht werden. Der Grund dafür ist eine fehlende Alternative, um das gegenseitige Hören der Musiker abzubilden. Ein vergleichbares Verfahren zum EEL ist ein Messverfahren von Naylor, welches in (Gade, Acoustics for Symphony Orchestras; Status After Three, 2011) beschrieben wird und Pegelverhältnisse zwischen Sendeposition (OTHER) und Empfangsposition (SELF) betrachtet. Die genaue Umsetzung des Verfahrens ist jedoch nicht frei zugänglich und wurde nie in weiteren Publikationen erprobt.

2.2.1 ST_{early}

$$ST_{\text{early}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{E_e(20 - 100 \text{ ms})}{E_e(DIR)} \right) \quad (1)$$

Der ST_{early} betrachtet einen Pegel, der aus dem Verhältnis von Erstreflexionen zum Direkt-schall (DIR) gebildet wird. Das Verhältnis wird dabei aus einer in 1 m von der Schallquelle entfernt gemessenen Impulsantwort (E_e) berechnet. Dieser Pegel gibt nach (Gade, Acoustics for Symphony Orchestras; Status After Three, 2011) Auskunft über das Maß an

Selbstwahrnehmung bzw. das Gefühl im eigenen Spiel unterstützt zu sein. Nach DIN EN ISO 3382-1 (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009) ist der übliche Bereich für den ST_{early} zwischen -24 dB und -8 dB anzusetzen. In den initialen Laborversuchen Gades (Gade, Investigations of Musicians' Room Acoustic Conditions in Concert Halls. Part I: Methods and Laboratory Experiments, 1989), welche zur Erstellung und Überprüfung der Bühnenparameter dienten, stellte er bereits fest, dass für verschiedene Instrumentengruppen verschiedene Pegelbereichsgrenzen angesetzt werden müssen. In späteren Veröffentlichungen beschreibt er, dass der untere Grenzwert des ST_{early} für Flötenspieler bei -15 dB liegt. Streicher hingegen empfinden seinen Befragungen nach ein ST_{early} von über -9 dB als unangenehm. Beim Ansetzen dieser Grenzwerte sollte jedoch beachtet werden, dass diese in einem künstlichen Schallfeld unter Laborbedingungen gemessen wurden und somit signifikant von der Praxis abweichen könnten.

2.2.2 ST_{late}

$$ST_{\text{late}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{E_e(100 - 1000 \text{ ms})}{E_e(DIR)} \right) \quad (2)$$

Der ST_{late} betrachtet einen Pegel, der aus dem Verhältnis von Spätreflexionen zum Direktschall gebildet wird. Er bildet die wahrgenommene Halligkeit ab und gibt somit Auskunft über späte Unterstützung des eigenen Spiels, welche durch den Raum und dessen Reflexionen mit langer Laufzeit entsteht. Nach DIN EN ISO 3382-1 (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009) ist der übliche Bereich für den ST_{late} zwischen -24 dB und -10 dB anzusetzen.

2.2.3 Early Ensemble Level

$$EEL = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{E_r(0 - 80 \text{ ms})}{E_e(DIR)} \right) \quad (3)$$

Das EEL bildet einen Pegel, welcher aus dem Verhältnis zwischen dem Direktschall in 1 m Entfernung von der Quelle ($E_e(DIR)$) und den Erstreflexionen, welche an einer zweiten Mikrofonposition auf der Bühne (E_r) gemessen werden (Dammerud, 2006). Es bildet das gegenseitige Hören der Musiker ab, wurde jedoch wie in Kapitel 2.2 beschrieben von Gade zurückgezogen. In einer Matrixanordnung der Werte gibt das EEL Auskunft über Störungen in der Schallleitung zwischen einzelnen Plätzen.

2.3 Die Early Decay Time

Da die Early Decay Time, kurz EDT, ebenfalls Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen ist, soll sie in diesem Abschnitt kurz erklärt werden.

Die EDT ist eine Sonderform der Nachhallzeit. Die Nahhallzeit gibt an, wie lange ein Impuls in einem Raum braucht, um 60 dB in seinem Pegel zu sinken. Sie wird als RT60 bezeichnet. Da ein Signalrauschabstand, der größer als 60 dB ist in der Realität nur schwer erzeugt werden kann, gibt es Abwandlungen der herkömmlichen Nachhallzeit, welche das Abklingverhalten von 60 dB approximieren. Eine solche Abwandlung stellt die EDT dar. Sie betrachtet die Zeit, die ein Impuls braucht, um 10 dB zu sinken und multipliziert diese mit 6. Die dadurch entstehende EDT weicht meistens von der RT60 ab und soll deshalb laut DIN EN ISO 3382-1 (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009) zusätzlich zur RT60 ausgewertet werden. Die Norm beschreibt sie als „subjektiv bedeutsamer“ und „mit der Nachhallzeit Empfindung zusammen“ hängend. Diese Definition macht sie für die Untersuchung der Orchesterspielstätten bezüglich der Bühnenparameter nach Gade geeigneter als die RT60.

2.4 Programmierung eines Auswertungsprogrammes in Python

Um die für die Orchesterspielstätten gemessenen Impulsantworten auszuwerten, wurde ein Auswertungsprogramm in Python programmiert. In diesem Kapitel soll auf die Programmiersprache und Funktionsweise des Programms eingegangen werden.

2.4.1 Python als Programmiersprache

1991 von Guido van Rossum als Nachfolger der Programmiersprache ABC entwickelt, handelt es sich bei Python um eine interpretierte, höhere Programmiersprache. Python zeichnet sich durch gute Lesbarkeit und eine reduzierte Programmierweise aus. Durch eine Open-Source Lizenzierung ist die Sprache weit verbreitet und verfügt über eine große Anzahl an Erweiterungspaketen. Python Anwendungen können plattformunabhängig ausgeführt werden, da es eine Python Distribution für Windows, macOS und Unix-basierte Betriebssysteme gibt. Die genannten Eigenschaften, eine flexible Programmierweise und bessere Performance im Vergleich zu Octave haben den Autor davon überzeugt, Python für das Auswerteprogramm zu wählen.

2.4.2 Funktionsweise des Auswertungsprogramms

Das Auswertungsprogramm mit dem Namen „ABD-OrAnG.exe“ wurde Objekt orientiert programmiert. Das heißt, dass es in Klassen und Funktionen unterteilt wurde, welche Subroutinen des Programms ausführen. Die Klassen und Funktionen werden dabei von einer

Hauptklasse und einer Hauptfunktion gesteuert. Die Hauptklasse namens „OrAnG()“ ist für die Benutzeroberfläche und das Auslösen der ihr zugehörigen Klassen und Funktionen zuständig. Sie löst Methoden zum Laden der Impulsantworten aus und startet über eine Methode die Hauptfunktion „Control()“. Die Funktion „Control()“ startet eine Subroutine, welche die zuvor in der Benutzeroberfläche ausgewählten Impulsantworten in 1 m Entfernung an die Klasse „Source()“ weitergibt. Diese Klasse berechnet über ihre Methode „CalculateSource()“ die Ankunftszeit, sowie frequenzabhängig die Energie des Direktschalls, der frühen Reflexionen und der späten Reflexionen. Die berechneten Werte werden dann zurück an „Control()“ gegeben und dort in einem Array zusammen mit impulsantwortspezifischen Metadaten abgelegt. Daraufhin werden in „Control()“ die berechneten Energien und bestimmten Ankunftszeiten über einen Algorithmus sortiert und gemittelt. Danach startet „Control()“ eine Subroutine, welche die zuvor in der Benutzeroberfläche ausgewählten Impulsantworten der Empfangspositionen an die Klasse „Receiver()“ weitergibt. Deren Methode „CalculateReceiver()“ berechnet dann frequenzabhängig die Energie der an den Empfangspositionen bestimmten Impulsantworten für ein Zeitfenster von 80ms ab der gemittelten Ankunftszeit der in 1 m Abstand gemessenen Impulsantworten. Die berechneten Werte werden dann an die Steuerfunktion „Control()“ übergeben, welche sie in einem Array abspeichert.

Nun sind alle benötigten Energien für die Berechnung der Bühnenparameter vorhanden. „Control()“ übergibt die Namen der Impulsantworten und die gefilterten Energien der Quelle und der Empfänger an die Klasse „StageParametersDataset()“, welche dann für jeden Bühnenparameter die jeweilige Funktion aufruft.

Als Erstes wird das Early Ensemble berechnet. Dabei wird zuerst für jedes benötigte Frequenzband das EEL aus dem Verhältnis zwischen Energie an der Empfängerposition und Energie des Direktschalls an der Quelle berechnet. Der Einzahlwert kann darauf über den gesamten Frequenzbereich gemittelt und in einem Speicherarray abgelegt werden. Die Methode „CalculateEEL()“ führt die vorher beschriebene Prozedur für jede Sender Empfänger Kombination durch.

Es folgt die Berechnung des ST_{early} mit der Methode „CalculateSTearly()“. Diese berechnet für jedes Frequenzband den ST_{early} aus dem Verhältnis der Energie der frühen Reflexionen zu der Energie des Direktschalls. Darauf mittelt die Prozedur über die berechneten Pegel und speichert den Einzahlwert mit dazugehörigem Namen zur Identifikation ab. Die Berechnung des ST_{late} folgt dem gleichen Prinzip. Jedoch setzt die Methode „CalculateSTlate()“ im Gegensatz zu „CalculateSTearly()“ die Energie der späten Reflexionen mit der Energie des Direktschalls ins Verhältnis.

Die berechneten Bühnenparameter werden an die Steuerfunktion „Control()“ zurückgegeben und von ihr in einem Outputarray gespeichert. Das Outputarray wird an die Hauptklasse „OrAnG()“ überreicht, welche den Nutzer dazu auffordert, einen Speicherort für die Ergebnisse der Berechnung auszuwählen. Hat sich der Nutzer für einen Speicherort entschieden, schreibt das Programm die Ergebnisse in eine Textdatei, welche im .csv-Stil

formatiert ist, sodass der Inhalt in Excel ohne Probleme durch Kopieren eingefügt werden kann. Der Nutzer kann nun die Darstellung der berechneten Werte durch zum Beispiel bedingte Formatierung anpassen.

2.5 Befragung von Musikern mittels eines Fragebogens

Um Aufschluss über die Aussagekraft der objektiven Bühnenparameter zu gewinnen, wurden zu jeder gemessenen Spielstätte die jeweiligen Orchestermusiker befragt. Dabei soll die Korrelation der objektiven akustischen Bühnenparameter mit den Antworten der Musiker untersucht werden. Dafür wurde ein Fragebogen entwickelt (siehe Anlage 3), der bestimmte Kriterien erfüllen sollte. Dieser Fragebogen ist von einem vorhergehenden Projekt der Hochschule Mittweida inspiriert (Standke, et al., 2022).

Das erste Kriterium war die räumliche Zuordenbarkeit. Dafür wurde eine Freitextfrage über das vom Musiker gespielte Instrument gestellt. Somit ist nach Erhalt eines Plans der Orchesteraufstellung jeder Fragebogen einer ungefähren Stelle und dadurch auch einer Messposition zuordenbar. Zudem sind die Selbstwahrnehmung und Wahrnehmung anderer Instrumente vom eigenen Instrument abhängig. Ein Trompetenspieler hört zum Beispiel durch die eigene hohe Lautstärke leisere Instrumente wie Flöten schlechter. Diesen Faktor kann man dann in die Auswertung und Interpretation einzelner Fragebögen einbeziehen.

Beim zweiten Kriterium handelt es sich darum, dass Fragen zu wählen sind, welche mit den objektiven akustischen Bühnenparametern und deren Beschreibung einhergehen. Das bedeutet, die Antworten auf die gestellten Fragen sollen möglichst das abbilden, was die Bühnenparameter laut Definition beschreiben. Da eine hohe Lautstärke zu guter Hörbarkeit anderer Instrumente, jedoch auch zu akustischem Unbehagen führt, wird zusätzlich eine Frage zu dieser gestellt. Die Antwort auf diese Frage hilft beim Nachvollziehen von fehlender Korrelation zwischen Antworten und Messwerten.

Das dritte Kriterium ist die Auswertbarkeit der Antworten. Dabei wurde für die Korrelationsrelevanten Fragen als Antwort eine lineare Skala mit den Werten 1 bis 5 gewählt. Wobei diese Skala entweder sehr schlecht bis sehr gut oder beide Enden eines Spektrums wie trocken und hallig beschreibt. Diese Skala ermöglicht es relativ einfach über den Mittelwert die Antworten der Musiker mit den Werten der objektiven akustischen Bühnenparameter zu korrelieren. Weiterhin wurden auch einige Fragen mit Freitext Antwort gewählt. Diese dienen dazu, im Einzelnen die Antworten auf die Fragen mit linearer Skala nachvollziehen und interpretieren zu können.

Der Umfang und die Übersichtlichkeit des Fragebogens war das vierte und letzte Kriterium des Fragebogens. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Länge des Fragebogens eine Seite nicht überschreitet. Durch die kurze Form ist die Hemmschwelle der Musiker niedriger, den Fragebogen zu beantworten und die Überschneidung der Aussagen der einzelnen

Fragen ist vermindert. Weiterhin wurde auf eine strukturierte Formatierung geachtet, welche Übersichtlichkeit und somit Verständlichkeit gewährleisten soll.

Unter Berücksichtigung der genannten Kriterien wurde ein Fragebogen in digitaler und druckbarer Form erstellt, welcher parallel zu den Messungen an die zu den Spielstätten gehörenden Orchester geschickt wurde. Als Plattform für die digitale Variante wurde Google Forms gewählt.

2.6 Korrelation

Das Korrelationsverfahren und dessen Koeffizient werden dazu benutzt, lineare Zusammenhänge zwischen zwei Datensätzen zu untersuchen. In der folgenden Arbeit wird dafür auf die Bravais-Pearson-Korrelation zurückgegriffen. Diese ist stark an die Kovarianz gebunden, welche ebenfalls ein Maß für den linearen Zusammenhang zweier Variablen ist. Jedoch gestaltet sich die Interpretation der Kovarianz als schwierig, da diese nicht standardisiert ist. Dieses Problem löst die Korrelation. Somit stellt sie die standardisierte Version der Kovarianz dar (Hemmerich, MatheGuru, 2023). Dazu wird die Kovarianz beider Variablen, wie in Gleichung (4) zu sehen, durch das Produkt ihrer Standardabweichungen geteilt.

$$\rho_{X,Y} = \text{corr}(X,Y) = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \cdot (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

Der beim Berechnen der Formel entstehende Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen -1 und +1 annehmen. Dabei bedeutet ein Korrelationskoeffizient von +1 eine perfekte positive Korrelation, die an einem gleichartigen positivem Steigungsverhalten erkennbar ist. Das heißt, dass die Werte der Variable X gleichförmig mit den Werten der Variable Y steigen. Nimmt der Korrelationskoeffizient einen Wert von -1 an, zeigt er eine perfekte Korrelation im negativen Bereich an. Das bedeutet, wenn beispielsweise die Werte der Variable X steigen, dann sinken die Werte der Variable Y. Kommt es zu einem Korrelationskoeffizienten von 0, so sagt dieser aus, dass keine Korrelation zwischen den beiden Variablen besteht. Da die Korrelation auch Werte zwischen beliebige Zwischenwerte annehmen kann, müssen für diese Grenzen gesetzt werden, ab denen von einer Korrelation ausgegangen wird. Dabei sind von Jacob Cohen 1988 folgende Grenzen festgelegt worden (Hemmerich, MatheGuru, 2023).

Tabelle 1: Korrelationsgrenzen nach Jacob Cohen 1988

Korrelationskoeffizient	Effekt
0,1	klein
0,3	mittel
0,5	groß

Wird jedoch die Korrelation mittels einer t-Statistik untersucht, ergibt sich insbesondere für kleine Stichproben, dass die Normalverteilung eines nicht korrelierenden Datenpaars sehr stark streut. Erhöht man die Stichprobengröße, wird die hierbei untersuchte 80 % Grenze aller Werte geringer. Die 80 % Grenze gibt den Bereich an, in dem 80% der Korrelationen liegen, wenn die eigentliche Korrelation 0 wäre. Dies ist besonders gut anhand der Tabelle 2 (Hemmerich, MatheGuru, 2023) zu visualisieren.

Tabelle 2: Änderung der 80% Grenzen des Korrelationskoeffizienten für steigende Stichprobengrößen

Stichprobengröße	80% Grenzen für den Korrelationskoeffizienten
5	-0,69 bis 0,69
15	-0,35 bis 0,35
25	-0,26 bis 0,26
50	-0,18 bis 0,18
100	-0,13 bis 0,13
200	-0,09 bis 0,09

Die Anzahl von den in dieser Arbeit gemittelten Bühnenmaßen beläuft sich auf 12 Werte. Die Anzahl der untersuchten Objekte mit beantwortetem Fragebogen beläuft sich auf 9 Orchesterspielstätten. Somit liegt die Stichprobengröße dieser Untersuchung zwischen den 80 % Grenzen des Korrelationskoeffizienten für die Stichprobengröße 5 und 15. Deshalb wurden für diese Untersuchung von den Vorgaben Cohens abweichende Grenzen für die Bewertung des Korrelationskoeffizienten festgelegt. Diese sind in Tabelle 3 festgehalten.

Tabelle 3: Grenzen zur Festlegung der Korrelation für die Arbeitsspezifische Stichprobengröße

Grenzbereich	Korrelationsgrad
± (0,0 bis 0,5)	Geringe bis keine Korrelation
± (0,5 bis 0,7)	Moderate Korrelation
± (0,7 bis 0,9)	Hohe Korrelation
± (0,9 bis 1,0)	Perfekte Korrelation

3 Messungen

In folgendem Kapitel wird beschrieben, wie und mit welcher Technik in den Orchesterspielstätten gemessen wurde. Zudem wird jeder Messort kurz beschrieben und Besonderheiten während der Messung werden aufgeführt. Um die Messdaten zu anonymisieren, wurden zur Benennung der Orchesterspielstätten keine Klarnamen, sondern der Spielstätten-typ und eine Nummer verwendet.

3.1 Messtechnik

Die Bühnenparameter wurden alle mit Korrelationsverfahren gemessen. Die benutzte Messtechnik dafür umfasst:

- ½ Zoll NTi M2210 Messmikrofon
- MIPRO ACT-818 + TA-80 Digital-Funkstrecke
- MOTU Audio Express USB-Audiointerface
- Laptop mit der Software EASERA
- ART SDA1 Digitalendstufe
- Dodekaederlautsprecher Brüel&Kjaer BBL512

Ein üblicher Messablauf geht wie folgt vonstatten. In das zu untersuchende Objekt wird mittels Audiointerface, Verstärker und Dodekaeder ein gewichteter Sinussweep eingeleitet. Die Raumantwort auf den Sweep wird mittels Messmikrofon, Funkstrecke und Audiointerface aufgezeichnet und im Laptop durch EASERA zu einer Impulsantwort verarbeitet. Dies funktioniert durch Rückfaltung des Sweeps aus der aufgenommenen Raumantwort. In EASERA kann das gewonnene Signal dann durch Darstellungsformen wie die Energy-Time-Curve auf Störungen überprüft und darauffolgend abgespeichert werden.

3.2 Messaufbau

Alle Orchesterspielstätten wurden in einer gleichen Vorgehensweise akustisch vermessen. Dabei besteht die Messung immer aus zwei Teilen.

Der erste Teil dient zur Bestimmung der Energie des Direktschalls $E_e(\text{DIR})$ und der Energie der frühen Reflexionen $E_e(20\text{-}100\text{ ms})$ und späten Reflexionen $E_e(100\text{-}1000\text{ms})$. Dafür werden mehrere repräsentative Quellpositionen im Bereich der Musiker ausgewählt. Je Position werden in 1 m Entfernung drei Impulsantworten gemessen. Für Impulsantwort zwei und drei wird der Dodekaederlautsprecher jeweils um 30° gedreht. Somit können die zuvor genannten Energien für jede Impulsantwort berechnet und daraufhin gemittelt werden. Die

Mittelung ist wichtig, um die Richtwirkung des Dodekaederlautsprechers im Nahfeld mit ausreichender Genauigkeit zu kompensieren.

Der zweite Teil der Vorgehensweise besteht darin, die übertragene Energie an den anderen Messpositionen $E_r(0-80 \text{ ms})$ zu bestimmen. Dazu wird nach Quellpositionen in der Spielstätte vorgegangen. An einer der Quellpositionen steht der Dodekaederlautsprecher. Von diesem wird an jeder anderen Quellposition und an der Position des Dirigenten mittels eines Mikrofons die jeweilige Impulsantwort gemessen.

Die beiden Teile der Vorgehensweise werden wie schon erwähnt für jede Quellposition durchgeführt. In Abbildung 1 und Abbildung 2 sind sie schematisch dargestellt.

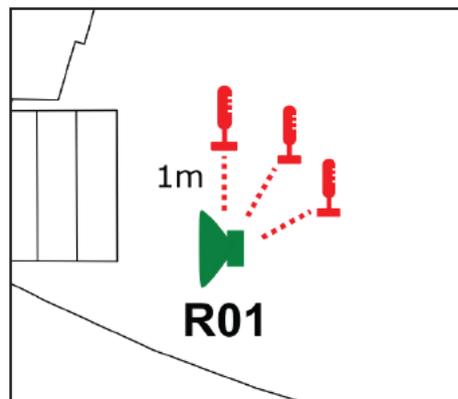


Abbildung 1: Messung von 30° Schritten in 1 m Entfernung

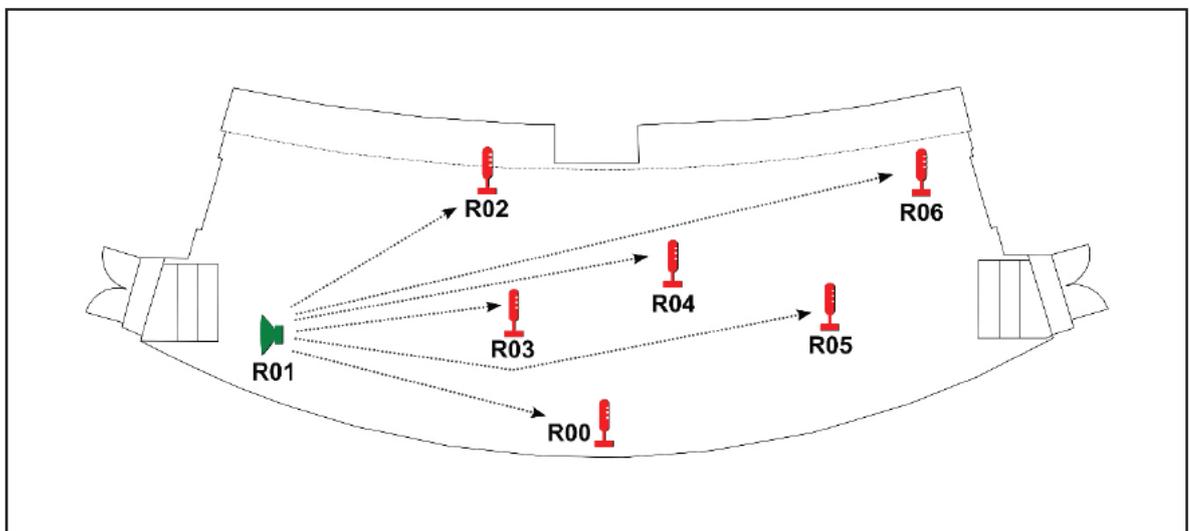


Abbildung 2: Messung der Quelle an den anderen Quellpositionen und beim Dirigenten

3.3 Gräben

3.3.1 Graben 1

Die Besonderheit dieser Messung ist, dass es schon Messdaten vom alten Zustand des Grabens gab und es nun möglich war den Effekt der neu eingebrachten Akustikelemente zu untersuchen. Dabei ist anzumerken, dass sich bei der Messung im neuen Zustand mehrere ungedämpfte Instrumente im Graben befanden, die einen Einfluss auf die Messung haben können. Zudem befand sich für jeden Musiker ein Stuhl und ein Notenpult im Graben. Bei den neu eingebrachten Akustikelementen handelte es sich um Diffusoren, Holzlattung mit Dämmstoffhinterlegung und Plattenschwinger, welche im mittleren bis hohen Frequenzbereich durch Neigung zur Schallleitung eingesetzt werden. Außerdem wurde die ursprüngliche Verkleidung der ins Publikum gewandten Grabenkante durch eine Textilbelegung ersetzt, welche für den auftreffenden Schall transparent ist.

Der Graben hat ein Volumen von ca. 375 m³ und eine mittlere Early Decay Time von 0,69 s im alten und 0,63 s im neuen akustisch optimierten Zustand. Mit einer Grundfläche von 116 m² und einer Öffnungsgröße von 69 m² ist der Graben zu 40,5% überdeckt. Somit erfüllt er nicht die von Beraneks Beobachtungen abgeleitete geforderte Überdeckung von 20% bis 30% (Beranek, 1996).

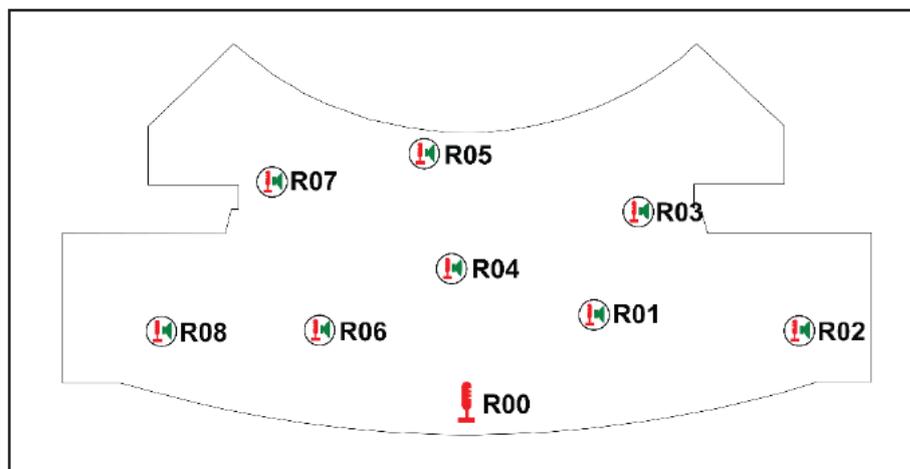


Abbildung 3: Messpositionen in Graben 1

3.3.2 Graben 2

Mit einem Volumen von ca. 180 m³ ist Graben 2 deutlich kleiner als die anderen untersuchten Gräben. Da ganze 43 m² von 78 m² Grundfläche des Grabens überdeckt sind, ist die Öffnung in den Saal ebenfalls sehr klein. Das ist eine anteilige Öffnung der Grabendecke von 45 %. Diese ist weit entfernt von der empfohlenen Öffnung von 70 % bis 80 %. Die Grundgeometrie ist somit für größere Orchesterbesetzungen eher ungeeignet und führt durch nahe Reflexionsflächen, insbesondere bei überdeckten Plätzen, zu überhöhten

Pegeln im Graben. Der Graben ist im Rahmen der Möglichkeiten bereits optimiert worden. Dies erfolgte in Form von gefalteten Wandstrukturen, gelochtem Gipskarton an den Wänden und in der Decke, sowie einem Podest für die Musiker in Dirigentennähe. Die beschriebene Geometrie des Grabens und seine Wandabwicklung spiegeln sich in seiner kurzen mittleren Early Decay Time von 0,43 s wider. Durch seine kleine Bauform kann der Graben ebenfalls repräsentativ für viele Orchestergräben in kleineren Theatern betrachtet werden.

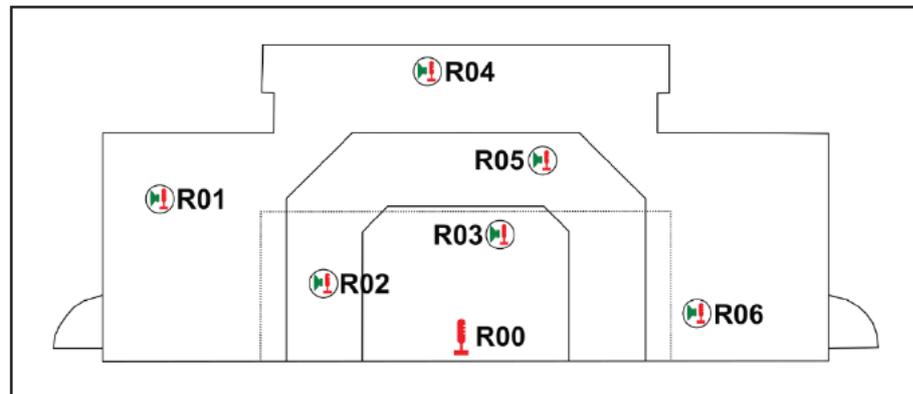


Abbildung 4: Messpositionen in Graben 2

3.3.3 Graben 3

Mit einem Volumen von ca. 250 m³ kann der Graben 3 als eher klein beschrieben werden. Dabei ist die beispielbare Grundfläche ca. 80 m² und die maximale Öffnung in den Saal ca. 53 m² groß. Somit liegt der Graben mit einer 66 % Öffnung nahe an der Empfehlung von einer 70 % bis 80 % geöffneten Grabendecke. Die mittlere Early Decay Time liegt bei 0,46 s und somit nahe bei Graben 2. In Graben 3 sind durch den Nutzer raumakustisch Maßnahmen eingebracht worden, deren Umfang jedoch nicht ausschlaggebend für den eine signifikante Wirksamkeit ist. Es handelt sich dabei um Lochkassetten und eine Holzlattung, welche mit Dämmstoff hinterlegt sind und im Bereich des Schlagwerks angebracht wurden. Die restlichen Wände sind mit Sperrholzplatten und im hinteren Bereich mit einer Holzlattung belegt.

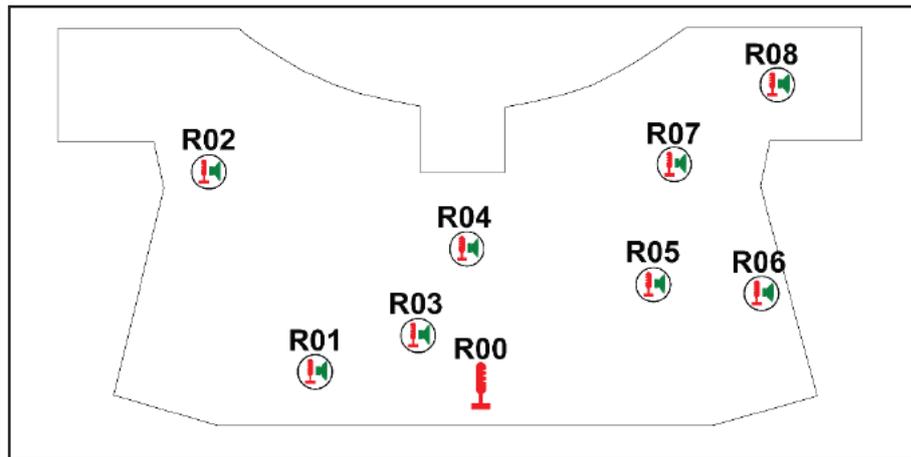


Abbildung 5: Messpositionen in Graben 3

3.3.4 Graben 4

Das Volumen von Graben 4 beträgt ca. 170 m^3 . Während der Graben das kleinste Volumen aufweist, beträgt seine Grundfläche $106,12 \text{ m}^2$ bei einer Tiefe von $1,6 \text{ m}$. Dies macht ihn flächenmäßig zum größten der untersuchten Gräben. Der Graben ist fast vollständig zu Saal hin geöffnet und nur eine Stuhlreihe breit in Richtung der Bühne mit $12,15 \text{ m}^2$ Decke überdacht. Damit ist der Graben zu $88,5 \%$ geöffnet, was $8,5 \%$ über der Öffnung von 70% bis 80% liegt, die empfohlen ist. Dies lässt vermuten, dass sich Graben 4 akustisch eher einer Bühne annähert. Die Wände des Grabens sind mit lackierten Holzplatten belegt und sind somit hauptsächlich tieffrequent wirksam. Durch seine geringe Absenkung und seinen hohen Öffnungsgrad ist der akustische Eindruck im Graben eher durch den Saal geprägt. Dies spiegelt sich auch in der vergleichsweise langen Early Decay Time wider, welche im weniger bestuhlten Zustand im Mittel $1,31 \text{ s}$ und im stärker bestuhlten Zustand im Mittel $1,36 \text{ s}$ beträgt.

Es wurden zwei Messreihen mit ähnlichen Messpositionen und gleicher Anzahl an Messpunkten, aber verschiedenen Bestuhlungsgraden durchgeführt. Somit kann in der Auswertung unter anderem auch der Einfluss der Bestuhlung auf die Bühnenmaße betrachtet werden.

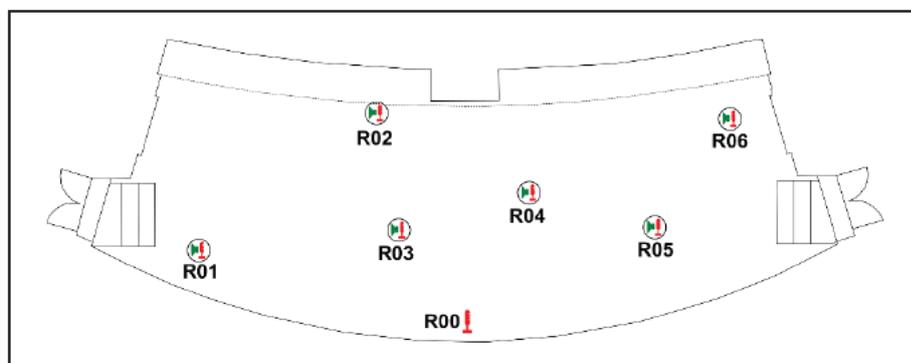


Abbildung 6: Messpositionen in Graben 4

3.4 Bühnen

Da sich die folgenden Abschnitte mit der Messung auf Bühnen beschäftigen, werden die Volumen der jeweils dazugehörigen Säle betrachtet. Somit fallen diese signifikant größer als die der Gräben aus.

3.4.1 Bühne 1

Der zu Bühne 1 gehörige Saal hat ein Volumen von ca. 6.000 m³. Die mittlere, auf der Bühne gemessene Early Decay Time beträgt 1,82 s. Der Saal und somit die Umgebung der Bühne sind durch einen Akustikdienstleister geplant worden. Das Ergebnis sind nicht parallele Gipskartonwände, „Halbkugelscheiben“-Diffusoren und variable Akustik in Form von fahrbaren Rollos an den Wänden. Zum Zeitpunkt der Messung befanden sich alle Rollos im maximal ausgefahrenen Zustand. Hinter der Bühne befindet sich eine ca. 3 m hohe Wand, an die je nach Nutzung eine Zuschauer- oder Chortribüne angrenzt.

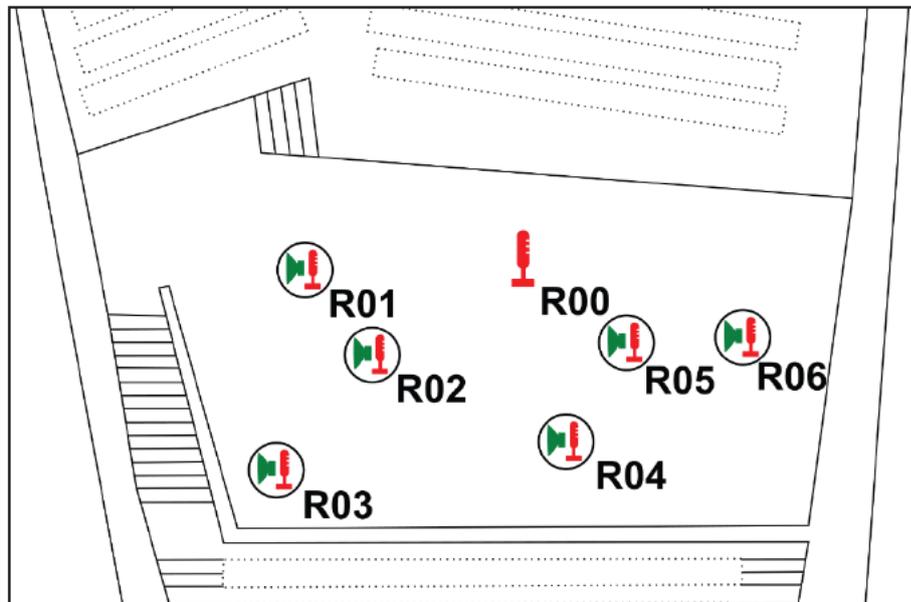


Abbildung 7: Messpositionen auf Bühne 1

3.4.2 Bühne 2

Das Volumen des zu Bühne 2 gehörigen Saals beträgt ca. 16.300 m³. Die dazugehörige EDT beträgt 1,98 s. Die Besonderheit des zur Bühne 2 gehörigen Saales besteht darin, dass seine Seitenränge für andere Nutzungsszenarien weggeklappt werden können. In dieser Messung wurde in einer Konzertvariante mit heruntergeklappten Seitenrängen gemessen. Die Bühne ist an der Rückwand mit einer gerundeten Holzstruktur belegt. Die beiden Seitenwände sind im unteren Bereich mit einer sägezahnartigen Wandstruktur ausgestattet, welche die Schallleitung nach vorn zum Publikum begünstigt. An der Decke befinden sich 30 fahrbare runde Kunststoffreflektoren, welche zum Zeitpunkt der Messung unter die

Decke gefahren waren. Die Bühne kann ebenfalls in Stufen gefahren werden. Die Positionen R03, R05 und R09 befinden sich auf einer Stufe, welche um ca. 0,75 m ausgefahren ist. Position R06 befindet sich auf einer hinteren Stufe, die auf ca. 1 m ausgefahren ist.

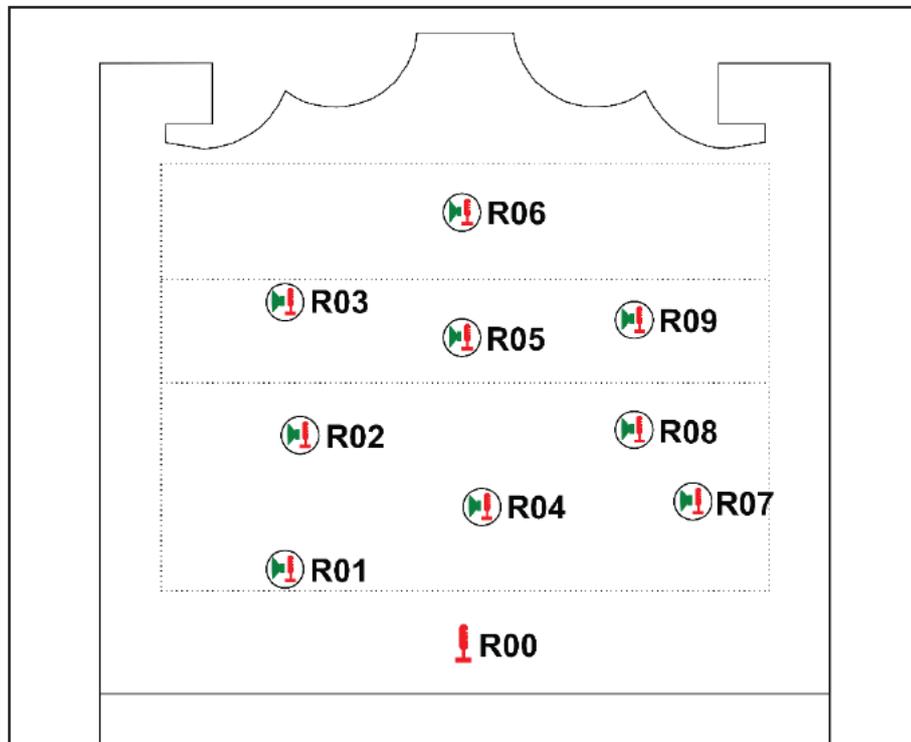


Abbildung 8: Messpositionen auf Bühne 2

3.4.3 Bühne 3

Bei Bühne 3 handelt es sich um die Bühne eines Konzertsaals, der für eine Musikschule gebaut wurde. Deshalb fällt der Saal mit einem Volumen von 1.700 m^3 kleiner aus als die anderen Säle und hat eine mittlere EDT von 1,14 s. Die Wände des Saals sind mit gefaltetem Gipskarton und darauf aufgebrachtem Akustikputz gestaltet. Unter der Decke sind in einer konkaven Anordnung leicht konvexe Gipskartonsegel abgehängt, welche der Schalleitung zwischen Bühne und Publikum dienen und ebenfalls für Diffusität sorgen. Die Bühne macht ungefähr ein Viertel der Grundfläche aus und ist um ca. 0,5 m angehoben. Bei üblicher Spielweise des Orchesters befinden sich die Blasmusiker auf der Bühne und die restlichen Musiker vor der Bühne.

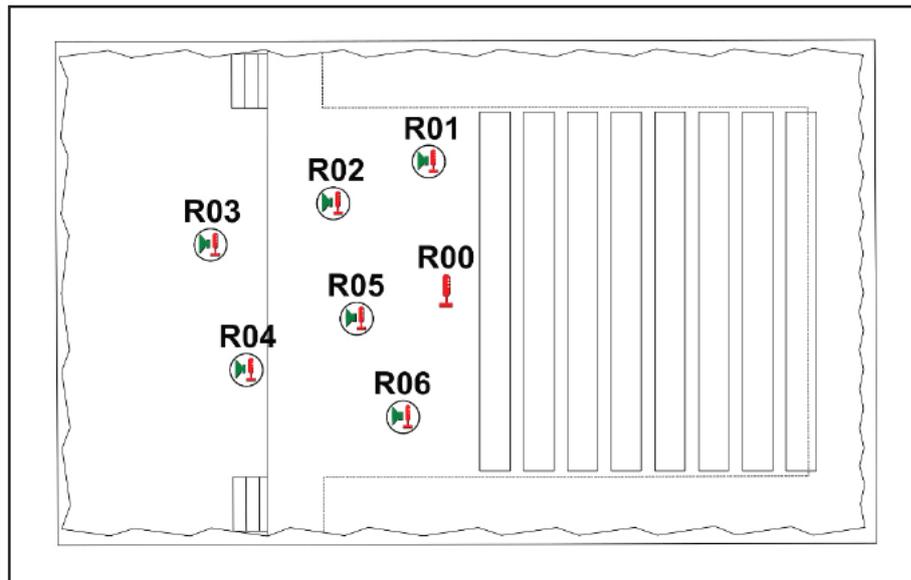


Abbildung 9: Messpositionen auf Bühne 3

3.5 Probenräume

3.5.1 Probenraum 1

Probenraum 1 weist ein Volumen von circa 5220 m^3 mit einer mittleren EDT von $1,29 \text{ s}$ auf. Er verfügt über ausfahrbare Stufen im hinteren Bereich, welche zum Zeitpunkt der Messung zu einer gleichmäßigen Treppe angeordnet waren. Die beiden Seitenwände sind vollflächig mit quadratischen Holzkassetten bedeckt, in welchen Holzplatten mit unterschiedlicher Neigung eingelassen sind. Die Front- und Rückwand sind ebenfalls mit quadratischen Holzkassetten bedeckt, die Platten sind jedoch alle senkrecht ausgerichtet. Die Platten der Frontwand sind alle gelocht, was auf eine Mitten- bis Höhenabsorption schließen lässt. An allen vier Wänden sind elektrisch fahrbare Rollos angebracht, welche die Wände komplett abdecken können. Dem üblichen Zustand bei Proben entsprechend, waren die Rollos abwechselnd komplett eingefahren und bis zur Hälfte ausgefahren. Die Decke ist vollflächig mit Metallkassetten bedeckt. Unter der Decke sind sechs große schalleitende Segel abgehängt, deren Neigung elektrisch einstellbar ist. Die Segel waren so ausgerichtet, dass sie den Schall auf die Musiker lenken. In der üblichen Spielweise sind die Bläser und das Schlagwerk auf der Treppe und die Streicher vor der Treppe angeordnet.

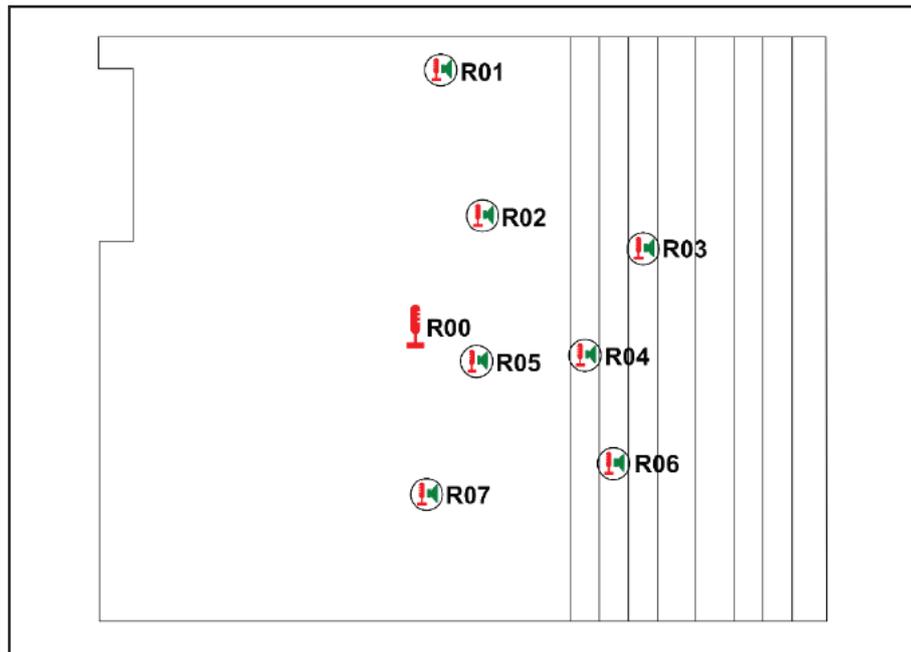


Abbildung 10: Messpositionen in Probenraum 1

3.5.2 Probenraum 2

Der Probenraum 2 weist ein Volumen von 1500 m^3 und eine mittlere EDT von $1,06 \text{ s}$ auf. Die Besonderheit dieses Probenraums liegt darin, dass er über eine Bühne mit nicht zu vernachlässigendem Rückvolumen und eine Bestuhlung für kleinere Aufführungen verfügt. Mit einem Volumen von ca. 300 m^3 macht der Bühnenbereich ein Fünftel des Raumes aus. Zudem handelt es sich beim „Zuschauerraum“ um einen Flachraum mit einer Deckenhöhe von ca. $4,3 \text{ m}$. Das Orchester sitzt in üblicher Spielweise zwischen Bühnenvorderkante und dem Publikum. Die Publikumsbestuhlung ist gepolstert und befindet sich in unmittelbarer Nähe zu den Orchestermusikern. Die Seitenwände des „Zuschauerraums“ sind vom Boden aus bis zur Mitte mit Holzbrettern verschalt. Die Wand hinter dem Publikum ist eine Fensterfront, welche jedoch beim Spiel durch Rollos aus einem planenähnlichen Stoff verdeckt wird. Im Bühnenbereich sind die Wände größtenteils mit Vorhängen verdeckt. Die Decke im Orchester- und Zuschauerraum ist abgehängt und mit diffus wirkenden Gipskartonelementen besetzt. Diese sind konvex und haben die Form von längs geschnittenen Zylindern (siehe Abbildung 11).



Abbildung 11: Deckenabwicklung von Probenraum 2

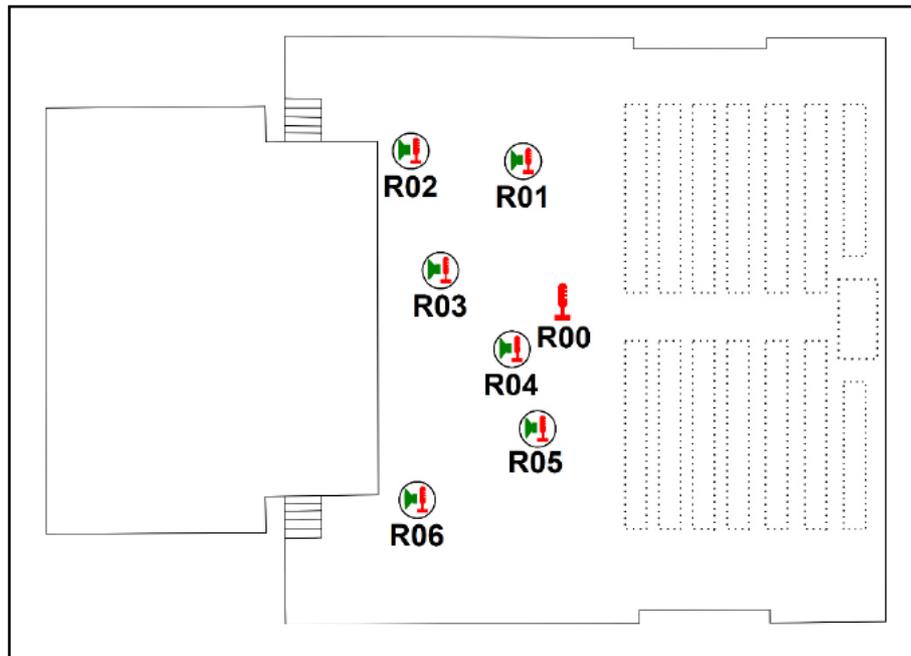


Abbildung 12: Messpositionen in Probenraum 2

3.5.3 Probenraum 3

Der Probenraum 3 lässt sich mit einem Volumen von ca. 1800 m³ und einer mittleren EDT von 0,73 s beziffern. In der Nutzart unterscheidet er sich von den anderen Probenräumen darin, dass er für die Proben eines Bläserensembles, eines sogenannten Spielmannszugs, genutzt wird. Ein Spielmannszug setzt sich üblicherweise aus Fanfaren, Flöten und Trommeln zusammen (Gerhards, 2023). Die Wände des Raums sind größtenteils mit einer unregelmäßigen Holzkassettenatur belegt. Die Kassetten rahmen Platten ein, die mit einem Dämmstoff hinterlegt sind. Dabei ist in ungelochte und gelochte Platten zu unterscheiden. Die gelochten Platten weisen ein eher mittenbetontes Schallabsorptionsverhalten auf. Die ungelochten Platten wirken als Plattenschwinger tieffrequent absorbierend. Um eine variable Akustik zu gewährleisten sind vor den Wänden akustisch wirksame Vorhänge angebracht, welche elektrisch ein und ausfahrbar sind. Zum Zeitpunkt der Messung waren die Vorhänge eingefahren und entsprechend ihrer verbleibenden Oberfläche auf der Wand, weniger wirksam. Diese Situation entspricht der üblichen Probeanordnung des Spielmannszugs. Die Decke des Probenraums ist mit Gipskarton abgehängt und in mehreren breiten Streifen gelocht und mit Mineralfaserplatten hinterlegt und wirkt deshalb an diesen Stellen absorbierend. Der Bereich der Musiker ist aus großen geschwungenen Stufen aufgebaut, welche ca. 0,35 m hoch sind. Somit hat jedes Instrument Sichtkontakt zum Dirigenten. Auf der hintersten oberen Stufe steht das Schlagwerk. Vor den Marschtrommeln wurde eine Plexiglasscheibe aufgestellt, welche als Schallschirm zu den davor sitzenden Musikern dient.

Da ein Spielmannszug im Stehen spielt, wurde im Gegensatz zu den anderen Messungen in dieser Spielstätte eine Mikrofonhöhe von 1,6 m anstatt von 1,2 m gewählt.

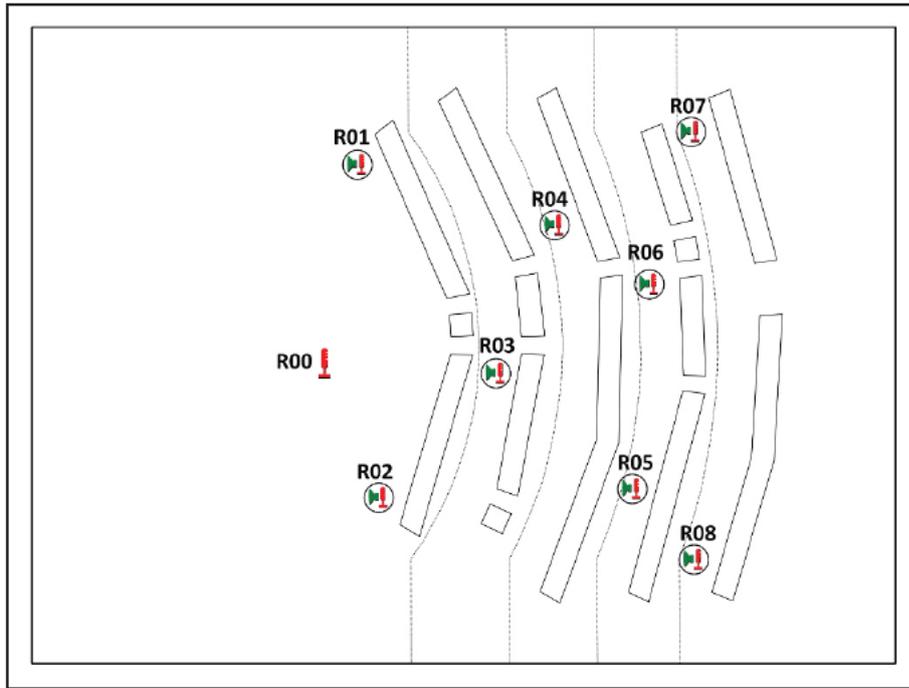


Abbildung 13: Messpositionen in Probenraum 3

4 Auswertung

In folgendem Kapitel werden die in Kapitel 3 beschriebenen Bühnen, Gräben und Probenräume auf die Parameter ST_{early} , ST_{late} und EEL untersucht und anhand dieser verglichen. Die resultierenden Ergebnisse werden dann mit den Antworten auf die Fragebögen abgeglichen, sowie auf Korrelation mit weiteren raumbeschreibenden Parametern untersucht. Weiterhin werden die Effektivität der Orchesterbefragung und die mit den Untersuchungen verbundene Arbeitsweise diskutiert. Darauf basierend werden die gewonnenen Erkenntnisse präsentiert und ein Ausblick auf mögliche weitere Untersuchungen gegeben.

4.1 ST_{early}

Um den ST_{early} und auch die anderen Bühnenparameter zu bestimmen, wurde das in Kapitel 2.3.2 beschriebene Auswertungsprogramm „ABD-OrAnG.exe“ verwendet. Für den ST_{early} wurden dazu die jeweils drei gemessenen Impulsantworten in einem Meter Entfernung verwendet und der mittlere ST_{early} bestimmt. Der Grund dafür ist die ungleiche Abstrahlung eines Dodekaederlautsprechers im Nahfeld, welche durch die Richtwirkung der Lautsprecherchassis im mittleren bis hohen Frequenzbereich entsteht. Dieses Vorgehen wurde für jede Sendeposition jeder Orchesterspielstätte durchgeführt, sodass für jedes untersuchte Objekt eine Anzahl an ST_{early} -Werten besteht, die sich mit der Anzahl der Sendepositionen deckt. Die für jedes Objekt gewonnenen ST_{early} -Werte wurden dann in einer zu dem Objekt gehörenden Bühnenparametertabelle gesammelt und in Excel zur besseren Vergleichbarkeit bedingt formatiert. Eine bedingte Formatierung beschreibt die Einfärbung einer Zelle entsprechend des in ihr gegebenen Wertes. Dadurch ist es einfacher, Abweichungen zwischen den Werten festzustellen. Die Bühnenparametertabellen in bedingt formatierter Form sind im Anlage 1 zu finden. Um den ST_{early} unter den Objekten zu vergleichen, wurde aus den ST_{early} -Werten der einzelnen Sendepositionen der Orchesterspielstätten pro Spielstätte ein Mittelwert gebildet.

Der Mittelwert verfügt über das Problem, dass er nicht in der Lage ist, die Schwankung des ST_{early} innerhalb eines Objekts abzubilden. Deshalb wurde die objektspezifische Spannweite und Standardabweichung des ST_{early} berechnet und gegeneinander abgewogen. Es wurde sich dazu entschieden, die Standardabweichung anstatt der Spannweite zu betrachten. Der Grund dafür ist, dass die Standardabweichung den Mittelwert der Abweichungen vom Mittelwert angibt und somit durch Raumgeometrie oder Messbedingungen hervorgerufene Anomalitäten abfängt. Solche Anomalitäten können zum Beispiel durch ungedämpfte Instrumente, die mitschwingen, entstehen. Die Spannweite stellt diese Ausreißer viel drastischer dar, da sie direkt an diese übergeben werden. Deshalb eignet sich die Standardabweichung besser zum Vergleich der Abweichungen zwischen zwei Objekten mit

verschiedenen Messbedingungen als die Spannweite. Weiterhin kann anhand des Werts der Standardabweichung ein Urteil über die Homogenität des Schallfeldes innerhalb der Orchesterspielstätte gefällt werden. Kommt es zu einer hohen Standardabweichung zwischen den Werten des ST_{early} lässt sich eine fluktuierende Balance zwischen frühen und späten Reflexionen feststellen, welche laut der Definition der Bühnenparameter zu einem anderen Hörempfinden führt.

Die berechneten ST_{early} Mittelwerte und deren Standardabweichung sind mittels eines Balkendiagramms in Abbildung 11 in Beziehung zueinander gesetzt.

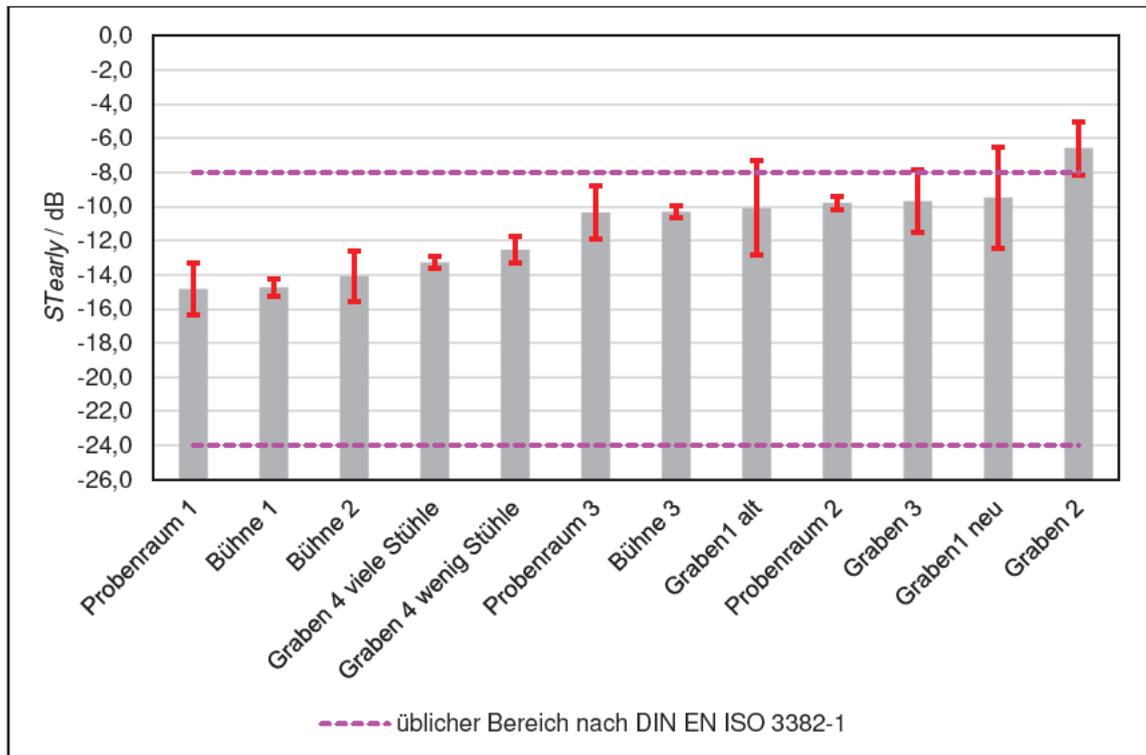


Abbildung 14: Mittlerer ST_{early} der Orchesterspielstätten mit jeweiliger Standardabweichung

Die in Abbildung 11 dargestellten mittleren ST_{early} Werte wurden mit dem geringsten Pegel beginnend bis zum höchsten Pegel hin entlang der x-Achse sortiert. Es fällt auf, dass alle Pegel, mit Ausnahme des Pegels von Graben 2, den üblichen Bereich im Mittel nicht überschreiten. Der mittlere ST_{early} des Grabens 2 ist mit - 6,6 dB der höchste und überschreitet damit den üblichen Bereich um 1,4 dB. Wird jedoch auch die Standardabweichung der einzelnen Objekte mit einbezogen, überschreiten 4 Gräben den üblichen Bereich. Die weniger starke Ausprägung des ST_{early} in Graben 4 ist auf dessen fehlende Überdachung zurückzuführen. Graben 4 verfügt über keine Überdachung und ist im Gegensatz zu den anderen Gräben nur 1,6 m tief. Somit verfügt er eher über die akustischen Eigenschaften einer Bühne.

Die anderen drei Gräben sind gemäß ihres Überdeckungsgrads sortiert. Je mehr der Graben überdeckt ist, desto höher ist der Wert des ST_{early} . Doch unterscheiden sich Graben 1 und 3 hinsichtlich dessen nicht wesentlich, da auch das Volumen und die Raumgeometrie

einen Einfluss auf den ST_{early} haben. Probenraum 2 weist ebenfalls einen hohen ST_{early} mit einem Pegel von - 9,8 dB auf. Das ist auf die Raumgeometrie als Flachraum mit einer Deckenhöhe von 4,3 m zurückzuführen. Die Folge ist, dass neben dem Boden auch die Decke für frühe Reflexionen sorgt und den ST_{early} erhöht. Das lässt darauf schließen, dass die für den Pegel des ST_{early} relevante Raumgeometrie der eines Orchestergrabens ähnelt. Einen ähnlichen mittleren ST_{early} Wert von ca. - 10 dB weisen auch Bühne 3 und Probenraum 3 auf. Das ist auf ein ähnliches Volumen zu Probenraum 3 zurückzuführen, welches bei höheren Decken zu näheren Seitenflächen führt, die eine größere Zahl an frühen Reflexionen bedingen.

In den verbleibenden Orchesterspielstätten liegen die Werte der Bühnenparameter im Bereich von - 12,5 dB bis - 15 dB. Zu ihnen zählt Graben 4 mit wenigen und vielen Stühlen, Bühne 2, Bühne 1 und Probenraum 1. Alle vier weisen ein signifikant größeres Volumen auf, das von 5.220 m³ bis 16.300 m³ reicht. Ein größeres Volumen bedeutet, dass die Reflexionsflächen im Vergleich zu den Gräben, kleineren Bühnen und Probenräumen weiter entfernt von den Hörer- bzw. Sendepositionen sind. Das führt dazu, dass auch die Pegel des ST_{early} geringer ausfallen.

Die Besonderheit der Messdaten für Graben 1 besteht darin, dass Messergebnisse von jeweils einem Zustand vor und nach dem Einbringen von akustischen Optimierungen existieren. Vor dem Einbringen der Akustiklösung wurde ein mittlerer ST_{early} von - 10,1 dB gemessen. Nach dem Einbringen von Absorption, schallstreuenden und schallleitenden Elementen wurde ein mittlerer ST_{early} von - 9,5 dB gemessen. Das Ergebnis ist als Erhöhung der frühen Reflexionen zu werten, was dem Ziel der akustischen Maßnahmen entspricht. Jedoch ist die Änderung des Höreindrucks, laut Gesprächen mit den Musikern viel signifikanter, als es eine mittlere Änderung des ST_{early} von 0,6 dB erwarten lässt. Dies lässt darauf schließen, dass der ST_{early} eher dienlich im Vergleich von Raumgeometrien ist. Seine Eignung zur aussagekräftigen Bewertung der Effekte einer raumakustischen Maßnahme in Form von Akustikelementen wie Absorbern und Diffusoren ist demnach anzuzweifeln. Es ist zu erwähnen, dass die Standardabweichung durch die akustischen Maßnahmen von 2,8 dB um 0,2 dB auf 3,0 dB gestiegen ist. Der Anstieg lässt sich jedoch mit den Anforderungen an die Raumakustik erklären. Das Ziel der Maßnahme ist es, das Schallfeld im Graben so anzupassen, dass die Musiker in ihrem Spiel unterstützt werden und sich die akustische Behaglichkeit verbessert. Solche Ansprüche erfordern verschiedene Maßnahmen für verschiedene Instrumentengruppen. Ein Beispiel dafür ist der Unterschied zwischen Pauke und Flöte. Die Anforderung für die Pauke ist, ihren Pegel für die anderen Musiker zu mindern. Dies erreicht man durch Schallschirme und Absorption. Eine Flöte hingegen ist schwerer im Graben zu vernehmen. Würde ihr Spielplatz mit Schallschirmen und Absorption ausgestattet, wäre es für andere Musiker schwierig sie wahrzunehmen. Also werden für sie eher diffuse und schallleitende Elemente eingesetzt. Somit kommt es zu einer ungleichmäßigen Anordnung von Akustiklösungen, die dazu führt, dass die Pegel des ST_{early} abhängig vom Platz stärker voneinander abweichen als zuvor.

Für Graben 4 bestehen ebenfalls zwei Sätze an Messdaten. Sie unterscheiden sich jedoch im Gegensatz zum Graben 1 darin, dass sie mit einer unterschiedlichen Anzahl an Stühlen gemessen wurden. Die eine Aufstellung umfasste 34 Stühle, die andere 96 Stühle. Der ST_{early} für eine große Anzahl an Stühlen im Graben beträgt -13,3 dB, mit einer Standardabweichung von 0,4 dB. Der ST_{early} für eine geringere Anzahl an Stühlen im Graben ist mit -12,5 dB höher und verfügt über eine Standardabweichung von 0,8 dB. Entgegen der Vermutung, dass mehr Stühle für mehr frühe Reflexionen im Graben sorgen und den ST_{early} erhöhen, sorgen sie für mehr Diffusion in den Reflexionswegen der frühen Reflexionen. Da Graben 4 nicht überdacht ist, wird durch die vielen Stühle mehr Schall aus dem Graben heraus reflektiert. Daraus folgt, dass weniger Energie im Zeitbereich des ST_{early} zurück zum Sender bzw. dem Hörer in 1 m Entfernung gelangt und sich deshalb auch der Pegel des Early Support verringert. Die geringere Standardabweichung bei größerer Anzahl an Stühlen weist auf ein diffuseres Schallfeld hin. Dieses auch als homogener beschreibbare Schallfeld wird durch eine größere Anzahl an schallstreuenden Elementen erzeugt. Damit wird die Annahme gestützt, dass mehr Stühle für eine höhere Diffusität im Graben sorgen.

Es ist anzumerken, dass keines der Objekte trotz der Diversität annähernd an die untere Grenze des üblichen Bereichs gestoßen ist. Jedoch wurde der übliche Bereich mit Sicherheit aus von Gade gemessenen Daten dänischer und britischer Konzerthäuser erstellt. Diese Konzerthäuser können Volumina aufweisen, welche größer als 20.000 m³ sind oder besondere Bühnenkonstruktionen beinhalten. Solche Besonderheiten führen zu geringeren ST_{early} Pegeln und haben somit vielleicht den üblichen Bereich für Einzelwerte aus der DIN EN ISO 3381-1 geprägt. Dieser gibt nur an, in welchem Bereich die Werte liegen können, wertet sie aber nicht. Er dient in seiner aktuellen Ausführung als Orientierungsstütze für eine Plausibilitätsprüfung der gemessenen Werte.

Allgemein lässt sich zusammenfassen, dass konventionelle, überdeckte Orchestergräben eher im höheren Pegelbereich des ST_{early} zu finden sind. Probenräume, Bühnen und nicht überdachte flache Gräben sind eher im mittleren bis mittelhohen Pegelbereich einzuordnen. Akustische Optimierungen sind nicht eindeutig am Pegel des ST_{early} zu erkennen, da dieser hauptsächlich vom Volumen und der Raumgeometrie geprägt wird. Das Einbringen von Diffusion in Form von mehr Stühlen führt in einem stark geöffneten Graben zu einem geringeren ST_{early} , da Teile der frühen Reflexionen aus dem Graben heraus reflektiert werden.

4.2 ST_{late}

Der ST_{late} wurde, wie in Kapitel 4.1 schon beschrieben, ebenfalls aus den 1m-Messungen bestimmt. Somit ist für jedes Objekt an jeder Sendeposition der ST_{late} aus drei Impulsantworten gemittelt worden. Dabei wird die Richtwirkung des Dodekaederlautsprechers im Nahfeld ebenfalls durch die Mittelung kompensiert. Um die untersuchten Orchesterspielstätten miteinander zu vergleichen, wurde jeweils aus den ST_{late} Werten aller Sendepositionen eines Objekts ein Mittelwert gebildet. Für diesen wurde ebenfalls jeweils eine

objektspezifische Standardabweichung bestimmt. So ist es möglich, die Schwankungsbreite der Werte und die Homogenität des Höreindrucks zu beurteilen.

Die berechneten objektbezogenen Mittelwerte des ST_{late} und deren zugehörige Standardabweichung sind in Abbildung 12 als ein Balkendiagramm dargestellt. Das ermöglicht den direkten Vergleich der berechneten Ergebnisse.

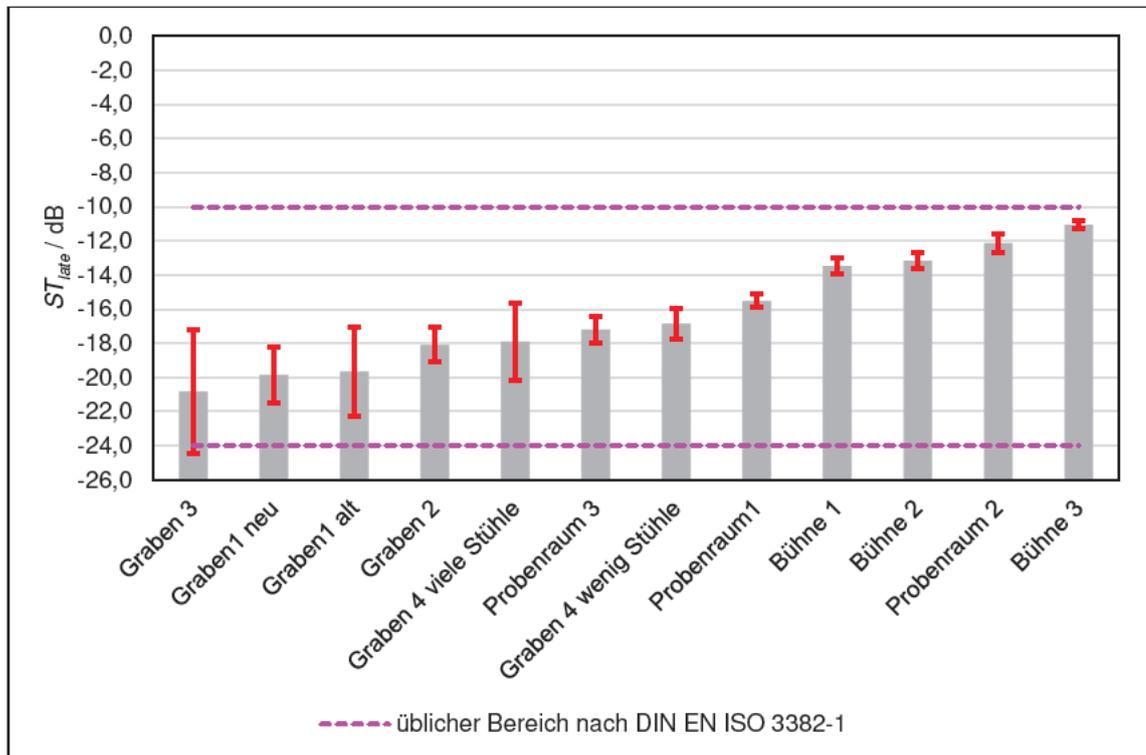


Abbildung 15: Mittlerer ST_{late} der Orchesterspielstätten mit jeweiliger Standardabweichung

Die in Abbildung 12 dargestellten Pegel des ST_{late} wurden entlang der x-Achse nach ihrer Größe sortiert. Dabei steht nach Definition des Bühnenparameters ein kleinerer Pegel für eine geringere durch den Hörer empfundene Halligkeit und dementsprechend ein höherer Pegel für ein stärkeres Halligkeitsempfinden. Mit einem Pegel von - 20,8 dB ist der Graben 3 laut ST_{late} die am wenigsten hallig empfundene Orchesterspielstätte. Das ist auf sein geringes Volumen von 250 m³, die 33,75 % Überdeckung, die im Bereich des Schlagwerks eingebrachte Absorption und die Berandung mit Holzplatten zurückzuführen. Durch die Dämpfung werden Energieanteile des Signals, welche im Zeitbereich des ST_{late} liegen, reduziert. Das kleine Volumen führt ebenfalls dazu, dass viele Reflexionen bereits früher wieder beim Hörer eintreffen. Eine stärkere Überdeckung des Grabens hat auch zur Folge, dass er stärker von der Halligkeit des Hauptraums abgekoppelt wird und die Funktion des dazugehörigen Saals als Nachhallreservoir geschmälert wird.

Bei Graben 1 hat sich der mittlere ST_{late} durch das Einbringen der Akustiklösungen nicht stark verändert. Der Pegel des ST_{late} stieg von - 19,8 dB um 0,1 dB auf - 19,7 dB. Der Unterschied ist dabei so marginal, dass er schon durch kleine Ungleichheiten der Bestuhlung im Messaufbau herbeigeführt worden sein kann. Hinsichtlich der Standardabweichung hat

sich jedoch eine Veränderung eingestellt. Die Standardabweichung ist von 2,6 dB auf 1,7 dB gesunken. Das ist auf die Verbesserung der Schalleitung zwischen Graben und Saal zurückzuführen, die durch die Einbringung von schalleitenden Elementen bedingt wird.

Graben 2 ist trotz seines kleineren Volumens und akustischer Behandlung bezüglich des ST_{late} als halliger im Vergleich zu Graben 1 und Graben 3 zu beschreiben. Ein Ansatz zur Erklärung dieses Phänomens ist die Betrachtung der Plafondhöhe vom Grabenboden. Weiterhin sollten das bloße Vorhandensein und die Neigung des Bühnenplafonds in Betracht gezogen werden. Über Graben 3 befindet sich ein um 12° ins Publikum geneigter Bühnenplafond, der einen Abstand von 9 m bis 10 m zum Grabenboden hat. Durch die Neigung werden die Reflexionen in den Zuschauerraum gerichtet und deren Energie trifft, wenn überhaupt, dann abgeschwächt innerhalb der zeitlichen Grenzen des ST_{late} beim Hörer im Graben ein. Dadurch ist der ST_{late} in Graben 3 niedriger. Der Bühnenplafond von Graben 1 ist parallel zum Grabenboden, jedoch in Stufen unterteilt. Dadurch nimmt der Abstand des Plafonds zum Grabenboden in Richtung des Publikums zu. Der Abstand beläuft sich auf 13,3 m bis 15,1 m. Durch Beugungseffekte an den Kanten kommt es zu Reflexionen am Bühnenplafond, die den Schall ins Publikum lenken. Die Höhe des Plafonds führt ebenfalls zu längeren Laufzeiten. Die Folge ist ein niedriger ST_{late} . Im Vergleich dazu ist der Plafond von Graben 2 mit 8,4 m niedriger. Außerdem ist er parallel zum Grabenboden ausgerichtet. Somit wird mehr Energie direkt in den Graben zurück reflektiert. Das zeigt sich im Pegel des zugehörigen ST_{late} , welcher - 18,1 dB beträgt. Durch die gleichförmige Reflexion des Plafonds fällt auch die Standardabweichung mit 1,0 dB relativ niedrig aus.

Graben 4 weist im Vergleich der Bestuhlungszustände wie auch schon beim ST_{early} Besonderheiten auf. Der mittlere ST_{late} im stark bestuhlten Zustand ist mit - 17,9 dB um 1,1 dB geringer als der wenig bestuhlte Zustand mit - 16,8 dB. Die Standardabweichung ist im stark bestuhlten Zustand mit 2,2 dB um 1,3 dB höher als die Standardabweichung im wenig bestuhlten Zustand von 0,9 dB. Der Bühnenplafond ist parallel zum Grabenboden und in zwei Höhen unterteilt. Der bühnennahe Teil des Plafonds ist 16,7 m vom Grabenboden entfernt. Dem gegenüber ist der publikumsnahe Teil 19,6 m vom Grabenboden entfernt. Der Unterschied zwischen den beiden ST_{late} Mittelwerten der Bestuhlungsgrade ist auf die von der Bestuhlung abhängigen Diffusität des Grabenbodens zurückzuführen. Ist der Graben mit wenig Stühlen besetzt, so kommt es durch den Grabenboden zu einer Abstrahlung an den Bühnenplafond, der diese Energie zurück in den Graben reflektiert. Eine Erhöhung der Stuhlanzahl führt zu einer diffuseren Schallabstrahlung aus dem Graben. Dadurch kommt es zu weniger Reflexionen am Bühnenplafond und mehr Schall, der in andere Bereiche des Saals, wie zum Beispiel den Zuschauerraum geleitet wird. Durch die Absorption des Zuschauergestühls wird dieser Schall gar nicht oder nur sehr schwach zurück in den Graben reflektiert, was bei den langen Laufwegen einen Einfluss auf den Pegel des ST_{late} hat. Die Standardabweichung nimmt mit mehr Stühlen im Graben ebenfalls zu. Der Grund dafür ist, dass die Stühle alle auf die Dirigentenposition ausgerichtet sind und sich keine größeren Lücken zwischen ihnen befinden. Dadurch kommt es zu einer unregelmäßigen

Anordnung der Reflexionsflächen auf dem Grabenboden und einem inhomogenen Abstrahlverhalten. Das Abstrahlverhalten beeinflusst auch die Reflexion des Schalls zurück in den Graben. Ist also das Abstrahlverhalten des Grabens inhomogen bzw. fokussiert, führt das ebenfalls zu inhomogenem Einfall von Schall zurück in den Graben, welcher die Standardabweichung des mittleren ST_{late} prägt.

Der ST_{late} von Probenraum 3 ist trotz eines Volumens, das nur 14,4 % des Volumens von Graben 4 ausmacht, genauso groß wie dessen ST_{late} . Das ist auf die Diffusität fördernde Wandabwicklung von Probenraum 3 zurückzuführen. Der Saal von Graben 4 ist reichlich mit gepolsterter Bestuhlung gefüllt, die für die Absorption von für den ST_{late} relevante Reflexionen verantwortlich ist. In Probenraum 3 sind die Wände teilweise als mittel- bis hochfrequent reflektierende Plattenschwinger abgewickelt. Zudem ist hinter dem Dirigenten ein großes Volumen vorhanden, was die Halligkeit des Raumes fördert. Somit ist hier die Wandabwicklung ausschlaggebend gegenüber dem Volumen. Weiterhin sind in Probenraum 3 die absorbierenden und reflektierenden Flächen umlaufend gleichmäßiger verteilt als in Graben 4, was zu einem homogeneren Schallfeld und somit einer geringeren Standardabweichung von 0,8 dB im Bereich der Musiker führt. Probenraum 1 ähnelt Probenraum 3 in der Wandabwicklung. Wie in Kapitel 3.4.1 beschrieben, handelt es sich auch um eine Mischung aus Plattenschwingern und mittenbetonter Absorption. Der Unterschied liegt im Volumen. Probenraum 1 verfügt über ein fast dreimal so großes Volumen. Das macht sich bei ähnlicher Wandabwicklung im Pegel des ST_{late} bemerkbar. Da die Platten der Wandkassetten bei Probenraum 1 an den Seitenwänden schräg gestellt sind, ist die Standardabweichung mit 0,4 dB gegenüber Probenraum 3 geringer. Das ist auf die stärkere Diffusität zurückzuführen, welche für ein homogeneres Schallfeld sorgt.

Bühne 1 und Bühne 2 sind bezüglich des ST_{late} einander sehr ähnlich. Der ST_{late} von Bühne 1 beträgt - 13,5 dB mit einer Standardabweichung von 0,4 dB, der von Bühne 2 beträgt - 13,2 dB mit einer Standardabweichung von 0,5 dB. Die gleiche empfundene Halligkeit der beiden Bühnen ist jedoch zunächst nicht mit ihren Volumina zu vereinen. Bühne 2 ist mit 16300 m³ an ein ca. 2,7-mal so großes Volumen wie Bühne 1 mit 6000 m³ angekoppelt. Betrachtet man jedoch die Raumgeometrie beider Bühnen, fallen diese sehr unterschiedlich aus. Bühne 1 öffnet sich zum Publikum hin wie ein Trichter. Zudem sind die Wände des dazugehörigen Saals großflächig mit diffus wirkenden Halbkugелеlementen besetzt. Weiterhin verfügt Bühne 1 durch einen Chorrang hinter ihr über ein nicht zu vernachlässigendes Rückvolumen. Bühne 2 verfügt über glatte, parallele Flächen. Die Decke über der Bühne ist ca. 3,5 m höher als die Decke von Bühne 1. Diese Eigenschaften stützen jedoch keine Erklärung für eine ähnliche Halligkeit. Es ist schwer anhand des ST_{late} nachzuvollziehen, wieso beide Bühnen baulich so unterschiedlich, aber bezüglich des ST_{late} so ähnlich sind. Dieses Problem zeichnet sich bei den weiteren beiden untersuchten Objekten ebenfalls ab. Probenraum 2 und Bühne 3 verfügen beide über ein viel geringeres Volumen als Bühne 1 und Bühne 2. Der Probenraum ist 1500 m³ und die Bühne ist 1700 m³ groß. Jedoch sind beide laut ST_{late} halliger als Bühne 1 und 2. Probenraum 2 verfügt über einen ST_{late} von - 12,1 dB mit einer Standardabweichung von 0,5 dB. Bühne 3 weist einen ST_{late}

von - 11,0 dB mit einer Standardabweichung von 0,2 dB auf. Bei Probenraum 2 handelt es sich um einen Flachraum, der schallstreuende Elemente an der Decke hat. Bühne 3 ist durch seine Wandabwicklung aus gefaltetem Gipskarton und Absorbern, sowie Schallsegeln an der Decke akustisch optimiert. Jedoch führen diese Raumabwicklungen nicht zu einer größeren empfundenen Halligkeit, die mit der von Bühne 1 und 2 verglichen werden kann. Die schlechte Nachvollziehbarkeit des ST_{late} , vor allem bei verschiedenen Volumina und Raumgeometrien, ist auf dessen zeitliche Definition zurückzuführen. Gade untersuchte damals ausschließlich Bühnen, um die auch danach benannten Bühnenparameter zu entwickeln. Deshalb sind die Zeitgrenzen des ST_{early} und des ST_{late} auf diesen Anwendungsbereich angepasst. Das führt jedoch dazu, dass Orchesterspielstätten mit bühnenuntypischen Volumina und Raumgeometrien als hallig eingestuft werden, weil ihre Raumeigenschaften zu viel Energie im Bereich von 0,1 s bis 1 s führen. Die Lösung dafür ist die Einführung neuer zeitlicher Grenzen, die an die jeweilige Raumart angepasst sind. Dabei ließe sich zum Beispiel in Orchestergraben, Proberaum und Bühne bzw. Saal unterscheiden. Diese Unterscheidung überträgt jedoch die Probleme der unterschiedlichen Raumgeometrie in die einzelnen Raumkategorien. Deshalb wäre ein Ansatz, die zeitlichen Grenzen von einem robusten und erprobten akustischen Maß abhängig zu machen, welches stark von der Raumgeometrie bestimmt wird. Dafür eignet sich zum Beispiel die mittlere EDT, welche über alle 1m-Messpositionen im Spielbereich bestimmt wurde. Diese würde die Raumgeometrie in die Wahl der Zeitgrenzen mit einbeziehen und eine Art Normierung der Bühnenmaße herbeiführen, was es möglich macht, diese besser miteinander zu vergleichen. Eine dafür geeignete Berechnungsvorschrift, die gut reproduzierbar ist, wäre zu erarbeiten.

Es lässt sich allgemein zusammenfassen, dass der ST_{late} nur bedingt aussagekräftig für die Einschätzung der Halligkeit einer Orchesterspielstätte ist. Dabei scheint er nicht direkt vom Volumen, sondern eher von der Wand- und Deckenabwicklung abhängig zu sein. Es konnte ebenfalls ein starker Einfluss des Bestuhlungsgrads nachgewiesen werden. Es gestaltet sich jedoch schwierig, die Gründe für bestimmte ST_{late} Werte zu benennen. Diese Uneindeutigkeit könnte mit einer Anpassung der Zeitgrenzen in der Berechnung kompensiert werden, muss jedoch noch genauer untersucht werden, um belastbare Aussagen zu treffen.

4.3 Early Ensemble Level

Das EEL wurde ebenfalls mittels des in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Auswertungsprogramms „ABD-OrAnG.exe“ berechnet. Aus den Impulsantworten wurde über die Formel Gades, das EEL der Quelle zu allen anderen Senderpositionen und der Dirigentenposition bestimmt. Somit entspricht die Anzahl der EEL-Werte pro Orchesterspielstätte dem Quadrat der Anzahl der Quellenpositionen. Aus diesen Werten konnte dann Matrix erstellt werden, welche die Übertragung des Schalls zwischen den Messpositionen der Orchesterspielstätte illustriert. Die Matrizen der untersuchten Orchesterspielstätten sind im Anlage 1 zu finden.

Da das EEL nicht in der DIN EN ISO 3382-1 aufgeführt ist, gibt es keine Angaben über einen zu erwartenden Wertebereich. Zudem gestaltet es sich schwierig, die EEL-Matrizen aufgrund ihres Wertebereichs direkt miteinander zu vergleichen. Deshalb wurde sich in dieser Arbeit dazu entschieden, den Mittelwert des EEL zu bilden und die Orchesterspielstätten anhand ihrer Standardabweichung miteinander zu vergleichen. Die Standardabweichung des EEL gibt eine Auskunft darüber, wie stark ortsabhängig die Übertragung zwischen Quellenpositionen in einer Orchesterspielstätte ist. Ein direkter Vergleich ist in Form eines Balkendiagramms in Abbildung 13 dargestellt.

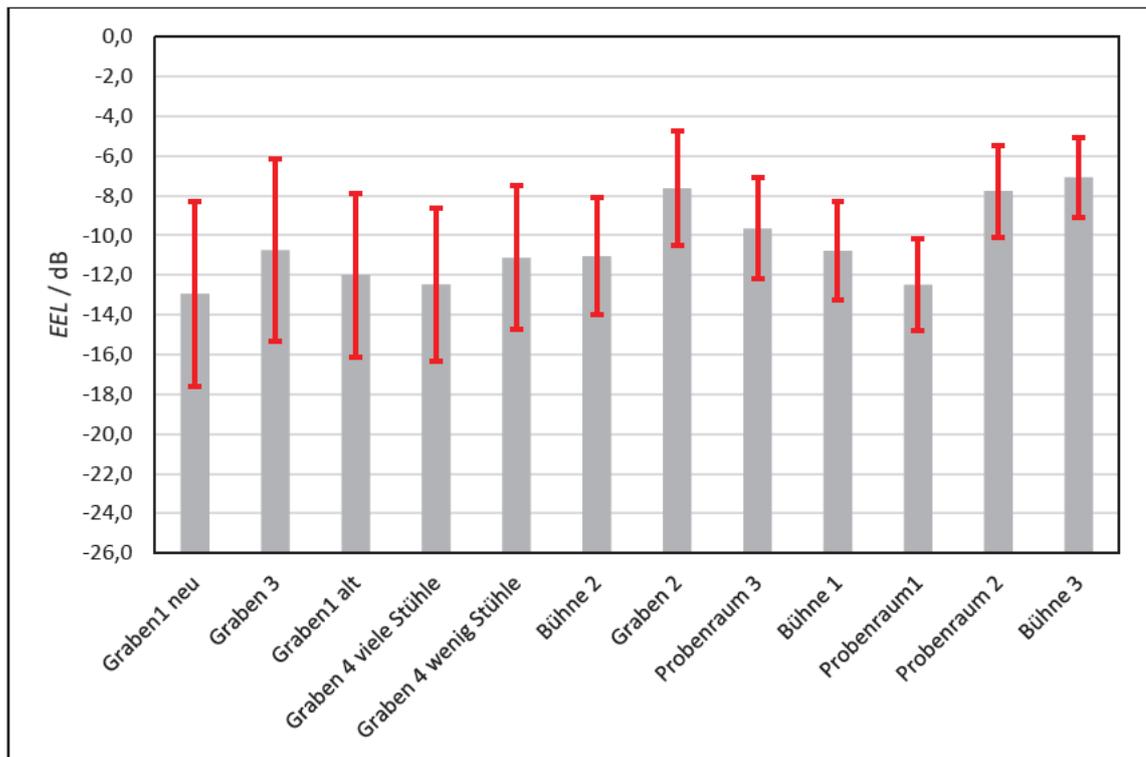


Abbildung 16: Mittleres EEL der Orchesterspielstätten mit jeweiliger Standardabweichung

Im Gegensatz zu ST_{early} und ST_{late} wurden in Abbildung 13 die Orchesterspielstätten entsprechend ihrer Standardabweichung entlang der x-Achse sortiert. Dabei ist mit einer hohen Standardabweichung eine starke Ortsabhängigkeit verbunden, die umso geringer ist, je mehr sich die Standardabweichung verkleinert.

Graben 1, 3 und 4 besitzen eine Standardabweichung welche größer als 3 dB ist und lassen sich somit gruppieren. Graben 2 bricht aus dieser Gruppierung mit einer Standardabweichung von 2,9 dB etwas aus. Die geringere Abweichung ist jedoch auf sein geringes Volumen und den somit nah beieinander liegenden Messpositionen zu erklären. Außerdem trägt der niedrige, parallele Bühnenplafond ebenfalls zu einer guten Übertragung zwischen Sender und Empfänger bei. Die Standardabweichung von Bühne 2 ist ebenfalls mit 2,9 dB zu beziffern. Die im Vergleich zu den anderen Bühnen größere Standardabweichung kann mit der glatten und dadurch nicht diffusen Wandabwicklung, sowie der hohen parallelen Decke über der Bühne begründet werden. Probenraum 2, Probenraum 3 und Bühne 1 sind

dagegen akustisch optimiert und verfügen über ein kleineres Volumen. Deshalb weisen sie eine geringere Standardabweichung im Bereich von 2,3 dB bis 2,6 dB auf. Probenraum 2 wird ebenfalls durch eine Standardabweichung von 2,3 dB charakterisiert. Diese ist jedoch nicht durch eine akustische Optimierung, sondern durch die Geometrie als Flachraum mit diffuser Decke bedingt. Seine Eigenschaften als Flachraum werden auch nicht anhand des mittleren Pegels des EEL ersichtlich. Bühne 3 setzt sich auch hier gegenüber den anderen Orchesterspielstätten ab. Mit einer Standardabweichung von 2,0 dB verfügt sie über die geringste Ortsabhängigkeit des EEL. Das ist dem für eine Bühne geringen Volumen des Saals und dem zuvor in Kapitel 3.3.3 beschriebenen Akustikkonzept zuzuschreiben.

Es lässt sich allgemein zusammenfassen, dass das EEL aufgrund einer mangelnden Bewertungsgrundlage schlecht einzuschätzen ist. Betrachtet man jedoch seine Standardabweichung, lassen sich eindeutige Zusammenhänge dieser mit der Art der Orchesterspielstätte feststellen. Dabei ist den Orchestergräben eine Standardabweichung von 2,9 dB und größer zuzuordnen. Bühnen und Proberäume sind mit einer Standardabweichung kleiner als 2,9 dB zu beziffern. Dabei liegt die geringste in dieser Arbeit zu verzeichnende Standardabweichung bei 2,0 dB und die höchste bei 4,7 dB. Besondere Raumgeometrien, wie zum Beispiel Flachräume, können anhand der Standardabweichung und dem mittleren Pegel des EEL nicht erkannt werden.

4.4 Ergebnisse der Fragebögen

Der den Musikern übermittelte Fragebogen umfasste 11 Fragen. Sechs dieser Fragen dienten der Identifikation der üblichen Spielposition des Musikers im Ensemble und falls eine Antwort stark abweichen sollte, der Bestimmung von akustischen Anomalien an diesem. Die Ergebnisse dieser Fragen sollen in der Auswertung nicht betrachtet werden. Dieses Kapitel vergleicht die Mittelwerte der Antworten auf die Fragen nach dem allgemeinen akustischen Raumeindruck, wie gut man das eigene und andere Instrumente hört, wie stark die empfundene Halligkeit ist und als wie laut der Spielort wahrgenommen wird. Zusätzlich zum Mittelwert wird auch die Standardabweichung der jeweiligen Antworten angegeben, um die Antwortbreite abzubilden.

Um die Verlässlichkeit der Antworten einschätzen zu können, ist es wichtig, die Anzahl an Antworten auf den Fragebogen des jeweiligen Objekts zu kennen. Deshalb sind in Tabelle 4 die einzelnen Orchesterspielstätten mit ihrer Anzahl an Antworten aufgeführt. Dabei ist anzumerken, dass es nicht möglich war eine Orchesterbefragung für Graben 3 und den alten Zustand von Graben 1 durchzuführen. Außerdem wurde für jede Orchesterspielstätte ein anderes Orchester befragt. Somit können die Empfindungen und das Gespür für die Akustik aufgrund der verschiedenen Musikerhintergründe und Erfahrungen zwischen den Objekten voneinander abweichen.

Tabelle 4: Anzahl der Antworten je Orchesterspielstätte

Graben 1 neu	27	Bühne 3	7
Graben 2	21	Probenraum 1	33
Graben 4 viele Stühle	31	Probenraum 2	14
Bühne 1	20	Probenraum 3	23
Bühne 2	36		

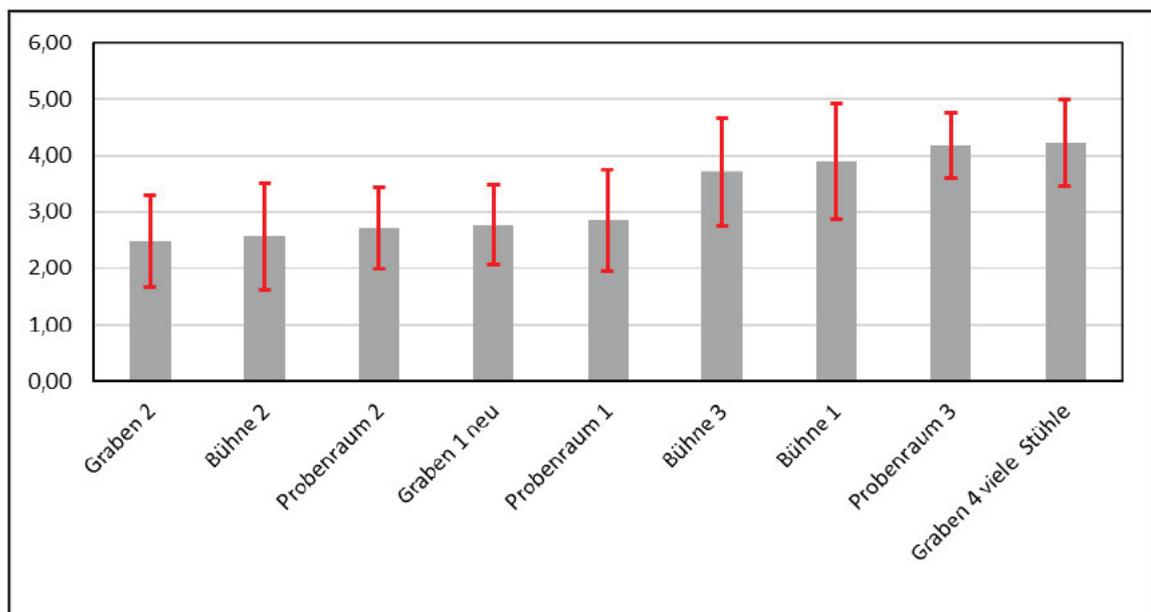


Abbildung 17: OAI in der jeweiligen Orchesterspielstätten

Das in Abbildung 14 dargestellte Balkendiagramm zeigt den Mittelwert des allgemeinen akustischen Raumeindrucks (OAI), der aus den Antworten der jeweiligen Orchester berechnet wurde. Dabei konnte eine schlechte OAI mit einer 1 bewertet und eine gute OAI mit einer 5 bewertet werden. Weiterhin ist pro Balken die dazugehörige Standardabweichung angetragen. Betrachtet man Abbildung 14 fällt auf, dass sich Bühne 1, Bühne 3, Graben 4 und Probenraum 3 stark von den anderen Orchesterspielstätten abheben. Ihre OAI liegen im Bereich von 3,71 bis 4,23 und ordnen sie als allgemein akustisch gut ein. Die anderen Spielstätten schneiden mit OAI im Bereich von 2,45 bis 2,85 mittelmäßig bis schlechter ab. Doch beziehen sich diese Annahmen nur auf den Mittelwert der Antworten. Wird zusätzlich noch die Standardabweichung betrachtet, kann eine feinere Zuordnung vorgenommen werden. Demnach sind Graben 2 und Bühne 2 als mittelmäßig bis schlecht, Probenraum 1 und 2, sowie Graben 1 neu als mittelmäßig, Bühne 1 und Bühne 3 als mittelmäßig bis gut und Probenraum 3 sowie Graben 4 als gut zu beurteilen. Die so erstellte Einteilung ist jedoch mit Vorbehalt zu betrachten, da die jeweiligen Standardabweichungen nicht über die gleiche

Stichprobenmenge verfügen und eine geringere Stichprobenmenge zu einer größeren Abweichung führen kann.

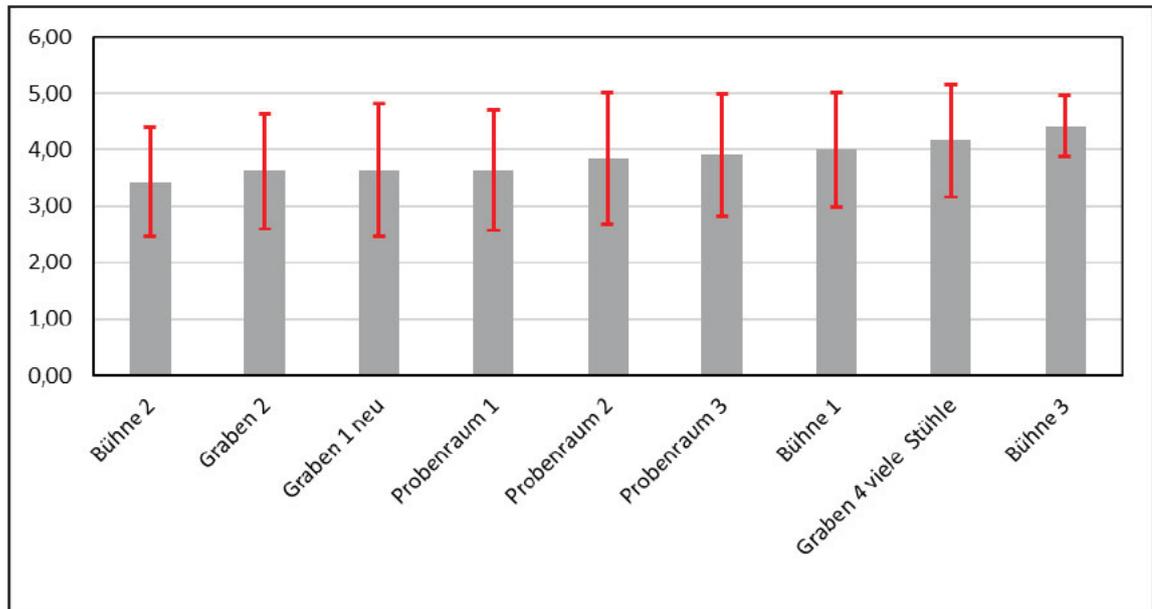


Abbildung 18: Hören des eigenen Instruments in der jeweiligen Orchesterspielstätte

Die Frage nach dem Hören des eigenen Instruments wurde für alle Orchesterspielstätten allgemein als gut beantwortet. Deren Antworten sind als Vergleich der Spielstätten in Abbildung 18 dargestellt. Trotzdem lassen sich Gruppierungen innerhalb der als gut zu bezeichnenden Antworten feststellen. Bühne 2, Graben 2, Graben 1 neu und Probenraum 1 sind im Bereich von 3,40 bis 3,65 einzuordnen. Probenraum 2, Probenraum 3 und Bühne 1 heben sich bezüglich des Hörens des eigenen Instruments von den zuvor genannten etwas ab. Die Musikereinschätzung dieser Spielstätten liegt zwischen 3,85 und 4,00. Mit einer Musikerbewertung von 4,43 und einer Standardabweichung von 0,53 sticht Bühne 3 bezüglich der Selbstwahrnehmung der Musiker heraus. Die anderen Objekte verfügen dagegen über zueinander sehr ähnliche Standardabweichungen, die im Mittel 1,06 betragen. Die Abweichung von Bühne 3 zu den anderen Spielstätten in den Punkten Musikerbewertung und Standardabweichung ist auf deren Stichprobengröße von 7 Antworten zurückzuführen, welche ebenfalls stark von allen anderen Orchesterspielstätten abweicht. Für die anderen Spielstätten lässt sich jedoch auch feststellen, dass die Selbstwahrnehmung der Instrumente bei allen Musikern als gut zu beschreiben ist und sich nur fein unterscheidet. Dabei sind auch die Standardabweichungen der jeweiligen Objekte ähnlich.

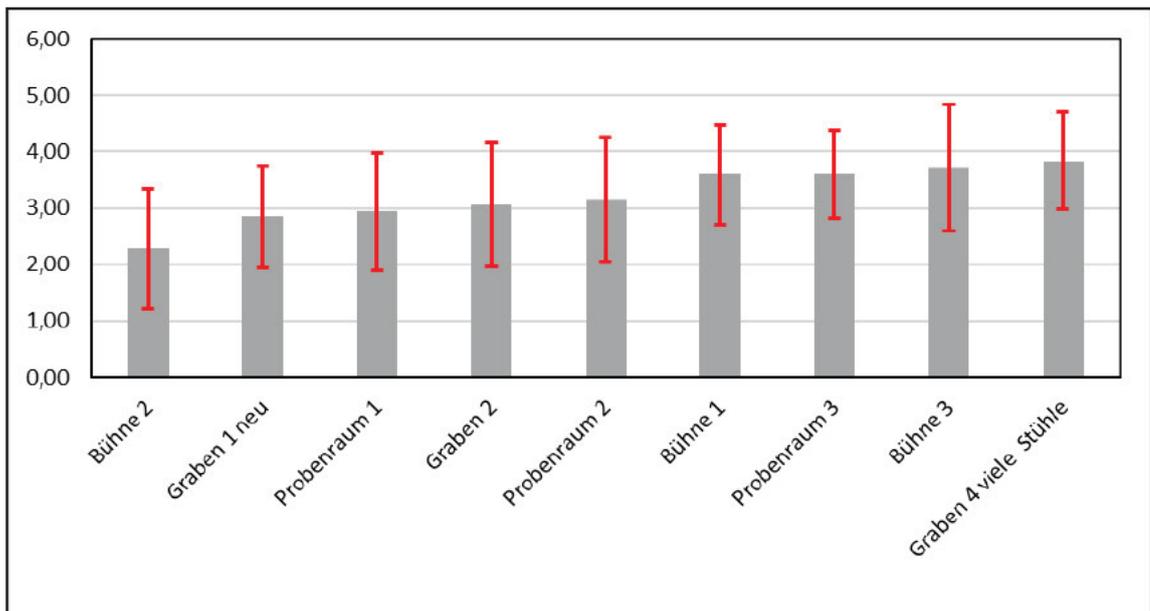


Abbildung 19: Hören der anderen Instrumente in der jeweiligen Orchesterspielstätte

Die Bewertung des Hörens anderer Instrumente lässt sich in drei Bereiche einordnen. Bühne 2 ist mit einer Bewertung von 2,29 als schlecht einzuordnen. Dem nächsten Bereich sind Graben 1 neu, Graben 2, Probenraum 1 und Probenraum 2 mit Werten von 2,85 bis 3,15 zuzuschreiben. Damit sind die Objekte bezüglich ihrer Bewertung als mittelmäßig einzustufen. Bühne 1, Bühne 3, Graben 4 und Probenraum 3 weisen Bewertungen im Bereich von 3,60 bis 3,84 auf. Somit wird das Hören anderer in diesen Spielstätten als gut befunden. Die Standardabweichung der Antworten in den Spielstätten weicht nicht zu sehr zwischen den Objekten ab und bewegt sich in einem Bereich von 0,78 bis 1,11. Grundsätzlich werden also die Spielstätten bezüglich des Hörens anderer als mittelmäßig bzw. gut eingeschätzt. Bühne 2 weicht stark vom Rest der anderen Bewertungen ab. Es scheinen die Raumgeometrie und Wandabwicklung der Schalleitung zwischen Musikern nicht dienlich zu sein. Außerdem kann die Abweichung durch eine Verdrossenheit der Musiker überhöht sein, da das Problem des schlechten gegenseitigen Hörens schon seit Bau der Bühne besteht. Da Bühne 2 über die größte Stichprobenanzahl verfügt, kann davon ausgegangen, dass die Werte belastbar sind.

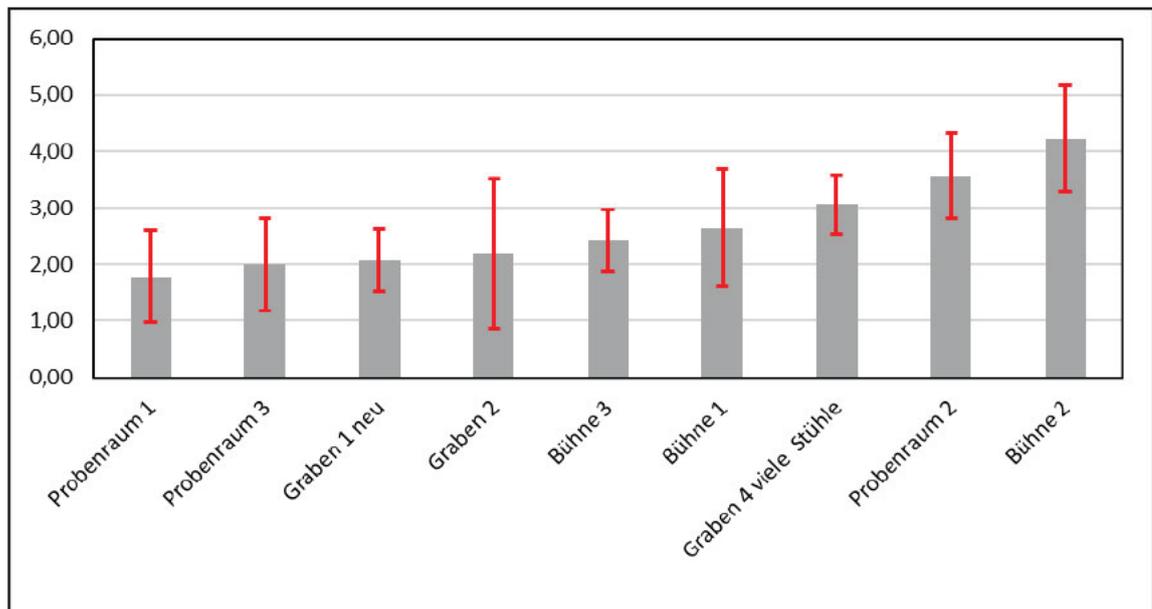


Abbildung 20: Empfundene Halligkeit in der jeweiligen Orchesterspielstätte

Abbildung 20 stellt die gemittelten Antworten der Musiker auf die Frage nach der empfundenen Halligkeit je Orchesterspielstätte dar. Dabei ist die semantische Skala von 1 bis 5 wie folgt zu verstehen. Die 1 steht für das Empfinden der Spielstätte als trocken. Die 5 repräsentiert das Empfinden der Orchesterspielstätte als hallig. Aus Ermangelung eines Begriffs für den Zwischenzustand, der einer Wertung von 3 entspricht, wird diese im folgenden Abschnitt als ausgewogen beschrieben. Bühne 2 und Probenraum 2 sind die einzigen Spielstätten, die von den Musikern als hallig bis sehr hallig bewertet wurden. Bühne 1 und Bühne 3 mit Wertungen von 2,43 und 2,65 und auch Probenraum 2 reichen nahe an die Beschreibung als ausgewogen heran. Graben 1 neu, Graben 2, sowie Probenraum 1 und Probenraum 3 wurden mit Wertungen im Bereich 1,79 bis 2,19 eher als trocken beschrieben. Als fast perfekt ausgewogen wurde Graben 4 mit einer Wertung von 3,07 durch die zugehörigen Musiker eingeschätzt. Besonders auffällig ist die Standardabweichung der Antworten von Graben 2. Sie weist im Gegensatz zum Mittel der anderen Standardabweichungen von 0,75 den Wert 1,33 auf, was auf einen signifikant ortsabhängigen Halligkeitseindruck der Musiker schließen lässt. Dieser ist auf den hohen Überdeckungsgrad und das geringe Volumen zurückzuführen. Sitzt ein Musiker unter einem weitläufig überdeckten Teil des Grabens, unterscheidet sich sein Höreindruck nachweislich von dem eines Musikers unter der Grabenöffnung. Da die Halligkeit starken Einfluss auf den Höreindruck hat, ist die starke Standardabweichung von Graben 2 sinnfälliger. Eine weitere Beobachtung ist, dass die einzigen Orchesterspielstätten, deren mittlere Wertung 3,0 signifikant übersteigt, diejenigen sind, die keine Form von aktiv geplanten akustisch absorbierenden Oberflächen haben. Dieser Umstand kann ein Grund für ihre wahrgenommene Halligkeit sein.

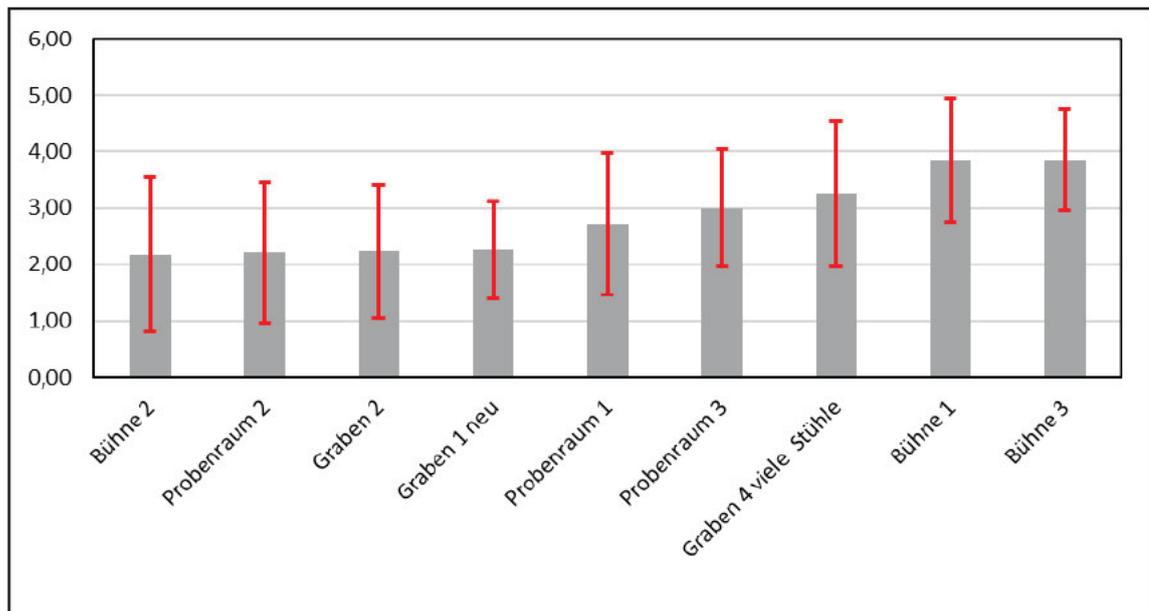


Abbildung 21: Empfundene Lautstärke in der jeweiligen Orchesterspielstätte

In Abbildung 21 werden die Ergebnisse der Antworten auf die Frage nach der empfundenen Lautstärke einander gegenübergestellt. Dabei beschreibt eine Wertung von 1 die Spielstätte als deutlich zu laut und eine Wertung von 5 sie als angemessen laut. Dieser Vergleich lässt sich wieder in Gruppierungen unterteilen. Bühne 2, Probenraum 2, Graben 1 und Graben 2 werden von den Musikern als zu laut eingeschätzt. Darauf folgen in Abstufungen Probenraum 1 mit einer Wertung von 2,72, Probenraum 3 mit 3,00 und Graben 4 mit 3,26. Diese drei können allgemein als etwas zu laut beschrieben werden. Bühne 1 und Bühne 3 werden mit 3,85 und 3,86 als am wenigsten zu laut bis angemessen beschrieben und stellen somit die am besten bewerteten Orchesterspielstätten bezüglich der Lautstärke dar.

Allgemein lässt sich aus der Auswertung der Fragebögen entnehmen, dass Bühne 1, Bühne 3, Probenraum 3 und Graben 4 von den Musikern gut angenommen werden. Die anderen Orchesterspielstätten werden besser angenommen, als zuvor aus Erfahrungsberichten zu erwarten war, weisen jedoch bezüglich bestimmter Charakteristiken einige Probleme auf. Ein sehr ernst zu nehmendes Problem der Spielstätten ist die zu hohe Lautstärke. Sie ist aus Erfahrung der größte Einflussfaktor für die Akzeptanz einer Orchesterspielstätte, da sie direkt das akustische Wohlbefinden der Musiker beeinflusst. Zudem bringt eine hohe Lautstärke das Potenzial für gesundheitliche Schäden mit sich, was die Wichtigkeit ihrer Regulierung noch verschärft. Bei allen Betrachtungen ist auch zu beachten, dass Befragte dazu neigen, leicht von der Mitte abweichende Antworten zu geben. Somit bilden Fragebögen drastische Unterschiede meist nur abgeschwächt ab.

4.5 Korrelationen der Bühnenmaße mit Ergebnissen der Fragebögen

Um ein umfassenderes Verständnis für die Bühnenmaße zu gewinnen, wurden Orchesterbefragungen durchgeführt. Die dabei für die Korrelation ausgelegten Fragen des Fragebogens wurden mit semantischen Skalen beantwortet. Das ermöglicht es, aus den Antworten einen numerischen Mittelwert zu bestimmen. Diese Mittelwerte konnten dann mit den Mittelwerten der Bühnenmaße einer Orchesterspielstätte über das Korrelationsverfahren abgeglichen werden. Die Bühnenmaße wurden mit dem allgemeinen akustischen Raumeindruck, der Wahrnehmung des eigenen Instruments, der Wahrnehmung anderer Instrumente und der empfundenen Halligkeit sowie der empfundenen Lautstärke korreliert. Der folgende Kapitelabschnitt präsentiert die dabei erlangten Ergebnisse.

Um sofort kenntlich zu machen, ob und wie stark ein Bühnenparameter mit dem zu untersuchenden Gegenstück korreliert, wurde eine Farbcodierung entsprechend positiver und negativer Korrelation und deren Stärke vorgenommen. Dabei wurde sich an den in Tabelle 3 festgelegten Grenzen orientiert. Die Legende für die gewählte Farbcodierung ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Legende für die Farbcodierung der Ergebnisse nach Korrelationsgrad

Korrelationsgrad	Negative Korrelation	Positive Korrelation
Gering	0,0 bis -0,5	0,0 bis 0,5
Moderat	-0,5 bis -0,7	0,5 bis 0,7
Hoch	-0,7 bis -0,9	0,7 bis 0,9
Perfekt	-0,9 bis -1,0	0,9 bis 1,0

In Tabelle 6 sind die Korrelationsgrade mit dem ST_{early} und dessen Standardabweichung zu sehen. Die abgebildeten Korrelationsgrade für den ST_{early} erreichen alle nicht die Grenze für eine moderate Korrelation. Betrachtet man die mittleren Ergebnisse der Fragebögen, fällt auf, dass diese für das Hören des eigenen Instruments untereinander sehr ähnlich sind. Dafür spricht auch der Korrelationsgrad der Standardabweichung des ST_{early} welcher mit einem Wert von -0,68 eine moderate, fast eine hohe Korrelation mit der Selbstwahrnehmung der Musiker anzeigt. Jedoch korreliert die Standardabweichung des ST_{early} mit einem Grad von -0,58 ebenfalls moderat mit den Antworten auf das Hören anderer und mit einem Wert von -0,59 auch mit der empfundenen Lautstärke. Somit ist infrage zu stellen, ob der Mittelwert des ST_{early} für diesen Vergleich aussagekräftig ist und ob eine genauere Untersuchung der Unterschiede innerhalb eines Objekts nicht aufschlussreicher wäre. Deshalb wurde eine solche genauere Untersuchung am Beispiel von Graben 1 im akustisch optimierten Zustand vorgenommen.

Tabelle 6: Korrelation des ST_{early} und dessen Standardabweichung mit den Antworten auf den Fragebogen

	OAI?	Selbst?	Andere?	Halligkeit?	Lautstärke?
ST_{early}	-0,29	-0,01	0,03	-0,26	-0,36
$s-ST_{early}$	-0,47	-0,68	-0,58	-0,38	-0,59

Um ein Objekt genauer untersuchen zu können, müssen folgende Vorgaben erfüllt sein. Es werden genügend Messpunkte im Graben benötigt, um eine gute Aufgliederung des Schallfelds zu erreichen. Es sollte pro Instrumentengruppe einen zuordenbaren Messpunkt geben. Weiterhin ist es wichtig über eine große Stichprobe bzw. viele Antworten auf den Fragebogen zu verfügen. Sind die Voraussetzungen erfüllt, müssen die Aussagen den Messpunkten zugeordnet und für diese gemittelt werden. Es ergibt sich eine Tabelle mit den Messpunkten und deren Bühnenmaßen nach Norm, sowie den zugehörigen gemittelten Musikerantworten. Eine solche Zuordnung kann dann die Bühnenparameter mit den Antworten korrelieren und eine feinere Auflösung für die jeweilige Orchesterspielstätte bieten. Die fein aufgelöste Korrelation des ST_{early} für Graben 1 ist in Tabelle 7 zu sehen. Sie bestätigt die Ergebnisse der Untersuchung Gades, da der höchste Korrelationsgrad des ST_{early} der Selbstwahrnehmung der Musiker zuzuordnen ist. Es handelt sich dabei um eine moderate Korrelation mit einem Korrelationsgrad von 0,53. Die Korrelation mit den anderen Antworten auf den Fragebogen ist im Gegensatz dazu geringfügig. Der einzige Korrelationsgrad, der fast an eine negativ moderate Korrelation herankommt, ist der des ST_{early} und der empfundenen Halligkeit, was ebenfalls sinnfällig wäre.

Tabelle 7: Korrelation des ST_{early} mit den Antworten der Fragebögen für Graben 1

	OAI?	Selbst?	Andere?	Halligkeit?	Lautstärke?
ST_{early}	0,34	0,53	-0,22	-0,44	0,32

In Tabelle 8 ist die Korrelation des mittleren ST_{late} mit den Antworten auf den Fragebogen dargestellt. Der maximale Korrelationsgrad tritt mit 0,48 bei der Frage nach der empfundenen Halligkeit auf. Die Korrelation ist folglich knapp an der Grenze zu einer moderaten Korrelation. Da sie jedoch das Korrelationsmaximum der Korrelationen des ST_{late} mit dem Fragebogen ist, bestätigt sie zumindest teilweise die Definition des Parameters als Anzeiger für die empfundene Halligkeit. Die anderen Antworten auf den Fragebogen korrelieren deutlich geringer mit dem mittleren ST_{early} und dessen Standardabweichung.

Tabelle 8: Korrelation des ST_{late} und dessen Standardabweichung mit den Antworten auf den Fragebogen

	OAI?	Selbst?	Andere?	Halligkeit?	Lautstärke?
ST_{late}	0,01	0,34	0,03	0,48	0,34
$s-ST_{late}$	0,21	0,03	0,20	-0,05	-0,15

Analog zum ST_{early} wurde der ST_{late} ebenfalls exemplarisch für Graben 1 mit den Antworten der Musiker in feinerer Auflösung korreliert. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Korrelation des ST_{late} mit den Antworten der Fragebögen für Graben 1

	OAI?	Selbst?	Andere?	Halligkeit?	Lautstärke?
ST_{late}	0,42	-0,25	0,12	0,55	-0,30

In der fein aufgelösten Korrelation des ST_{late} ist der Parameter wirksam und entspricht seiner Definition, das Empfinden der Musiker darzustellen. Er weist mit einem Korrelationsgrad von 0,55 eine moderate Korrelation mit dem Halligkeitsempfinden der Musiker in Graben 1 auf. Die nächststärkere Korrelation besteht mit der OAI und einem Wert von 0,42 und ist dementsprechend als geringfügig einzuordnen.

Das EEL wurde ebenfalls mit den Antworten der Musiker korreliert, doch kam es nicht zu einem signifikanten Korrelationsgrad. Eine maximale Korrelation trat mit der Selbstwahrnehmung und einem Grad von 0,34 auf. Dieser kann jedoch aufgrund der Stichprobengröße noch als geringfügig bezeichnet werden. Somit trifft auch für die in dieser Arbeit untersuchten Orchesterspielstätten zu, dass das EEL nicht die empfundene Leichtigkeit des Zusammenspiels repräsentiert.

Tabelle 10: Korrelation des EEL und dessen Standardabweichung mit den Antworten auf den Fragebogen

	OAI?	Selbst?	Andere?	Halligkeit?	Lautstärke?
EEL	-0,09	0,34	0,21	0,09	0,09
s-EEL	-0,07	-0,27	-0,18	-0,03	-0,34

Da der Mittelwert und dessen Standardabweichung von einer Normalverteilung ausgehen, wurden die mittleren Bühnenmaße ebenfalls mit dem Median der Musikerantworten korreliert. Möglicherweise repräsentiert er die Antworten der Musiker besser. Wie in Tabelle 11 jedoch zu sehen ist, kam es dadurch nur bei der Standardabweichung des ST_{early} und dem Empfinden der Lautstärke zu einer moderaten negativen Korrelation. Diese ist sinnfälliger, da eine geringere Standardabweichung des ST_{early} durch weiter entfernte Reflexionsflächen hervorgerufen wird. Je weiter die Reflexionsflächen auseinanderrücken, desto geringer wird auch der Pegel zwischen ihnen und deshalb auch die empfundene Lautstärke. Somit ist diese Korrelation zu einem gewissen Maße schlüssig. Alle anderen Maße korrelieren nur gering oder gar nicht mit den Medianen der Antworten der Musiker.

Tabelle 11: Korrelation der mittleren Bühnenmaße und deren Standardabweichung mit dem Median der Musikerantworten

	OAI? (Median)	Selbst? (Median)	Andere? (Median)	Halligkeit? (Median)	Lautstärke? (Median)
ST_{early}	-0,34	0,34	-0,01	-0,31	-0,30
s-ST_{early}	-0,33	-0,12	-0,46	-0,25	-0,64
ST_{late}	-0,20	-0,27	-0,02	0,43	0,24
s-ST_{late}	0,32	0,21	0,16	-0,10	0,11
EEL	-0,25	0,14	0,13	-0,01	0,06
s-EEL	0,06	-0,02	-0,15	-0,03	-0,15

Allgemein lässt sich zusammenfassen, dass die Mittelwerte der Bühnenparameter bei der gegebenen Stichprobengröße von acht Orchesterspielstätten keine signifikanten Korrelationen zu den Mittelwerten oder Medianen der Musikerbefragung aufweisen. Die einzige Ausnahme bildet die Standardabweichung des ST_{early}. Wird sie geringer kommt es zu einem höheren Lautstärkeempfinden der Musiker. Aufgrund dessen ist die Annahme zu treffen, dass alle anderen untersuchten Maße keine Auskunft über das Musikerempfinden im Vergleich der Spielstätten geben. Somit ist ein Vergleich von Orchesterspielstätten nur über die Standardabweichung des ST_{early} bezüglich der zu erwartenden empfundenen Lautstärke möglich.

Die vorangegangenen Aussagen wurden aufgrund der in dieser Arbeit untersuchten Parameter und Fragebögen getroffen und sollen die Ergebnisse der Korrelationen zusammenfassen. Um eine größere Verlässlichkeit der Korrelationen zu gewährleisten und um die Ergebnisse zu verifizieren, sind weitere Untersuchungen mit höherer Stichprobengröße durchzuführen. Weiterhin ist anzumerken, dass das verwendete Korrelationsverfahren nur lineare Zusammenhänge abbildet. Gibt es einen exponentiellen oder logarithmischen Zusammenhang zwischen den Parametern, so wird dieser nicht erkannt. Trotz der fehlenden Korrelation im Vergleich der Mittelwerte konnten ST_{early} und ST_{late} gemäß ihrer Definition im nicht gemittelten und objektgebundenen Zustand verifiziert werden. Dieses Verfahren gestaltet sich jedoch für viele Objekte und im Zusammenhang mit Musikerbefragungen als kleinteilig und zeitintensiv, weshalb es nur exemplarisch für Graben 1 durchgeführt wurde.

4.6 Korrelation mit weiteren Parametern

Zusätzlich zur Korrelation der mittleren Bühnenmaße und ihrer Standardabweichung mit dem Fragebogen wurden auch andere raumbeschreibende Parameter mit den Bühnenparametern und den Musikerantworten korreliert. Die Korrelationsmatrix aller Parameter und Antworten zueinander ist in Anlage 2 zu finden. In folgendem Abschnitt sollen die Ergebnisse dieser umfassenderen Korrelation ausgewertet werden. Dabei werden Korrelationsreihen präsentiert, die für die Bewertung von Orchestergräben signifikante Korrelationen aufweisen.

Tabelle 12: Korrelation der Bühnenmaße mit raumbeschreibenden Parametern

	Volumen	Decken- höhe über den Musi- kern	Stuhlanzahl	EDT
ST_{early}	-0,72	-0,73	-0,39	-0,87
ST_{late}	0,27	0,25	-0,24	0,66
EEL	-0,35	-0,34	-0,56	-0,18
$ST_{\text{early}}/ST_{\text{late}}$	0,58	0,55	0,10	0,93

In Tabelle 12 ist ein Ausschnitt aus der umfassenderen Korrelation zu sehen, welcher die Bühnenmaße und das Verhältnis zwischen ST_{early} und ST_{late} mit den raumbeschreibenden Parametern Volumen, Deckenhöhe über den Musikern, Stuhlanzahl und EDT korreliert. Als Deckenhöhe wurde für die stark überdeckten Gräben die Höhe der Überdeckung angesetzt.

Wie anhand der Farbcodierung zu sehen ist, weist der ST_{early} eine hohe negative Korrelation mit dem Volumen, der Deckenhöhe über den Musikern und der EDT auf. Das bedeutet, dass sich das Hören des eigenen Instruments verbessert, wenn das Volumen kleiner wird und deshalb wichtige Reflexionsflächen näher rücken. Da die EDT maßgeblich vom Volumen bestimmt ist, wird sie bei einem steigenden ST_{early} und einem somit kleiner werdenden Volumen ebenfalls geringer. Dabei ist die Bestimmung der EDT durch das Volumen in der umfassenderen Korrelation durch einen Korrelationsgrad von 0,80 ersichtlich.

Der ST_{late} weist nur eine positive, moderate Korrelation mit der EDT auf. Das lässt darauf schließen, dass er stärker durch die akustisch wirksame Abwicklung der Oberflächen als durch die Raumgeometrie beeinflusst wird. Der Grund für diese Annahme war die fehlende Korrelation mit dem Volumen und der Deckenhöhe über den Musikern, welche beschreibend für die Raumgeometrie sind.

Das EEL weist als einziges Bühnenmaß eine Korrelation mit der Stuhlanzahl im Graben auf. Die Korrelation fällt dabei negativ und moderat aus. Das bedeutet, dass ein Einbringen von mehr Stühlen zu einer Verringerung des EEL sorgt. Da das EEL als ein Maß für die Schallübertragung zwischen Musikern definiert ist, ist die Korrelation erklärbar. Werden mehr Reflexionsflächen in Form von Stühlen zwischen Sender und Hörer eingebracht, so kommt es durch Abschattung und Reflexion aus dem Schallweg heraus zu einem geringeren EEL.

Da das Verhältnis zwischen ST_{early} und ST_{late} charakterisierend für bestimmte Spielstätten sein könnte, wurde dessen Korrelation auch untersucht. Mit den Antworten der Orchesterbefragung kam es nicht zu einer Korrelation. Bezüglich der raumbeschreibenden Parameter konnte jedoch die einzige perfekte Korrelation eines berechneten Parameters festgestellt werden. Das Verhältnis aus ST_{early} und ST_{late} korreliert positiv perfekt mit einem Grad von 0,93 mit der EDT. Da ST_{early} und ST_{late} beide über einen negativen Pegel verfügen, ist zu folgern, dass die EDT zunimmt, wenn der ST_{early} abnimmt oder der ST_{late} zunimmt. Diese starke Korrelation bestätigt weiterhin die schon zuvor gezeigte Abhängigkeit zwischen der

EDT und dem ST_{early} bzw. dem ST_{late} . Es kommt ebenfalls zu einer positiven, moderaten Korrelation des Verhältnisses mit dem Volumen und der Deckenhöhe.

In Tabelle 13 ist die Korrelation vom Median der Selbstwahrnehmung und der empfundenen Halligkeit, sowie dem Mittelwert der empfundenen Halligkeit mit den raumbeschreibenden Parametern aus Tabelle 12 dargestellt.

Die Selbstwahrnehmung weist eine hohe negative Korrelation mit dem Volumen und eine moderate negative Korrelation mit der EDT auf. Beide Korrelationen sind nachvollziehbar, da bei einem geringeren Volumen die Wände näher rücken, dadurch die EDT geringer wird und der Anteil an frühen Reflexionen steigt. Durch vermehrte frühe Reflexionen kommt es zu einer erhöhten Selbstwahrnehmung.

Der Median und der Mittelwert der empfundenen Halligkeit korrelieren ebenfalls moderat, jedoch positiv mit dem Volumen und der EDT. Somit bestätigt sich die Korrelation der Selbstwahrnehmung, da das Halligkeitsempfinden sich invers zur Selbstwahrnehmung verhält. Wird das Volumen größer, wird die EDT größer und das Halligkeitsempfinden nimmt zu. Parallel dazu nimmt die Selbstwahrnehmung ab.

Die beschriebenen Korrelationsergebnisse aus Tabelle 13 bestätigen die Aussagekräftigkeit der Musikerbefragungen, da sie schon bekannte Zusammenhänge bestätigen und somit anzeigen, ob die Befragten entsprechend dieser geantwortet haben.

Tabelle 13: Korrelation der Musikerantworten mit raumbeschreibenden Parametern

	Volumen	Raumhöhe über den Musikern	Stuhlanzahl	EDT
Selbst? (Median)	-0,73	-0,37	-0,47	-0,59
Halligkeit? (Mittelwert)	0,68	0,46	0,31	0,62
Halligkeit? (Median)	0,69	0,42	0,30	0,61

In der Großkorrelation trat ebenfalls eine Korrelation zwischen der Standardabweichung des EEL und der Standardabweichung des ST_{late} auf. Die Korrelation ist in Tabelle 14 zu sehen. In Kapitel 4.3 wurden die Gräben anhand ihrer Standardabweichung des EEL verglichen. Die Korrelation bedeutet somit, dass die Auswertung in einem Graben auch mit der Standardabweichung des ST_{late} möglich wäre. Da das Verfahren zur Bestimmung des EEL das aufwändigste ist und der eigentliche Erkenntnisgewinn in der Standardabweichung liegt, könnte man nach weiterer Verifizierung die Standardabweichung des ST_{late} betrachten und das Verfahren für den EEL weglassen. Somit spart man bei der Messung signifikant Zeit ein.

Tabelle 14: Korrelation zwischen s EEL und s ST_{late}

	s-ST_{late}
s-EEL	0,86

4.7 Effektivität von Bühnenparametern und Orchesterbefragungen

Die vorliegende Arbeit hat sich eingehend mit dem Vergleich von Orchesterspielstätten anhand der Bühnenparameter beschäftigt. Auf Basis der erfolgten Untersuchungen soll in diesem Kapitel eine Aussage über die Effektivität der Bühnenparameter getroffen werden. Dabei werden die Orchesterbefragungen und deren Korrelationen mit einbezogen.

Anhand von den Ergebnissen für Graben 1 konnte die Wirksamkeit der Bühnenparameter für einzelne Objekte in sich bestätigt werden. Der ST_{early} korrelierte mit der Selbstwahrnehmung und der ST_{late} korrelierte mit der empfundenen Halligkeit. Das beweist ihre Funktionstüchtigkeit innerhalb einer Spielstätte, welche jedoch auch schon von anderen Veröffentlichungen verifiziert wurde.

Das Ziel dieser Arbeit war es jedoch, Orchesterspielstätten anhand der Bühnenmaße miteinander zu vergleichen und aufgrund der Nutzerbefragung einzugrenzen, welchen Wert die Bühnenmaße haben müssen, damit sie gut angenommen werden. Dieses Ziel konnte nicht erreicht werden. Die Mittelwerte der Bühnenmaße zeigen keine signifikante Korrelation mit den Mittelwerten oder Medianen der Nutzerbefragung. Somit konnte im Vergleich der Spielstätten kein Zusammenhang festgestellt werden, der dazu befähigt, einen Orchestergraben aufgrund des Mittelwerts seiner Bühnenmaße absolut zu bewerten.

Weiterhin wurde am Beispiel von Graben 1 festgestellt, dass die Bühnenparameter nicht in der Lage sind, die Einbringung von akustischen Maßnahmen wie Absorption oder Diffusion im Orchestergraben signifikant abzubilden. Sie sind hauptsächlich von größeren Geometrien wie dem Bühnenplafond und dem Volumen abhängig.

Im Gegensatz zu normalen raumakustischen Messungen ist die Messung der Bühnenmaße ST_{early} , ST_{late} und EEL sehr aufwändig. Eine Messung mit zum Beispiel 8 untersuchten

Positionen umfasst 88 Impulsantworten. 64 Impulsantworten davon werden nur für das EEL aufgenommen. Zudem ist der Prozess, um zu einer Orchesterbefragung mit vielen Antworten zu kommen, sehr langwierig und kann mehrere Monate in Anspruch nehmen. Die Erkenntnis aus den Antworten des Fragebogens ist ebenfalls begrenzt, da die Befragten meist dazu tendieren mittlere und nicht sehr stark ausgeprägte Antworten zu geben, welche im gemittelten Zustand zu sehr ähnlichen Ergebnissen zwischen den Spielstätten führen.

All die aufgeführten Punkte sprechen gegen eine Betrachtung der Bühnenmaße im Vergleich der Orchesterspielstätten und zeigen deren Ineffektivität auf. Dieses Urteil sollte jedoch von einer größeren Studie nochmals überprüft werden.

Um die Umsetzbarkeit einer solchen Studie zu erleichtern, ist in Erwägung zu ziehen, das EEL nicht zu betrachten und dafür den Fokus auf die Standardabweichung des ST_{late} zu legen. Somit wird die Anzahl der zu messenden und auszuwertenden Impulsantworten drastisch reduziert. Es ist jedoch darauf zu achten, dass trotzdem andere raumakustische Parameter weiterhin auswertbar bleiben.

4.8 Erkenntnisse und mögliche weitere Schritte

Nach umfassender Auswertung der gesammelten Messdaten können folgende Schlüsse gezogen werden.

Ein Vergleich von Orchesterspielstätten bezüglich ihrer Güte ist auf Basis der Bühnenparameter nach jetzigem Wissensstand nicht möglich. Dementsprechend ist das Empfinden der Musiker nicht vorhersehbar und kann nicht durch einen Toleranzbereich bewertet werden. Deshalb bleibt es bei einer Betrachtung des üblichen Bereichs für den ST_{early} und den ST_{late} nach DIN EN ISO 3382-1.

Da über die Wertung des Pegels des EEL ebenfalls kein Wertebereich vorgegeben ist, bietet es sich an, dessen Standardabweichung zu betrachten. Die Standardabweichung des EEL korreliert stark mit der des ST_{late} , weshalb in Zukunft auf die Betrachtung des EEL verzichtet werden könnte.

Es konnte nachgewiesen werden, dass der ST_{early} abhängig vom Volumen und vor allem der Deckenhöhe ist.

Änderungen der Wandoberflächen durch Akustikelemente im Orchestergraben werden durch die Bühnenmaße nicht eindeutig abgebildet. Eine drastische Veränderung in der Bestuhlung eines Grabens ist jedoch anhand der Bühnenmaße eindeutig erkennbar geworden.

Der folgende Abschnitt soll Ansätze für die weitere Untersuchung von Orchesterspielstätten betrachten.

Es ist nicht abzustreiten, dass die in dieser Arbeit untersuchte Stichprobengröße relativ klein ist, obwohl deren Erarbeitung mit viel Aufwand verbunden war. Deshalb ist der nahe-
liegende nächste Schritt, um an die dargelegten Untersuchungen anzuknüpfen, weitere
Spielstätten zu vermessen und deren Orchester zu befragen. Somit wird die Stichproben-
größe der Korrelation vergrößert und es können verlässlichere Ergebnisse erzielt werden.

Weiterhin ist es möglich, die Untersuchungen durch Simulationen weiterzuführen. Es kam
in der Auswertung zu einer hohen Korrelation zwischen dem ST_{early} und der Raumhöhe über
den Musikern. Diese lässt auf einen starken Einfluss des Bühnenplafonds auf diesen Büh-
nenparameter schließen. Demnach könnte durch eine Simulation von Energieimpulsant-
worten und deren Auswertung für ein Bühnen- oder Grabenmodell Aufschluss über die Aus-
wirkung des Bühnenplafonds geben. Dabei ließen sich Parameter wie Höhe, Neigung und
Form des Plafonds untersuchen.

Teil der Auswertung war ebenfalls die Untersuchung des Einflusses von akustischen Ele-
menten auf die Bühnenparameter innerhalb eines Orchestergrabens. Dabei kam es jedoch
nur zu einer Orchesterbefragung, welche nach der akustischen Maßnahme erfolgte. Des-
halb wäre ein weiterer Ansatz zur Untersuchung der Bühnenparameter, ob das nicht Abbil-
den der akustischen Maßnahmen auch dem akustischen Eindruck der Musiker entspricht.
Dazu muss eine Musikerbefragung vor und nach dem Einbringen von akustischen Elemen-
ten durchgeführt werden.

Da die Bühnenparameter nach jetzigem Wissensstand schwer bewertbar sind, bietet es
sich auch an andere Bewertungsansätze zu untersuchen. Dabei kann auf etablierte Maße
wie die EDT und das Stärkemaß zurückgegriffen oder die Entwicklung eines neuen Maßes
angestrebt werden. Ein Ansatz für ein neues Maß wäre, sich an dem Verfahren zur Bestim-
mung des Speech Transmission Index zu orientieren. Dies bedarf jedoch umfangreiche
Forschung auf dem Gebiet der Wahrnehmbarkeit von Musik und eine Vielzahl an empiri-
schen Versuchen.

5 Fazit

Seit fast 40 Jahren kommt es zu Untersuchungen der Akustik von Bühnen anhand der Bühnenparameter nach Gade. Während der Untersuchungen wurden die Parameter ST_{early} und ST_{late} in die DIN EN ISO 3382-1 aufgenommen, sowie ein üblicher Wertebereich für sie festgelegt. Dieser Bereich sagt jedoch nicht aus, ob ein hoher oder niedriger Wert der jeweiligen Bühnenparameter anzustreben ist. Diese Arbeit versucht durch einen Vergleich mehrerer Orchesterspielstätten anhand der Bühnenparameter und mehrerer Orchesterbefragungen eine Abhängigkeit des Höreindrucks der Musiker von den Bühnenparametern festzustellen. Dazu wurden drei Bühnen, vier Orchestergräben und drei Probenräume akustisch vermessen. Zu 9 der 10 Spielstätten konnte eine Orchesterbefragung durchgeführt werden. Um die in den Spielstätten gemessenen Impulsantworten bezüglich der Bühnenparameter auszuwerten, wurde in Python ein eigenes Programm zur Berechnung der Bühnenparameter geschrieben. In der Auswertung wurden zunächst die Spielstätten bezüglich ihrer Bühnenparameter und der Antworten auf die Fragebögen verglichen. Dabei ist für die Bühnenparameter und die Antworten auf den Fragebogen jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung der Spielstätten betrachtet worden. Um die Bühnenparameter und Fragebögen in Relation zueinander zu setzen, wurde eine Korrelation der Mittelwerte und Standardabweichungen der Bühnenparameter mit den Mittel- und Medianwerten der Fragebogenantworten durchgeführt. Dabei konnte bis auf eine moderate Korrelation der Standardabweichung des ST_{early} keine Erkenntnis gebende Korrelation mit den Mittelwerten und Medianen der Orchesterbefragung nachgewiesen werden. Parallel dazu wurden die Bühnenmaße und Antworten der Fragebögen mit raumbeschreibenden Parametern wie dem Volumen und der EDT korreliert. Dabei konnten moderate bis hohe Korrelationen vor allem mit Teilen der Orchesterbefragung sowie dem ST_{early} erzielt werden.

Das Ziel der Arbeit wurde nicht erreicht. Es konnte kein Zusammenhang zwischen den mittleren Bühnenparametern und dem Nutzerempfinden nachgewiesen werden. Jedoch trägt diese Arbeit zur Erweiterung des Verständnisses der Bühnenparameter nach Gade bei und stellt eine Grundlage für weitere Untersuchungen dar. Dies nicht zuletzt durch die Bereitstellung mehrerer objektspezifischer Datensätze an Bühnenparametern und Nutzerbefragungen. Zudem ist sie die erste Veröffentlichung, welche zusätzlich zu den Bühnen auch Orchestergräben und Probenräume in die Betrachtung mit einbezieht.

Danksagung

Ich möchte mich oftmals beim Akustik Bureau Dresden, im Besonderen bei Herrn Dr. Ederer und Herrn Jannik Enders bedanken. Beide hatten immer ein offenes Ohr für meine Fragen und unterstützten mich in meinen vielen aufwändigen Messungen. Weiterhin möchte ich mich bei allen Orchesterspielstätten, die ich vermessen durfte und den Orchestern, die ich befragen durfte, bedanken. Ohne sie wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Außerdem möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir immer wieder motivierende Worte schenkten, wenn das Ziel der Arbeit unerreichbar schien.

Literaturverzeichnis

Barron, M. (1978). The Gulbenkian Great Hall, Lisbon, II: An Acoustic Study of a Concert Hall with Variable Stage. *Journal of Sound and Vibration*, 481-502.

Beranek, L. L. (1996). *Concert and opera halls: how they sound*. Woodbury, NY: Acoustical Society of America.

Dammerud, J. J. (2006). Stage Acoustics - Literature Review. In J. J. Dammerud, *Stage Acoustics for Symphonic Orchestras in Concert Halls*. University of Bath.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2009). *Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 1: Aufführungsräume (ISO 3382-1:2009)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Gade, A. C. (1989). Investigations of Musicians' Room Acoustic Conditions in Concert Halls. Part I: Methods and Laboratory Experiments. *ACUSTICA*, 193-203.

Gade, A. C. (2011). Acoustics for Symphony Orchestras; Status After Three. *Journal of Building Acoustics*.

Gerhards, C. (06.. April 2023). *blasorchester-solingen.de*. Von Wissenswertes über ein Blasorchester: <https://www.blasorchester-solingen.de/wissen/blasorchester.htm#fanf> abgerufen

Hemmerich, W. (11. April 2023). *MatheGuru*. Von Kovarianz: <https://matheguru.com/stochastik/kovarianz.html> abgerufen

Hemmerich, W. (11. April 2023). *MatheGuru*. Von Korrelation, Korrelationskoeffizient: <https://matheguru.com/stochastik/korrelation-korrelationskoeffizient.html> abgerufen

Standke, A., Staubach, L., Blochwitz, L., Fiedler, O., Janda, A., Johann, H., & Nock, J. (2022). *Psychoakustische Bewertung des Schallfeldes im Orchester-graben der mittelsächsischen Philharmonie*. Mittweida: Hochschule Mittweida.

Anlagen

Anlage 1, Bühnenmaße nach Gade je Spielstätte II

Anlage 2, Korrelationsmatrix..... X

Anlage 3, Fragebogen..... XI

Anlage 1, Bühnenmaße nach Gade

Bühne 1

Sender	ST _{early}	ST _{late}
S01	-14,85	-13,68
S02	-15,02	-13,37
S03	15,55	14,22
S04	-14,3	-13,6
S05	-14,76	-13,01
S06	-13,89	-12,87

EEL							
Messpunkt	R00	R01	R02	R03	R04	R05	R06
S01	-10,08		-7,00	-12,48	-14,04	-11,20	-14,70
S02	-11,51	-8,09		-11,29	-8,81	-7,17	-13,10
S03	-14,19	-12,69	-10,52		-6,98	-13,18	-13,46
S04	-12,78	-13,08	-8,77	-6,63		-9,18	-9,89
S05	-6,25	-11,40	-7,43	-12,85	-9,68		-9,81
S06	-11,44	-14,71	-11,58	-13,08	-10,62	-8,15	

Bühne 2

Sender	ST _{early}	ST _{late}
S01	-14,15	-13,49
S02	-13,3	-13,9
S03	-11,52	-13,1
S04	-16,38	-12,77
S05	-14,59	-13,3
S06	-14,49	-12,36

EEL							
Messpunkt	R00	R01	R02	R03	R04	R05	R06
S01	-10,65		-7,22	-12,31	-11,07	-13,57	-15,59
S02	-12,37	-7,10		-8,36	-10,46	-11,64	-13,83
S03	-12,38	-9,03	-7,42		-11,84	-7,93	-10,17
S04	-5,13	-9,39	-9,66	-13,67		-13,39	-16,13
S05	-11,35	-11,64	-7,37	-6,83	-10,66		-7,82
S06	-15,89	-15,33	-13,81	-11,04	-16,61	-9,03	

Bühne 3

Sender	ST _{early}	ST _{late}
S01	-10,51	-10,92
S02	-9,95	-10,85
S03	-10,90	-11,15
S04	-10,08	-11,03
S05	-9,96	-10,80
S06	-10,56	-11,53

EEL							
Messpunkt	R00	R01	R02	R03	R04	R05	R06
S01	-7,59		-4,92	-9,63	-9,23	-7,38	-10,17
S02	-3,69	-4,69		-6,82	-7,90	-5,17	-8,07
S03	-9,34	-9,39	-7,32		-5,41	-8,77	-8,64
S04	-7,70	-7,89	-6,88	-4,82		-5,89	-6,16
S05	-3,26	-7,84	-5,05	-8,82	-5,66		-3,82
S06	-6,50	-10,54	-8,07	-10,25	-7,52	-3,49	

Graben 1 alt

Sender	ST _{early}	ST _{late}
S01	-12,20	-18,03
S02	-3,70	-17,79
S03	-10,43	-23,50
S04	-12,16	-17,54
S05	-11,50	-20,51
S06	-11,64	-17,82
S07	-11,33	-24,22
S08	-7,75	-17,86

EEL									
Messpunkt	R00	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08
S01	-9,96		-9,05	-8,51	-8,83	-9,93	-12,78	-14,98	-15,51
S02	-13,31	-7,33		-9,29	-14,56	-14,36	-17,78	-19,14	-19,85
S03	-14,68	-10,39	-11,18		-13,72	-11,01	-17,11	-15,80	-19,70
S04	-5,62	-8,06	-14,28	-11,85		-7,14	-8,27	-10,54	-10,18
S05	-12,60	-13,52	-16,96	-11,07	-5,73		-8,10	-5,57	-11,25
S06	-7,59	-12,87	-17,78	-14,16	-5,05	-8,51		-8,45	-4,86
S07	-15,94	-16,60	-19,94	-15,18	-11,19	-7,75	-9,67		-10,31
S08	-11,78	-16,27	-20,53	-17,77	-11,33	-10,82	-6,14	-7,74	

Graben 1 neu

Sender	ST _{early}	ST _{late}
S01	-13,37	-19,23
S02	-10,03	-21,12
S03	-4,18	-18,11
S04	-11,56	-17,24
S05	-7,23	-20,1
S06	-12,92	-19,08
S07	-7,25	-21,24
S08	-9,31	-22,61

EEL									
Messpunkt	R00	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08
S01	-8,64		-12,95	-9,76	-6,41	-8,04	-13,48	-13,79	-18,54
S02	-15,12	-13,25		-12,00	-17,45	-16,20	-21,61	-21,18	-24,32
S03	-13,55	-10,84	-12,40		-12,12	-6,48	-16,07	-13,71	-21,12
S04	-6,15	-6,67	-15,13	-10,64		-5,16	-6,66	-9,37	-12,97
S05	-13,08	-10,27	-17,27	-7,78	-9,12		-12,66	-8,09	-16,94
S06	-9,09	-11,38	-19,08	-14,12	-6,81	-9,36		-8,24	-8,63
S07	-15,29	-14,22	-23,30	-14,60	-11,83	-7,74	-10,55		-13,24
S08	-15,10	-18,03	-23,03	-19,94	-14,58	-14,13	-8,68	-10,51	

Graben 2

Sender	ST _{early}	ST _{late}
S01	-5,46	-19,22
S02	-7,77	-18,30
S03	-8,98	-16,76
S04	-4,15	-16,60
S05	-7,10	-18,57
S06	-6,03	-19,00

EEL							
Messpunkt	R00	R01	R02	R03	R04	R05	R06
S01	-11,40		-5,60	-10,33	-8,89	-11,45	-14,33
S02	-7,22	-4,64		-6,38	-5,28	-8,55	-11,86
S03	-4,62	-8,51	-6,24		-4,00	-3,02	-6,38
S04	-8,38	-6,90	-4,78	-5,02		-5,35	-7,81
S05	-8,26	-12,20	-10,41	-5,81	-6,87		-5,08
S06	-8,55	-13,64	-10,75	-6,48	-6,69	-2,92	

Graben 3

Sender	ST _{early}	ST _{late}
S01	-9,94	-18,02
S02	-7,10	-18,04
S03	-12,78	-19,01
S04	-10,29	-18,72
S05	-10,20	-19,36
S06	-8,60	-21,55
S07	-7,17	-22,36
S08	-11,30	-29,52

EEL									
Messpunkt	S00	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08
S01	-2,89		-6,29	-4,50	-7,05	-9,35	-12,17	-11,01	-16,84
S02	-11,78	-9,34		-11,30	-9,66	-15,06	-16,93	-17,34	-24,82
S03	-4,69	-4,42	-8,43		-6,37	-8,59	-12,47	-11,48	-16,86
S04	-6,58	-7,88	-5,53	-2,84		-8,19	-10,81	-7,86	-15,55
S05	-6,89	-11,62	-12,03	-8,53	-5,55		-7,00	-4,77	-11,83
S06	-10,34	-16,72	-18,16	-13,65	-12,59	-7,96		-8,00	-15,44
S07	-11,95	-14,10	-15,64	-11,71	-7,62	-8,75	-6,24		-8,54
S08	-15,13	-19,05	-20,73	-15,50	-12,11	-11,59	-8,66	-3,48	

Graben 4 wenig Stühle

Sender	ST _{early}	ST _{late}
S01	-13,66	-17,05
S02	-12,6	-16,82
S03	-11,12	-16,22
S04	-12,19	-15,51
S05	-12,6	-17,05
S06	-13,12	-18,41

EEL							
Messpunkt	R00	R01	R02	R03	R04	R05	R06
S01	-9,96		-8,18	-7,33	-13,47	-13,79	-16,36
S02	-9,35	-7,79		-4,98	-11,49	-13,94	-14,13
S03	-4,01	-8,25	-7,23		-8,33	-10,94	-13,18
S04	-6,42	-13,22	-10,79	-8,26		-7,36	-11,45
S05	-11,81	-17,24	-16,11	-13,88	-6,90		-8,76
S06	-13,05	-18,78	-17,22	-14,60	-11,00	-10,77	

Graben 4 viele Stühle

Sender	ST _{early}	ST _{late}
S01	-13,87	-17,43
S02	-12,72	-22,68
S03	-13,12	-16,26
S04	-13,49	-16,33
S05	-13,45	-16,51
S06	-13,03	-18,14

EEL							
Messpunkt	R00	R01	R02	R03	R04	R05	R06
S01	-11,28		-10,68	-10,66	-15,98	-17,43	-18,55
S02	-12,15	-11,67		-10,97	-12,83	-16,31	-16,90
S03	-7,75	-10,19	-9,57		-10,11	-13,97	-14,96
S04	-7,14	-14,85	-10,47	-7,89		-5,14	-10,40
S05	-8,75	-16,59	-14,34	-11,94	-5,25		-8,71
S06	-13,65	-22,67	-16,57	-17,70	-14,33	-10,99	

Probenraum 1

Sender	ST _{early}	ST _{late}
S01	-14,91	-15,96
S02	-16,37	-15,74
S03	-15,90	-15,74
S04	-15,74	-15,31
S05	-15,74	-15,90
S06	-12,72	-14,93
S07	-12,41	-15,06

EEL								
Messpunkt	R00	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07
S01	-12,56		-10,10	-13,15	-14,98	-14,22	-16,10	-17,03
S02	-10,98	-11,20		-13,20	-11,22	-9,90	-13,36	-14,67
S03	-15,03	-13,51	-11,79		-7,96	-13,07	-11,59	-15,74
S04	-13,63	-14,48	-10,16	-8,88		-10,79	-9,41	-12,65
S05	-9,04	-14,35	-9,29	-13,18	-11,28		-13,08	-8,65
S06	-14,77	-16,56	-13,41	-11,46	-8,49	-12,51		-12,46
S07	-10,52	-16,41	-13,67	-15,73	-12,98	-9,88	-13,12	

Probenraum 2

Sender	ST _{early}	ST _{late}
S01	-10,31	-12,33
S02	-10,12	-12,33
S03	-9,82	-12,08
S04	-9,70	-10,95
S05	-9,00	-12,46
S06	-9,83	-12,61

EEL							
Messpunkt	R00	R01	R02	R03	R04	R05	R06
S01	-7,35		-6,26	-6,26	-7,76	-9,60	-10,33
S02	-9,44	-5,68		-7,78	-8,81	-10,78	-11,93
S03	-6,52	-5,82	-7,60		-5,66	-8,05	-7,90
S04	-2,45	-6,45	-8,48	-3,81		-2,95	-6,38
S05	-6,51	-10,57	-11,36	-9,74	-5,26		-7,73
S06	-8,94	-10,87	-11,93	-8,57	-7,71	-6,32	

Probenraum 3

Sender	ST _{early}	ST _{late}
S01	-10,87	-16,36
S02	-12,10	-17,53
S03	-10,58	-16,97
S04	-9,46	-17,75
S05	-12,63	-16,75
S06	-10,75	-18,86
S07	-8,10	-16,80
S08	-8,30	-16,49

EEL									
Messpunkt	R00	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08
S01	-5,68		-8,58	-8,39	-7,70	-10,87	-9,94	-10,46	-13,63
S02	-6,77	-9,46		-9,50	-11,27	-8,11	-10,22	-13,81	-13,18
S03	-7,14	-9,43	-8,12		-6,53	-8,03	-6,25	-11,27	-11,86
S04	-8,70	-8,23	-9,97	-5,16		-7,75	-3,23	-6,56	-11,03
S05	-10,96	-12,38	-10,27	-9,18	-9,97		-8,14	-12,32	-6,85
S06	-10,46	-11,07	-10,90	-7,88	-4,31	-7,11		-7,71	-8,80
S07	-12,08	-11,35	-13,72	-11,37	-7,75	-10,91	-7,84		-11,59
S08	-14,46	-15,30	-13,03	-12,79	-12,01	-6,63	-9,75	-12,35	

Anlage 2, Korrelationsmatrix

	Stearly	Stabw. Stearly	Sfate	Stabw. Sfate	EEL	Stabw. EEL	Verhältnis Stearly/Sfate	Volumen	Raumhöhe über den Musikern	Stuhlanzahl	Volumen pro Stuhl	EDT	OAI?	Selbst?	Andere?	Helligkeit?	Lautstärke?	OAI? median	Selbst? Median	Andere? Median	Helligkeit? Median	Lautstärke? Median	
Stearly	1,00																						
Stabw. Stearly	0,36	1,00																					
Sfate	-0,37	-0,71	1,00																				
Stabw. Sfate	0,31	0,47	-0,82	1,00																			
EEL	0,52	-0,46	0,53	-0,39	1,00																		
Stabw. EEL	0,23	0,62	-0,85	0,86	-0,61	1,00																	
Verhältnis Stearly/Sfate	-0,82	-0,60	0,82	-0,65	0,00	-0,62	1,00																
Volumen	-0,72	-0,40	0,27	-0,23	-0,35	-0,05	0,58	1,00															
Raumhöhe über den Musikern	-0,73	-0,55	0,25	-0,23	-0,34	-0,07	0,55	0,92	1,00														
Stuhlanzahl	-0,39	0,11	-0,24	0,32	-0,56	0,34	0,10	0,54	0,43	1,00													
Volumen pro Stuhl	-0,62	-0,44	0,28	-0,34	-0,22	-0,10	0,51	0,83	0,87	0,05	1,00												
EDT	-0,87	-0,55	0,66	-0,54	-0,18	-0,42	0,93	0,80	0,73	0,31	0,67	1,00											
OAI?	-0,29	-0,47	0,01	0,21	-0,09	-0,07	0,17	0,11	0,41	0,34	0,07	0,16	1,00										
Selbst?	-0,01	-0,68	0,34	0,03	0,34	-0,27	0,18	-0,16	0,18	-0,05	-0,15	0,03	0,76	1,00									
Andere?	0,03	-0,58	0,03	0,20	0,21	-0,18	-0,04	-0,25	0,15	-0,02	-0,25	-0,13	0,87	0,90	1,00								
Helligkeit?	-0,26	-0,38	0,48	-0,05	0,09	-0,03	0,45	0,68	0,46	0,31	0,67	0,62	-0,19	-0,14	-0,34	1,00							
Lautstärke?	-0,36	-0,59	0,34	-0,15	0,09	-0,34	0,44	0,02	0,33	0,06	0,11	0,32	0,82	0,84	0,80	-0,24	1,00						
OAI? median	-0,34	-0,33	-0,20	0,32	-0,25	0,06	0,09	0,22	0,44	0,42	0,19	0,21	0,87	0,41	0,68	-0,09	0,57	1,00					
Selbst? Median	0,34	-0,12	-0,27	0,21	0,14	-0,02	-0,42	-0,73	-0,37	-0,47	-0,67	-0,59	0,36	0,51	0,70	-0,72	0,36	0,25	1,00				
Andere? Median	-0,01	-0,46	-0,02	0,16	0,13	-0,15	-0,03	-0,29	0,09	-0,03	-0,28	-0,14	0,89	0,86	0,96	-0,45	0,84	0,71	0,71	1,00			
Helligkeit? Median	-0,31	-0,25	0,43	-0,10	-0,01	-0,03	0,45	0,69	0,42	0,30	0,70	0,61	-0,30	-0,32	-0,49	0,97	-0,38	-0,15	-0,78	-0,59	1,00		
Lautstärke? Median	-0,30	-0,64	0,24	0,11	0,06	-0,15	0,33	0,15	0,46	0,26	0,14	0,31	0,89	0,87	0,85	-0,06	0,94	0,69	0,30	0,85	-0,24	1,00	

Korrelationsgrad	Negative Korrelation	Positive Korrelation
Gering	0,0 bis -0,5	0,0 bis 0,5
Moderat	-0,5 bis -0,7	0,5 bis 0,7
Hoch	-0,7 bis -0,9	0,7 bis 0,9
Perfekt	-0,9 bis -1,0	0,9 bis 1,0

Anlage 3, Fragebogen



Akustik Bureau Dresden

Fragebogen zur akustischen Situation in Orchestergräben

Welches Instrument spielen Sie?

Wie bewerten Sie den allgemeinen akustischen Eindruck?

sehr schlecht 1 2 3 4 5 sehr gut

Wie gut können Sie ihr eigenes Instrument hören?

sehr schlecht 1 2 3 4 5 sehr gut

Wie gut hören Sie die anderen Instrumente des Ensembles?

Es ist schwierig sich gegenseitig zu hören 1 2 3 4 5 Es ist einfach sich gegenseitig zu hören

Gibt es Instrumente, die Sie besonders schlecht hören?

Gibt es Instrumente, die Sie besonders prominent wahrnehmen?

Wie beurteilen Sie die Halligkeit des Grabens?

trocken 1 2 3 4 5 sehr hallig

Würden Sie den Klang des Grabens als gut beschreiben? Wenn nicht, beschreiben Sie bitte die klanglichen Probleme mit den gegebenen Skalen.

Ja

Nein, denn der Klang ist ...

schrill und spitz 1 2 3 4 5 verwaschen und dumpf

und von ...

keinen Echos und Resonanzen 1 2 3 4 5 vielen Echos und Resonanzen

... geprägt

Wie schätzen Sie die allgemeine Lautstärke beim Spielen ein?

deutlich zu laut 1 2 3 4 5 angemessen

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Dresden, den 05.05.2023



Augustin Hellmut Standke

.