Technische Universität Berlin

Fakultät I – Geistes- und Bildungswissenschaften
Institut für Sprache und Kommunikation
Audiokommunikation-und Technologie, M.Sc.

Masterarbeit

Modellierung von Publikumsgeräuschen

Eingereicht von: Sebastian Böldt [redacted]

Erstgutachter: Prof. Dr. Stefan Weinzierl
Zweitgutachter: Clemens Büttner

Datum: 12.09.2019

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt gegenüber der Fakultät I der Technischen Universität Berlin, dass die vorliegende, dieser Erklärung angefügte Arbeit selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der im Literaturverzeichnis genannten Quellen und Hilfsmittel angefertigt wurde. Alle Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind kenntlich gemacht. Ich reiche die Arbeit erstmals als Prüfungsleistung ein. Ich versichere, dass diese Arbeit oder wesentliche Teile dieser Arbeit nicht bereits dem Leistungserwerb in einer anderen Lehrveranstaltung zugrunde lagen.

Berlin, den

. . . . . .

Sebastian Böldt

Danksagung

Ich möchte mich auf diesem Wege bei Clemens Büttner für die Betreuung dieser Masterarbeit, dem damit verbundenem konstruktiven Feedback sowie hilfreichen Hinweisen bedanken. Vielen Dank an Prof. Stefan Weinzierl für die produktiven Gespräche, welche zur Entwicklung und Bearbeitung dieser Masterarbeit maßgeblich beigetragen haben.
Ein besonderen Dank auch an Erik Brauer für die Unterstützung bei den zahlreichen Messungen sowie Jochen Steffens für die Unterstützung bei allen statistikrelevanten Themen und natürlich an all die hilfsbereiten Mitglieder des Fachgebietes.
Bezüglich der Datenerhebung möchte mich insbesondere bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Tonabteilungen aus der Staatsoper Unter den Linden und Komischen Oper bedanken. Vielen Dank für das entgegengebrachte Verständnis und die großartige Hilfsbereitschaft vor Ort. Gleiches gilt auch für Dr. Patrick Winkler und Prof. Odej Kao dafür, dass ich Messungen während ihrer Vorlesungen durchführen durfte.

Natürlich gebührt ein großer Dank auch meiner Familie dafür, dass sie mich immer ermutigt, unterstützt und während der gesamten Zeit begleitet haben.

Abstract

The investigation of audience noise is an area that has not been researched much in literature up to now. Although the audience, for example during a concert, accounts for a large part of the background noise, little is known about its spectral composition, room acoustic influences or even mood-dependent changes. This work aims to investigate noise produced by an audience with regard to its spectral distribution and how it changes over the course of an event. Using a method by Jeong et al. (2012), audience noise from eight recordings in five different rooms were analyzed. Based on the data set, a statistical prediction model was created to assess the influence of technical background noise, room acoustics and audience mood. Results of a linear mixed model show that the audience noise level significantly dependents on the technical background noise as well as the number of spectators. In addition, two characteristic curves for the A-weighted broadband audience noise level over time could also be determined. In order to investigate the influence of the audience's mood on the overall noise level, a self-assessment during a concert as well as a listening test were carried out. As a result, a vocabulary has been developed to describe the perceived atmosphere and acoustical properties of audience noise sounds. Alongside the three-dimensional conceptual construct obtained, it was also possible to identify *exuberance* as an influencing factor for mood-dependent level changes. Therefore, these findings can be used for further research with regard to audience noise synthesis and offer valuable new insights in room acoustic planning where interference noise levels, produced by an audience, are needed.

Zusammenfassung

Die Untersuchung von Publikumsgeräuschen ist ein in der Literatur bisher wenig erforschtes Gebiet. Obwohl das Publikum, zum Beispiel während einer Konzertveranstaltung, einen Großteil der Störgeräusche ausmacht, ist nur wenig über dessen spektrale Zusammensetzung, raumakustische Einflüsse oder gar stimmungsabhängige Veränderungen bekannt. Ziel dieser Arbeit ist es, Geräusche, welche von einem Publikum erzeugt werden, in Bezug auf deren spektrale Verteilung zu analysieren und zu untersuchen, wie sich diese über den zeitlichen Verlauf einer Veranstaltung verändern. Unter Verwendung einer Methode von Jeong et al. (2012) werden Publikumsgeräusche aus acht Aufnahmen in fünf verschiedenen Räumen analysiert. Basierend auf dem erstellten Datensatz wurde ein statistisches Vorhersagemodell erstellt, um den Einfluss von technischem Hintergrundrauschen, raumakustischen Gegebenheiten sowie der Stimmung des Publikums zu analysieren. Die Ergebnisse des gemischten linearen Modells zeigen, dass der Publikumsgeräuschpegel signifikant vom vorliegenden technischen Hintergrundrauschen sowie der Zuschaueranzahl abhängt. Auch können zwei charakteristische Verläufe für den A-bewerteten breitbandigen Publikumsgeräuschpegel über die Zeit festgestellt werden. Um den Einfluss der Stimmung eines Publikums auf deren Geräuschpegel zu untersuchen, wurde eine Selbstbewertung während eines Konzertes und ein Hörversuch durchgeführt. Hiermit konnte ein Vokabular zur Beschreibung der suggerierten Atmosphäre und wahrgenommenen akustischen Eigenschaften von Publikumsgeräuschen erarbeitet werden. Neben dem dreidimensionalen Begriffskonstrukt wurde zusätzlich die *Ausgelassenheit* des Publikums als ein Einflussfaktor für Pegelveränderungen identifiziert.
Die Ergebnisse dieser Arbeit können daher für weitere Forschungen zur Synthese von Publikumsgeräuschen genutzt werden und bieten wertvolle neue Erkenntnisse für die raumakustische Planung, bei der Störgeräusche, die von einem Publikum erzeugt werden, von Bedeutung sind.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung **1**

2. Aktueller Kenntnisstand **4**
2.1. Aufmerksamkeit und Wahrnehmung von Publika 4
2.2. Messung von Publikumsgeräuschpegeln 6
2.3. Offene Forschungsfragen und Hypothesen 8

3. Methode **9**
3.1. Messung der Publikumsgeräusche 9
3.2. Messaufbau in den Sälen 11
3.2.1. Uni.T (Theater der Universität der Künste Berlin) 11
3.2.2. Audimax TU Berlin 12
3.2.3. Udk Konzertsaal 13
3.2.4. Komische Oper 14
3.2.5. Staatsoper 15
3.3. Extrahieren des Publikumsgeräuschpegels 17
3.3.1. Erstellen der Häufigkeitsverteilungskurven 17
3.3.2. Modellerstellung und Minimieren der Fehlerfunktion 18
3.3.3. Verteilungsfunktion der Publikumsgeräuschpegel und Einzahlwertermittlung 20
3.4. Statistisches Vorhersagemodell 22
3.5. Vokabularerstellung zur Beschreibung von Publikumsgeräuschen . 23
3.5.1. Erste Begriffsfindung und Skalenentwicklung 24
3.5.2. Selbstbewertung der Stimmung während Konzertveranstaltung 25
3.5.3. Hörversuch 26

4. Ergebnisse **28**
4.1. Ermittelte Nachhallzeiten 28
4.2. Extrahierte Publikumsgeräuschpegel 29
4.2.1. Breitbandiger Pegel und zeitlicher Verlauf 29
4.2.2. Spektrale Verteilungen 33
4.3. Statistische Analyse und Vorhersagemodell 39
4.4. Selbstbewertung der Stimmung während Konzertveranstaltung . . 44
4.5. Hörversuch 46

5. Zusammenfassung **54**

6. Diskussion und Ausblick **62**

7. Quellnachweise **66**
Literatur 66

A. Anhang **69**
A.1. Fragebogen Hörversuch 69

Abbildungsverzeichnis

2.1. Aufmerksamkeitsverlauf nach Uhde 5

3.1. Draufsicht Messposition Uni.T 12
3.2. Draufsicht Messposition Audimax 13
3.3. Draufsicht Messposition UdK Konzertsaal 14
3.4. Draufsicht Messposition Komische Oper 15
3.5. Schnittansicht Messposition Staatsoper 16
3.6. Häufigkeitsverteilung innerhalb eines Zeitabschnittes 18
3.7. Gemessene und modellierte Verteilungskurve 20
3.8. Häufigkeitsverteilung aller Geräuschanteile 21
3.9. Modell Stimmungsbewertung 24

4.1. Zeitlicher Verlauf breitbandige Publikumsgeräuschpegel 30
4.2. UdK Konzertsaal (01): Ermittelte Publikumsgeräuschpegel 31
4.3. Staatsoper: Ermittelte Publikumsgeräuschpegel 32
4.4. Uni.T (01): Spektrale Zusammensetzung 33
4.5. Uni.T (02): Spektrale Zusammensetzung 33
4.6. Audimax (01): Spektrale Zusammensetzung 34
4.7. Audimax (02): Spektrale Zusammensetzung 34
4.8. UdK Konzertsaal (01): Spektrale Zusammensetzung 35
4.9. UdK Konzertsaal (02): Spektrale Zusammensetzung 35
4.10. Komische Oper: Spektrale Zusammensetzung 36
4.11. Staatsoper: Spektrale Zusammensetzung 37
4.12. Durschnittliche spektrale Verteilung für Einlass und Applaus 38
4.13. Vorhersagemodell: Zufällige Effekte 41
4.14. Ergebnis Vorhersagemodell spektrale Verteilung je Raum 43
4.15. Prognostizierter spektraler Verlauf 44
4.16. Boxplot Selbstbewertungsergebnisse 45
4.17. Biplot Faktor 1 und 2 51
4.18. Biplot Faktor 1 und 3 51
4.19. Biplot Faktor 2 und 3 51

5.1. Durchschnittlich ermittelte Publikumsgeräuschpegel 57

A.1. Ausschnitt der Bedienoberfläche des Fragebogens 70

Tabellenverzeichnis

3.1. Übersicht der untersuchten Räume 11
3.2. Ruhepegel kleines Studio 26

4.1. Mittlere Nachhallzeiten im unbesetzten und besetzten Zustand . . 28
4.2. Nachhallzeiten je Oktave im besetzten und unbesetzten Zustand . 29
4.3. Ergebnisse Lineares Gemischtes Modell 40
4.4. Ermittelte Korrelationskoeffizienten Selbsteinschätzung 46
4.5. Ermittelte Korrelationskoeffizienten Hörversuch 47
4.6. Berechnung Kaiser-Meyer-Olkin je Variable 48
4.7. Ergebnis Faktorenanalyse 49
4.8. Korrelationsanalyse von Publikumsgeräuschpegel und Faktoren . 53

5.1. Zusammenfassung mögliche Bewertungsdimensionen 60

1. Einleitung

Wichtige Arbeitsschritte während der raumakustischen Planung und Simulation sind die Erstellung und Verifizierung eines raumakustischen Simulationsmodells. Dafür geeignete Verfahren sind das Abgleichen mit Messungen, die in dem zu betrachtenden Raum vorgenommen wurden sowie eine Auralisation unterschiedlicher Signalquellen. Während der Planung sollen möglichst realistische Szenarien nachempfunden werden, die eine spätere Nutzung des Raumes widerspiegeln (zum Beispiel Aufführung im gefüllten Konzertsaal oder ein Auditorium während einer gut besuchten Vorlesung). Insbesondere bei Räumen, welche der Darbietung von Sprach- oder Musikveranstaltungen dienen, ist es von Vorteil, den vollbesetzten Zustand eines Raumes abbilden zu können. Zu Simulationszwecken gibt es hierzu bereits einige Annahmen, welche herangezogenen werden können, um die Veränderung von raumakustischen Parametern vorhersagen zu können. Diese beziehen sich vorrangig auf die Veränderung der Nachhallzeit, welche unter anderem in Abhängigkeit der Zuschaueranzahl oder anhand der Beschaffenheit der Sitze und den damit verbundenen Absorbtionsgraden herabgesenkt wird (Beranek, 2006, S. 7-11) (Hidaka et al., 2001).
Diese Angabe ist besonders hilfreich, um auf weitere raumakustische Parameter zu schließen und den Einfluss des Raumes auf das zu übertragende Signal zu simulieren. Komplizierter wird es jedoch, wenn raumakustische Kenndaten erhoben werden sollen, deren Simulation einen definierten Störpegel benötigt. Dies ist zum Beispiel der Fall, sobald der Sprachverständlichkeitsindex (STI) ermittelt werden soll. Hier ist eine möglichst genaue Annahme über den vorhandenen Geräuschpegel und seine spektrale Verteilung über Oktavbänder erforderlich (vgl. DIN EN 60268, S.32).
Soll nun zum Beispiel die Sprachverständlichkeit eines elektroakustisch verstärkten Sprechers in einem vollbesetzten Vorlesungssaal ermittelt werden, so gibt es hierzu erst wenige allgemeingültige bzw. standardisierte Annahmen zum vorliegenden Störgeräuschpegel. Die Simulation wird meist auf Grundlage von selbst gewählten, empirisch ermittelten Werten durchgeführt, die möglichst realitätsnah sein sollen. Eine zuverlässige Aussage kann allerdings oft erst vor Ort während einer Messung unter Realbedingungen getroffen werden. Dies stellt ein Problem dar, speziell wenn ein Raum erst in der Entstehungsphase ist oder die potentielle Installation eines neuen Lautsprechersystems von solchen Simulationen und ihrer Richtigkeit abhängt.
Am Fachgebiet Audiokommunikation an der TU Berlin werden zudem Forschungen betrieben, bei denen Annahmen über den Geräuschpegel getroffen

werden müssen, welcher durch ein Publikum vor Ort induziert wird. Besonders sind hier die Untersuchungen von Weinzierl et al., 2015 zu erwähnen, bei denen historische Aufführungsorte der Renaissance in Italien im Hinblick auf die damals vorliegenden raumakustischen Parameter untersucht worden sind. Hier war insbesondere der Sprachverständlichkeitsindex von großer Bedeutung, um die damalige Darbietungsqualität aus Sicht des Publikums bewerten können. Dieser wird durch die raumakustischen Gegebenheiten, sowie die vom Publikum induzierten Geräusche beeinflusst. Neben der Ermittlung des Sprachverständlichkeitsindexes und dem benötigten Störgeräuschpegel sind Informationen zur spektralen Verteilung der Publikumsgeräusche für die Synthese eines Publikums und dessen Geräuschkulisse unabdingbar, um dieses zum Beispiel einer bestehenden Orchesteraufnahme in einem Raum hinzuzumischen und somit ein realistisches, virtuelles Zuhörerszenario zu schaffen. Hierzu gibt es erste samplebasierte Ansätze, welche ebenfalls am Fachgebiet entwickelt wurden (Grimaldi et al., 2017). Jedoch lagen den Autoren zu dieser Zeit keine absoluten Schalldruckpegelwerte vor, welche es zum Beispiel in Abhängigkeit der Publikumsgröße und raumakustischer Parameter anzunehmen gilt.
Darüberhinaus sind zuverlässige Aussagen über die spektrale Verteilung von Publikumsgeräuschen bei der raumakustischen Planung von Relevanz. Insbesondere wenn es um die Installation von technischen Geräten wie Lüftungen, Klimananlagen, Licht o.ä. geht, von denen ein so genanntes technisches Hintergrundrauschen ausgeht. Da eine geräuscharme Planung oftmals mit hohen Mehrkosten verbunden ist, kann es von großem Interesse sein, in welchem Frequenzbereich üblicherweise Publikumsgeräusche charakteristisch ausgeprägt sind und technische Hintergrundgeräusche maskiert werden, um hier speziell Rücksicht bei der Auslegung technischer Einbauten und deren Emission nehmen zu können.
Zur Untersuchung von Publikumsgeräuschen sind in der Vergangenheit die Arbeiten von Hodgson et al., 1999 und Jeong et al., 2012 zu erwähnen. Ersterer untersuchte die Hintergrundgeräusche in Klassenräumen und kam zu der Schlussfolgerung, dass sich diese maßgeblich aus den Geräuschen der Schüler und der technischen Geräte zusammensetzten. Basierend darauf konnten erste statistische Vorhersagemodelle für das technische Hintergrundrauschen, den Geräuschpegel der Schüler sowie für den Sprecher erstellt werden, welche die spektrale Verteilung in Oktavbändern abbilden. Auch wurden Methoden aufgezeigt, wie diese Geräuschpegel aus einer Langzeitmessung zu extrahieren sind.
Diese Methode wurde von Jeong et al., 2012 aufgegriffen und auf Musikdarbietungen in Konzertsälen übertragen. Auch wurde das statistische Vorhersagemodell weiterentwickelt und der Einfluss des technischen Hintergrundrauschens sowie die Größe der äquivalenten Absorptionsfläche auf den Publikumsgeräuschpegel untersucht. Die Messungen erfolgten auch hier im Diffusfeld über die gesamte Dauer eines Konzertes, wobei gezeigt wurde, dass Publikumsgeräusche

stark mit dem vorliegenden technischen Hintergrundrauschen korrelieren. Bezüglich des technischen Hintergrundrauschens und den Bereichen in denen es von Publikumsgeräuschen maskiert wird, geben Forschungen von Kleiner (1980) zusätzliche Auskünfte. Übereinstimmend mit den Ergebnissen von Jeong et al. wurden hier ähnliche Publikumsgeräuschpegel gemessen und anschließend je Oktavband ein maximal akzeptabler Wert für den Pegel des technischen Hintergrundrauschens bestimmt.
Um ein zuverlässigeres Vorhersagemodell zur Ausprägung von Publikumsgeräuschen in Abhängigkeit der vorliegenden Raumakustik zu erhalten, ist eine Weiterführung der vorangegangenen Untersuchungen nötig. Auch ist unklar, inwiefern sich der Geräuschpegel des Publikums über den zeitlichen Verlauf einer Darbietung verändert. Als ein maßgeblicher Einflussparameter kann hier die Stimmung des Publikums mit einbezogen werden. Somit soll zum Beispiel der Publikumsgeräuschpegel entlang des Spannungsverlaufes einer Darbietung ermittelt und in Abhängigkeit der Publikumsstimmung sowie Raumakustik für verschiedene Zeitabschnitte vorhersagbar gemacht werden. Zur Beschreibung der wahrgenommenen Atmosphäre eines Publikums mittels eines qualitativen Vokabulars ist dem Autor bisher keine Forschung bekannt. Es ist somit zusätzlich erforderlich, ein geeignetes Vokabular zu erarbeiten, welches die akustischen Eigenschaften von Publikumsgeräuschen sowie deren Atmosphäre beschreiben kann. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen zusätzlich zeigen, ob dieses Vokabular ein mehrdimensionales Konstrukt darstellt oder in nur wenigen Dimensionen abbildbar ist.

Diese Masterarbeit widmet sich der Vorhersage des Geräuschpegels von Publika sowie dessen spektraler Verteilung. Es soll in Abhängigkeit der raumakustischen Parameter eines Raumes, dem vorliegenden technischen Hintergrundrauschen, der Publikumsgröße und dessen Stimmung eine Vorhersage zum erzeugten Geräuschpegel gemacht werden können. Ziel ist es, somit verschiedene zeitliche Abschnitte während einer Darbietung abbilden und simulieren zu können. Dies soll, wie eingangs erwähnt, dazu beitragen, beispielsweise zuverlässigere raumakustische Simulationen vornehmen zu können sowie als Grundlage zur Synthese von Publikumsgeräuschen dienen. Auch soll ermittelt werden in welchen Freqeunzbereichen Publikumsgeräusche charakteristisch ausgeprägt sind und wie sich diese vom technischen Hintergrundrauschen unterscheiden. Als Grundlage dafür werden Schallpegelmessungen während realer Veranstaltungen vorgenommen sowie das zugehörige technische Hintergrundrauschen erfasst und innerhalb sinnvoller Zeitabschnitte analysiert. Anschließend soll den Abschnitten in einem Hörversuch sowie einer Selbsteinschätzung des Publikums während einer Konzertveranstaltung, ein Stimmungsniveau zugeordnet werden.
Hierfür wird ein Vokabular zur qualitativen Beschreibung von Publikumsgeräuschen sowie dessen Atmosphäre und damit verbundenen akustischen Eigenschaften erstellt.

2. Aktueller Kenntnisstand

Im Folgenden wird der Stand der Forschung bezüglich der Wahrnehmung und Aufmerksamkeit von Publika sowie zur Messung von Publikumsgeräuschen erläutert. Diese dienen als Grundlage für das zu entwickelnde Vokabular zur Beschreibung von Publikumsgeräuschen und dessen Zuordnung zum Verlauf des Publikumsgeräuschpegels.

2.1. Aufmerksamkeit und Wahrnehmung von Publika

Menschliche Aufmerksamkeit als solche wird als eine Selektivität der Wahrnehmung bezeichnet und kann durch externe Ereignisse als auch Ermüdung oder Gewöhnung an einen Stimulus beeinflusst werden (Ansorge & Leder, 2011, S. 17). Eine Konsequenz dessen ist eine selektive Wahrnehmung von Ereignissen sowie eine beobachtbare Veränderung der Körperhaltung, wobei letztere im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit analysiert und berücksichtigt wird. Die Ursache und Entstehung verschiedender Aufmerksamkeitsarten erklärt die Kapazitäts- und Tätigkeitstheorie. Die Kapazitätstheorie basiert auf der Annahme, dass die selektive Wahrnehmung durch eine begrenzte Aufnahmekapazität an Reizen begründet ist. Durch dieses begrenzte Auffassungsvermögung muss der Rezipient eine Selektion der wahrzunehmenden Stimuli treffen. Dies äußert sich somit in einer unterschiedlich starken Aufmerksamkeit für verschiedene Stimuli.
Die zweite Theorie geht nicht von einer erreichbaren Kapazität, sondern vom funktionalen Ansatz, dass die selektive Wahrnehmung zur Erbringung einer Aufgabe dient, aus. Es wird also gezielt die Aufmerksamkeit auf einen Stimuli gerichtet, um einer bestimmten Aufgabe nachzukommen (Ansorge & Leder, 2011, S. 18).
Die Aktivierung der Aufmerksamkeit kann dabei in eine tonische und phasische Wachsamkeit unterschieden werden. Die tonische Wachsamkeit umfasst eine Daueraufmerksamkeit bzw. Aufmerksamkeitsaufrechterhaltung unter monotonen Bedingungen. Die phasische (exzentrische) Wachsamkeit beschreibt im Gegensatz dazu eine kurzfristige Zunahme der Aufmerksamkeit durch schwankende Stimuli (Heidler, 2008, S.76). Beide Aktivierungsarten können zum Beispiel während Sprach- und Konzertdarbietungen auftreten. Sie werden durch die Aufmerksamkeit des Zuhörers ausgedrückt, welche je nach Spannungsbogen des Stücks oder persönlichem Interesse schwankt.

Betrachtet man nun den Begriff der Aufmerksamkeit in Zusammenhang mit dem Verhalten eines Publikums, so kann dieses als eine Gruppe von Menschen bezeichnet werden, welche sich bewusst zu einem bestimmten Zeitpunkt trifft und ein Ereignis (Darbietung) beobachtet (Forsyth, 2009, S. 506). Butler und Baumeister (1998) unterscheiden hier generell zwischen einem *unterstützenden*, *neutralen* und *negativem* Publikum. Ein *unterstützendes* Publikum ist dem Darbietenden zugewandt und wünscht eine gutes Gelingen. *Neutrales* Publikum hat dahingegen weder Interesse an einem guten noch an einem schlechten Gelingen. Es kann ein generelles Interesse beobachtet werden, jedoch keine besondere Zugewandtheit oder Ablehnung. Folglich wünscht ein *negatives* Publikum kein gutes Gelingen und weist wohlmöglich kontraproduktives Verhalten auf, indem zum Beispiel andere Zuschauer abgelenkt werden.

Im Rahmen der neuesten Erkenntnisse zur Einschätzung der Aufmerksamkeit eines Publikums während Konzertdarbietungen stellen Rost (2017) und Uhde (in Tröndle und Uhde (2018)) empirische Beobachtungen während Theater- und Konzertaufführungen an. Rost (2017, S. 123) beschreibt hier explizit, dass das Zuhören als solches mehrere Ausprägungen besitzt und sich die Zuhörweise aus der Differenz unterschiedlicher Aufmerksamkeitsdynamiken ergibt.
Bezüglich dieser dynamischen Veränderung macht hier Folker Uhde eine empirisch erhobene Angabe zum Aufmerksamkeitsverlauf des Publikums auf Grund von Erfahrungen aus über 1000 Konzertbesuchen (Angabe Uhde). Dieser ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

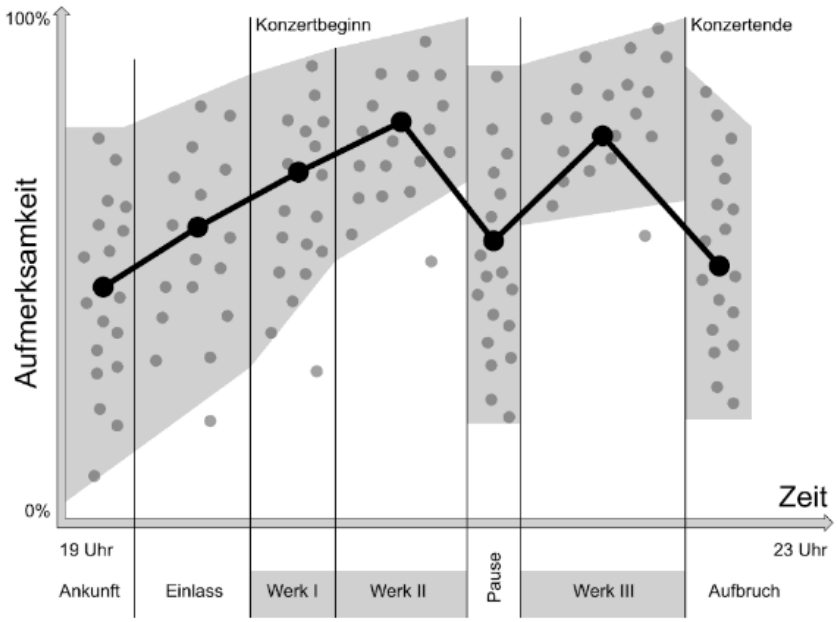

Abbildung 2.1.: Aufmerksamkeitsverlauf des Publikums während eines Konzerts, nach Uhde

Abbildung 2.1 zeigt einen Verlauf, in dem sieben unterschiedliche Zeitabschnitte erkennbar sind. Beobachtet man die Phasen von Einlass und Werk I bis III so ist ein invertiert U-förmiger Verlauf erkennbar, mit einem Maximum bei Werk II vor der Pause. Forschungsgegenstand dieser Arbeit soll es sein, ob ein zur Literatur vergleichbarer Verlauf der Aufmerksamkeit ermittelbar ist und inwiefern dieser Verlauf mit objektiven Parametern, wie zum Beispiel dem Publikumsgeräuschpegel korrelierbar ist. Auch ist zu klären, ob die Beschreibung der Stimmung des Publikums vorrangig durch dessen Aufmerksamkeit ausgedrückt wird oder ob dies ein mehrdimensionales Konstrukt darstellt. Eine Zusammenführung der bisherigen Untersuchungen, bei denen der Stimmungsverlauf des Publikums qualitativ anhand eines geeigneten Vokabulars beschrieben wird, ist dem Autor bisher nicht bekannt.

2.2. Messung von Publikumsgeräuschpegeln

Die Untersuchung des Publikumsgeräuschpegels ist ein in der Forschung bisher wenig bearbeitetes Feld. In der Literatur gehen die Ursprünge dabei auf erste Untersuchungen durch Kleiner (1980) und Hodgson et al. (1999) zurück. Kleiner und Kollegen nahmen Schalldruckpegelmessungen während eines einzigen Konzertes an 14 örtlich verschiedenen Positionen vor (15 Minuten je Position). Die Pegelwerte wurden in einem kleinen Zeitintervall von 20 ms geloggt und anschließend über die gesamte Konzertdauer ausgewertet. Eine genaue Beschreibung zur Methode, die das Ermitteln der Publikumsgeräuschpegel je Oktavband beschreibt, ist leider nicht angegeben. Es wird lediglich ein breitbandiger Bereich von 20 dB(A) - 38 dB(A) als charakteristisch für Publikumsgeräusche berichtet (entnommen aus Abbildung 3, Kleiner (1980)).
Eine genauere Beschreibung zur Methodik wird bei Hodgson et al., 1999 gegeben. Diese nahmen Messungen über jeweils die Länge einer Unterrichtseinheit vor, um dadurch auf die spektrale Verteilung und einen mittleren Pegel der unterschiedlichen Geräuschquellen schließen zu können. Es wurden Blöcke von je 15 Minuten am Anfang, in der Mitte und am Ende einer Unterrichtseinheit gemessen. Anhand dieser Daten konnte eine mittlere Häufigkeitsverteilung der aufgezeichneten Pegel über der Zeit erstellt werden. Mittels eines Regressionsmodells, bei dem die gemessene Verteilungsfunktion durch zwei Gaußsche Verteilungsfunktionen nachgebildet wurde, konnten die Pegelverteilungen für die Quelle (Sprecher/Lehrer) und das gemischte Hintergrundrauschen bestimmt werden. Letzteres teilt sich in das technische Hintergrundrauschen sowie den gesuchten Publikumsgeräuschen auf. Nach energetischer Subtraktion des technischem Hintergrundrauschens vom gemischten Hintergrundrauschen, konnte auf die Verteilung der Publikumsgeräusche geschlossen werden. Es wurde ebenso ein empirisches Vorhersagemodell entwickelt, um den Geräuschpegel des Publikums, respektive der Schüler, in Abhängigkeit von der Schüleranzahl vorhersagbar zu machen. Der Einfluss von raumakustischen Parametern wurde

nicht untersucht. Hodgsons Forschungen stehen mit der Untersuchung in Schulen natürlich in einem anderen Kontext. Die verwendete Methode ist jedoch grundlegend für die anschließenden Forschungen von Jeong et al., welche die Basis der Methode dieser Arbeit bilden.

So griffen Jeong et al. (2012) den Ansatz von Hodgson auf und führten diesen für Messungen in Konzert- und Theatersälen weiter. Hier wurden Messungen über die gesamte Länge des Konzerts aufgenommen (2-3 h, 4-5 verschiedene Mikrofonpositionen). Darüber hinaus wurde in jedem Raum die Nachhallzeit und das technische Hintergrundrauschen im unbesetzten Zustand gemessen. Durch das anschließende Aufteilen der erstellten Häufikeitspegelverteilung in drei Gaußsche Verteilungskurven wurde hier das Musiksignal vom gemischten Hintergrundrauschen getrennt. Diese Aufteilung beruht auf der Annahme, dass das Gesamtsignal in drei unterschiedliche und voneinander unabhängige, akustische Ereignisse aufgeteilt werden kann. Jeong et al. (2012) teilen diese in Orchester, Solist bzw. Sänger und das gemischte Hintergrundrauschen auf. Auch wird angenommen, dass alle drei Häufigkeitsverteilungen einer Gaußschen Normalverteilungskurve folgen. Nach Subtraktion des technischen Hintergrundrauschens vom gemischten Hintergrundrauschen wird der Publikumsgeräuschpegel ermittelt.

Eine zentrale Erkenntnis der Forschungen von Jeong et al. ist, dass Publikumsgeräusche im Mittel 8 dB über dem technischen Hintergrundrauschen liegen. Auch ist zu erkennen, dass ein erhöhtes technisches Hintergrundrauschen zu erhöhten Publikumsgeräuschen führt. Folglich wirkt sich eine Reduzierung technischer Hintergrundgeräusche auf den Geräuschpegel des Publikums aus. Basierend auf dieser Erkenntnis wird empfohlen den Noise-Criteria (NC) [1] - Richtlinien für Theater- und Konzertsäle zu folgen (vgl. ANSI/ASA S12.2-2008). Das technische Hintergrundrauschen werde zwar weitestgehend von Publikumsgeräuschen in deren markanten Bereich von 500 Hz - 4000 Hz maskiert, jedoch wirken sich Veränderungen in der spektralen Verteilung des technischen Hintergrundrauschens auch unmittelbar auf den Publikumsgeräuschpegel aus. Diese Erkenntnisse decken sich ebenso mit den Ergebnisse von Kleiner und Kollegen.

[1] Geben den empfohlenen höchstzulässigen Schalldruckpegel von Dauergeräuschen durch technische Geräte an und kategorisieren einen Veranstaltungsraum anhand standardisierter Bewertungskurven. Ähnliches Verfahren der *Noise-Rating Curves* dient auch als Basis für Richtlinien zu Arbeitsplätzen in der Bild- und Tonverarbeitung (vgl. DIN 15996, S.29).

2.3. Offene Forschungsfragen und Hypothesen

Der erläuterte Forschungsstand dient als Basis für die weitere Durchführung dieser Arbeit. Es ist darauf hinzuweisen, dass die bisherigen Methodiken immer den gesamten Veranstaltungszeitraum betrachtet haben. Es erfolgte keine Einteilung in Zeitabschnitte, um auf einen aufmerksamkeits- bzw. stimmungsabhängigen Verlauf der Publikumsgeräusche zu schließen. Die zu untersuchenden Alternativhypothesen sind demnach wie folgt definiert:

Hypothese 1 (H1): *Eine Sprach-bzw. Konzertdarbietung kann in sinnvolle Zeitabschnitte unterteilt werden, innerhalb derer Veränderungen des gemessenen Pubklikumsgeräuschpegels zu erwarten sind.*

Hypothese 2 (H2): *Veränderungen im Verlauf des Publikumsgeräuschpegels sowie der spektralen Verteilung sind auf die sich verändernde Stimmung des Publikums zurückzuführen.*

Hypothese 3 (H3): *Der Publikumsgeräuschpegel wird durch das technische Hintergrundrauschen beeinflusst und folgt dessen Veränderungen.*

Außerdem gilt es, Erkenntnisse vorangegangener Forschungen zu untersuchen. So soll geprüft werden, inwiefern der Publikumsgeräuschpegel von der Zuschaueranzahl und raumakustischen Parametern wie zum Beispiel der Nachhallzeit und der äquivalenten Absorbtionsfläche abhängt.

Darüber hinaus soll eine weitere Motivation dieser Arbeit sein, für die Synthese von Publika eine geeignete Grundlage bezüglich der dafür anzusetzenden Schalldruckpegelwerte zu liefern.
Um eine gewünschte Geräuschatmosphäre charakterisieren zu können, soll zusätzlich ein Vokabular entwickelt werden, welches der Beschreibung von Publikumsgeräuschen dient. Hierbei liegt der Fokus insbesondere auf der suggerierten Atmosphäre sowie wahrgenommenen akustischen Eigenschaften von Publikumsgeräuschen.

Die Methode, welche zur Untersuchung dieser Hypothesen herangezogen wird, ist im folgenden Abschnitt 3 erläutert.

3. Methode

Es wird im Folgenden die Methode zur Messung der Publikumsgeräusche erläutert sowie die Erstellung des Vokabulars zur Beschreibung der Atmosphäre von Publikumsgeräuschen beschrieben.

3.1. Messung der Publikumsgeräusche

Die Messung der Publikumsgeräusche erfolgt während acht verschiedener Veranstaltungen in fünf Räumen. Diese sind:

- Uni.T (Theater der Universität der Künste Berlin)
- Audimax TU Berlin
- UdK Konzertsaal Berlin
- Komische Oper Berlin
- Staatsoper Unter den Linden Berlin

Ziel der Messung ist es, den Verlauf des Schalldruckpegels (breitbandig sowie in Terzbändern) über den gesamten Veranstaltungszeitraum zu erfassen. Auch wird das technische Hintergrundrauschen sowie die Nachhallzeit im unbesetzten Zustand ermittelt, falls zu dieser keine Messdaten vorliegen.

Messquipment Das Equipment, welches bei jeder Messung verwendet wird, besteht aus:

- 1x Schallpegelmesser *NTI XL2* mit 1/2” M2230 Messmikrofon (Klasse 1)
- 1x 3D Audio-Mikrofon *Sennheiser AMBEO VR Mikrofon*
- 1x Aufnahmegerät *Tascam DR-70* (Audimax) / 1x Soundkarte *Scarlett 8i8* (UniT) / 1x *Fireface UFX* (UdK)

Die Messungen erfolgen dabei immer, soweit möglich, im Diffusfeld. Die genaue Positionierung ist nachfolgend (siehe Abbildungen 3.1-3.5) je Saal dokumentiert.

Messablauf Zu Beginn jeder Publikumsgeräuschmessung wird das technische Hintergrundrauschen erfasst. Dies erfolgt im unbesetzten Zustand und unter der Maßgabe, dass möglichst alle technischen Geräte angeschaltet sind, die auch während der Darbietung eingesetzt werden. Die Messpositionen zum Erfassen des technischen Hintergrundrauschens sowie der Publikumsgeräusche sind gleich. Sobald die ersten Zuschauer den Saal betreten, wird die Messung der Publikumsgeräusche gestartet. Der Schalldruckpegel wird nun im Sekundentakt mitgeschrieben und die vier Ausgangskanäle des Sennheiser AMBEO Mikrofons werden zeitgleich aufgenommen. In Anlehnung an das gegebene Programm (unterschiedliche Werke) bzw. dem dramaturgischen Verlauf werden die zugehörigen Zeitabschnitte annotiert, um eine spätere Analyse dieser Intervalle zu ermöglichen.

Im Einzelnen sind diese *Overtüre/Rede* (wenn vorhanden) *Werk I, Werk II* und *Werk III*. Bei Sprachdarbietungen, wie zum Beispiel Vorträgen, können diese Phasen als *Anfang, Wiederholung/Einleitung, Hauptthema* und *Zusammenfassung* analog beschrieben werden. Bei Theaterdarbietungen sind die Abschnitte sinngemäß *Exposition*, *steigende Handlung*, *Höhepunkt*, *Retardierendes Moment* und *Auflösung* (Freytag, 1920, S.99).
Die Aufnahme wird gestoppt, sobald die Vorstellung beendet ist und die Zuschauer den Saal verlassen haben.

Nachhallzeitmessung und Berechnung des besetzen Zustandes Sind keine Messdaten zur Nachhallzeit bekannt oder zugänglich, so erfolgt zusätzlich eine Nachhallzeitmessung. Ist ein Lautsprechersystem im Raum vorhanden, so wird über dieses rosa Rauschen wiedergegeben, um eine Anregung des Raumes in einem möglichst breiten Frequenzspektrum zu ermöglichen. Die Messung selbst wird mit Hilfe des NTI XL2 Analyzer im Zuschauerraum vorgenommen. Dabei wird die Nachhallzeit mittels T_{20}-Methode in drei Durchläufen erfasst und ein Mittelwert gebildet.

Die Messung der Nachhallzeit im besetzten Zustand ist zwar möglich, erfordert allerdings je nach Methode einen nicht unwesentlichen Mehraufwand sowie einen Eingriff in den organisatorischen Ablauf der Darbietung. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit der besetzte Zustand gemäß DIN 18041 berechnet. Die empfohlene Berechnungsvorschrift ist hier mit Gleichung 3.1 angegeben.

$$T_{besetzt} = \frac{T_{unbesetzt}}{1 + \frac{T_{unbesetzt} \cdot N \cdot \Delta A_{Personen}}{0{,}16V}} \tag{3.1}$$

Mit T gleich der Nachhallzeit, $\Delta A_{Personen}$ gleich der äquivalenten Absorbtionsfläche pro Person je Oktavband und N der Zuschaueranzahl. Für die

Berechnung der äquivalenten Absorbtionsfläche des Publikums wird für die Räume Uni.T und UdK Konzertsaal eine Leichtpolsterbestuhlung angenommen, für das Audimax eine ungepolsterte Bestuhlung und für die Komische Oper sowie Staatsoper eine Hochpolsterbestuhlung. Die dementsprechende frequenzabhängige Absorbtionsfläche je Person ergibt sich aus der Berechnungsvorschrift nach DIN18041 (S.24, Tabelle A.1).

3.2. Messaufbau in den Sälen

Ein Überblick aller untersuchten Räume, deren Kapazität sowie Hauptveranstaltungszweck ist in Tabelle 3.1 angegeben.

Raum	**Kapazität**	**Volumen**	**Zweck**
Uni.T	330	4850 m^3	Theater
Audimax	1150	8605 m^3	Vorlesungen
Udk Konzertsaal	1255	9000 m^3	Konzerte
Komische Oper	1150	7057 m^3	Oper
Staatsoper	1300	9500 m^3	Oper

Tabelle 3.1.: Übersicht der untersuchten Räume

3.2.1. Uni.T (Theater der Universität der Künste Berlin)

Die erste Messung wird im Theater der UdK Berlin durchgeführt. Während zwei aufeinanderfolgenden Veranstaltungen wird der Schalldruckpegel gemessen, sowie eine räumliche Aufnahme mittels des Sennheiser VR Mikrofon erstellt.
Das Theater umfasst eine maximale Zuschaueranzahl von 330 Personen und der Zuschauerraum ist ca. 292 m^2 groß. Während der Messung waren die Vorhänge an allen Seiten geschlossen. Somit umfasst der Raum mit Bühne eine Länge von 22 m, eine Breite von 18,50 m sowie eine Höhe von 12 m (Volumen: 4850 m^3).
Der Schalldruckpegelmesser sowie das VR-Mikrofon wurden auf der Empore links vom Publikum (auf die Bühne blickend) positioniert. Im Gegensatz zu allen anderen Messungen ist hier das VR Mikrofon, aus Stabilitätsgründen, mit der Orientierung *upside down* aufgestellt. Die genaue Position ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

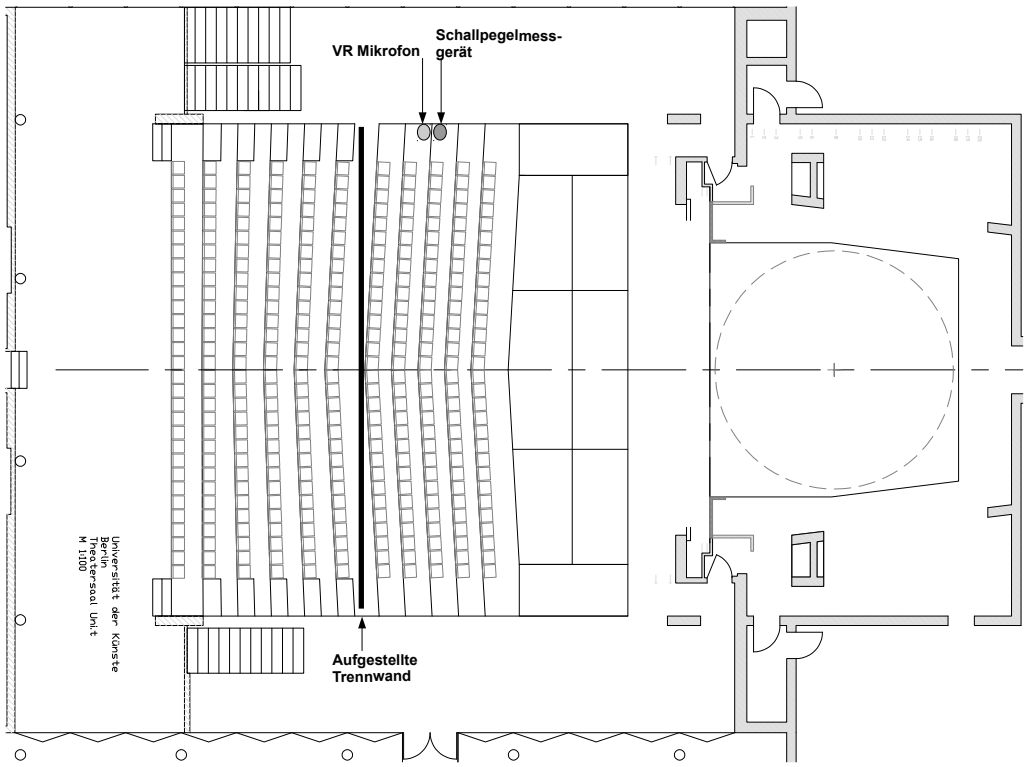

Abbildung 3.1.: Draufsicht: Messposition auf Empore im Uni.T (Plan durch Mitarbeiter der UdK bereitgestellt)

Die lichte Höhe zwischen den Mikrofonen und den Sitzplätzen beträgt ca. 3,5 m, wobei sie jeweils etwa 1m über die Brüstung herausragten. Die Mikrofone sind in Höhe der Hälfte der vorderen Zuschauerreihen angeordnet. Diese Position wurde gewählt, da hier die Mikrofone in einer ausreichend großen Entfernung über dem Publikum platziert werden können, bei der von einem angenäherten Diffusfeld auszugehen ist. Für beide Vorstellungen ist zusätzlich eine Trennwand (bespannt mit Molton) in der Mitte des Zuschauerraumes aufgestellt worden, um diesen zu verkleinern - es handelte sich bei beiden Vorstellungen um keine beworbenen, kommerziellen Aufführen weswegen nicht mit einer Vollauslastung des Zuschauerraumes gerechnet wurde. Beide Vorstellungen hatten eine Dauer von etwa 75 Minuten.

3.2.2. Audimax TU Berlin

Im Rahmen von zwei Vorlesungen wird im Audimax der TU Berlin der Publikumsgeräuschpegel erfasst sowie jeweils mit dem VR-Mikrofon eine räumliche Aufnahme erstellt. Das Audimax umfasst eine maximale Zuschaueranzahl von 1150 Personen und besitzt ein Volumen von 8605 m^3. Die Maße belaufen sich auf eine Länge von 29,9 m und eine Breite von 24,6 m bei einer Höhe von 11,7 m.

Die Messposition wurde zentral, mittig auf der Empore gewählt. In diesem Bereich gibt es einen Regietisch auf welchen die beiden Mikrofone positioniert wurden. Der Aufbau ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

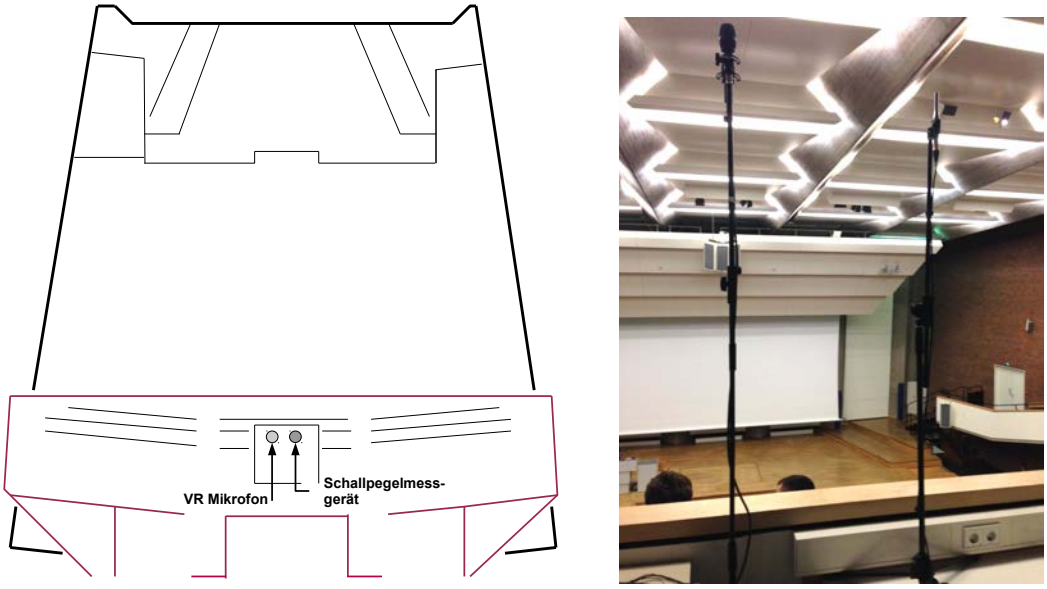

Abbildung 3.2.: Messposition im Audimax auf Empore (Regietisch), links: Draufsicht Grundriss, rechts: Foto des Aufbaus

Die Mikrofone wurden mit Stativ auf den Tisch gestellt, um einen möglichst großen Abstand zu den Zuschauern herzustellen, welche auf den benachbarten Stuhlreihen saßen. Kurz vor Beginn der Vorlesung wurden die Messungen gestartet und beendet, sobald die letzten Studierenden den Saal verlassen haben. Beide Aufnahmen haben eine Dauer von etwa 100 Minuten.

3.2.3. Udk Konzertsaal

Die erste Messung im UdK Konzertsaal erfolgte während des Eröffnungskonzertes zum 'Crescendo-Festival, 150 Jahre Fakultät Musik'. Einige Wochen später wurde eine zweite Messung während des Masterabschlusskonzertes der Dirigenten durchgeführt. In beiden Fällen war der nachfolgend beschriebene Aufbau identisch. Der Konzertsaal umfasst ein Volumen von 9000 m^3 und bietet Platz für maximal 1255 Zuschauer.
Da das Publikum für diese Veranstaltung ausschließlich auf die Sitzplätze im Parkettbereich verteilt wurde, konnten das Messmikrofon sowie das VR-Mikrofon am Geländer der oberen Ränge befestigt werden. Die Messposition wurde mittig, mit Blick zur Bühne gewählt und ist in Abbildung 3.3 schematisch dargestellt.

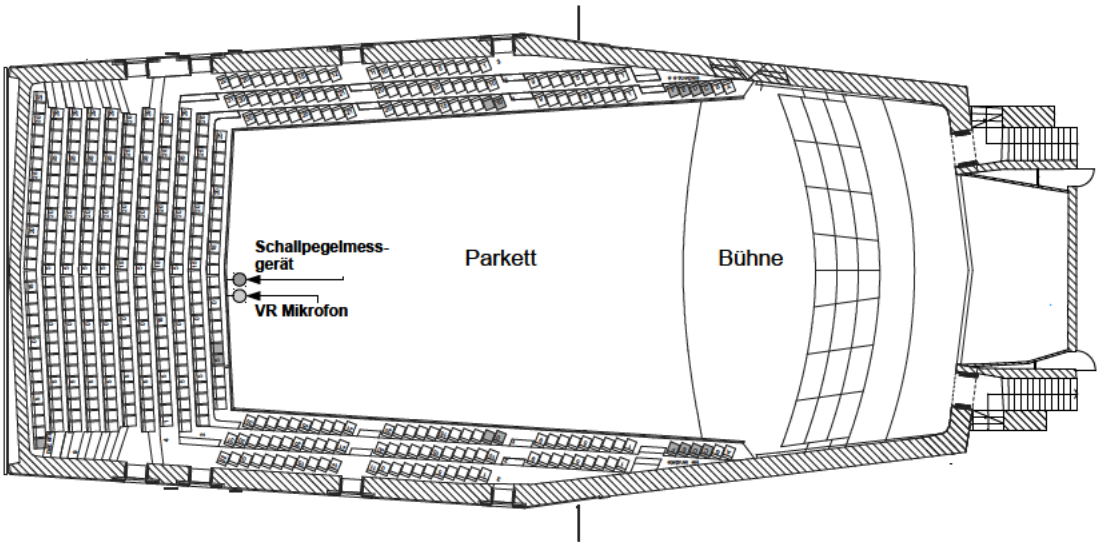

Abbildung 3.3.: Draufsicht: Messposition auf Rang im UdK Konzertsaal

Die Mikrofone ragen etwa 1,5 m über der Brüstung hervor und hängen somit ca. 3,0 m über den Zuschauerplätzen womit sie sich angenähert im Diffusfeld der vom Publikum ausgehenden Geräusche befinden. Beide Aufnahmen haben eine Dauer von 120-150 Minuten.

3.2.4. Komische Oper

Bei dem Stück, während dessen die Messung der Publikumsgeräusche erfolgte, handelte es sich um das Ballett 'Distant Matter/Half Life'. Es ist in zwei unabhängige Akte unterteilt zu je 45-50 Minuten. Der Zuschauerraum der Komischen Oper umfasst ein Volumen von 7057 m^3 und die Zuschaueranzahl der ausverkauften Vorstellung beträgt 1150 Personen.
Gemäß Abbildung 3.4 wurde sowohl das Schallpegelmessgerät als auch VR-Mikrofon mittig an der Brüstung des ersten Ranges befestigt.

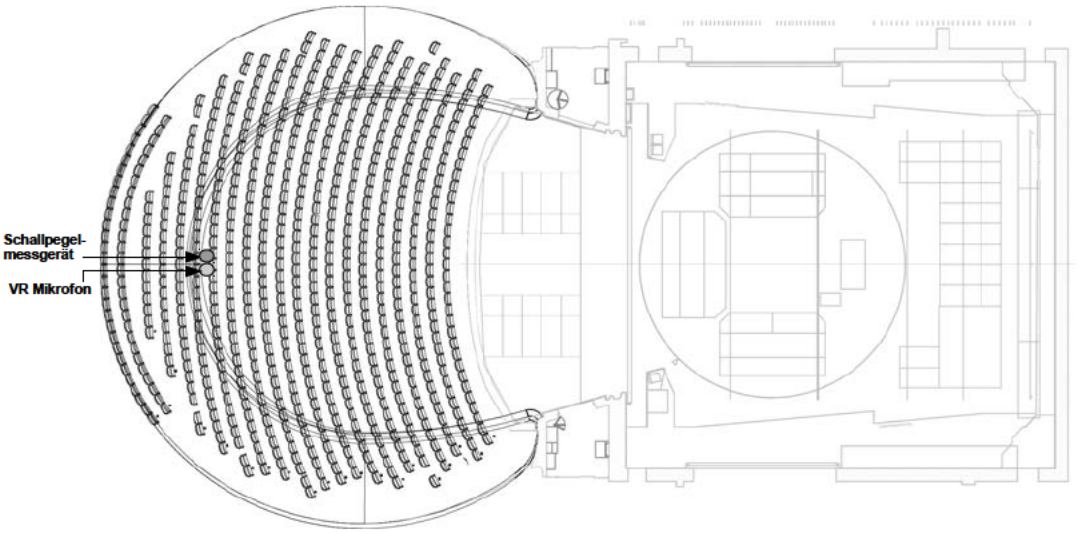

Abbildung 3.4.: Draufsicht: Messposition Höhe des ersten Ranges in der Komischen Oper

Die lichte Höhe zum Parkettboden beträgt 2,7 m , wobei sich die Mikrofone somit im Diffusfeld für die Sitzplätze im Parkett und dem zweiten Rang befinden. Da ebenso Zuschauer hinter den Mikrofonen auf dem ersten Rang sitzen, ist ein Direktschalleinfluss von diesen Sitzplätzen nicht vollständig auszuschließen. Die Gesamtaufnahme dauert 120 Minuten.

3.2.5. Staatsoper

Die letzte Messung erfolgte in der Staatsoper Unter den Linden während der Oper 'Rigoletto' in drei Akten. Aus urheberrechtlichen Gründen konnte leider keine Aufnahme mit dem VR-Mikrofon gemacht werden. Es erfolgte somit nur eine Aufzeichnung mit dem Schalldruckpegelmessgerät. Dieses wurde auf der Empore oberhalb des dritten Zuschauerranges, etwas seitlich positioniert und befindet sich damit angenähert im idealen Diffusfeld für alle Zuschauerplätze, da insbesondere in Höhe der Nachhallgallerie von einer gleichmäßigen Durchmischung des Schallfeldes auszugehen ist. Abbildung 3.5 (Modell entnommen aus Vercammen & Lautenbach, 2018a) illustriert die beschriebene Messposition nochmals.

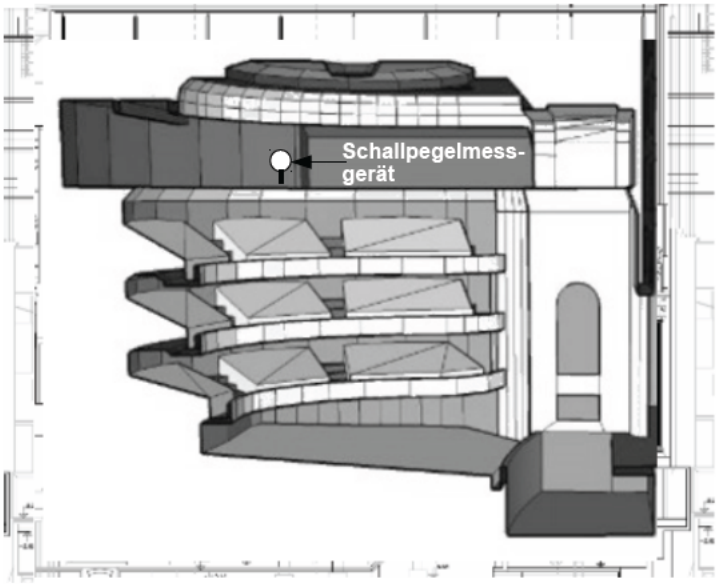

Abbildung 3.5.: Schnittansicht: Messposition Staatsoper

Der Zuschauerraum der Staatsoper umfasst ein Volumen von 9500 m^3 bei einer maximalen Zuschauerzahl von etwa 1300 Personen.

3.3. Extrahieren des Publikumsgeräuschpegels

Nachdem die aufgezeichneten Schalldruckpegelwerte über den gesamten Veranstaltungszeitraum erfasst wurden, können diese verwendet werden, um die Häufigkeitsverteilungskurven der Publikumsgeräusche zu extrahieren und auf dessen spektrale Verteilung zu schließen.

Die Messdaten liegen in Form von Schalldruckpegelwerten vor (Zahlenwerte), welche im Sekundentakt mitgeschrieben werden. Daraus lässt sich für jeden gegebenen Zeitbereich ein Histogramm der insgesamt, aufgezeichneten Geräuschpegel erstellen. Dieses wird für jede zu untersuchende Oktave erstellt. Somit wird ein Zeitabschnitt durch 12 Histogramme beschrieben. Ziel ist es, auf Basis der aus der Literatur bekannten Verfahren, eine Häufigkeitsverteilung der Schalldruckpegel der Publikumsgeräusche je Zeitabschnitt zu extrahieren, um Aussagen über die spektrale Verteilung und den resultierenden breitbandigen Pegel treffen zu können.
Die Methode dieser Arbeit ist im weiteren Verlauf beschrieben und basiert dabei auf dem Ansatz von Jeong und Kollegen, da dieser als vielversprechend eingeschätzt wird.

3.3.1. Erstellen der Häufigkeitsverteilungskurven

Unter Verwendung des Befehls *histfit* wird auf Basis der Messdaten eine Zielverteilungskurve *pE* in MATLAB gebildet. Eine typische Häufigkeitsverteilungskurve innerhalb eines Oktavsbands für einen Zeitabschnitt ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

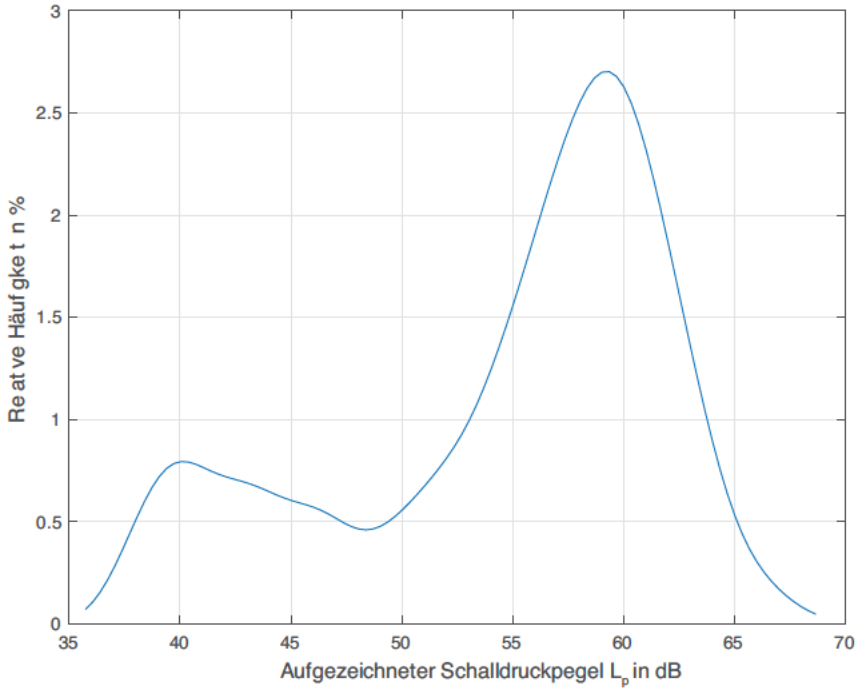

Abbildung 3.6.: Beispiel einer Häufigkeitsverteilung der gemessenen Schalldruckpegel innerhalb eines Zeitabschnittes (250 Hz Oktavband)

Es ist beispielhaft gut zu erkennen, dass die Häufigkeitsverteilung der Messdaten weitestgehend einer Gaußschen Normalverteilung ähnelt. Eine erneute Anhebung zwischen 40 dB - 45 dB lässt darauf schließen, dass insbesondere in diesem Bereich eine Geräuschquelle des erfassten Gesamtsignals dominant ist. In Bezug auf vorangegangene Forschungen kann dies als gemischtes Hintergrundrauschen identifiziert werden.

3.3.2. Modellerstellung und Minimieren der Fehlerfunktion

Unter der Annahme, das Gesamtsignal bestehe aus drei voneinander unabhängigen Anteilen (Orchester, Solist und gemischtes Hintergrundrauschen), wird die Zielverteilungskurve mittels drei gewichteter Gaußscher Normalverteilungskurven nachmodelliert (Jeong et al., 2012). Als ein Gütemaß für die Genauigkeit der Anpassung (*Fitting*) wird die Differenz zwischen gemessener und modellierter Kurve gebildet. Ziel ist es, diese zu minimieren. Gleichung 3.3.2 beschreibt die in dieser Arbeit verwendete Berechnungsvorschrift zur Ermittlung der Abweichungsquadratsumme (RSS, engl. Residual Sum of Squares) der Fehlerfunktion, welche es zu optimieren gilt.

$$RSS_w = \sum_{L_{min}}^{L_1} \epsilon_i^2 + \sum_{L_{1+1}}^{L_2} \epsilon_i^2 + \sum_{L_{2+1}}^{L_{max}} \epsilon_i^2 \tag{3.2}$$

Mit $\epsilon = p_E(L_i) - p_M(L_i)$ als Differenz zwischen den aufgezeichneten Werten und den Modellierten in den angegebenen Grenzen.

Dabei gibt L_1 die obere Grenze der unteren Verteilungsfunktion an. Die mittlere Gaußsche Normalverteilungsfunktion liegt zwischen L_{1+1} und L_2 und demnach die obere zwischen L_{2+1} und dem maximal aufgezeichneten Pegelwert. Die konkreten Werte werden unter Betrachtung der Ausprägungsform der jeweils anzupassenden Verteilungsfunktion individuell gesetzt. Sie dienen als Orientierung für den verwendeten Optimierungsalgorithmus, um eine sinnvolle Ermittlung der Normalverteilungsfunktionen und deren Parameter zu gewährleisten. Im Gegensatz zur bisherigen Forschung wird auf zusätzliche Gewichtungsfaktoren verzichtet, da durch die unterschiedlichen Volumen der betrachteten Räume eine plausible Herleitung aus der Literatur nicht möglich scheint. So werden zwar in der Literatur zwei verschiedene Raumgrößen abgedeckt. Es ist aber nicht beschrieben, wie die Gewichtungen für Räume anderer Größe und Nutzungsart (zum Beispiel Vorlesungssaal) umzurechnen sind. Auch berichten die Autoren, dass die verschiedenen eingesetzten Gewichtungen nur minimale Unterschiede erzielt haben und dies vorerst weiter evaluiert werden müsse.
Die Zusammensetzung der modellierten Verteilungskurve in dieser Arbeit ist nach Gleichung 3.3 beschrieben.

$$p_M(L_i|Z) = A_1 \cdot p_{\mu_1,\sigma_1}(x_1) + A_2 \cdot p_{\mu_2,\sigma_2}(x_2) + A_3 \cdot p_{\mu_3,\sigma_3}(x_3) \tag{3.3}$$

Mit $Z = (A_1, A_2, A_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ und A als Verstärkungsfaktor, μ gleich dem Mittelwert sowie σ als die Standardabweichung der Normalverteilung p.
Zur Beschreibung der modellierten Verteilungsfunktion wird zudem in dieser Arbeit ein Verstärkungsfaktor A_3 eingeführt, da dieser bei der Minimierung der Fehlerfunktion zu einem effektiveren Ergebnis führt. Für das Optimieren der Fehlerfunktion (RSS) wird die MATLAB-Funktion *fmincon* verwendet, welche die optimierten Parameter der drei Normalverteilungsfunktionen (Mittelwert, Standardabweichung und Verstärkungsfaktor) als Ergebnis des Minimierungsproblems liefert. Abbildung 3.7 zeigt beispielhaft eine gemessene Häufigkeitsverteilung, sowie die modellierte Kurve.

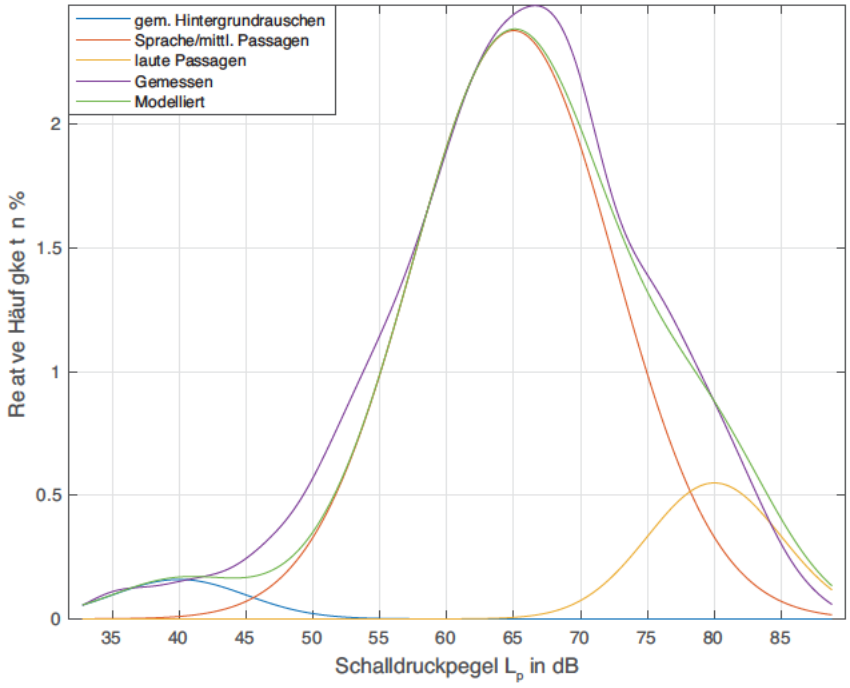

Abbildung 3.7.: Gemessene und modellierte Verteilungskurve eines Zeitabschnittes im 1 kHz Oktavband unter Angabe der Verteilungskurven der drei Signalanteile

Die Verteilungskurve mit dem niedrigsten Mittelwert wird als das *gemischte Hintergrundrauschen* (blau) angenommen. Da dieses aus dem technischen Hintergrundrauschen sowie Publikumsrauschen besteht, wird dessen Verteilungskurve zur weiteren Ermittlung des Publikumsgeräuschpegels verwendet.
Die restlichen beiden Verteilungskurven stellen die übrigen gemessenen Signalanteile und deren Pegelverteilung dar. Diese können als Sprache/durchschnittlich laute Passagen (orange) sowie lautere musikalische Passagen (zum Bsp. forte oder Tutti-Passagen (gelb)) beschrieben werden.

3.3.3. Verteilungsfunktion der Publikumsgeräuschpegel und Einzahlwertermittlung

Da das technische Hintergrundrauschen im unbesetzten Zustand bei jeder Messung erfasst wurde, liegt hierzu ebenso eine Häufigkeitsverteilung der aufgezeichneten Pegel je Oktavband vor. Ähnlich zu Jeong et al., 2012, werden auf Basis des bekannten Mittelwertes sowie Standardabweichung des gemischten Hintergrundrauschens und technischen Hintergrundrauschens jeweils neue Verteilungskurven interpoliert (1000 Datenpunkte, vergleichbar mit Monte Carlo - Simulation). Insbesondere für das technische Hintergrundrauschen, welches meist nur für einen kurzen Zeitraum (1-3 Minuten) aufnehmbar ist, soll dies die

Messdaten stabilisieren und den Einfluss von Ausreißern mindern. Durch energetische Subtraktion von gemischtem Hintergrundrauschen und technischem Hintergrundrauschen, kann eine Verteilungskurve des Publikumsrauschens für jedes Oktavband gewonnen werden.
Abbildung 3.8 zeigt ein Beispiel der beiden Verteilungskurven (gemischtes Hintergrundrauschen und techn. Hintergrundrauschen) sowie der gewonnen Verteilungskurve der Publikumsgeräusche innerhalb eines Oktavbandes.

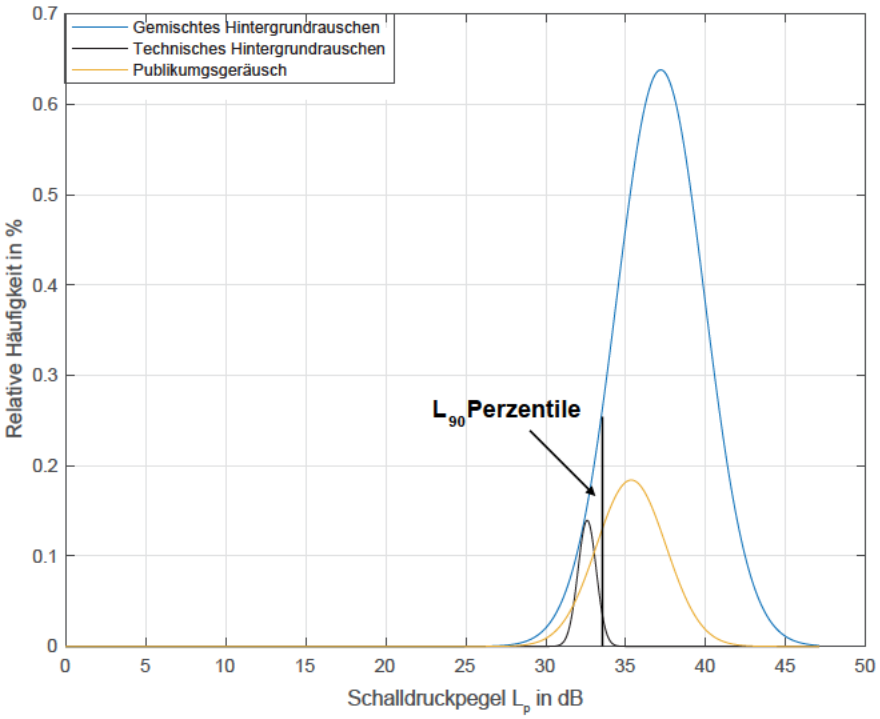

Abbildung 3.8.: Häufigkeitsverteilung des gemischten Hintergrundrauschens, technischem Hintergrundrauschen sowie extrahiertem Publikumsgeräusch unter Angabe des L_{90} Perzentile des gemischten Hintergrundrauschens (500 Hz Oktavband)

Liegt der Mittelwert des technischen Hintergrundrauschens oberhalb des L_{90} Perzentiles des gemischten Hintergrundrauschens, so kann davon ausgegangen werden, dass in diesem Oktavband das technische Hintergrundrauschen die Publikumsgeräusche maskiert und letztere nicht sinnvoll extrahiert werden können. Andernfalls lässt sich, wie in der obenstehenden Grafik abgebildet, eine Häufigkeitsverteilung der Publikumsgeräuschpegel extrahieren.

Ermitteln eines Einzahlwertes Liegt die extrahierte Verteilungskurve der Publikumsgeräuschpegel innerhalb des betrachteten Oktavbandes (und Zeitabschnitt) vor, so muss ein Einzahlwert für den betreffenden Schalldruckpegel ermittelt werden.

Jeong et al., 2012 verwenden hierfür das L_{90} Perzentile der gewonnenen Verteilungskurve. Dieses wird meist zur Abschätzung des Hintergrundlärms einer gemessenen Häufigkeitsverteilungskurve angenommen (Cowan*, 1993, S.41). Da die extrahierte Verteilungskurve der Publikumsgeräusche jedoch bereits auf der Annahme zur Signaltrennung beruht und keine gemessene Kurve darstellt, wird im Rahmen dieser Arbeit auf weitere Vermutungen zur Ermittlung des Einzahlwertes verzichtet. Insbesondere weil Publikumsgeräusche als Teil des gemischten Hintergrundrauschens bereits einen Geräuschanteil darstellen, der nochmals unterteilt werden würde.
Folglich wird die errechnete Häufigkeitsverteilungskurve nicht zusätzlich unterteilt, sondern der *Mittelwert* im weiteren Verlauf dieser Arbeit herangezogen. Dieser beschreibt den mittleren Pegel der extrahierten Publikumsgeräusche und somit auch den der größten Häufigkeit. Sind je Zeitabschnitt alle Oktavbänder analysiert, kann ein Verlauf zur spektralen Verteilung der Publikumsgeräusche in jedem Zeitintervall gewonnen werden. Aus diesem lassen sich ebenso bewertete Breitbandpegel ableiten.

3.4. Statistisches Vorhersagemodell

Mit den ermittelten Einzahlwerten der Publikumsgeräusche stellen Jeong et al. (2012) ein empirisches Vorhersagemodell auf, um den Geräuschpegel eines Publikums der Größe N und der damit verbundenen äquivalenten Absorptionsfläche A vorhersagen zu können. Die Untersuchungen zeigen, dass eine starke Korrelation (0,81) zwischen dem Publikumsgeräuschpegel (500 Hz bis 4 kHz) und dem technischen Hintergrundrauschen vorliegt. Eine schwache negative Korrelation (-0,54) besteht zwischen dem Publikumsgeräuschpegel und der äquivalenten Absorptionsfläche. Ein Einfluss der Zuschaueranzahl konnte nicht nachgewiesen werden. Das auf Grundlage dieser Erkenntnis entwickelte Vorhersagemodell ist in Gleichung 3.4 beschrieben und sagt den Publikumsgeräuschpegel je Oktave vorher.

$$L_{AN} = 28,8 + 0,88L_{BN} - 6,6log(A) \tag{3.4}$$

Mit L_{AN} als Publikumsgeräusch, L_{BN} als technisches Hintergrundrauschen des Oktavbandes und A entsprechend der äquivalenten Absorptionsfläche der Zuschauer. Laut Literatur besitzt dieses lineare Regressionsmodell eine Anpassungsgüte von 72% mit $R^2 = 0.72$. Der dabei ermittelte Wert wird als Publikumsgeräuschpegel über den gesamten Veranstaltungszeitraum angenommen.

Um die hierarchische Struktur des zugrunde liegenden Datensatzes (mehrere Messungen je Raum) zu berücksichtigen, wird im Rahmen dieser Arbeit ein

Mehrebenenmodell (engl. Linear Mixed Effect Model) berechnet. Dieses dient dem Hypothesentest und um feste als auch zufällige Effekte schätzen zu können, welche für ein Vorhersagemodell benötigt werden. Somit können zusätzlich zu dem Modell von Jeong et. al Unterschiede zwischen den betrachteten Räumen sowie zeitliche Veränderungen mit einbezogen werden.
Bei dem hier verwendeten Modell handelt es sich um ein *Random Intercept* Modell, d.h es werden neben einem allgemeinen Achsenabschnitt der Regressionsgeraden, zusätzlich Achsenabschnitte je Gruppe zugelassen. Dieser Zusammenhang kann mit Gleichung 3.5 beschrieben werden:

$$Y_{ij} = \beta_{0j} + \beta_{1j} X_{ij} + e_{ij}, \quad wobei \quad \beta_{0j} = \beta_0 + u_{0j} \tag{3.5}$$

mit β_{0j} als allgemeiner Achsenabschnitt auf der Y-Achse und $u_{0j} \sim N(0, \sigma^2_{u0})$ als zufällige Effekte (gruppierende Variablen: Raum, Mess ID, Zeitabschnitt). β_{1j} bestimmt den Anstieg der Regression, X_{ij} den Koeffizienten des jeweils zu untersuchenden fixen Effektes (zum Beispiel techn. Hintergrundrauschen) und $e_{ij} \sim N(0, \sigma^2_e)$ steht für das Residuum. Der Index j bezeichnet die Gruppe (zum Beispiel den Raum) und steht somit für die hierarchische Struktur der Daten. Der zweite Index i beschreibt die Anzahl der Beobachtungen je Gruppe.
Um die aufgestellten Hypothesen zu testen und den Einfluss von raumakustischen Parametern zu untersuchen, wird die Berechnung des Modells in R-Studio vorgenommen. Zur Berechnung der Varianzanalyse wird die Methode von Satterthwaite's, unter Verwendung des *lmerTest* Package (Kuznetsova et al., 2017), herangezogen.

3.5. Vokabularerstellung zur Beschreibung von Publikumsgeräuschen

Um mögliche Schalldruckpegelveränderungen unter Einfluss der wahrgenommenen akustischen Eigenschaften sowie dem atmosphärischen Charakter der Publikumsgeräusche beschreibbar zu machen, muss hierfür ein Vokabular entwickelt werden. Auch soll hierdurch untersucht werden, ob und inwiefern diese Beschreibung ein multidimensionales Begriffskonstrukt darstellt.
Anhand einer Selbsteinschätzung zur Stimmung während einer Konzertveranstaltung sowie einem Hörversuch sollen Begriffe herausgearbeitet werden, welche das Vokabular hierfür bilden. Anschließend soll durch Korrelationsanalyse ermittelt werden, ob Veränderungen der Geräuschpegel durch Änderungen der Begriffsbewertungen zu erklären sind.

3.5.1. Erste Begriffsfindung und Skalenentwicklung

Zur Erstellung eines ersten Konstrukts für die zu entwickeldene Skala während der Selbstbewertung, werden Begriffe aus bekannter Literatur herangezogen. Kang et al., 2013 beschreiben zum Beispiel die Stimmungszustände eines Publikums wie folgt:

- Aufmerksam
- Neutral
- Abgelenkt
- Gelangweilt
- Kritisch
- Aktiv
- Schläfrig
- Entspannt

Die Ausführungen von Kang et al. (2013) ermöglichen eine erste qualitative Beschreibung der wahrgenommenen Stimmung und Atmosphäre eines Publikums. Eine eindeutige Kategorisierung von zum Beispiel *Nicht Aufmerksam* zu *Aufmerksam* scheint hier in Form einer eindimensionalen Skala jedoch durch die Vielzahl von Begriffen als nicht sinnvoll.
Betrachtet man die aus der Literatur gewonnen Begriffe, so lässt sich ein Zusammenhang zum bestehenden dreidimensionalen Emotionsmodell nach Schimmack & Grob, 2000 herstellen. Hier werden zwar emotionale Zustände einer Person dargestellt, die verwendeten Begriffe und deren Zuordnung auf den drei Skalen (Items) ähneln aber sehr denen von Kang und sollen zur Beobachtung und Einschätzung des Publikums herangezogen werden.
Eine schematische Darstellung des Modells, in Anlehnung der Forschungsergebnisse von Schimmack und Grob ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

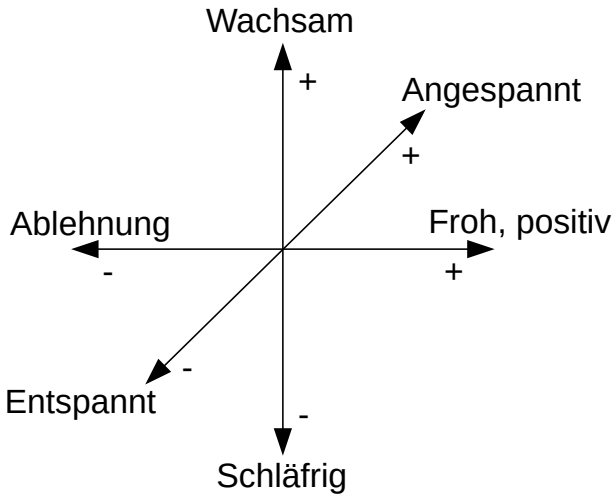

Abbildung 3.9.: Modell zur Stimmungsbewertung eines Publikums in Anlehnung an das Emotionsmodell nach Schimmack & Grob

Die Begriffe aus Auflistung 3.5.1 sind in der *Gefallen* - *Wachheits* - Ebene angeordnet. Dies folgt dem ursprünglichen *Valence* - *Arousal* - Modell von Russel (Russell, 1980) und dient der sinnvollen Zuordnung. Die zusätzlich dritte Dimension *Anspannung* ist gemäß Schimmack und Grob übernommen.
Es wird der hypothetische Ansatz verfolgt, das eine (Selbst-)Bewertung der Stimmung bzw. Aufmerksamkeit des Publikums mittels dieser drei Skalen (Items) vorerst möglich ist. Anhand der empirisch erhobenen Daten kann nachfolgend ermittelt werden, ob zwischen dem Bewertungsverlauf der jeweiligen Items und dem ermittelten Schalldruckpegelverlauf der Publikumsgeräusche ein korrelierter Zusammenhang besteht oder nicht.

3.5.2. Selbstbewertung der Stimmung während Konzertveranstaltung

Während eines Konzertabends im UdK-Konzertsaal bewerten 13 Personen ihre eigene Stimmung anhand von drei Begriffen (*Anspannung*, *Wachheit*, *Gefallen*), welche die drei Achsen des zuvor genannten Modells widerspiegeln.
Das Konzertprogramm besteht aus zwei Werken zu je drei und vier Sätzen (Jean Sibelius: Sinfonie Nr. 3 C-Dur op. 52 und Felix Mendelssohn Bartholdy: Sinfonie Nr. 5 'Reformations-Sinfonie'), einer Pause und abschließend einem Werk in drei Sätzen (Igor Strawinsky: Der Feuervogel).
Die Bewertungen erfolgen nach jedem einzelnen Satz eines Werkes. Dabei verwenden die Probanden ihr Smartphone auf welchem nach Ende jedes Satzes die Frage erscheint, wie sie ihre Stimmung in Hinblick auf die letzten 5 Minuten des vorangegangenen Satzes bewerten würden. Die drei Begriffe können dann mittels 10-stufiger Likert-Skala bewertet werden. Durch die browserbasierte Software wird ein erfolgreiches Registrieren der Antwort signalisiert und jeder Proband kann eine Frage nur einmal beantworten. Anschließend verschwindet die Frage und erscheint zum Ende des nächsten Satzes erneut.
Nach Erhalt aller Selbsteinschätzungen, können die Bewertungen innerhalb eines Werkes (über alle Sätze) betrachtet sowie über den Verlauf des Konzertes analysiert werden.

3.5.3. Hörversuch

Um die Begriffe der zuvor erarbeiteten, dreidimensionalen Skala potentiell zu erweitern, wird abschließend ein Hörversuch durchgeführt. Die Stimuli hierfür sind den Aufnahmen entnommen, welche mit dem VR-Mikrofon während jeder Messung aufgezeichnet wurden. Sie beinhalten ausschließlich Publikums- sowie technische Hintergrundgeräusche und sind zwischen fünf und 20 Sekunden lang. Das Aufnahmeformat kann durch ein Plugin (Sennheiser AMBEO) in das Ambisonics ambix - Format umgewandelt werden, womit die Aufnahmen im kleinen Studio der TU Berlin und dem hier installierten Ambisonics Dome wiedergegeben werden können. Der Wiedergabepegel an der Hörerposition wird dabei dem gemessenen Schalldruckpegel angeglichen.
Dieses Wiedergabeverfahren ermöglicht es, dass ein möglichst realistischer räumlicher Eindruck des Aufnahmeortes und dessen Geräuschkulisse reproduziert wird. Im Gegensatz zu einer binauralen Wiedergabe können mit diesem Versuchsaufbau ohne Mehraufwand mehrere Personen den Versuch durchführen und die Geräuschkulisse bewerten. Auch wird angenommen, dass ein Sitzen im reproduzierten Schallfeld der nachempfunden Hörersituation in der betreffenden Veranstaltung am nächsten kommt. Die Teilnehmeranzahl wird hierbei auf 3-4 Personen beschränkt, um zu ermöglichen, dass eine weitesgehend mittige Hörposition eingenommen werden kann und die eingebrachte Absorbtionsfläche der Teilnehmer den eingemessenen Wiedergabepegel nicht beeinflusst.

Um zu gewährleisten, dass auch Ausschnitte mit einem sehr geringen Publikumsgeräuschpegel zweifelsfrei ohne Einfluss der technischen Geräte im Studio bewertet werden können, wird vorab der Ruhepegel gemessen (alle benötigten Geräten angeschaltet). Der gemessene Ruhepegel ist in Tabelle 3.2 je Oktavband dargestellt.

f_m in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	63-8000
L_p in dB(A)	9,2	5,6	7,3	10,2	12,9	15,8	16,5	15,4	22,2

Tabelle 3.2.: Gemessener Ruhepegel je Oktavband sowie breitbandig A-bewertet im kleinen Studio der TU Berlin, mit allen benötigten Geräten angeschaltet

Betrachtet man den breitbandigen Pegel so liegt dieser mit 22dB(A) immer noch 15dB unterhalb des niedrigsten präsentierten Pegels eines Stimuli (Udk Konzertsaal: 37,5 dB(A)). Der Einfluss des Ruhepegels im Studio ist daher als nur sehr gering einzuschätzen.

Vokabularerstellung Innerhalb einer vorgelagerten Gesprächsrunde soll einmalig, wie eingangs erwähnt, auf Basis des zuvor erstellten Modells weiteres Vokabular erarbeitet werden, um die akustischen Eigenschaften der präsentierten Publikumsgeräusche und deren Atmosphäre beschreiben zu können. Als Grundlage dienen zum einen Beschreibungen aus der Literatur ((Tudor, 2016), (Kang et al., 2013)) sowie Begriffe des RAQI - Vokabulars (Weinzierl et al., 2018) und dem ISO Standard zur Bewertung von Soundscapes (vgl. ISO/TS 12913:2 2018, S.16-18).
Um ein strukturiertes Vorgehen sicherzustellen, werden zu Beginn zwei Stimuli wiedergeben und Begriffe von allen Teilnehmern genannt, welche Unterschiede innerhalb dieses Paares beschreiben. Die Begriffe müssen dabei eine bipolare Ausprägung besitzen und Adjektive sein. Im weiteren Verlauf werden weitere Stimulipaare vorgespielt und zusätzliche Begriffe bzw. Begriffspaare erarbeitet, die wieder den Unterschied zwischen zwei Stimuli beschreiben. Dieses Verfahren ist angelehnt an die Repertory Grid Technique, welche aus der Persönlichkeitspsychologie stammt aber bereits zur Begriffsfindung und Beschreibung von akustischen Stimuli verwendet wurde (Berg & Rumsey, 2006) (Grill et al., 2011). Stimmen alle Diskussionsteilnehmer zu, dass im Laufe der Diskussionsrunde eine Sättigung erreicht ist, wird die Begriffsfindung als beendet erklärt und ein Fragebogen mit den gesammelten Begriffspaaren erstellt.
Insgesamt werden der jeweiligen Teilnehmergruppe 31 Stimuli präsentiert. Auf Grund der teilweise sehr begrenzten Längen, läuft jeder Stimulus in einer Schleife. Die Teilnehmer können die Wiedergabe selbst Starten und Stoppen und zwischen den Stimuli wechseln. Die betreffende Nummerierung wird auf einem Bildschrim angezeigt. Die Bedienung zum Starten, Stoppen und Wechseln der Stimuli erfolgt über ein Tablet, welches über TouchOSC Midi-Nachrichten sendet. Die Wiedergabe erfolgt dann über REAPER, welches auf dem MacPro des Studios installiert ist. Die Bewertung eines Stimuli erfolgt über den erarbeiteten Fragebogen, welcher browserbasiert für jeden Teilnehmer zugänglich ist.

4. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der acht Publikumsgeräuschmessungen in fünf verschiedenen Räumen beschrieben. Außerdem werden die Ergebnisse zur Erstellung des statistischen Vohersagemodells, der Selbsteinschätzung zur Publikumsstimmung sowie des Hörversuches vorgestellt und das erarbeitete Beschreibungsvokabular präsentiert.

4.1. Ermittelte Nachhallzeiten

Bis auf das Uni.T Theater und der Staatsoper waren für alle Räume Daten zur Nachhallzeit im unbesetzten Zustand verfügbar und wurden bereitgestellt. Im Uni.T Theater ist die Nachhallzeit wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, im unbesetzten Zustand selbst gemessen. Für die Staatsoper lagen gemessene Nachhallzeiten für den besetzten Zustand vor (siehe Vercammen & Lautenbach, 2018b). Tabelle 4.1 zeigt die mittleren Nachhallzeiten (gemittelt zwischen 500 Hz und 1000 Hz Oktavband[1] gemäß DIN EN ISO 3382-1) im unbesetzen Zustand sowie die berechneten Nachhallzeiten im besetzten Zustand unter Angabe der Zuschaueranzahl. Die Berechnung des besetzten Zustands erfolgt, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben nach DIN18041:2016-03.

	øRT60 (unbes.)	øRT60 (bes.)	Volumen	Zuschauer
Uni.T 01/02	1,5	1,4/1,4	4850 m^3	80/130
Audimax 01/02	2,1	1,4/1,9	8605 m^3	700/200
UdK Konzertsaal 01/02	1,6	1,4/1,5	9000 m^3	600/230
Komische Oper	1,3	1,2	7057 m^3	1150
Staatsoper	-	1,6	9500 m^3	1300

Tabelle 4.1.: Mittlere Nachhallzeiten im unbesetzten Zustand in Sekunden sowie errechnet im besetzten Zustand mit Angabe von Volumen und geschätzter Publikumsgröße

Eine detaillierte Angabe der Nachhallzeiten in Oktaven ist nachstehend in Tabelle 4.2 abgebildet.

[1] Mittelung für Staatsoper gemäß Quelle von 125 Hz - 4000 Hz.

f_m in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Uni.T (unbes.)*	2,7	2,6	2,3	1,6	1,4	1,3	1,0	0,7
Uni.T01 (bes.)	2,7	2,5	2,2	1,5	1,4	1,2	1,0	0,7
Uni.T02 (bes.)	2,7	2,5	2,1	1,5	1,3	1,2	1,0	0,7
Audimax (unbes.)*	2,0	2,3	2,4	2,1	2,1	1,9	1,4	0,8
Audimax 01 (bes.)	1,8	2,0	1,8	1,5	1,4	1,2	1,0	0,7
Audimax 02 (bes.)	1,9	2,2	2,2	1,9	1,9	1,6	1,3	0,8
Udk (unbes.)*	2,0	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4	1,1	0,7
UdK 01 (bes.)	1,9	1,8	1,5	1,4	1,3	1,2	1,0	0,7
UdK 02 (bes.)	2,0	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3	1,0	0,7
Komische Oper (unbes.) ▸	1,9	1,7	1,6	1,6	1,4	1,2	1,1	0,9
Komische Oper (bes.)	1,8	1,6	1,5	1,3	1,1	1,0	0,8	0,5
Staatsoper (bes.) ▸	1,5	1,5	1,8	1,7	1,7	1,7	1,5	1,4

Tabelle 4.2.: Nachhallzeiten in Sekunden je Oktave, im unbesetzten sowie berechnet im besetzten Zustand. (* Nachhallzeiten T_{20}, ▸ Nachhallzeiten T_{30})

4.2. Extrahierte Publikumsgeräuschpegel

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Messungen und respektive der Ermittlung der breitbandigen Publikumsgeräuschpegel aufgeführt.

4.2.1. Breitbandiger Pegel und zeitlicher Verlauf

Da die Publikumsgeräusche für alle Veranstaltungen nicht im selben Frequenzbereich extrahiert werden können, wird der Bereich von 500 Hz - 8000 Hz zum Erstellen der breitbandigen Pegel gewählt. Hier konnten in jedem Raum die Publikumsgeräusche extrahiert werden, was eine Vergleichbarkeit der Räume ermöglicht. Die während der Darbietung ermittelten breitbandig A-bewerteten Pegelverläufe sind über die analysierten Zeitabschnitte aufgetragen und in Abbildung 4.1 dargestellt.

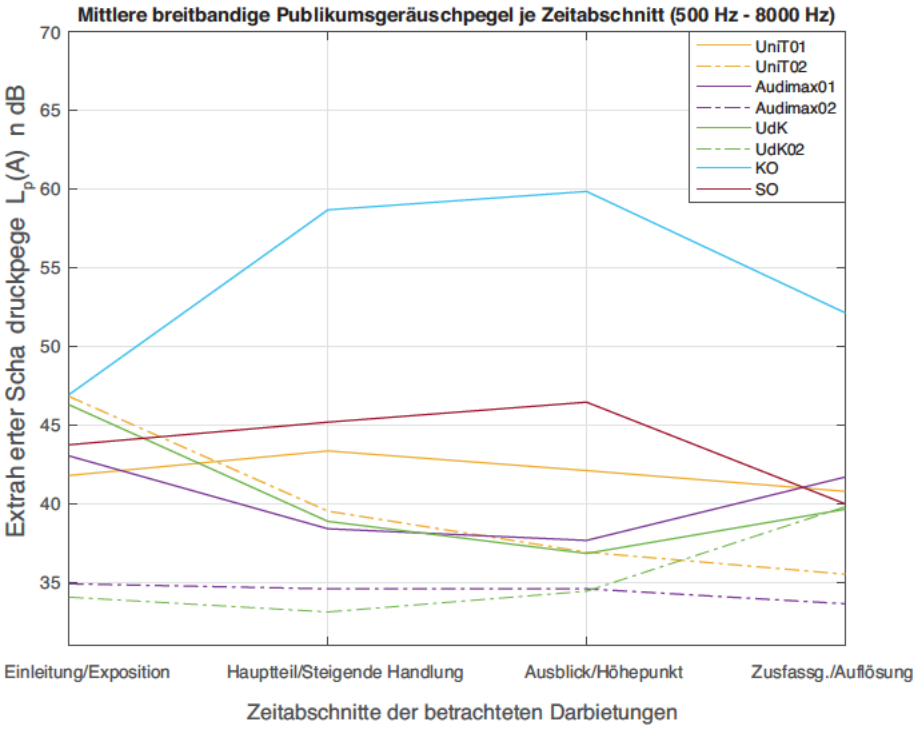

Abbildung 4.1.: Zeitlicher Verlauf der extrahierten breitbandigen Publikumsgeräuschpegel während der Darbietung (KO = Komische Oper, SO = Staatsoper)

Grundsätzlich sind zwei charakterische Verläufe der Publikumsgeräuschpegel über die Zeit zu erkennen. Der erste ist durch einen U-förmigen Verlauf gekennzeichnet, mit den niedrigsten Werten meist um Zeitabschnitt zwei oder drei und anschließend wieder ansteigendem Pegel, welcher meist unterhalb des maximalen Pegels aus dem ersten Zeitabschnitt liegt. Hierzu gehören die Verläufe von Udk01/02, Audimax01 und Unit02, wobei bei letzterem der Pegel zum Ende hin wieder abfällt. Der zweite Verlauf wird durch die Veranstaltungen in der Komischen Oper, Staatsoper sowie UniT01 gebildet. Dieser folgt einer invertierten U-Form mit einem Anstieg zum dritten Zeitabschnitt hin und anschließendem Pegelabfall zum Ende. Die zweite Veranstaltung im Audimax ist mit einem eher monotonen Verlauf keinem der beiden charakteristischen Verläufe zu zu ordnen.
Trotz der Unterschiedlichkeit der einzelnen Veranstaltungstypen bilden die beiden Verläufe eine sinnvolle Zusammenfassung der jeweiligen Räume ab. So folgen die gemessenen klassischen Konzertveranstaltungen sowie eine Theatervorstellung dem U-förmigen Verlauf. Dahingegen wird der gegensätzliche zweite Verlauf durch die beiden Opernveranstaltungen und der zweiten Theaterveranstaltung abgebildet, was durch einen sich ähnelnden dramaturgischen Aufbau begründet werden kann. Auf Grund der Veränderungen der ermittelten Publikumsgeräuschpegel über die Zeit gilt *Hypothese 1* somit als bestätigt.

Um einen Überblick des detaillierten Verlaufes der Publikumsgeräuschpegel über einen gesamten Konzertabend zu erhalten, sind zusätzlich die Verläufe für den UdK Konzertsaal (01) sowie für die Staatsoper in Abbildung 4.2 und 4.3 aufgetragen. Diese zeigen den Verlauf des ermittelten Schalldruckpegels der Publikumsgeräusche während der Darbietung einzelner Werke/Akte sowie zusätzlich die Pegelwerte, welche während der Pause und Applaus gemessen werden können.

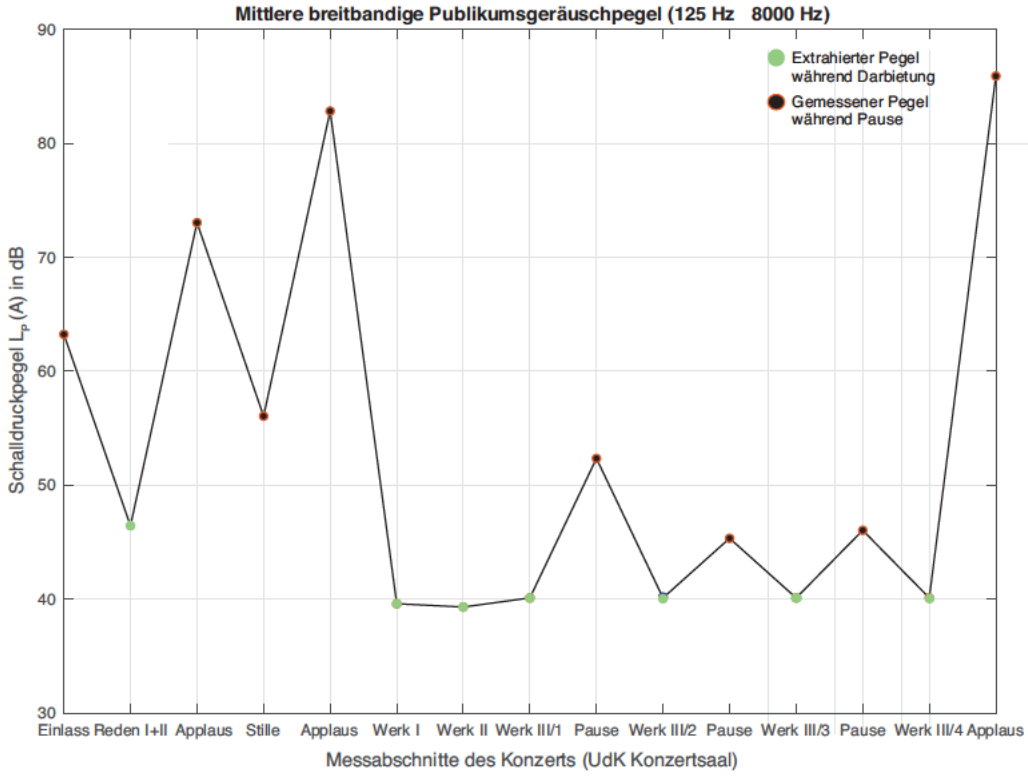

Abbildung 4.2.: UdK Konzertsaal (01): Ermittelte Publikumsgeräuschpegel für detaillierte Zeitabschnitte des gesamten Konzertabends (Grün: Extrahierter Publikumsgeräuschpegel während Darbietung, Schwarz-rot: Gemessen während Pause)

In dieser Darstellung ist gut zu erkennen, wie die extrahierten Pegelwerte vom Abschnitt *Rede* über *Werk I* hin zu *Werk II* abfallen (grün) , um zu den Abschnitten von *Werk III* hin wieder anzusteigen. Während der Applaus am Anfang noch als verhalten bezeichnet werden kann, nimmt dessen Pegel im weiteren Verlauf zu und erreicht seinen höchsten Wert mit dem Abschlussapplaus. Auch sinkt der Publikumsgeräuschpegel während der Pausenabschnitte vom Anfang zum Ende hin. So ist der Abschnitt *Stille* bei dem das Publikum auf den Dirigenten wartet, mit 56 dB(A) um 4 dB lauter als der Pegel in der nächsten Pause und um 12 dB höher als die Satzpausen während des dritten Werkes. Die letzte

Satzpause weist einen etwas höheren Pegel auf als die vorherige und folgt somit dem Verlauf des Publikumsgeräuschpegels während der Darbietung.

Die ermittelten Publikumsgeräuschpegel während der Darbietung in der Staatsoper sowie die gemessenen Pegel in der Pause sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Für den Schalldruckpegelverlauf während der Darbietung ist ein Anstieg von *Akt I/1* bis *Akt II* zu erkennen, welcher zum letzten Akt hin wieder abfällt (grün).

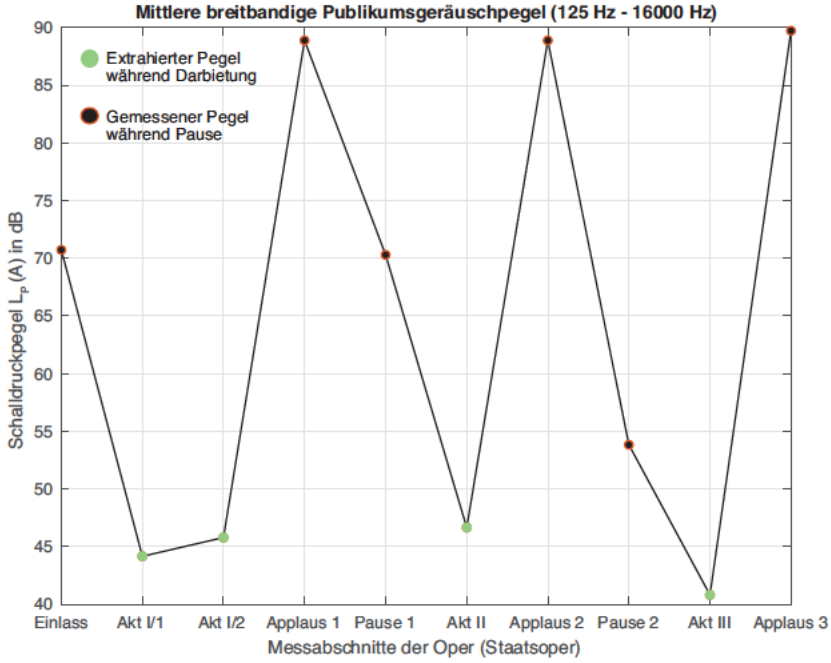

Abbildung 4.3.: Staatsoper: Ermittelte Publikumsgeräuschpegel für detaillierte Zeitabschnitte des gesamten Opernabends (Grün: Extrahierter Publikumsgeräuschpegel während Darbietung, Schwarz-rot: Gemessen während Pause)

Während die Pegel für *Einlass* und der großen Pause (*Pause 1*) zwischen erstem und zweiten Akt sehr ähnlich sind, ist die Pause zwischen zweiten und drittem Akt deutlicher leiser, da hier das Publikum sitzen bleibt und die Pause wesentlich kürzer ist. Der Applaus hingegen erreicht für alle Abschnitte einen nahezu konstanten Pegel. Der höchste Wert wird wieder mit dem Abschlussapplaus erreicht.

4.2.2. Spektrale Verteilungen

Uni.T

Im Theater der UdK Berlin wurde während zwei Veranstaltungen gemessen und die spektrale Zusammensetzung der Pubklikumsgeräusche je Zeitabschnitt analysiert. Die Messergebnisse der ersten Veranstaltung mit 80 Zuschauern sind nachstehend in Abbildung 4.4 dargestellt. Abbildung 4.5 zeigt die Ergebnisse der zweiten Veranstaltung, welche mit ca. 130 Zuschauern besser besucht war, als die erste.

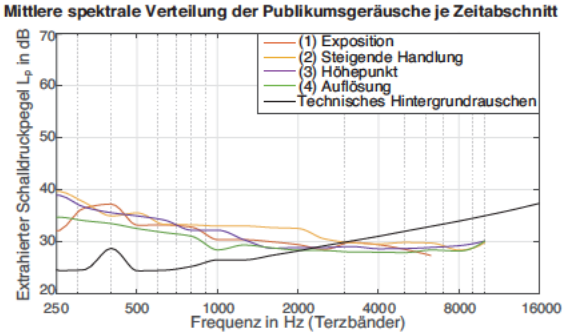

Abbildung 4.4.: Uni.T (01), N=80

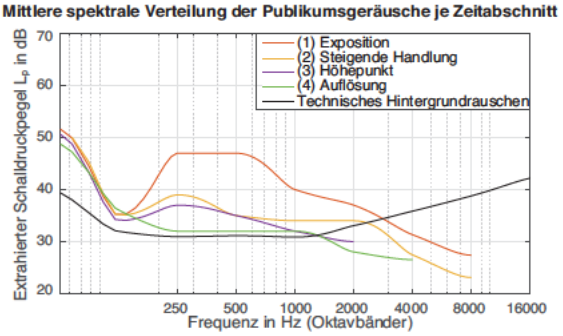

Abbildung 4.5.: Uni.T (02), N=130

Durchschnittliche spektrale Zusammensetzung der extrahierten Publikumsgeräusche im Uni.T gemittelt je Zeitabschnitt

Die Pubklikumsgeräusche sind für die erste Veranstaltung zwischen ca. 250 Hz - 2000 Hz extrahierbar. Unterhalb sowie oberhalb dieses Frequenzbereiches werden die Publikumsgeräusche vom technischen Hintergrundrauschen maskiert. Dabei beträgt die mittlere Differenz zwischen technischem Hintergrundrauschen und Publikumsgeräuschen 6,6 dB (SD=1,0 dB). Der Verlauf der einzelnen Zeitabschnitte ist insgesamt sehr ähnlich. Der Abschnitt *steigende Handlung* weist im Mittel den höchsten Pegel auf und liegt in Teilen oberhalb der anderen Intervalle. Der letzte Abschnitt *Auflösung* liegt im Mittel am niedrigsten. Zwischen 1000 Hz - 2000 Hz ist eine deutlichere Separierung zwischen den Kurven erkennbar. Darüber und darunter liegen alle sehr nah beieinander.

Für die zweite Veranstaltung können im Bereich von 125 Hz - 2000 Hz die Publikumsgeräusche sinnvoll extrahiert werden, da diese oberhalb des technisches Hintergrundrauschens liegen. Das Intervall *Exposition* besitzt die höchst gelegene Kurve gefolgt von den Zeitabschnitten *steigende Handlung* und *Höhepunkt*. Bis auf das 1000 Hz Oktavband sind alle Graphen gut von einander getrennt. Unterhalb von 250 Hz sind kaum Unterscheidungen erkennbar, sondern ein eher einheitlicher Verlauf aller Kurven. Publikumsgeräusche und technisches Hintergrundrauschen liegen im Mittel 6,6 dB (SD=2,8 dB) auseinander.

Audimax

Im Rahmen zweier Vorlesungen wurde der Pubklikumsgeräuschpegel im Audimax der TU Berlin erfasst. Abbildung 4.6 zeigt die spektrale Zusammensetzung der Publikumsgeräusche für die gewählten Zeitabschnitte der ersten Vorlesung. Das Publikum umfasste ca. 700 Personen. Unter Beibehalten des Messaufbaus wurde während einer weiteren Veranstaltung gemessen, welche mit 200 Zuschauern weniger gut besucht war als die erste Vorlesung und dessen Ergebnisse in Abbildung 4.7 dargestellt sind.

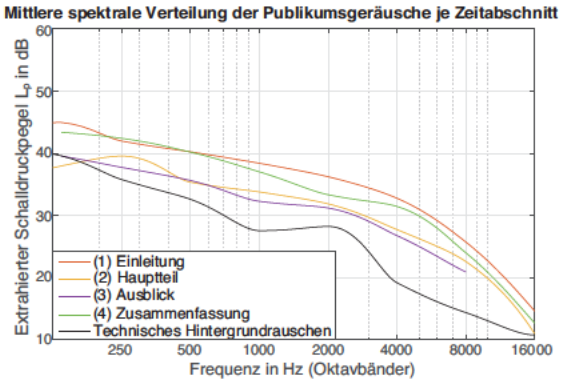

Abbildung 4.6.: Audimax (01), N=700

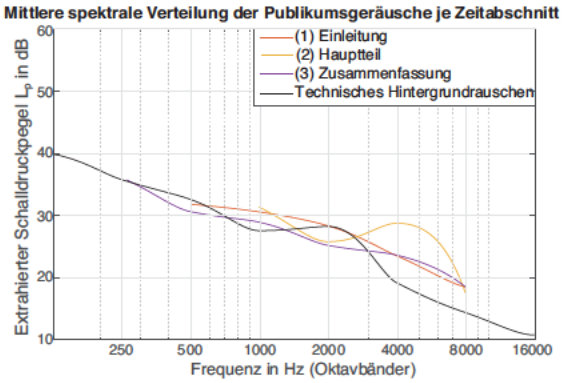

Abbildung 4.7.: Audimax (02), N=200

Durchschnittliche spektrale Zusammensetzung der extrahierten Publikumsgeräusche im Audimax gemittelt je Zeitabschnitt

Für die erste Vorlesung ist gut zu erkennen, dass zwischen 250 Hz - 16 kHz der Publikumsgeräuschpegel über dem technischen Hintergrundrauschen liegt. Im Mittel beträgt die Differenz 6,3 dB (SD=1,9 dB). Der Abschnitt *Einleitung* stellt den Graphen mit dem höchsten Schalldruckpegel dar, gefolgt vom chronologisch letzten Abschnitt *Zusammenfassung*. Hier sind Überschneidungen von 250 Hz bis 500 Hz erkennbar, danach sind beide Kurven klar getrennt. Parallel dazu verlaufen die Pegelverläufe der Zeitabschnitte *Hauptteil* und *Ausblick* in chronologischer Reihenfolge. Die spektrale Zusammensetzung aller Zeitabschnitte ist relativ zueinander sehr ähnlich. Sie unterscheiden sich lediglich durch die absoluten Pegelwerte.
Aus den Daten der zweiten Vorlesung ist zu entnehmen, dass die Publikumsgeräusche nur bedingt zwischen 500 Hz und 8000 Hz extrahierbar sind. Der Graph des Abschnittes *Einleitung* liegt mit durchschnittlich höchsten Pegelwerten knapp überhalb des technischen Hintergrundrauschens. Die Abschnitte *Hauptteil* und *Zusammenfassung* sind nur um 2000 Hz - 1000 Hz und zwischen 4000 Hz - 8000 Hz extrahierbar. Dies drückt sich auch in der niedrigen, mittleren Differenz von 2,2 dB (SD=1,3 dB) zwischen Publikumsgeräuschpegel und technischem Hintergrundrauschen aus. Auf Grund der inhaltlichen Struktur der gemessenen Vorlesung, war das Einfügen eines Abschnitts *Ausblick* nicht sinnvoll, weswegen dieser hier nicht existent ist.

UdK Konzertsaal

Die spektrale Zusammensetzung der Publikumsgeräusche während eines klassischen Konzertes sind in Abbildung 4.8 dargestellt. Die Zuschaueranzahl betrug während der ersten Messung etwa 600 Personen. Im Rahmen der zweiten Messung betrug die Zuschaueranzahl 230 Personen. Unter Beibehaltung des Messaufbaus sind die Ergebnisse der spektralen Zusammensetzung der Publikumsgeräusche in Abbildung 4.9 dargestellt.

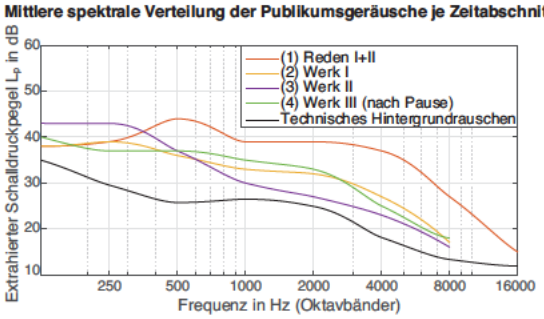

Abbildung 4.8.: UdK Konzertsaal (01), N=600

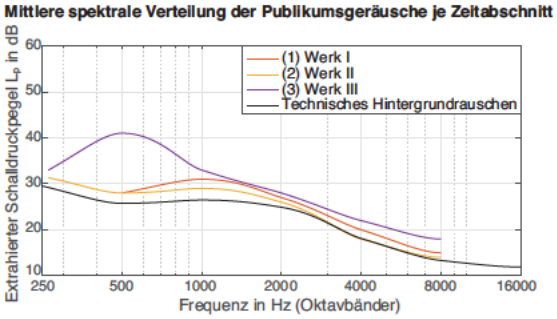

Abbildung 4.9.: UdK Konzertsaal (02), N=230

Durchschnittliche spektrale Zusammensetzung der extrahierten Publikumsgeräusche im UdK Konzertsaal gemittelt je Zeitabschnitt

Die Publikumsgeräusche sind in jedem Zeitabschnitt gut von 125 Hz - 8000 Hz extrahierbar, wobei eine deutliche Unterscheidung zwischen den Zeitabschnitten ab 500 Hz zu erkennen ist. Dabei ist der erste Abschnitt der beiden Reden durch die höchstgelegene Kurve gekennzeichnet. Die Zeitabschnitte von *Werk I* und *Werk III* ähneln sich sehr, wobei letzterer im Bereich von 500 Hz - 2000 Hz etwas oberhalb liegt. Die am niedrigsten gelegene Kurve ist die des dritten Abschnittes (*Werk II*), welcher das letzte Werk vor der Pause darstellt. Im Mittel liegen die Publikumsgeräusche 8,7 dB über dem technischen Hintergrundrauschen (SD=0,4 dB).

Für die zweite Messung ist, wie erwartet, der Bereich der zu extrahierenden Publikumsgeräusche mit 250Hz (für *Werk I*, 500 Hz) - 8000 Hz im tieffrequenten Bereich eingeschränkter als im Vergleich zur ersten Vorstellung mit einem größeren Publikum. Die Graphen der einzelnen Zeitbereiche verlaufen zudem deutlich näher entlang des technischen Hintergrundrauschens, sind dabei jedoch klar von einander getrennt. Hier bildet der dritte Abschnitt mit *Werk III* den höchst gelegenen Graphen gefolgt von *Werk I* und *Werk II*. Die Publikumsgeräusche liegen im Mittel 4,30 dB (SD=1,9 dB) über dem technischen Hintergrundrauschen.

Komische Oper

Die während des ersten Aktes einer Ballettaufführung extrahierten Publikumsgeräusche und deren spektrale Zusammensetzung sind in Abbildung 4.10 dargestellt. Da im Rahmen des zweiten Aktes die Musik ausschließlich elektroakustisch verstärkt wurde, sind nur die Publikumsgeräusche des ersten Aktes sinnvoll extrahierbar. Die Zuschaueranzahl betrug etwa 1150 Personen.

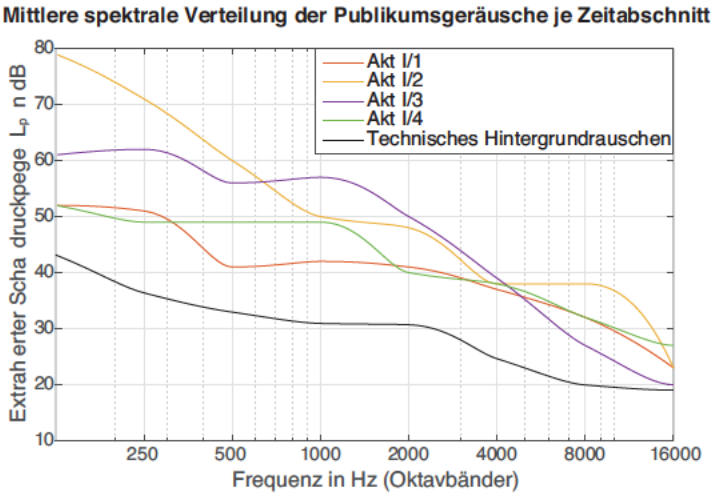

Abbildung 4.10.: Komische Oper: Durchschnittliche spektrale Zusammensetzung der extrahierten Publikumsgeräusche gemittelt je Zeitabschnitt, N=1150

Im Frequenzbereich von 125 Hz - 16 kHz ist es möglich die Publikumsgeräusche für jeden Zeitabschnitt zu extrahieren. Unterhalb von 500 Hz überschneiden sich die spektralen Verläufe der Zeitabschnitte sehr. Da auch im ersten Akt teils elektronische Musik gespielt wurde, kann es insbesondere im tieffrequenten Bereich zu Überschneidungen mit den Pubklikumsgeräuschen kommen, was zu Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Publikumsgeräuschpegel führt. Oberhalb von 500 Hz bis ca. 4000 Hz ist eine bessere Differenzierung erkennbar. Demnach stellt *Akt I/1* den Abschnitt mit der am niedrigsten gelegenen Kurve da, gefolgt von Abschnitt *Akt I/4* und *Akt I/2*, welche oberhalb davon liegen. Abschnitt *Akt I/3* liegt in weiten Teilen oberhalb der übrigen drei Zeitabschnitte und stellt die Kurve mit dem durchschnittlich höchsten Pegel dar.
Im Mittel beträgt der Unterschied zwischen Publikumsgeräuschen und technischem Hintergrundrauschen 15,6 dB (SD=5,2 dB). Dies ist insbesondere durch erhöhte Pegel im tieffrequenten Bereich unter 500 Hz zu begründen.

Staatsoper

Auf Grundlage der Messdaten aus der Staatsoper kann die in Abbildung 4.11 dargestellte, spektrale Verteilung der Publikumsgeräusche je Zeitabschnitt gewonnen werden. Die Darbietung war mit etwa 1300 Zuschauern fast ausverkauft.

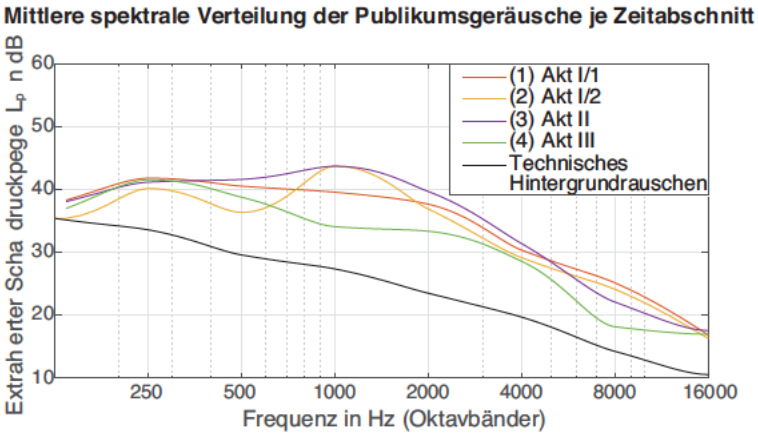

Abbildung 4.11.: Staatsoper: Durchschnittliche spektrale Zusammensetzung der extrahierten Publikumsgeräusche gemittelt je Zeitabschnitt, N=1300

Die Publikumsgeräuschpegel lassen sich für alle Abschnitte im Bereich von 125 Hz - 16 kHz extrahieren. Eine Differenzierung zwischen den einzelnen Akten findet ab etwa 500 Hz statt. Darunter sind die Verläufe sehr nah bei einander und kaum zu unterscheiden. Zwischen 500 Hz und 5000 Hz ist erkennbar, dass *Akt II* durch die am höchsten gelegene Kurve gekennzeichnet ist. Gefolgt von *Akt I/2* und *Akt I/1*, welche dicht beinander verlaufen. Der letzte *Akt III* stellt die am tiefsten verlaufende Kurve da.
Der Unterschied zwischen dem Publikumsgeräuschpegel und technischem Hintergrundrauschen beträgt im Mittel 8,7 dB (SD=1,8 dB).

Spektrale Verteilung von *Einlass* und *Applaus*

Zusätzlich zu den extrahierten Publikumsgeräuschpegeln werden in jedem Raum die mittleren spektralen Verläufe vor der Darbietung (Einlass) und abschließend während des Applaus analysiert. Abbildung 4.12 zeigt die durchschnittlichen spektralen Verteilungen (gemittelt über einen Messabschnitt) je Raum und Veranstaltung.

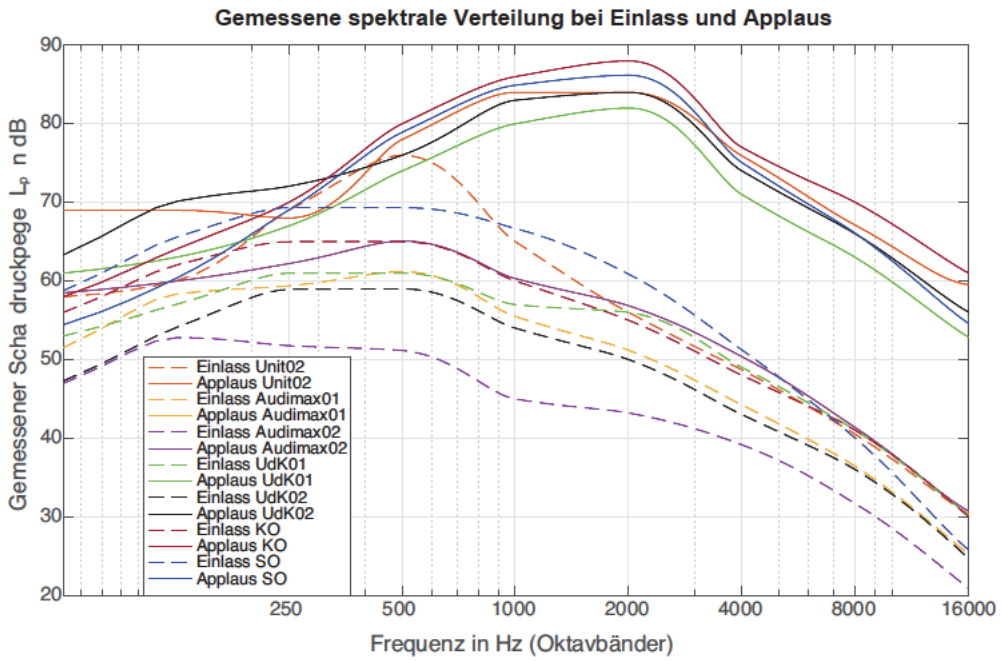

Abbildung 4.12.: Durchschnittlich gemessenen spektrale Verläufe für Einlass und Applaus je Raum und Veranstaltung (Gestrichelt: Einlass, Durchgezogen: Applaus)

Während die spektralen Verläufe von *Einlass* und *Applaus* sich bis zum 250 Hz Oktavband sehr überschneiden, zeichnet sich darüber, ab dem 500 Hz Oktavband, jeweils ein charakteristischer Verlauf ab.
So verlaufen die Graphen der Publikumsgeräusche während des Einlasses bis 1000 Hz recht monoton und beginnen zu höheren Frequenzen hin abzufallen. ab dem 2000Hz Oktavband sind sogar Steigungen von -10 dB je Oktave zu beobachten.
Dahingegen steigen die spektralen Verläufe vom Applaus ab 500 Hz an und erreichen zwischen dem 1000 Hz und 2000 Hz Oktavband den höchsten Punkt. Zum 4000 Hz Oktavband hin ist anschließend ein recht steiler Abfall zu beobachten, um darüber hinaus gleichmäßig mit etwa -10 dB je Oktave abzusinken.

4.3. Statistische Analyse und Vorhersagemodell

Basierend auf 30 Datenpunkten (acht Messungen zu je 3-4 Zeitabschnitten) kann der Einfluss des technischen Hintergrundrauschens, der Zuschaueranzahl sowie baulichen Gegebenheiten und den damit verbundenen raumakustischen Parametern untersucht werden. Basierend auf den vorangegangen Ergebnissen wurde ein Vorhersagemodell erstellt, welches einen breitbandigen Schalldruckpegel sowie eine spektrale Verteilung voraussagt. Der Frequenzbereich für die vorhergesagte spektrale Verteilung liegt dabei zwischen 250 Hz und 8000 Hz, da hier für fast alle Messungen der Publikumsgeräuschpegel extrahiert werden konnte.

Nullmodelle Vor dem Testen der Hypothesen werden Nullmodelle berechnet, welche nur den Einfluss der zufälligen Effekte untersuchen, um die zugehörigen Interclass Correlation Coefficients (ICC) zu berechnen. ICCs geben an, wie viel der Gesamtvarianz bezüglich des Publikumsgeräuschpegels allein durch zufällige Effekte, d.h. den kategorisierenden Variablen, aufgeklärt wird. Die Ergebnisse dieser Analyse ergeben, dass bereits 66% der Gesamtvarianz durch Unterschiede zwischen den Räumen (ICC_{Raum} = 0,66) hervorgerufen wird. Weitere 24% werden durch Unterschiede zwischen den Messungen selbst (ICC_{MessID} = 0,24) erklärt. Diese müssen berücksichtigt werden, da in drei von fünf Räumen eine wiederholte Messung im Rahmen einer anderen Veranstaltung stattfand.

Hypothesentest Im nächsten Schritt werden die Hypothesen überprüft, inwiefern der Publikumsgeräuschpegel durch das technische Hintergrundrauschen, raumakustische Parameter sowie die Zuschaueranzahl beeinflusst wird. Es wurde sowohl ein Modell mit und ohne vorgelagerter Faktorenanalyse berechnet, um den Einfluss von Kollinearitäten zwischen den unabhängigen Variablen zu minimieren. Eine vorgelagerte Faktorenanalyse stellte zwar sinnvolle Faktoren heraus (feste Raumparameter: Volumen und techn. Hintergrundrauschen; variable Parameter: Zuschauerzahl, Nachhallzeit), allerdings kam es bei der Berechnung des Modells zu Singularitäten, welche das Modell unzuverlässig machen und keine sinnvolle Kombination von fixen Effekten ermöglichte. Die Berechnung ohne vorgelagerte Faktorenanalyse erwies sich als robuster. Hierbei wurden Modelle für jeden fixen Effekt einzeln berechnet, um den Einfluss isoliert zu prüfen. Da es Ziel ist, ein Vorhersagemodell zu erstellen, welches alle fixen Effekte vereint, wurden anschließend schrittweise die fixen Effekte zusammengefügt. Auch hierbei traten Probleme mit Singularitäten auf, die auf ein *Overfitting* hindeuten, welches insbesondere bei einer mehrschichtigen Struktur der zufälligen Effekte und wenigen Datenpunkten auftritt. Eine Vereinfachung der zufälligen Effektstruktur brachte keine Verbesserung. Tabelle 4.3 zeigt die Ergebnisse des Modells, welches problemlos berechnet werden konnte.

Prädiktoren *Fixe Effekte*	**Koeffizient (SE)**	**Df**	**p**
(Achsenabschnitt)	0,14 (13,28)	4,69	0,99
Zeitabschnitt	-0,75 (0,59)	24,70	0,221
Techn. Hintergr.	0,91 (0,35)	4,39	$<$0,05*
Zuschaueranzahl	0,01 (0,003)	10,16	$<$0,001*
Zufällige Effekte	**Achsenabschnitt**		
Raum			
1	-1,15		
2	-4,34		
3	-3,72		
4	9,33		
5	-0,11		
Zeitabschnitt			
1	$1{,}47 \cdot 10^{-6}$		
2	$1{,}02 \cdot 10^{-7}$		
3	$3{,}77 \cdot 10^{-7}$		
4	$-1{,}62 \cdot 10^{-6}$		
Messung			
1	1,89		
2	-1,89		

Tabelle 4.3.: Ergebnisse des Linearen Gemischten Modells zur Vorhersage des breitbandigen, A-bewerteten Publikumsgeräuschpegels

Folglich besteht das finale Vorhersagemodell aus den Prädiktoren *technisches Hintergrundrauschen* sowie *Zuschaueranzahl* für die ein signifikanter Einfluss ermittelt werden kann und *Hypothese 3* bestätigen.
Die Güte des Modells wird durch den Anteil der aufgeklärten Varianz beschrieben und ist hier mit $R^2_{marginal} = 0{,}59$ basierend auf der Methode von Nakagawa & Schielzeth, 2013, berechnet.
Die vierte Zeile der Tabelle zeigt, dass zwischen dem Zeitabschnitt und dem Publikumsgeräuschpegel kein signifikanter Zusammenhang besteht und widerspricht somit *Hypothese 2*. Dass ein sich zeitlich ändernder Verlauf in jedem Raum gemessen wurde, zeigt Abbildung 4.1. Allerdings betrachtet das hier berechnete Modell alle Messungen, womit sich durch die teils gegensätzlichen Verläufe im Mittel ein nicht signifikanter Einfluss des Zeitabschnittes einstellt. Für das technische Hintergrundrauschen und die Zuschaueranzahl kann ein signifikanter Zusammenhang beobachtet werden, womit bestehende Forschungsergebnisse von Jeong et al. (2012) bestätigt werden. Dass kein signifikanter Einfluss raumakustischer Parameter ermittelt werden kann, widerspricht den ursprünglichen Erwartungen, der Publikumsgeräuschpegel sei raumabhängig.

Geht man auf die Art der Zusammenhänge näher ein, so ist zu erkennen, dass die Erhöhung des technischen Hintergrundrauschens um 1 dB eine Zunahme des Publikumsgeräuschpegel um 0,9 dB bewirkt. Die Zuschaueranzahl beeinflusst den Publikumsgeräuschpegel ebenso positiv und bewirkt eine Erhöhung von 0,01 dB je Zuschauer. Dies entspricht einem Anstieg von 1 dB je 100 weiterer Zuschauer.
Als letztes ist zu erwähnen, dass für den allgemeinen Achsenabschnitt kein signifikanter Einfluss beobachtbar ist. Dies bedeutet im Fall, dass alle unabhängigen Variablen gleich Null sind, sich die abhängige Variable ebenfalls zu Null ergibt. Unter der Annahme, dass sich bei einem Nichtvorhandensein von technischem Hintergrundrauschen und Publikum kein Geräuschpegel einstellt, scheint dieses Ergebnis sinnvoll.

Analyse der zufälligen Effekte Die zufälligen Effekte geben die Abweichungen von dem geschätzten festen Effektwert pro Gruppe an. Je nach Raum, Zeitabschnitt und ID der Messung, werden zusätzlich Abweichungen zur Lage des Achsenabschnittes dazu berechnet, um schlussendlich einen Wert vorherzusagen. Die in Tabelle 4.3 dargestellten Werte der zufälligen Effekte zeigen, dass die ermittelten Werten für die Gruppe *Raum* in drei Untergruppen eingeteilt werden können deren Räume ähnliche Abweichungen besitzen. Die Achsenabschnitte des zufälligen Effekts *Raum* sind in Abbildung 4.13 dargestellt.

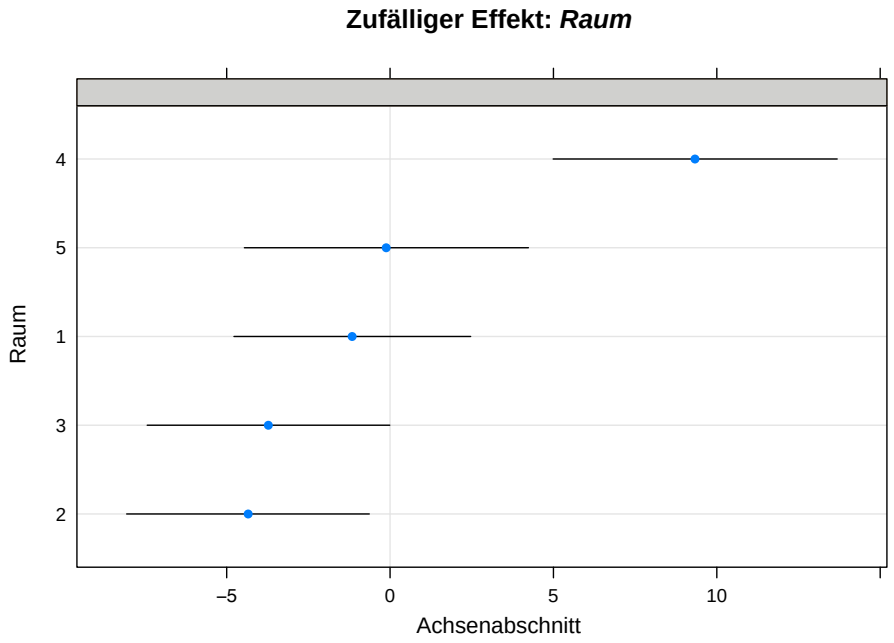

Abbildung 4.13.: Achsenabschnitte für den Zufälligen Effekt *Raum*

Es ist zu erkennen, dass Raum 4 (Komische Oper) mit einem positiven Wert für sich eine Gruppe bildet. Es ist der Raum mit den höchst gemessenen Pegeln, was hierfür eine Begründung sein kann. Raum 1 (UniT) und 5 (Staatsoper) können auf Grund der ermittelten Werte zu einer zweiten Gruppe zusammengefasst werden. Zwar sind die raumakustischen Kenndaten der Räume verschieden, die Veranstaltungstypen und deren dramaturgischer Verlauf ähneln sich jedoch. Dies spiegelt sich auch im zeitlichen Verlauf der Publikumsgeräuschpegel wider, welche für UniT(01) und Staatsoper der invertierten U-Form folgen (siehe Abbildung 4.1). Die dritte Gruppierung ist zwischen den Räumen 2 (Audimax) und 3 (Udk) zu erkennen. Zwar unterscheiden sich die Veranstaltungstypen mit einer Vorlesung und einem klassischen Konzert grundlegend, jedoch folgen hier die zeitlichen Verläufe der Publikumsgeräuschpegel jeweils einem U-förmigen Verlauf. Auch waren die Zuschauerzahlen fast gleich und es wurden ähnliche Pegel ermittelt, was zur einer sinnvollen Gruppierung beiträgt.

Vorhergesagte spektrale Verteilung Für die Berechnung der spektralen Verteilung wurde je Oktavband ein Vorhersagemodell erstellt, welches auf derselben Struktur wie das zuvor beschriebene Modell für den breitbandigen Pegel basiert (fixe und zufällige Effekte). Um anschließend nachvollziehen zu können, wie sich die vorhergesagte spektrale Verteilung zwischen den Räumen unterscheidet, ist diese prognostiziert für 1000 Zuschauer und einem technischen Hintergrundrauschen gleich der NC-25 Kurve[2] in Abbildung 4.14 dargestellt.

[2]Quelle: (NTI-Audio, 2016), da kein kostenfreier Zugang zu ANSI/ASA S12.2-2008 möglich

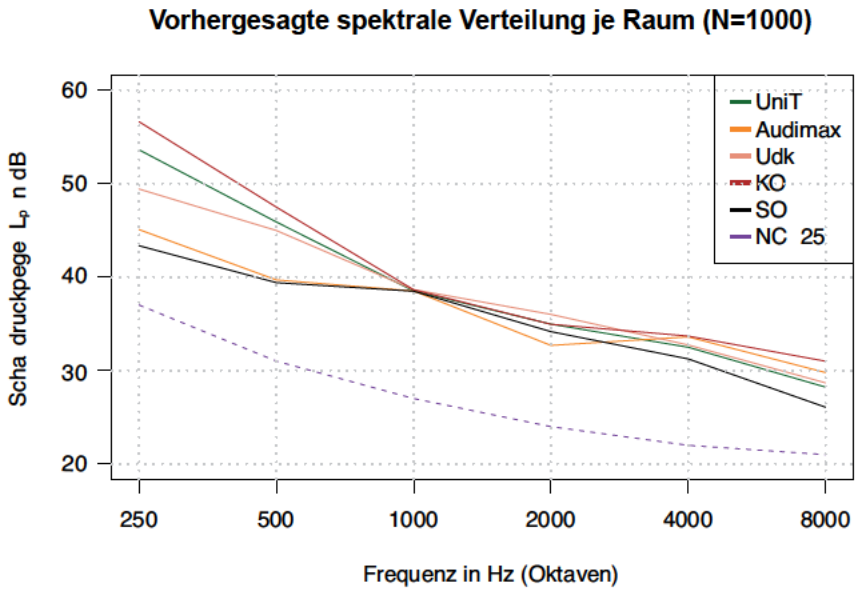

Abbildung 4.14.: Ergebnis Vorhersagemodell zur spektralen Verteilung der Publikumsgeräusche je Raum (KO=Komische Oper, SO=Staatsoper)

Im Mittel liegen alle Kurven etwa 10 dB über dem technischen Hintergrundrauschen (gemittelt über alle Oktaven). Für die Modelle mit den Achsenabschnitten der Räume 1, 3 und 4 (UniT, UdK sowie Komische Oper) ist ein Anstieg unterhalb von 1000 Hz zu beobachten. Dies kann mit den vorliegenden Messdaten zusammenhängen, welche insbesondere in diesem Bereich eine größere Anhebung zeigen als bei den Messungen im Audimax und der Staatsoper. Letztere steigen unterhalb von 1000 Hz sowie 500Hz weniger steil an und spiegeln die Messwerte somit in einem realistischeren Maße wieder. Eine mittlere Differenz zum technischen Hintergrundrauschen von 9,8 dB bzw. 8,9 dB unterstreicht diese Annahme, da ähnliche Werte bereits in der Literatur berichtet wurden (siehe Abschnitt 2.2).

Basierend auf diesen Erkenntnissen kann erneut eine spektrale Verteilung der Publikumsgeräusche für eine gegebene Zuschauerzahl sowie ein gegebenes technisches Hintergrundrauschen ermittelt werden. Um einen Vergleich mit der zuvor erstellten Grafik zu ermöglichen, wird die Zuschauerzahl mit 1000 Personen beibehalten und das technische Hintergrundrauschen unter Verwendung einer NC-20 Kurve herabgesetzt. Als Eingangsparameter für die kategorische Variable (zufälliger Effekt) wird Raum 5 gewählt. Abbildung 4.15 zeigt die vorhergesagte spektrale Verteilung der Publikumsgeräusche.

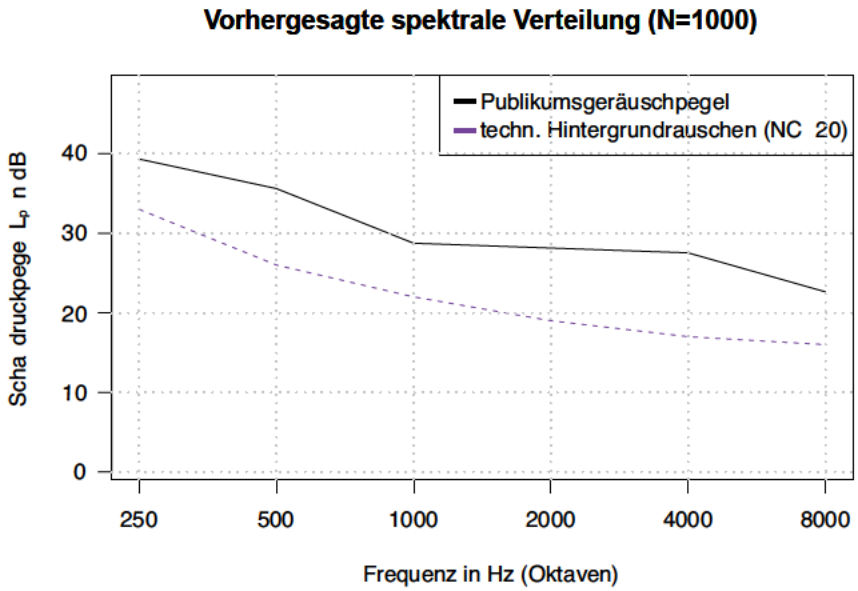

Abbildung 4.15.: Prognostizierter spektraler Verlauf der Publikumsgeräusche (Raum 5) während einer Darbietung

Es ist zu erkennen, dass ein Herabsetzen des technischen Hintergrundrauschens ebenso ein Herabsetzen der Publikumsgeräuschpegel je Oktavband bewirkt. Der mittlere Abstand zwischen den beiden Geräuschpegeln ergibt sich zu 8,4 dB. Gemäß dem erstellen Vorhersagemodell ist zu erwarten, dass nun ein Beibehalten des technischen Hintergrundrauschens und das Anheben der Zuschauerzahl die Differenz zwischen den beiden Kurven vergrößert. Respektive führt ein Herabsetzen der Zuschaueranzahl zu einer Reduzierung der Differenz und Teile der Publikumsgeräusche werden tendenziell unterhalb von 250 Hz und oberhalb von 8000 Hz beginnend maskiert.

4.4. Selbstbewertung der Stimmung während Konzertveranstaltung

Um anschließend die ermittelten breitbandigen Pegelveränderungen über die Zeit mit der Stimmung des Publikums zu korrelieren, wurden Begriffsbewertungen zur Stimmung eines jeden Probanden abgefragt. Die Ergebnisse der Publikumsbefragung zur Stimmung/Aufmerksamkeit nach jedem Satz sind grafisch in Abbildung 4.16 abgebildet. Der blaue Graph verdeutlich dabei den Verlauf der Mittelwerte der einzelnen Bewertungen (N=13) je Satz.

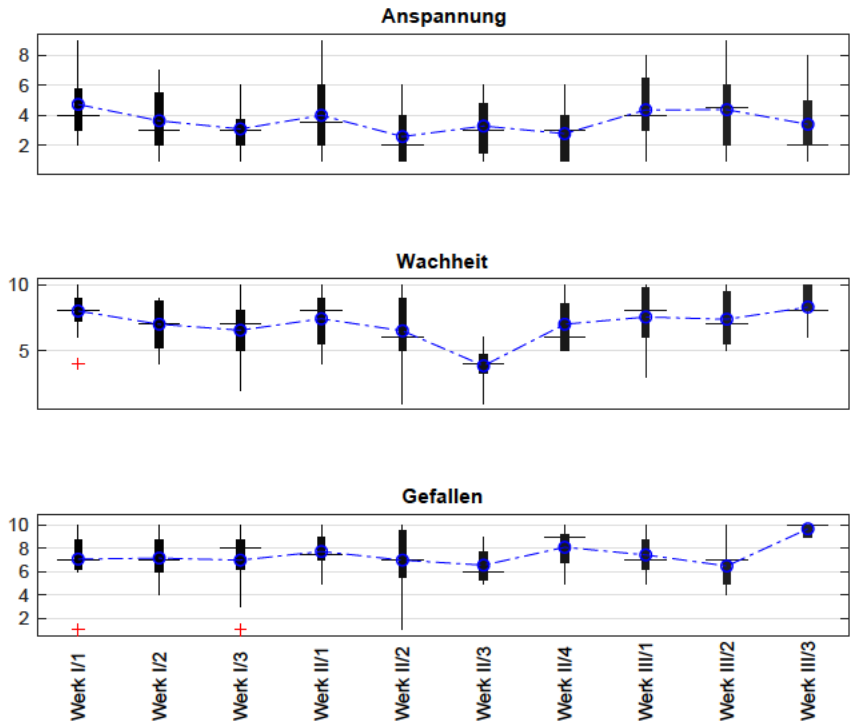

Abbildung 4.16.: Boxplot der Selbstbewertungsergebnisse durch das Publikum mit Angabe der Mittelwerte und deren Verlauf (blau)

Die Bewertungen zur Anspannung fallen von Beginn an leicht ab und erreichen ihren niedrigsten Wert beim zweiten Satz des zweiten Werkes. Ab da ist wieder ein leichter Anstieg zu erkennen, wobei die Werte im Mittel im letzten Satz des dritten Werkes wieder abfallen. Die Wachheit ist zu Beginn recht hoch bewertet und erreicht im dritten Satz des zweiten Werkes einen Tiefpunkt, um zum Ende hin wieder anzusteigen. Das Attribut Gefallen ist zu Beginn recht monoton ausgeprägt mit zwei Ausreißern im ersten Werk. Im dritten Satz des zweiten Werkes sowie im zweiten Satz des dritten Werkes werden jeweils die niedrigsten Werte gemessen, um mit dem letzten Satz des dritten (letzten) Werkes das Maximum zu erreichen.
Die Ergebnisse der anschließenden Korrelationsanalyse mit dem extrahierten, breitbandigen Publikumsgeräuschpegel sind in Tabelle 4.4 angegeben.

	L_{eqA}[1]	Anspannung	Wachheit	Gefallen
L_{eqA}[1]	1	-0,16	0,32	0,73▸
Anspannung	-	1	0,43	-0,17
Wachheit	-	-	1	0,53
Gefallen	-	-	-	1

▸ $p < 0.05$

[1] breitbandig (500Hz-8000Hz)

Tabelle 4.4.: Ermittelte Korrelationskoeffizienten nach Selbsteinschätzung während eines Konzertabends

Es ist eine signifikant positive Korrelation zwischen dem Attribut *Gefallen* (M=7,53; SD=0,93) und dem Verlauf des extrahierten Publikumsgeräuschpegels (M=36,76; SD=2,62) zu beobachten. Für alle anderen Attribute kann zwischen deren Bewertungsverlauf und dem Verlauf des Publikumsgeräuschpegels kein signifikanter Zusammenhang ermittelt werden.

4.5. Hörversuch

Mit dem weiterführenden Ziel ein Vokabular für die Beschreibung von Publikumsgeräuschen zu erstellen und um den zuvor erarbeiteten Zusammenhang von *Gefallen* und dem Verlauf des Publikumsgeräuschpegels auszuarbeiten, wurde ein Hörversuch im kleinen Studio der TU Berlin durchgeführt.
Insgesamt wurden 31 Stimuli anhand von 21 bipolaren Begriffspaaren bewertet, welche in einer vorgelagerten Diskussionsrunde erarbeitet wurden. Anschließend wurden die Mittelwerte je Begriffspaar und Stimuli ermittelt (N=12), womit sich 21 durchschnittliche Begriffsbewertungen je Stimuli ergeben (21x31 Bewertungen insgesamt). Die Begriffspaare sowie ein Ausschnitt aus der Bedienoberfläche zum Fragebogen sind in Anhang A.1 dargestellt.

Korrelationsanalyse

Um einen ersten Eindruck über den Verlauf der Begriffsbewertungen in Abhängigkeit vom Publikumsgeräuschpegel zu bekommen, wird eine Korrelationsanalyse durchgeführt, welche in Tabelle 4.5 aufgeführt ist. Als zu vergleichenden Schalldruckpegelwert wird der tatsächlich gemessene L_{eqA} - Wert für diesen Zeitabschnitt herangezogen, da alle präsentierten Stimuli ausschließlich Publikumsgeräusche sowie technisches Hintergrundrauschen beinhalten. Da letzteres ebenso einen Teil der zu bewertenden Atmosphäre darstellt, macht ein Vergleich mit den extrahierten Publikumsgeräuschpegeln weniger Sinn, weil hier der Pegel des technischen Hintergrundrauschens bereits herausgerechnet ist.

	L_{eqA} gemessen
laut	0,78*
hell	0,76*
ausgelassen	0,75*
chaotisch	0,72*
sprachhaltig	0,71*
wach	0,71*
lebendig	0,70*
ereignisreich	0,70*
räum. verteilt	0,66*
amüsiert	0,62*
rau	0,59*
scharf	0,59*
transientenhaltig	0,55*
ruhig	-0,68*
aufmerksam	-0,60*
technisch	-0,51▸
monoton	-0,49▸
angenehm	-0,42▸
dröhnend	0,28
tonhaltig	0,13
rauschhaft	-0,31

$^{*}\, p < 0.001$, $^{\blacktriangleright}\, p < 0.05$

Tabelle 4.5.: Ermittelte Korrelationskoeffizienten zwischen mittleren Begriffsbewertungen während des Hörversuches und dem zugehörigen gemessenen Publikumsgeräuschpegel (betrachtet über alle Stimuli)

Bis auf die Begriffsbewertungen der Variablen *dröhnend*, *tonhaltig* und *rauschhaft* ist für alle weiteren Variablen eine signifikante Korrelation mit dem gemessenen Publikumsgeräuschpegel zu erkennen. Insbesondere Begriffe wie *laut*, *hell* und *ausgelassen* korrelieren stark positiv mit dem gemessenen Pegel. Einen Gegenpol bilden dazu Begriffe wie *ruhig* und *aufmerksam*, welche negativ mit dem Publikumsgeräuschpegel korrelieren. Um die Vielzahl von Begriffen in eine kompakte Form zu bringen, wird nachfolgend eine Faktorenanalyse durchgeführt, die potentiell ein Zusammenfassen der Begriffe ermöglichen soll.

Faktorenanalyse

Um die Eignung der einzelnen Variablen für eine Faktorenanalyse zu prüfen, wird die Berechnung des Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) Kriteriums vorangestellt. Tabelle 4.6 zeigt die Ergebnisse je Variable.

rauschaft 0,70	tonhaltig 0,30	transientenhaltig 0,92	rverteilt 0,93
ereignisreich 0,93	hell 0,84	dröhnend 0,60	scharf 0,86
laut 0,87	rau 0,81	sprachhaltig 0,81	technisch 0,86
chaotisch 0,85	angenehm 0,80	monoton 0,85	amüsiert 0,75
ruhig 0,84	aufmerksam 0,88	lebendig 0,85	wach 0,83
ausgelassen 0,79			

Tabelle 4.6.: Berechnete KMO-Kriterien je Variable, um Eignung der Variablen für Faktorenanalyse zu prüfen

Das Kriterium gibt an, inwiefern eine Variable für die Berechnung der Faktorenanalyse geeignet ist und demnach weiter verwendet werden sollte (Kaiser, 1974) (Cerny & Kaiser, 1977). Bis auf die Variablen *tonhaltig* und *dröhnend* liegen alle Werte über 0,7 und sind somit mindestens gut bis mittel geeignet. Da vermutet wird, dass insbesondere diese beiden Variablen zur Kategorie des technischen Hintergrundrauschens beitragen, wird die nachfolgende Faktorenanalyse vorerst mit dem vollen Begriffsumfang berechnet. Ist ersichtlich, dass sich solch eine Dimension nicht ausbildet, können die Variablen verworfen werden.

Um die sinnvolle Anzahl von Faktoren zu bestimmen, die es zu berechnet gilt, wird ein Scree-Plot erstellt. Unter Anwendung des Kaiser-Kriteriums, d.h. Faktoren mit einem Eigenwert > 1, ist das Berechnen von drei Faktoren als sinnvoll zu betrachten. Es wird folglich eine Faktorenanalyse mit drei Faktoren berechnet und *Oblimin* als Rotationsmethode gewählt. Eine Berechnung mit orthogonaler Rotation (*Varimax*) zeigte weniger deutliche bzw. starke Ladungen der Variablen je Faktor und wies dabei mehrere Kreuzladungen auf.
Das Ergebnis der Faktorenanalyse (oblique) ist in Tabelle 4.7 dargestellt.

Variable	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
amüsiert	**1,12**	-0,22	0,07
ausgelassen	**0,95**	0,08	0,07
wach	**0,81**	0,22	-0,05
lebendig	**0,72**	0,31	-0,19
ereignisreich	**0,61**	0,45	-0,11
hell	**0,67**	0,29	0,23
sprachhaltig	**0,54**	0,44	-0,01
rauschhaft	**-0,72**	0,23	0,25
monoton	**-0,61**	-0,29	0,30
rau	-0,14	**0,96**	-0,02
räum. verteilt	0,06	**0,89**	-0,05
chaotisch	0,33	**0,72**	-0,03
laut	0,46	**0,65**	0,07
transientenhaltig	0,38	**0,57**	-0,23
scharf	0,46	0,45	0,20
aufmerksam	0,04	**-0,91**	0,09
angenehm	0,08	**-0,76**	-0,31
ruhig	-0,44	**-0,62**	0,14
tonhaltig	0,28	-0,11	**0,67**
dröhnend	0,07	0,43	**0,65**
technisch	-0,36	-0,41	**0,56**

Tabelle 4.7.: Ergebnis der explorativen Faktorenanalyse mit obliquer Rotation, welches die drei Faktoren sowie betreffende Variablen nebst Ladung auf den jeweiligen Faktor zeigt. (Fett gedruckt: Ladungen $>$ 0,5 bzw. $<$ -0,5)

Es ist zu erkennen, dass der erste Faktor stark durch Variablen geladen wird, die vorrangig die Atmosphäre des Publikums in Hinblick auf dessen Stimmung beschreiben. Insbesondere sind hier Begriffe wie *amüsiert*, *ausgelassen*, *wach* und *lebendig* herauszustellen. Einen Gegenpol dazu bilden Begriffe wie *rauschhaft* und *monoton*, welche den Faktor negativ laden. Basierend auf den Ladungen der Begriffe soll der erste Faktor hier hypothetisch als *Ausgelassenheit* bezeichnet werden und beschreibt somit wie ausgelassen bzw. verhalten oder monoton die Atmosphäre der Publikumsgeräusche wahrgenommen wird.
Betrachtet man den zweiten Faktor, so fasst dieser vorrangig Begriffe zu akustischen Eigenschaften und deren Wahrnehmung zusammen. Insbesondere Begriffe wie *rau*, *räumlich verteilt*, *laut* und *transientenhaltig* unterstreichen diese Erkenntnis und sind positiv mit dem Faktor korreliert. Im Gegensatz dazu laden Variablen wie *aufmerksam*, *angenehm* und *ruhig* den Faktor negativ, was zeigt, dass auch dieser Faktor eine bipolare Ausprägung mit zugehörigen Variablen besitzt. Da diese Begriffe vornehmlich auf die akustische Wahrnehmung ab-

zielen und die Ausprägung tendenziell zwischen *angenehm*/*aufmerksam* und *chaotisch*/*räumlich verteilt* liegt, soll dieser Faktor als *akustische Ereignishaftigkeit* bezeichnet werden.
Der dritte Faktor wird eindeutig nur von drei Variablen geladen, welche positiv mit diesem korreliert sind. Dabei drücken die Begriffe *tonhaltig*, *dröhnend* und *technisch* den Einfluss von technischen Geräuschen aus, welche zusätzlich zu den Publikumsgeräuschen wahrnehmbar sind. Daher kann dieser Faktor als *Technisches Hintergrundrauschen* bezeichnet werden und es bewahrheitet sich die Annahme, dass diese Begriffe eine eigenständige Dimension abbilden. Somit ist es sinnvoll diese nach Berechnung des KMO-Kriteriums nicht vom Faktorraum auszuschließen.

Biplots Um abschließend eine bessere Interpretation des erstellten Faktorraumes zu ermöglichen, werden nachfolgend Biplots von jeweils zwei Faktoren und den zugehörigen Variablen mit deren Ladungen dargestellt (siehe Abbildung 4.17 - 4.19). Somit sollen in der zweidimensionalen Ebene die möglichen Ausprägungen der Faktoren und deren Zusammenspiel besser interpretiert werden können.

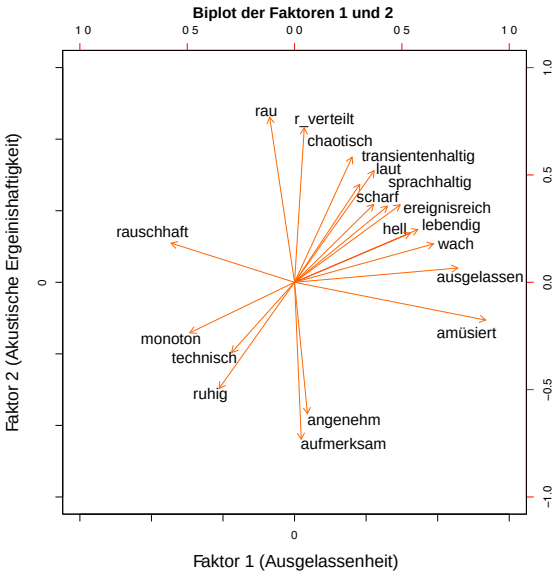

Abbildung 4.17.

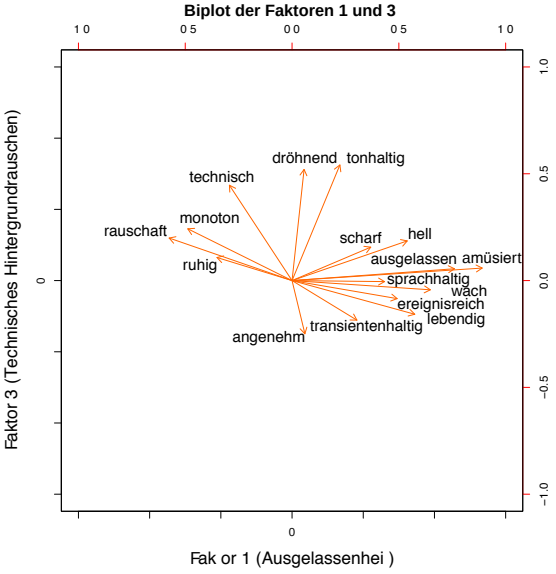

Abbildung 4.18.

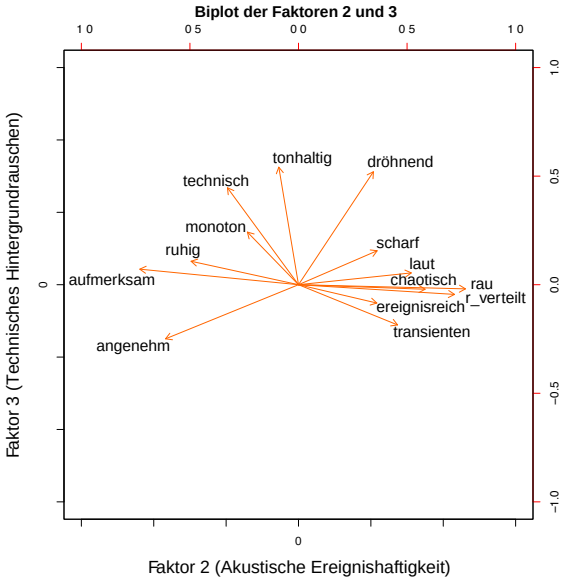

Abbildung 4.19.

Biplots von jeweils zwei Faktoren und zugehörigen Variablen sowie deren Ladungen je Faktor. (Oben links: Faktor 1 und 2, Oben rechts: Faktor 1 und 3 , Mitte unten: Faktor 2 und 3)

In Abbildung 4.17 ist zu erkennen, dass eine erhöhte Ausgelassenheit sich insbesondere durch die Begriffe *amüsiert* und *ausgelassen* ausdrückt und diese Faktor 2 nur gering laden. Steigt nun bei einer hohen Ausgelassenheit zusätzlich die akustische Ereignishaftigkeit so wird dies durch Begriffe wie *wach, lebendig* und *sprachhaltig* beschrieben, wobei diese weiterhin stärker Faktor 1 laden. Weiterschreitend (entgegen des Uhrzeigersinns) würden die

Publikumsgeräusche zusätzlich als *ereignisreich*, *transientenhaltig*, und *laut* beschrieben werden, wobei die letzten beiden Begriffe bereits Faktor 2 stärker laden. Nimmt nun die Ausgelassenheit etwas ab und Faktor 2 überwiegt, werden die Geräusche zunehmend *räumlich verteilt*, *rau* und *chaotisch* wahrgenommen. Als Gegenpol dazu zeigen Begriffe für negative Faktorenladungen, dass Publikumsgeräusche hier als *ruhig, angenehm* und *aufmerksam* wahrgenommen werden. Dies entspricht einem eher verhaltenen Publikum sowie einer geringen akustischen Ereignishaftigkeit. Begriffe wie *rauschhaft* und *technisch* deuten darauf hin, dass der Raumeinfluss bei einem sehr ruhigen, nicht ausgelassenen Publikum überwiegt, bei dem somit auch die akustische Ereignishaftikgkeit gering ist.

Betrachtet man die Ebene zwischen Faktor 1 und 3 in Abbildung 4.18, so bleibt die Ausprägung zwischen einem ruhigen, verhaltenen, nicht ausgelassenem Publikum und einem lebendigen, wachen, amüsierten Publikum erhalten. Faktor 3 beschreibt zusätzlich dazu den Einfluss des technischen Hintergrundrauschens. Nimmt dieser zu, so drückt sich dies in positiven Ladungen der Begriffe *dröhnend*, *tonhaltig* und *technisch* aus. Entgegengesetzt dazu wird ein nicht dominantes technisches Hintergrundrauchen als *angenehm* empfunden und bildet entlang von Faktor 3 den Gegenpol zu den zuvor genannten Begriffen. Die sehr niedrigen Ladungen der Begriffe *dröhnend*, *tonhaltig* und *angenehm* auf den ersten Faktor zeigen, dass sie von diesem nahezu unabhängig verlaufen und eine eigenständige Dimension abbilden.

Im Faktorenraum zwischen der akustischen Ereignishaftigkeit und dem technischen Hintergrundrauschen (Abbildung 4.19) ist letzteres wieder deutlich durch die Begriffe *tonhaltig*, *dröhnend* und *technisch* beschrieben, mit nur geringen Ladungen auf den zweiten Faktor. Die akustische Ereignishaftigkeit wird insbesondere durch Begriffe wie *räumlich verteilt*, *rau*, *chaotisch* und *ereignisreich* beschrieben, mit *aufmerksam*, *ruhig* und *monoton* als Gegenpol. Durch die geringe Ladung der übrigen Begriffe auf den dritten Faktor und umgekehrt ist wiederholt zu sehen, dass sich die Bewertungen der technischen Geräusche von denen der Publikumsgeräusche abheben.

Korrelation der Faktorenscores mit Schalldruckpegel Um abschließend den Zusammenhang zwischen Publikumsgeräuschpegeln und den Ausprägungen der ermittelten Faktoren zu untersuchen, wird eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Hiermit soll überprüft werden, ob und inwiefern zum Beispiel eine Erhöhung oder Absenkung des Publikumsgeräuschpegels sich auf die Bewertung der Faktoren auswirkt. Tabelle 4.8 zeigt die Ergebnisse der Korrelationsanalyse.

	L_{eqA} gem.	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
L_{eqA} gem.	1	0,40 ▸	0,33	0,21
Faktor 1	-	1	-0,57*	0,12
Faktor 2	-	-	1	0,02
Faktor 3	-	-	-	1

* $p < 0.001$, ▸ $p < 0.05$

Tabelle 4.8.: Ermittelte Korrelationskoeffizienten zwischen dem gemessenen Publikumsgeräuschpegel sowie den berechneten Faktoren-Scores basierend auf Begriffsbewertungen im Rahmen eines Höversuches. (Faktor 1: *Ausgelassenheit*, Faktor 2: *Akust. Ereignishaftigkeit*, Faktor 3: *Technisches Hintergrundrauschen)*

Es ist zu erkennen, dass zwischen dem gemessenen A-bewerteten Breitbandpegel und Faktor 1 eine signifikant positive Korrelation besteht. Das heißt, dass dieser Faktor tendenziell höher bewertet wird, wenn auch der Publikumsgeräuschpegel steigt, respektive niedriger bewertet wird, wenn dieser abnimmt. Eine Korrelation mit der akustischen Ereignishaftigkeit und dem dritten Faktoren, welcher den Einfluss von technischen Hintergrundgeräuschen beschreibt, kann nicht ermittelt werden.
Betrachtet man die Korrelation zwischen den Faktoren untereinander, so ist eine signifikante Korrelation zwischen dem ersten und zweiten Faktor zu erkennen. Dies hängt mit der verwendeten Rotationsmethode *Oblimin* zusammen, welche korrelierte Faktoren erlaubt und somit anzunehmen ist, dass dieser Zusammenhang der Realität entspricht.

Betracht man den ersten Faktor *Ausgelassenheit*, so könnte dieser auch mit dem Begriff *Gefallen* in Verbindung gebracht werden. In diesem Fall wäre ein weiteres Ergebnis der Analyse, dass die Erkenntnisse zur Selbstbewertung mit einer positiven Korrelation zwischen *Gefallen* und dem Verlauf des Publikumsgeräuschpegels bestätigt werden können.

5. Zusammenfassung

Verlauf Publikumsgeräuschpegel und spektrale Verteilung Auf Basis der spektralen Zusammensetzung der extrahierten Publikumsgeräuschpegel je Zeitabschnitt wurden breitbandige Pegelwerte und deren zeitlicher Verlauf ermittelt. Hierbei sind unter Berücksichtigung aller Veranstaltungen zwei charakteristische Verläufe erkennbar, die einem U-förmigen sowie einem invertiert U-förmigen Graphen folgen. Auf Grund dieser Veränderungen des Publikumsgeräuschpegels über die Zeit kann *Hypothese 1* bestätigt werden.
Der invertiert U-förmige Verlauf würde sich mit dem von Uhde aufgestellten Aufmerksamkeitsverlauf decken (Tröndle & Uhde, 2018). Durch das Vorhandensein von ebenso U-förmigen Verläufen kann dieser jedoch nicht generalisierend bestätigt werden.
Hinsichtlich der in dieser Arbeit ermittelten Breitbandpegelverläufe konnte der aktuelle Stand der Forschung erweitert werden. Die Beschreibung der Publikumsgeräuschpegel für einen gesamten Veranstaltungszeitraum mit nur einem Wert ist daher als eher ungenau anzusehen. Die Unterschiede zwischen den Zeitabschnitten zeigen, dass Publikumsgeräusche im Verlauf der Veranstaltung eine große Dynamik aufweisen können (zum Beispiel 37 dB(A) - 46 dB(A) in UdK). Daher ist es zu empfehlen, bei weiteren Betrachtungen eine zeitliche Unterteilung der Messergebnisse vorzunehmen. Die hier angesetzte Unterteilung in Anlehnung an den Programmablauf bzw. der Dramaturgie eines Stückes kann als sinnvoll betrachtet werden.

Die spektrale Verteilung der Publikumsgeräusche lässt sich zwischen dem 250 Hz und 8000 Hz Oktavband ermitteln. Zwischen dem 250 Hz und 500 Hz Oktavband ist dabei beginnend eine Differenzierung der spektralen Verläufe je Zeitabschnitt zu erkennen. Darunter sind die Verläufe für alle Zeitabschnitte sehr nah bei einander und fast nicht unterscheidbar. Bis zum 4000 Hz Oktavband ist eine differenzierte Trennung der Verläufe je Zeitabschnitt erkennbar. Zu höheren Frequenzen hin kommt es wieder häufig zu Überschneidung der Graphen.

Differenz zu technischem Hintergrundrauschen Mit einem charakteristischen Frequenzspektrum zwischen 250 Hz und 8000 Hz sind Publikumsgeräusche in diesem Bereich dominant gegenüber dem technischen Hintergrundrauschen, welches somit häufig im mittleren Frequenzbereich maskiert wird.

Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Jeong et al., 2012, wobei hier ein Bereich von 500 Hz bis 4000 Hz als charakteristisch beschrieben wird. Auch ist zu bemerken, dass insbesondere in diesem Bereich die spektrale Verteilung sehr dem Verlauf des technischen Hintergrundrauschens folgt. Dabei unterscheiden sich die Publikumsgeräusche vom technischen Hintergrundrauschen im Mittel um 2,2 dB - 8,7 dB (ohne Komische Oper).
Gemittelt über alle Messungen kann eine Differenz von 7,4 dB (SD = 3,9 dB) zwischen Publikumsgeräuschpegel und technischem Hintergrundrauschen beobachtet werden, was sich mit den Ergebnissen von Jeong und Kollegen deckt, die eine mittlere Differenz von 7,9 dB berichten.
Es könnte vermutet werden, dass dieser Signal-Rausch-Abstand ein Mindestmaß darstellt, ab dem sich ein Publikum als eigene Geräuschquelle wahrnimmt und sich somit in Abhängigkeit des technischen Hintergrundrauschens immer ein gewisser Publikumsgeräuschpegel einstellt. Dieser Punkt sei hier jedoch nur spekulativ erwähnt und bedarf weiterer Nachforschungen.
Insbesondere bei der Messung in der Komischen Oper ist die Differenz mit 16 dB sehr viel größer und die Publikumsgeräuschpegel der einzelnen Zeitabschnitte höher als erwartet (in Hinblick auf den geringeren Pegel des technischen Hintergrundrauschens). Jeong et al., 2012 berichten ebenso erhöhte Pegel bei ihren Messungen in einem Opernhaus. Dies sei damit begründet, dass die Oper einen lockereren Veranstaltungstyp darstellt als zum Beispiel ein Konzert, bei dem auch einer anderen Etikette gefolgt wird (zum Beispiel Szenenapplaus nach jedem Akt). Demnach fühlt sich das Publikum möglicherweise wohler und eigene Geräusche werden weniger unterdrückt, da diese eher von den lauteren Geräuschen der Aufführung maskiert werden. Dies trifft insbesondere bei der Messung in der Komischen Oper zu, bei der die Musik elektroakustisch verstärkt wurde.

Einlass und Applaus Bezüglich der Geräusche, welche zwischen den Zeitabschnitten erfasst wurden, können ebenso Gemeinsamkeiten in der spektralen Verteilung beobachtet werden. So ist Applaus sehr prägnant im Bereich von 500 Hz - 3000 Hz und erreicht bei fast allen Messungen Werte über 80 dB innerhalb einzelner Oktaven - teilweise 90 dB im Maximum. Zwischen 1000 Hz und 2000 Hz sind die erzielten Pegelwerte recht ähnlich und es stellt sich ein konstanter Verlauf ein. Bei Messungen im Audimax ist das Maximum bei 500 Hz ausgeprägt und ein starker Abfall oberhalb von 1000 Hz zu beobachten, da hier typischerweise nicht geklatscht sondern auf den Tischen geklopft wird.
Geräusche beim Einlass oder in Pausen liegen mit typischen Maximalwerten zwischen dem 250 Hz und 500 Hz Oktavband tieffrequenter und fallen oberhalb davon ab ca. 700 Hz-900 Hz stark ab. Dies kann mit der Art der Geräuscherzeugung zusammenhängen, da hier das Publikum vornehmlich umherläuft, wobei zum Beispiel Schrittgeräusche entstehen.

Statistisches Vorhersagemodell Auf Basis der erhobenen Messdaten und ermittelten Publikumsgeräuschpegel wurde ein Vorhersagemodell erstellt, welches die spektrale Verteilung von Publikumsgeräuschen prognostiziert. Das Modell gibt Pegel im Frequenzbereich von 250 Hz - 8000 Hz im angenäherten Diffusfeld an, da unter- und oberhalb davon Publikumsgeräusche tendenziell vom technischen Hintergrundrauschen maskiert werden und somit nur eine geringe Anzahl Messdaten vorliegt.
Der Hypothesentest zeigt, dass es einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Verlauf des technischen Hintergrundrauschens und der Publikumsgeräusche gibt, womit *Hypothese 3* bestätigt werden kann. Diese Ergebnisse zeigen, dass ein Herabsetzen des technischen Hintergrundrauschens explizit auch eine Verringerung des Publikumsgeräuschpegels mit sich zieht. So können markante Anhebungen oder Absenkungen ebenso Veränderungen im Verlauf der Publikumsgeräusche bewirken.
Auch konnte mit einem signifikanten Einfluss der Zuschaueranzahl der bestehende Forschungsstand erweitert und eine Zielstellung aus Abschnitt 2.3 erfüllt werden. Dabei ist das Modell weitestgehend im Bereich der erfassten Zuschauerzahlen und etwas darüberhinhaus gültig - schätzungsweise 2000 Zuschauer. Darüber kann ein unrealistischer Anstieg des Publikumsgeräuschpegels entstehen. Zum Beispiel werden durch den linearen Zusammenhang beim Einsetzten von 10.000 Zuschauern Pegelwerte größer 110 dB erreicht, was als eher unrealistisch einzuschätzen ist. Da Konzerthäuser sich jedoch üblicherweise nicht in dieser Größenordnung befinden, kann das Modell als Basis für weitere Forschungen angenommen werden. Ein logarithmischer Zusammenhang (log(N)) wurde auch geprüft, allerdings kam es hier zu Konvergenzproblemen bei der Modellberechnung, was ein Verwenden dieses Ansatzes leider nicht möglich macht.
Die statistische Analyse zeigt zudem, dass kein signifikanter Einfluss der zeitlichen Komponente festgestellt werden konnte und somit *Hypothese 2* vorerst verworfen werden muss. Dies ist insbesondere dadurch zu begründen, dass die gemessenen Verläufe zum einen U-förmig und zum anderen invertiert U-förmig verlaufen. Unter Berücksichtigung aller Messungen stellt sich somit im zeitlichen Mittel ein gleichbleibender Publikumsgeräuschpegel ein. Dieses Ergebnis wirkt sich kontraproduktiv auf die Verbindung der Publikumsstimmung mit dem Vorhersagemodell als Eingangsparamter aus. Zwar kann ein ermittelter Stimmungsverlauf (Selbsteinschätzung bei Konzert sowie Hörversuch) mit dem Verlauf des Publikumsgeräuschpegels korreliert werden, das in dieser Arbeit erstellte Modell kann diesen Zusammenhang jedoch nicht berücksichtigen.
Auch konnte der Einfluss der Nachhallzeit zwar isoliert in einem Modell nachgewiesen werden, in Kombination mit anderen fixen Effekten entstanden jedoch Singularitäten bei der Berechnung. Es liegt daher die Vermutung nahe, dass eine Erweiterung des Datensatzes mit Fokus auf einen bestimmten Raum- bzw. Veranstaltungstyp hilfreich sein kann, um weitere Einflüsse (insbesondere zeitlicher Verlauf sowie Nachhallzeit) einbeziehen zu können und das Modell zu

erweitern. Dies würde folglich ebenso die Genauigkeit des Modells steigern.

Vergleich mit Literatur Bildet man das Mittel der gewonnen spektralen Verteilungen dieser Arbeit über alle Zeitabschnitte sowie Räume, so können diese mit den Ergebnissen von Kleiner und Jeong (ebenfalls gemittelt über alle Räume) verglichen werden. Hierbei sind sehr ähnliche Verläufe zu beobachten, welche Abbildung 5.1 zeigt. Auch ist zum Zweck der Vergleichbarkeit für eine Messung (ähnliche Zuschauerzahl) die Kurve des Zeitabschnittes mit dem niedrigsten Verlauf abgebildet.

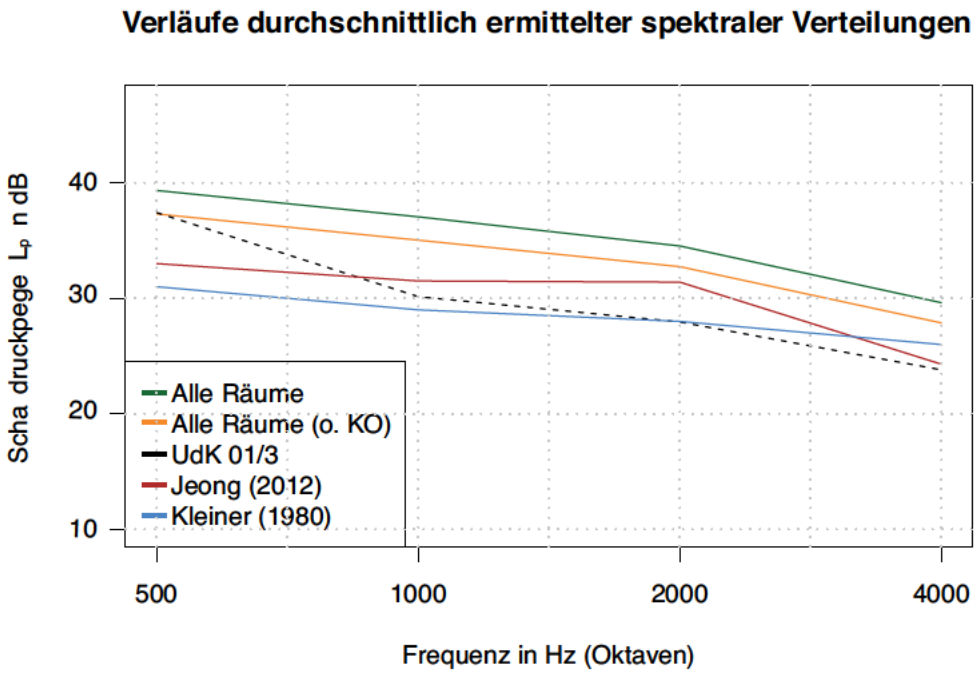

Abbildung 5.1.: Durchschnittlich ermittelte Publikumsgeräuschpegel (gemittelt über alle Veranstaltungen) je Oktavband im Vergleich zur Literatur

Da in den vorangegangenen Forschungen nur Schalldruckpegelwerte vom 500 Hz bis 4000 Hz Oktavband angegeben sind, ist der Frequenzbereich der Abbildung dementsprechend begrenzt, um einen Vergleich mit den Ergebnissen dieser Arbeit zu ermöglichen. Die blaue Kurve stellt die Ergebnisse der (einzelnen) Messung von Kleiner und Kollegen im Stadttheater Göteborg, Schweden dar. Der rote Graph beschreibt den mittleren Verlauf aller Publikumsgeräuschmessungen von Jeong und Kollegen. Die durchschnittlichen Pegelwerte je Oktave beziehen sich in dieser Abbildung auf die Mittelwerte der extrahierten Verteilungsfunktionen der Publikumsgeräusche und nicht auf deren L_{90} Perzentile (entnommen aus Tab. IV, Jeong et al., 2012).

Zur zusätzlichen Vergleichbarkeit ist ebenfalls der Graph mit dem niedrigsten Verlauf für die Messung UdK(01) abgebildet. Bei dieser Veranstaltung betrug die Zuschaueranzahl 600 Personen, entsprechend wie bei der Messung von Kleiner. Bis auf den Bereich unterhalb von 1000 Hz ähneln sich die Verläufe sehr. Im 500 Hz Oktavband beträgt die Abweichung 6 dB, was durch ein erhöhtes technisches Hintergrundrauschen begründet werden kann, welches in der UdK ca. 5 dB höher ist als im Stadttheater Göteborg von Kleiner gemessen. Der Verlauf für die Messung in der UdK knickt ab 4000 Hz etwas früher ab. Die geringe mittlere Abweichung von 1,3 dB (SD = 3,6 dB) zwischen der Messung von Kleiner und der UdK stützt zudem die verwendete Methode dieser Arbeit.
Die wichtigste Erkenntnis dieses Vergleiches sind die ähnlichen spektralen Verläufe dieser Arbeit zu denen aus der Literatur. Die vergleichbaren Verläufe, welche teilweise parallel zueinander verlaufen, zeigen, dass ein charakteristischer Verlauf zur spektralen Zusammensetzung von Publikumsgeräuschen existiert.

Vergleicht man die in dieser Arbeit ermittelten Publikumsgeräuschpegel (je Oktavband) mit den berichteten Pegelwerten von Jeong et al., 2012, so ist zu bemerken, dass letztere niedriger liegen. Dies kann dadurch begründet sein, dass im Rahmen dieser Forschung mit Theateraufführungen und Vorlesungen ein zusätzlich breiteres Spektrum an Veranstaltungstypen abgedeckt wurde. Zum anderen weisen alle Räume, im Vergleich zu den betrachteten Räumen aus der Literatur, ein höheres technisches Hintergrundrauschen auf. Dies kann damit zusammenhängen, dass in manchen Räumen keine oder nur geringere Auflagen bezüglich dem *Noise Criteria* (siehe Abschnitt 2.2) erfüllt werden müssen. Auch ist trotz sorgfältiger Durchführung nicht auszuschließen, dass während der Messung des technischen Hintergrundrauschens nicht auch andere minimale Störeinflüsse vorhanden waren (Lärmgeräusche durch eindringenden Straßenverkehr, Geräusche durch Konzertteilnehmer/Angestellte vor dem Eingang des Saales, etc.) und nicht der absolut stillste Moment erfasst werden konnte.
Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass als Parameter zur Ermittlung eines Einzahlwertes für den Publikumsgeräuschpegel der Mittelwert der gewonnen Verteilungskurve herangezogen wird. In der vorangehenden Literatur wurde auf Basis weiterer Annahmen das L_{90} Perzentile der Verteilungskurve der Publikumsgeräusche verwendet, was zwangsläufig zu niedrigeren Geräuschpegeln führt. In dieser Arbeit erfolgt die Einzahlwertermittlung anhand des Mittelwertes der jeweiligen Verteilungskurve und das L_{90} Perzentile wird nicht berücksichtigt. Dies sei damit begründet, dass für den Autor das zusätzliche Unterteilen der extrahierten Verteilungsfunktion (der Publikumsgeräusche) in dominante und nicht dominante Geräuschanteile in der Literatur als nicht ausreichend begründet beschrieben ist, da Publikumsgeräusche bereits aus mehreren inkohärenten Quellen bestehen und in diesem Sinne keine einzelne Quelle existiert, welche es zu betrachten gäbe und somit als dominant bezeichnet werden könnte.

Selbsteinschätzung der Aufmerksamkeit Die Korrelationsanalyse zwischen den drei zu bewertenden Begriffen *Gefallen*, *Wachheit* und *Anspannung* und dem Publikumsgeräuschpegel zeigt, dass dieser positiv mit den Bewertungen des Begriffs *Gefallen* (engl. Valence) korreliert. Dies bedeutet, dass im Verlauf des untersuchten Konzertes eine steigende Zuneigung zur Darbietung zu einem erhöhten Publikumsgeräuschpegel führt.
Ein Grund hierfür kann die Zuneigung zu lauten, kraftvollen und freudigeren Passagen sein sowie, dass erhöhte Wachheit und Gefallen (engl. Arousal und Valence) mit offenen und zugewandten Gesten verbunden werden können (Chollet et al., 2016, S.9). Ein weiterer Anhaltspunkt ist eine mögliche Synchronisation von Bewegungen innerhalb des Publikums. Seibert und Kollegen konnten zeigen, dass in Abhängigkeit des Stückes unterschiedlich starke Bewegungssynchronisationen innerhalb des Publikums auftreten (Seibert et al., 2018). Zwar zeigt sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Empfinden (Gefallen) des jeweiligen Stückes und dem Bewegungsdrang, die hier festgestellten Ergebnisse können aber erneut ein Anhaltspunkt für die Existenz dieses Effekts darstellen.

Hörversuch und Vokabularerstellung Anknüpfend an die Selbstbewertung zur Stimmung während eines Konzertes wird auf Basis eines Hörversuches ein weiterführendes Vokabular zur Beschreibung von Publikumsgeräuschen entwickelt.
Eine Faktorenanalyse der zugrundeliegenden Begriffsbewertungen zeigt, dass die Atmosphäre von Publikumsgeräuschen sowie die damit verbundenen akustischen Eigenschaften in drei Dimensionen beschrieben werden können. So ist eine zentrale Erkenntnis das Herausbilden von drei Faktoren, welche als *Ausgelassenheit*, *akustische Ereignishaftigkeit* und *technisches Hintergrundrauschen* bezeichnet werden können.
Die erste Dimension beschreibt somit entweder wie *ausgelassen*, *amüsiert* und *lebendig* ein Publikum wirkt oder ob es eher einen *monotonen*, *ruhigen* und *verhaltenen* Eindruck macht.
Die wahrgenommenen akustischen Eigenschaften werden durch die zweite Dimension mit Begriffen wie zum Beispiel *rau*, *räumlich verteilt*, *laut* und *chaotisch* beschrieben, wobei hier Begriffe wie *stationär*, *angenehm* und *räumlich fokussiert* das gegensätzliche Extrem bilden. Darüberhinaus wird durch eine negative Ladung des Faktors ausgedrückt, wie *aufmerksam* das zugehörige Publikum wirkt. Letzterer stellt zwar keinen akustischen Beschreibungsbegriff im klassischen Sinne dar, zeigt jedoch, dass bei einer geringen akustischen Ereignishaftigkeit die empfundene Aufmerksamkeit eines Publikums steigt. Eine sehr geringe Ladung des Begriffs *aufmerksam* auf den Faktor *Ausgelassenheit* lässt darauf schließen, dass ein Publikum unabhängig davon, ob es verhalten oder lebendig klingt, als aufmerksam bewertet werden kann.
Betrachtet man den dritten Faktor *Technisches Hintergrundrauschen*, so ist zu erkennen, dass dieser überwiegend von den Begriffen *tonhaltig*, *dröhnend* und

technisch stark geladen wird, was darauf schließen lässt, dass dieser eine eher eigenständige Dimension bildet und sich von den beiden ersten Faktoren abhebt. So werden die suggerierte Atmosphäre sowie wahrgenommenen akustischen Eigenschaften der Publikumsgeräusche mit den ersten beiden Dimensionen bewertet und der Einfluss des technischen Hintergrundrauschens zusätzlich durch den dritten Faktor bestimmt.

In Hinblick auf die detaillierte Zuordnung der Begriffe und das erstellete Vokabular zeigt Tabelle 5.1 zusammengefasst die resultierenden Faktoren mit zugehörigen Variablen und Begriffsausprägungen. Da die Ergebnisse der Faktorenanalyse für den Begriff *scharf* keine eindeutige Zuordnung zeigen, wird dieser vom Vokabular ausgeschlossen.

Faktor	Variable	Ausprägung
I: Ausgelassenheit	amüsiert	ernsthaft - amüsiert
	ausgelassen	verhalten - ausgelassen
	wach	müde - wach
	lebendig	leblos - lebendig
	hell	dunkel - hell
	ereignisreich	ereignisarm - ereignisreich
	sprachhaltig	n. sprachhaltig - sprachhaltig
	rauschhaft	n. rauschhaft - rauschhaft
	monoton	n. monoton - monoton
II: Ak. Ereignishaftigkeit	rau	nicht rau - rau
	r. verteilt	r. fokussiert - r. verteilt
	chaotisch	geordnet - chaotisch
	laut	leise - laut
	transientenhaltig	stationär - transientenhaltig
	aufmerksam	unaufmerksam - aufmerksam
	angenehm	unangenehm - angenehm
	ruhig	unruhig - ruhig
III: Techn. Hintergrundr.	tonhaltig	nicht tonhaltig - tonhaltig
	dröhnend	nicht dröhnend - dröhnend
	technisch	nicht technisch - technisch

Tabelle 5.1.: Zusammenfassung der drei möglichen Bewertungsdimensionen als Ergebnis der explorativen Faktorenanalyse mit zugehörigen Variablen und deren Begriffsausprägungen

Vergleicht man die aus der Literatur bekannten Begriffe mit den hier ermittelten, so können innerhalb des ersten Faktors *Ausgelasseneit* mit Begriffen wie *müde* bzw. *lebendig/ausgelassen* Ähnlichkeiten zur Literatur identifiziert und zusammengefasst werden (vgl. Kang et al. (2013), welche zum Beispiel *schläfrig/gelangweilt* bzw. *aktiv/positiv* verwenden). Dies führt sich unter Betrachtung des zweiten Faktors fort, welcher das Begriffspaar *nicht aufmerksam/aufmerksam* beinhaltet.
Zudem zeigt das deutliche Herausbilden von drei Faktoren, dass das erarbeitete Vokabular eine geeignete Grundlage für die Beschreibung von Publikumsgeräuschen bildet, wobei jeder Faktor eine bipolare Ausprägung mit zugehörigen Begriffspaaren besitzt.

Zur Korrelationsanalyse der Faktoren-Scores mit dem gemessenen Publikumsgeräuschpegel ist anzumerken, dass unter Verwendung einer orthogonalen Rotation (*Varimax*) und den zugehörigen Faktoren-Scores stärkere Korrelationen ermittelt werden konnten. Im Gegensatz dazu treten bei dieser ermittelten Lösung Kreuzladungen auf, was eine weniger eindeutige Zuordnung von Variablen zu einer Dimension ermöglicht. Da das primäre Ziel, ein kompaktes Beschreibungsvokabular zu entwickeln, eine genaue Beschreibung der Begriffsdimensionen mit möglichst eindeutiger Variablenzuordnung benötigt, wird an einer Lösung mit obliquer Rotationsmethode (*Oblimin*) festgehalten.
Hier kann eine positive Korrelation der Faktoren-Scores für die Dimension *Ausgelassenheit* mit dem gemessenen Publikumsgeräuschpegel (L_{eqA}) festgestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass sich Veränderungen des Geräuschpegels signifikant auf die Bewertungen dieser Dimension auswirken. Im Umkehrschluss kann diese Erkenntnis dafür genutzt werden, anhand von Bewertungen entlang des ersten Faktors einen Publikumsgeräuschpegel vorherzusagen. Eine solche Erweiterung des bestehenden Modells ist in dieser Arbeit ist jedoch nicht geplant. Zum einen, da der bestehende Datensatz nur über eine geringe Anzahl von Datenpunkten verfügt und somit das weitere Hinzufügen von unabhängigen Variablen (fixe Effekte) zu Singularitäten führen kann, welches die Zuverlässigkeit weiter mindert (siehe dazu auch Abschnitt 4.3). Zum anderen konnte leider nicht zu jedem Abschnitt ein Stimuli für den Hörversuch erstellt werden, womit nicht alle untersuchten Messabschnitte bewertet werden können.
Für weitere Untersuchungen können diese Ergebnisse jedoch ein Anhaltspunkt sein, um *Hypothese 2* zu bestätigen.

6. Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit haben große Teile der bestehenden Forschung bestätigt und um eine psychoakustische Komponente im Sinne des entwickelten Vokabulars zur Beschreibung von Publikumsgeräuschen erweitert, sowie dessen Bewertungsverlauf als möglichen Einflussfaktor identifiziert.
Es wurde eine Methode von Jeong et al. (2012) zum Extrahieren von Publikumsgeräuschpegeln aufgenommen und die Analyse der Aufnahmen um einen zeitlichen Verlauf erweitert. Die Publikumsgeräuschpegel wurden dabei über den gesamten Zeitraum eines Konzertes erfasst und in sinnvolle Zeitabschnitte unterteilt. Insgesamt wurden Daten in fünf verschiedenen Räumen bei acht verschiedenen Veranstaltungen ermittelt.
Die Analyse der spektralen Verteilung und breitbandigen Pegel je Zeitabschnitt zeigt, dass der Publikumsgeräuschpegel sich über die Zeit verändert, was die bestehenden Forschungen von Kleiner (1980), Hodgson et al. (1999) und Jeong et al. erweitert. Hierbei konnten zwei typische Verläufe identifiziert werden, welche ähnlichen Veranstaltungstypen und deren dramaturgischen Verlauf zuzuordnen sind **(H(1))**. So ist bei allen Opernveranstaltungen und vereinzelten Theateraufführungen ein invertiert U-förmiger Verlauf zu beobachten, wohingegen die Pegelverläufe aller betrachteten klassischen Konzertveranstaltungen und Vorlesungen tendenziell U-förmig verlaufen. Desweiteren stehen die Ergebnisse zum spektralen Verlauf der Publikumsgeräusche im Konsens zu bisherigen Forschungen, was das Vorhandensein einer charakteristischen spektralen Verteilung bestätigt.
Zur Methode sei angemerkt, dass das Aufteilen der gesamt aufgezeichneten Häufigkeitsverteilung in drei Signalanteile sinnvoll erscheint, insbesondere da oftmals eine mehrgipflige Häufigkeitsverteilung vorlag und dies ein Vorhandensein von mehreren Signalanteilen bekräftigt. Eine Grenze der Methode ist mit lauten, durchgehenden Passagen erreicht, bei denen es nicht möglich ist, auf einen plausiblen Publikumsgeräuschpegel zu schließen, da hier der gemessene Schalldruckpegel nie auf das Niveau der eigentlichen Publikumsgeräusche abfällt. Stattdessen werden ausschließlich Pegel der dargebotenen Musik erfasst.

Zur Messung des technischen Hintergrundrauschens ist zu erwähnen, dass das Verwenden von mehreren Low Noise - Mikrofonen dazu beitragen kann, bei weiterführenden Messungen zuverlässigere Messwerte zu erlangen und Fehlerquellen zu minimieren. Die Messungen in dieser Arbeit wurden mit größter Sorgfalt durchgeführt und mit dem Bestreben, den möglichst leisesten

Moment für die Messung vorzufinden (mit den entsprechenden technischen Geräten angeschaltet, die das Hintergrundrauschen erzeugen). Obgleich das verwendete Equipment ein Klasse 1 Messmikrofon beinhaltete, welches ein relativ geringes Eigenrausch besitzt (16 dB(A)), so ist es rückblickend ratsam, bei weiteren Messungen Equipment zu verwenden, welches ein noch geringeres Eigenrauschen besitzt und Pegel im einstelligen Bereich zuverlässig erfassen kann. Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Messwerte sind nach wie vor als sinnvoll zu betrachten und tragen zu den hier erlangten Erkenntnissen bei. Sollte der Fokus weiterer Arbeiten insbesondere auf dem Verhältnis zwischen technischem Hintergrundrauschen und Publikumsgeräuschpegel liegen, sei dieser Hinweis zum Equipment angebracht. Insbesondere, wenn Messungen in Räumen vorgenommen werden, die ein geringeres technisches Hintergrundrauschen aufweisen als die bisher betrachteten Räume.

Ein weiteres zentrales Ergebnis dieser Arbeit ist das entwickelte Vorhersagemodell zur spektralen Verteilung der Publikumsgeräuschpegel je Oktavband in Abhängigkeit vom technischen Hintergrundrauschen **(H(3))** und Zuschaueranzahl. Der Einfluss der Zuschaueranzahl erweitert dabei die bisherige Forschung, bei denen stattdessen ein Einfluss der äquivalenten Absorbtionsfläche gezeigt werden konnte.
Auch ließ sich unter Verwendung eines gemischten linearen Modells die Komplexität des Vorhersagemodells gegenüber den bestehenden Forschungen erweitern und ermöglicht das Berücksichtigen von hierachischen Datenstrukturen. Im Rahmen der erhobenen Messdaten gibt das Modell Auskunft über die Auswirkungen von Veränderungen des technischen Hintergrundrauschens oder der Zuschauergröße auf den spektralen Verlauf der Publikumsgeräusche. Die hier gewonnen Werte können für die Erstellung eines Synthesemodells herangezogen werden, um erstmals Aussagen über den anzunehmenden Publikumsgeräuschpegel treffen zu können. Gleiches trifft auf Raumakustiksimulationen zu, wobei die Ergebnisse fundierte Ansatzpunkte für anzunehmende Störgeräuschpegel je Oktave liefern.
Auf Grund der unterschiedlichen und teils gegensätzlichen Verläufe (U-förmig und invertiert U-förmig) konnte eine direkte Verbindung der sich zeitlich verändernden Publikumsstimmung als Eingangsparamter für das Vorhersagemodell nicht erreicht werden **(H(2))**. Deshalb wird empfohlen, weitere Messungen fokussiert auf einen Veranstaltungstyp vorzunehmen und das Modell zu erweitern (zum Beispiel klassische Konzerthäuser). Der Einfluss der Stimmung eines Publikums wurde dennoch separat eingehend untersucht, sowie ein Vokabular zur Beschreibung der Atmosphäre von Publikumsgeräuschen erstellt.

So zeigen die Selbstbewertungen bei einer Konzertveranstaltung, dass der Publikumsgeräuschpegel mit der Bewertung des Begriffs *Gefallen* positiv korreliert und somit darauf hindeutet, dass eine steigende Zuneigung zum Stück zu einem erhöhten Publikumsgeräuschpegel führen kann. Darüber

hinaus wurden verschiedene Stimuli bestehend aus Publikumsgeräuschen (aufgenommen in unterschiedlichen Räumen und Veranstaltungen) im Rahmen eines Hörversuches mittels 21 Begriffspaaren bewertet.
Die Ergebnisse einer Faktorenanalyse zeigen, dass die Atmosphäre sowie wahrgenommenen akustischen Eigenschaften von Publikumsgeräuschen durch ein dreidimensionales Begriffskonstrukt beschrieben werden können. Dieses besteht aus den Faktoren *Ausgelassenheit*, *akustische Ereignishaftigkeit* und *technisches Hintergrundrauschen*. Zusätzlich wurde ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen Bewertungen der *Ausgelassenheit* und dem gemessenen Publikumsgeräuschpegel ermittelt. Dieser kann mit dem Ergebnis der Selbstbewertung (Korrelation mit *Gefallen*) verglichen werden, was zum einen die Ergebnisse der Selbstbewertung bestätigt und den Einfluss insbesondere der Bewertungsdimension *Ausgelassenheit*/*Gefallen* in Bezug auf den Publikumsgeräuschpegel betont. Zum anderen werden damit die verwendeten Methoden in Form einer in situ Messung sowie eines Hörversuches in ihrer Validität bestärkt.
Abschließend ist ein weiteres Ergebnis dieser Arbeit, dass erstmals ein Vokabular zur Beschreibung von Publikumsgeräuschen während unterschiedlichster Veranstaltungen erarbeitet wurde. Zumindest ist zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit dem Autor hierüber keine bestehende Literatur bekannt. Es ist zu empfehlen, bei einer weiterführenden Datenerhebung im Rahmen eines Hörversuches die in dieser Arbeit ermittelten Begriffe zur Bewertung heran zu ziehen. Dabei kann entweder auf die erarbeiteten Einzelbegriffspaare (siehe Tabelle 5) oder die drei zusammengefassten Dimensionen zurückgegriffen werden. Letztere bieten durch die Begriffsreduzierung eine effiziente Möglichkeit, Publikumsgeräusche hinsichtlich der suggerierten Atmosphäre sowie akustischen Eigenschaften beschreibbar zu machen. Auch ist somit eine zuverlässigere Vergleichbarkeit gewährleistet. Bei Bedarf kann durch das Bekanntsein der Gewichtungen je Variable und zugehörigem Faktor auf den Einfluss jedes Begriffs rückgeschlossen werden.

Abschließend und als zusammenfassende Bemerkung ist der nicht unerhebliche Aufwand zu erwähnen, welcher durch die Datenerhebung entstand. Insbesondere das Organisieren der Messungen, das Koordinieren der Benutzung des Equipments und die anschließende Datenaufbereitung haben einen großen Teil der Bearbeitungszeit beansprucht. Die Ergebnisse dieser Arbeit bieten eine gute Grundlage für potentiell weitere Datensammlungen, bei denen die Einflüsse von raumakustischen Gegebenheiten sowie der Zuschauerstimmung auf den Publikumsgeräuschpegel vertieft geprüft werden können.
Das erarbeitete Vokabular stellt zusätzlich eine Erkenntnis im Bereich der Psychoakustik dar, um die suggerierte Atmosphäre von Publikumsgeräuschen und deren akustische Eigenschaften einheitlich beschreibbar zu machen und kann beim Erstellen von weiterführenden Modellen als methodisches Mittel verwendet werden. Zudem tragen die Ergebnisse dieser Arbeit dazu bei, den

Zusammenhang zwischen technischem Hintergrundrauschen und Publikumsgeräuschen weiter zu verstehen, was bei der raumakustischen Planung hilfreich sein kann.

7. Quellnachweise

Literatur

Ansorge, U. & Leder, H. (2011). *Wahrnehmung und Aufmerksamkeit* (1. Aufl Aufl.). Wiesbaden: VS-Verl. (OCLC: 732342639)

Beranek, L. L. (2006, September). Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *120* (3), 1399–1410. doi: 10.1121/1.2221392

Berg, J. & Rumsey, F. (2006, Mai). Identification of Quality Attributes of Spatial Audio by Repertory Grid Technique. *Journal of the Audio Engineering Society*, *54* (5), 365–379.

Butler, J. L. & Baumeister, R. F. (1998). The trouble with friendly faces: Skilled performance with a supportive audience. *Journal of Personality and Social Psychology*, *75* (5), 1213–1230. doi: 10.1037/0022-3514.75.5.1213

Cerny, B. A. & Kaiser, H. F. (1977, Januar). A Study Of A Measure Of Sampling Adequacy For Factor-Analytic Correlation Matrices. *Multivariate Behavioral Research*, *12* (1), 43–47. doi: 10.1207/s15327906mbr1201_3

Chollet, M., Chandrashekhar, N., Shapiro, A., Morency, L.-P. & Scherer, S. (2016). Manipulating the Perception of Virtual Audiences Using Crowdsourced Behaviors. In D. Traum, W. Swartout, P. Khooshabeh, S. Kopp, S. Scherer & A. Leuski (Hrsg.), *Intelligent Virtual Agents* (S. 164–174). Springer International Publishing.

Cowan*, J. P. (1993). *Handbook of Environmental Acoustics*. John Wiley & Sons. (* PDF liegt nicht vor)

Forsyth, D. R. (2009, März). Group Dynamics. In *Group Dynamics* (S. 506). Cengage Learning. (Google-Books-ID: RsMNiobZojIC)

Freytag, G. (1920). *Dramatische Werke / Technik des Dramas. 1. Auflage.* H. Fikentscher Verlag,.

Grill, T., Flexer, A. & Cunningham, S. (2011). Identification of Perceptual Qualities in Textural Sounds Using the Repertory Grid Method. In *Proceedings of the 6th Audio Mostly Conference: A Conference on Interaction with Sound* (S. 67–74). New York, NY, USA: ACM. (event-place: Coimbra, Portugal) doi: 10.1145/2095667.2095677

Grimaldi, V., Böhm, C., Weinzierl, S. & von Coler, H. (2017, Mai). Parametric Synthesis of Crowd Noises in Virtual Acoustic Environments. Audio Engineering Society.

Heidler, M.-D. (2008). Aufmerksamkeit und Sprachverarbeitung. In *Sprache - Stimme - Gehör* (S. 74–85). Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York.

Hidaka, T., Nishihara, N. & Beranek, L. L. (2001, März). Relation of acoustical parameters with and without audiences in concert halls and a simple method for simulating the occupied state. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *109* (3), 1028–1042. doi: 10.1121/1.1340649

Hodgson, M., Rempel, R. & Kennedy, S. (1999). Measurement and prediction of typical speech and background-noise levels in university classrooms during lectures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *105* (1), 226–233.

Jeong, C.-H., Marie, P., Brunskog, J. & Møller Petersen, C. (2012, April). Audience noise in concert halls during musical performances. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *131* (4). doi: 10.1121/1.3689558

Kaiser, H. F. (1974, März). An index of factorial simplicity. *Psychometrika*, *39* (1), 31–36. doi: 10.1007/BF02291575

Kang, N., Brinkman, W., Riemsdijk, M. B. v. & Neerincx, M. A. (2013, Oktober). An Expressive Virtual Audiencewith Flexible Behavioral Styles. *IEEE Transactions on Affective Computing*, *4* (4), 326–340. doi: 10.1109/TAFFC.2013.2297104

Kleiner, M. (1980, September). On the Audience Induced Background Noise Level in Auditoria. In (Bd. 46). S. Hirzel Verlag. Zugriff am 2019-06-26 auf `https://www.ingentaconnect.com/content/dav/aaua/1980/00000046/00000001/art00012`

Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B. & Christensen, R. H. B. (2017, Dezember). lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, *82* (1), 1–26. Zugriff am 2019-07-02 auf `https://www.jstatsoft.org/index.php/jss/article/view/v082i13` doi: 10.18637/jss.v082.i13

Nakagawa, S. & Schielzeth, H. (2013). A general and simple method for obtaining R2 from generalized linear mixed-effects models. *Methods In Ecology And Evolution*, *4* (2). Zugriff am 2019-07-02 auf `https://pub.uni-bielefeld.de/record/2565368`

NTI-Audio. (2016, Januar). *Noise Curves Measurements with XL2.* Zugriff am 2019-06-09 auf `https://www.nti-audio.com/Portals/0/data/en/NTi-Audio-AppNote-XL2-Noise-Curves.pdf`

Rost, K. (2017). *Sounds that matter - Dynamiken des Hörens in Theater und Performance*. transcript Verlag.

Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, *39* (6), 1161–1178. doi: 10.1037/h0077714

Schimmack, U. & Grob, A. (2000). Dimensional models of core affect: A quantitative comparison by means of structural equation modeling. *European Journal of Personality*, *14* (4), 325–345. doi: 10.1002/1099-0984(200007/08)14:4⟨325::AID-PER380⟩3.0.CO;2-I

Seibert, C., Greb, F. & Tschacher, W. (2018). Nonverbale Synchronie und Musik-Erleben im klassischen Konzert. *Jahrbuch Musikpsychologie*, *28*, 1–28. doi: 10.5964/jbdgm.2018v28.18

Tröndle, M. & Uhde, F. (2018). *Das Konzert II: Beiträge zum Forschungsfeld der Concert Studies*. transcript Verlag.

Tudor, A.-D. (2016). *Development of a virtual audience concept for public speaking training in immersive virtual environments*.

Vercammen, M. & Lautenbach, M. (2018a, März). Akustik der Staatsoper Unter den Linden - Entwurf. In *FORTSCHRITTE DER AKUSTIK.* München.

Vercammen, M. & Lautenbach, M. (2018b, April). Staatsoper Unter Den Linden Berlin. In *Proceedings of the Institute of Acoustics.* Cardiff. Zugriff auf `https://www.peutz.nl/sites/peutz.nl/files/publicaties/p8.pdf`

Weinzierl, S., Lepa, S. & Ackermann, D. (2018, September). A measuring instrument for the auditory perception of rooms: The Room Acoustical Quality Inventory (RAQI). *The Journal of the Acoustical Society of America*, *144* (3), 1245–1257. doi: 10.1121/1.5051453

Weinzierl, S., Sanvito, P., Schultz, F. & Büttner, C. (2015, Juni). *The Acoustics of Renaissance Theatres in Italy* [Text]. doi: info:doi/10.3813/AAA.918858

A. Anhang

A.1. Fragebogen Hörversuch

Aufgabenstellung: Bitte bewerten Sie die akustischen Eigenschaften der präsentierten Publikumsgeräusche sowie die dadurch suggerierte Atmosphäre.

Bewertungsvokabular

- nicht sprachhaltig - sprachhaltig
- nicht rauschhaft - rauschhaft
- nicht tonhaltig - tonhaltig
- stationär - transientenhaltig
- räuml. fokussiert - räuml. verteilt
- ereignisarm - ereignisreich
- dunkel - hell
- nicht dröhnend - dröhnend
- dumpf - scharf
- leise - laut
- nicht rau - rau
- nicht technisch - technisch
- geordnet - chaotisch
- unangenehm - angenehm
- nicht monoton - monoton
- ernsthaft - amüsiert
- unruhig - ruhig
- unaufmerksam - aufmerksam
- leblos - lebendig
- müde - wach
- verhalten - ausgelassen

Link zum Fragebogen: `https://wooclap.com/akt`

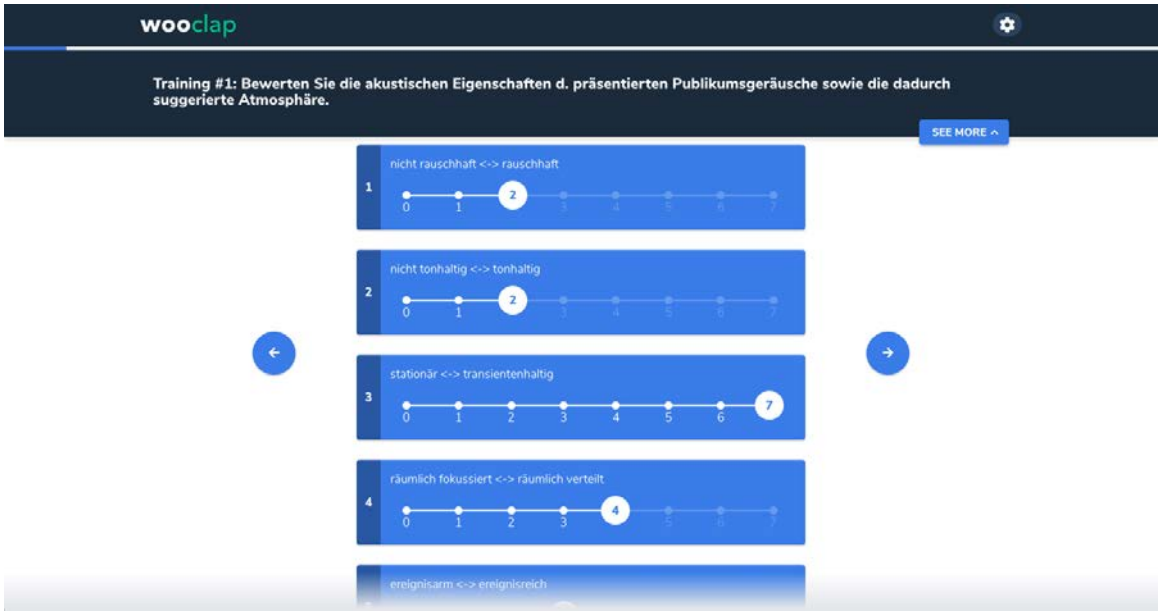

Abbildung A.1.: Ausschnitt der Bedienoberfläche des Fragebogens