Fakultät I Geistes- und Bildungswissenschaften
Institut für Sprache und Kommunikation
Fachgebiet Audiokommunikation
M. Sc. Audiokommunikation und -technologie

Masterthesis

Analyse und Synthese von Publikumsgeräuschen in Musikaufführungen

Matthias Görlach [redacted]

Erstkorrektor: Prof. S. Weinzierl
Zweitkorrektor: H. von Coler
Abgabedatum: 2020-11-22

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, 2020-11-16 .....

Unterschrift

Danksagung

Die hier vorliegende Arbeit wäre ohne die Unterstützung verschiedener Personen und Institutionen nicht möglich gewesen: Zunächst gilt mein Dank der Firma TKH Sitzsysteme, insbesondere Frau Hilbig, für die Leihgabe der fünf Konzertstühle für zwei Wochenenden. Zweitens möchte ich Herrn Tschakert, Herrn Daniel, die technische Akustikprüfstelle und den beteiligten Mitarbeitern für die Unterstützung und Beratung bei der Umsetzung der Messungen und Aufnahmen danken. Das Messsystem für die Hallraummessung wurde von Norsonic/Tippkemper GmbH gemietet. Für den freundlichen und kompetenten Support von Herrn Overhaus, der auch die Messdaten wegen eines Auslesefehlers der Globalparameter nach Norwegen zum Firmensitz weiterleitete, ebenfalls meinen Dank aussprechen. Die Firma Neumann, welche in sehr engem Kontakt zum Fachgebiet Audiokommunikation an der TU Berlin steht, stellte die fünf Studiomikrofone der Serie TLM103 kostenfrei zur Verfügung. Insbesondere Herrn Schneider, Herrn Veseli und Herrn Eichler gilt hier mein Dank. Ohne teilnehmende Personen wäre diese Studie nicht möglich gewesen. Daher gilt allen teilnehmenden Personen, gerade auch denjenigen, welche an beiden Versuchen teilgenommen haben, mein besonderer Dank. Das Korrekturlesen wurde von meinem Bandkollegen und Germanistikstudenten Maximilian Gaube und meinem alten Schulkameraden Johannes Schulze – welcher die Formalia penibel unter die Lupe genommen hat – übernommen. Auch dafür bin ich sehr dankbar. Gerade meine teilweise kryptischen Satzkonstruktionen und Formulierungsschwächen dürften den Germanisten an den Rande des Wahnsinns getrieben haben. Danke für die Geduld und Muße, diese Arbeit auf ein ansprechend sprachliches Niveau zu bringen, welches einer Masterarbeit gerecht wird. Ein weiteres persönliches Anliegen gilt meinem Vater, der mir meine gesamte Studienphase hin mit Rat und Tat zur Seite stand. Gerade auch durch die finanzielle Unterstützung wurden mir Wege ermöglicht, die vielen verwehrt bleiben. Darunter fällt beispielsweise das Bachelorstudium an einer privaten Hochschule und das aus finanzieller Sicht sorgenfreie Studieren bis hin zu dieser Arbeit. Lieber Achim, ohne Dich würde ich sowohl im privaten als auch im beruflichen Bereich nicht da stehen, wo ich heute stehe. Ich danke Dir von Herzen für all die Möglichkeiten, die ich erhalten habe.

Zuletzt gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Weinzierl und Herrn von Coler für die hervorragende Betreuung und Unterstützung während der gesamte Phase der Masterarbeit. Von der Themenfindung inklusive der Abgrenzung respektive Eingrenzung bis hin zu methodischen und fachlichen Fragen war die Betreuung hervorragend.

Abstract

Audience noises are indispensable during a classical concert. On the one hand they make an important contribution to the live atmosphere of the musical performance, on the other hand they define the lower perceptible dynamic range of the musical performance. The reduction of technical background noise is often associated with high costs. Audience noise acts as a masker for noises from technical systems, such as those generated by air conditioning, lighting and media technology. In order to create a sufficiently well-founded empirical basis for these noises, a sound power determination was made in the reverberation room of the Technical University of Berlin (TU Berlin) with different intensities, which relate to the behavior of an audience sample in typical concert chairs, measured according to ISO 3741. In addition to this determination, a data set was created for the development of an analysis-resynthesis system. In the course of this, near-field recordings of breath noises were made. Based on the sound power determination, suitable limit values for the design of technical systems can be defined and a reasonable economic outlay can be achieved when building a concert hall with regard to the technical systems. Together with the data set, a synthesis algorithm can be developed for creating realistic virtual acoustic concert situations.

Zusammenfassung

Publikumsgeräusche sind während eines klassischen Konzertes nicht wegzudenken. Einerseits leisten sie einen wichtigen Beitrag zur Live-Atmosphäre bei der Musikaufführung, andererseits definieren sie die untere wahrnehmbare dynamische Bandbreite der musikalischen Aufführung. Die Reduktion des technischen Hintergrundgeräusches ist oftmals mit hohen Kosten verbunden. Das Publikumsgeräusch stellt einen Maskierer für Geräusche technischer Anlagen, wie bspw. durch Klima-, Licht- und Medientechnik erzeugt, dar. Um eine ausreichend fundierte empirische Grundlage eben dieser Geräusche zu schaffen, wurde im Hallraum der Technischen Universität Berlin (TU Berlin) eine Schallleistungsbestimmung mit unterschiedlichen Intensitäten, welche sich auf das Verhalten eines Publikumssamples in typischen Konzertstühlen beziehen, nach ISO 3741 messtechnisch erfasst. Nebst dieser Bestimmung wurde ein Datensatz für die Erstellung eines Analyse-Resynthese-Systems erstellt. Im Zuge dessen wurden Nahfeldaufnahmen von Atemgeräuschen getätigt. Anhand der Schallleistungsbestimmung können geeignete Grenzwerte für die Auslegung technischer Anlagen definiert und einen sinnvollen wirtschaftlichen Aufwand beim Bau eines Konzertsaales im Bezug auf die technischen Anlagen erzielt werden. Zusammen mit dem Datensatz kann ein Synthese-Algorithmus zur Erstellung realistischer virtueller Konzertsituationen entwickelt werden.

Abbildungsverzeichnis

2.1 Schallleistung: Modell und Messung nach Kleiner 4
2.2 Schallleistung des modellierten Publikumsgeräusch (Kurve A) und Schallleistung aus den tatsächlichen Messwerten im Göteborg Theater (Kurve B) ([10, Abb. 6])Kleiners Berechnung (A) und Messung (B) des Schallleistungspegels im Göteborg Theather 4
2.3 Gemessene Diffusfeldpegel zweier Opern durch Melnikov et al. in der Bayerischen Staatsoper in Oktavbändern 5
2.4 Taxonomie der Klangsynthese nach Smith [16, Abb. 2] 7

3.1 Grundriss des Hallraums der TUB mit eingezeichneten Wandabständen . 11
3.2 Nachhallzeit des Hallraums mit Grenzkriterium der ISO 3741 12
3.3 Messinstrument von Norsonic Fabrikat NOR145 22
3.4 Messmikrofon GRAS 47HC mit Eichstempel und Seriennummer 22
3.5 Äquivalenter Schalldruckpegel der Eigenstörspannung des Gras 47HC Messmikrofons in Terzbändern nach Herstellerangaben [32]. 23
3.6 Frequenzgänge und Richtdiagramme des verwendeten Lautsprechers . . . 25
3.7 Kalibrierschrieb des EMX7150 des Herstellers iSemCon 27
3.8 Grundriss des Hallraums mit den Messbedingungen 29
3.9 Foto der Anordnung im Hallraum mit leeren Konzertstühlen 30
3.10 Versuchsaufbau der Tonaufzeichnung im RaR 33
3.11 Darstellung der Referenzkalibrierung. 34
3.12 Altersangaben der Teilnehmer: Frauen in rot, Männer blau und beide Geschlechter zusammen in schwarz 36
3.13 Größenverteilung der Teilnehmer 37
3.14 Gewichtsverteilung der Teilnehmer 37

4.1 Vergleich Nachhallzeit und äquivalente Absorptionsflächen der Hallraummessung 40
4.2 Fremdgeräuschmessungen im Vergleich zu dem Absolutkriterium der DIN EN ISO 3741 42
4.3 Gemitteltes Fremdgeräusch, Eigenstörspannung des Messmikrofons und energetische Subtraktion 42

4.4 Gemessene Diffusfeldpegel der drei Zustände und über beide Messungen gemitteltes Fremdgeräusch 43
4.5 Schallleistungspegel inkl. eingezeichnetem Bereich der Standardabweichung über die Messpositionen s_M aller Zustände und Fremdgeräuschmessungen 45
4.6 Wasserfalldiagramme aller Messungen je Block (50 ms) über alle Messpositionen gemittelt 47
4.7 Histogramme im Vergleich 48
4.8 Histogramme der Messpositionen des ersten Zustandes (a), des zweiten Zustandes (b) und des dritten Zustandes (c) 49
4.9 Vergleich des gesamten Atemzyklus 51
4.10 Vergleich Ein- mit Ausatemvorgang geschlechtergetrennt 51
4.11 Boxplots der Periodendauer des gesamten Atemzyklus, des Ein- und Ausatmungsvorgangs von jeder Person (linke Hälfte) und geschlechtergetrennt sowie die Gesamtverteilung (rechte Hälfte). 52

5.1 Vergleich Nahfeldaufnahmen mit dem aus dem Schallleistungspegel des ersten Zustandes berechneten Freifeldpegel 57
5.2 Vergleich Schallleistungspegel der drei Zustände normiert auf eine Person mit den gemittelten Werten von Kleiner in Oktavbändern 59
5.3 Vergleich der aus der Schallleistungsmessung berechneten Diffusfeldpegel mit den in der Bayerischen Staatsoper gemessenen Diffusfeldpegel von Melnikov et al. [13, Abb. 4 (e)] in Oktavändern 60

A.1 Grundriss des Hallraums mit den Messbedingungen 70

Tabellenverzeichnis

3.1 Zustände und die zu erwartenden Geräusche 10
3.2 Abgeschätzte Schalldruckpegel aus den Schallleistungsangaben in der Literatur für 5 Personen für beide Schallleistungsverfahren und für das Hüllflächenverfahren mit einem Messradius von $r = 4{,}2\,\mathrm{m}$ 14
3.3 Typische äquivalente Absorptionsflächen für die quellrelevanten Parameter. Auszug aus Tabelle G.2 DIN EN ISO 18041 [23, Anhang G] 14
3.4 Vergleich der Messverfahren nach DIN EN ISO 3740 [24] 16
3.5 Vergleich der Messverfahren nach DIN EN ISO 3740 [24, Tabelle A.2] . . 17
3.6 Gegenüberstellung Quelleigenschaften und mit der Norm DIN EN ISO 3741 bestimmbare Signaltypen 17
3.7 Technische Daten der rückseitigen Line-Eingänge des RME Fireface UCs 24
3.8 Technische Daten der rückseitigen Line-Eingänge des RME Micstasy . . . 25
3.9 Technische Daten der Yamaha P-2500S Endstufe 26
3.10 Auflistung der verwendeten Bestuhlung inklusive der Nummerierung . . . 28
3.11 Quellabmessungen nach Sitzreihen und Gesamt 28
3.12 Abstandskriterien nach DIN EN ISO 3741 [20] 29
3.13 Tatsächliche Messpositionen 29
3.14 Meteorologische Bedingungen zum Messzeitpunkt 30
3.15 Daten der Versuchspersonen 31
3.16 Bekleidung der Versuchspersonen 31
3.17 Timetable 34
3.18 Personeneigenschaften der Nahfeldaufnahmen 38

4.1 Eingeschränkter gültiger Frequenzbereich der Zustände 44
4.2 Statistische Eigenschaften der Messungen über die Messzeit 48
4.3 Statistische Eigenschaften des gesamten Atemzyklus je Person 53
4.4 Statistische Eigenschaften der Einatmungsvorgänge je Person 54
4.5 Statistische Eigenschaften der Ausatmungsvorgänge je Person 54

A.1 Auflistung der verwendeten Bestuhlung inklusive der Nummerierung . . . 69
A.2 Quellabmessungen nach Sitzreihen und Gesamt 69
A.3 Meteorlogische Bedingungen zum Messzeitpunkt 71
A.4 Verwendete Messgeräte 71

A.5 Zeitstempel der Einzelmessungen 72
A.6 Gemessene Schalldruckpegel des ersten Betriebszustandes von allen Messpositionen in Terzbändern 73
A.7 Gemessene Schalldruckpegel des zweiten Betriebszustandes von allen Messpositionen in Terzbändern 74
A.8 Gemessene Schalldruckpegel des dritten Betriebszustandes von allen Messpositionen in Terzbändern 75
A.9 Gemessene Schalldruckpegel der ersten Fremdgeräuschmessung von allen Messpositionen in Terzbändern 76
A.10 Gemessene Schalldruckpegel der zweiten Fremdgeräuschmessung von allen Messpositionen in Terzbändern 77
A.11 Gemessene Schalldruckpegel des über die zwei Messungen gemittelten Fremdgeräuschs von allen Messpositionen in Terzbändern 78
A.12 Standardabweichung über die Messpositionen je Betriebszustand und gemitteltes Fremdgeräusch in Terzbändern 79
A.13 Korrekturfaktoren des ersten Betriebszustandes über die Messpositionen in Terzbändern 80
A.14 Korrekturfaktoren des zweiten Betriebszustandes über die Messpositionen in Terzbändern 81
A.15 Korrekturfaktoren des dritten Betriebszustandes über die Messpositionen in Terzbändern 82
A.16 *SNR* des ersten Betriebszustandes über die Messpositionen in Terzbändern mit in rot markierte negativen Werten 83
A.17 Terzbandmittenfrequenzen des ersten Betriebszustandes je Messposition, bei denen die Anforderungen der Norm an den *SNR* unterschritten wurden 84
A.18 *SNR* des zweiten Betriebszustandes über die Messpositionen in Terzbändern mit in rot markierte negativen Werten 85
A.19 *SNR* des dritten Betriebszustandes über die Messpositionen in Terzbändern mit in rot markierte negativen Werten 86
A.20 Schallleistungspegel der Betriebszustände und des gemittelten Fremdgeräusches in Terzbändern 87
A.21 Schallleistungspegel der Betriebszustände und des gemittelten Fremdgeräusches in Terzbändern 88

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung **III**

Danksagung **V**

Abstract **VII**

Abbildungsverzeichnis **IX**

Tabellenverzeichnis **XI**

1 Einleitung und Fragestellung **1**

2 Stand der Forschung **3**
2.1 Hintergrund- und Publikumsgeräusch . . . 3
2.2 Grundlagen Synthese . . . 6

3 Methoden **9**
3.1 Quellbeschreibung . . . 9
3.2 Beschreibung der zur Verfügung stehenden Laborräume . . . 11
3.3 Quellabschätzung . . . 13
3.4 Auswahl des Verfahrens . . . 14
3.5 Schallleistungsbestimmung nach dem Hallraumverfahren Genauigkeitsklasse 1 gemäß DIN EN ISO 3741 . . . 18
3.6 Messequipment . . . 21
3.6.1 Hallraum . . . 21
3.6.2 Tonaufzeichnung . . . 23
3.7 Durchführung . . . 27
3.7.1 Hallraum . . . 27
3.7.2 Tonaufzeichnung . . . 32

4 Ergebnisse **39**
4.1 Messung im Hallraum . . . 39
4.1.1 Nachhallzeit und Absorptionsflächen . . . 39
4.1.2 Fremdgeräusch . . . 41

4.1.3 Schallleistungen der Zustände 44
4.1.4 Analyse im Zeitbereich 46
4.2 Tonaufzeichnung 50

5 Auswertung **55**
5.1 Interpretation der Quellzustände 56
5.2 Interner Vergleich: Hallraum und Nahfeld 57
5.3 Externer Vergleich 58
5.3.1 Schallleistung nach Kleiner 58
5.3.2 Vergleich mit Konzertmitschnitt 59

6 Zusammenfassung **62**
6.1 Limitation und weitere Forschung 63

Quellenverzeichnis **64**

Anhang **68**

A Messbericht **69**

B Elektronischer Anhang **89**

1 Einleitung und Fragestellung

Die Darbietung eines klassischen Konzerts ist seit je her ein Erlebnis. Um die Umstände dieses Erlebnisses greifbarer zu machen, wurden diverse Forschungen getätigt. Diese sind auf Gebieten der musikalischen, technischen Akustik und Raum- und Bauakustik zu verorten. In der musikalischen Akustik wurden die Orchesterinstrumente hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften analysiert. Dies betrifft die Schallleistung der einzelnen Orchesterinstrumente inklusive der möglichen Dynamikbereiche, den Tonumfang und die Richtcharakteristiken [1, 2, 3]. Erste raumakustische Forschungen wurden vor allem durch Sabine vor über 100 Jahren durchgeführt [4]. In dieser Zeit wurde von der anfänglichen und ausschließlichen Betrachtung der Nachhallzeit bis zu komplexeren Themengebieten, wie z. B. der Einfluss der Raumgeometrie, Erkenntnisse gewonnen [5, 6, 7]. Diese Themen werden seit langem erforscht und stehen auch heute noch – wegen des hohen subjektiven Einflusses von Hörpräferenzen – im Fokus.

Ein weiterer Grund ist der, dass der Bau eines Konzertsaales ein Prestigeprojekt mit einem hohen wirtschaftlichen Aufwand darstellt. In der raumakustischen Planung wird vor allem auf maßstabsgetreue Modellmessungen – vornehmlich aus einer Zeit stammend, in welcher computergestützte Verfahren nicht realisierbar waren – und Modellsimulationen im Rechner zurückgegriffen [5]. Die Aufnahme von Beethovens 8. Sinfonie, welche am Fachgebiet Audiokommunikation an der Technischen Universität Berlin (TU Berlin) im reflexionsarmen Raum (RaR) durchgeführt wurde [8], kann als nachhallfreies Quellsignal für eine Rechnersimulation dienen. Um ein besseres Gesamtbild zu erhalten fehlt die Integration von dem Geräusch technischer Anlagen und dem des Publikums.

Deutlich weniger Aufmerksamkeit wurde und wird den von Publikum erzeugten Geräuschen gewidmet. Die Mehrheit aller Studien beschäftigten sich mit dem Publikumsgeräusch während einer Veranstaltung. Diese reichten von Hörsaalvorlesungen und Unterricht in Schulklassenzimmern [9], Theatervorstellungen [10] bis hin zu Opern und klassischen Konzerten [11, 12, 13]. Allen gemein ist die Ermittlung des Publikumsgeräusches in Anwesenheit einer Programmquelle und dem technischen Hintergrundgeräusch: Egal, ob dies nun durch einen Sprecher in Hörsaal, Klassenzimmer oder Theater, oder aber ein Orchester im Opernhaus bzw. Konzertsaal geschieht. Im Betrieb ist zwar die Analyse von einem Publikum eines vollständig besetzten Saales möglich, jedoch gibt es bei dieser Art der Näherung Probleme: Das Publikumsgeräusch ist unter realen Konzertbedingungen, bedingt durch die Aufführungsquelle – Orchester

oder Theaterschauspieler – und das technische Hintergrundgeräusch, nur teilweise und mit hohem Auswertungsaufwand zugänglich, wie unter anderem Jeong et al. [11] zeigten. Eine Betrachtung der Schallleistung außerhalb eines Konzertsaales wurde zuletzt 1980 mit Bandmaschine und analogen Pegelmesser durchgeführt [10].

Die Analyse der Geräusche, welche vom Publikum in klassischen Konzerten erzeugt werden, ist aus mehreren Gründen ein interessantes Forschungsgebiet: Zum einen wird die musikalische Dynamikbandbreite der Aufführung nach unten begrenzt, zum anderen stellt das Publikumsgeräusch einen Maskierer für das technische Hintergrundgeräusch, welches von Klima-, Licht- und Medientechnik erzeugt wird, dar. Die Auslegung solch technischer Anlagen – respektive der Minimierung des technischen Hintergrundgeräusches – ist oftmals mit einem hohen wirtschaftlichen Aufwand verbunden. Aus diesen Gründen sollten jene Publikumsgeräusche bei der Auslegung technischer Anlagen und den hierfür angesetzten Grenzwerten berücksichtigt werden. Mit Hilfe von Schallleistungswerten können bereits in der Planung geeignetere Grenzwerte anhand der Noise Rating (NR) oder Noise Criterion (NC) Kurven ermittelt werden. Eine empirische Grundlage zur Ermittelung des minimalen Hintergrundgeräusches fehlt bis dato.

Des Weiteren kann aus den Daten der Analyse ein Synthese-Algorithmus entwickelt werden, welcher eine realistische, virtuelle und akustische Konzertumgebung synthetisiert. Mit Hilfe einer solchen virtuellen Konzertumgebung können realistische Konzerterlebnisse erstellt und im Rahmen eines Hörversuchs ein entsprechender Schwellwert für das technische Hintergrundgeräusch bestimmt werden, welcher als nicht störend wahrgenommen wird, aber möglicherweise oberhalb der Wahrnehmungsschwelle liegt. Es wurden bereits erste Ansätze für Menschenansammlungen entwickelt, bei welchen den Autoren jedoch keine absoluten Pegelangaben einer Menschenmenge zur Verfügung standen [14]. Für raumakustische Modellsimulationen im Rechner können die hier ermittelten Werte mit in die Simulation mit einbezogen werden, um dort realistischere Ergebnisse für die Planung zu erzielen.

Diese Arbeit widmet sich der Analyse eines sich in Konzert befindlichen Publikums. Es sollen Schallleistungswerte ermittelt werden, welche in Simulationen für die Auslegung technischer Anlagen in Konzertsälen unabhängig von dessen Größe, Raumakustik und der Anzahl an Zuschauern verwendet werden können. Neben diesen Werten soll zusätzlich die Grundlage für einen Klangsynthese-Algorithmus geschaffen werden. Anhand bekannter Synthese-Algorithmen wird die Art der notwendigen Daten bestimmt. Aufgrund der logistischen Probleme soll die Analyse im kontrollierten Labor – Hallraum und reflexionsarmer Raum (RaR) der Technischen Universität Berlin (TU Berlin) mit einem Publikumsausschnitt durchgeführt werden. Dies ermöglicht auch eine detaillierte Betrachtung der charakteristischen Abstrahlung im spektralen Bereich.

2 Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird der aktuelle Forschungsstand der vom Publikum erzeugten Geräusch dargelegt. Dies betrifft die Schallleistung von Atemgeräuschen und die erzeugten Diffusfeldpegel während eines Konzertes. Außerdem wird die grundlegende Taxonomie für Synthese-Algorithmen vorgestellt.

2.1 Hintergrund- und Publikumsgeräusch

Das vom Publikum erzeugte Geräusch unterteilt sich in mehrere Komponenten: Je nach Aufmerksamkeitsspanne verhält sich das Publikum mehr oder weniger ruhig. Dies erstreckt sich von Bewegungen im Stuhl, dem Auspacken von Taschentüchern oder Bonbons, Husten oder Ähnlichem, bis hin zu Atemgeräuschen. Bei einem äußerst aufmerksamen Publikum ist anzunehmen, dass letztere Komponente die einzige des Publikumsgeräusches darstellt.

Bei der Entstehung des Publikumsgeräuschs nennt Kleiner das Atmungsgeräusch als die relevante Schallquelle. Hierbei entstehe eine turbulente Luftströmung in den Nasenkanälen. Er bestimmt einen theoretischen Wert für die Schallleistung der Atmungsgeräusche. Hierfür setzt er für eine durchschnittliche Person mit Körpergröße von 1,85 m und 85 kg Körpergewicht ein Atmungsvolumen V von 3,5 mal der Körperoberfläche an. Des Weiteren beschränkt er den schallentstehungsrelevanten Bereich auf die Ausatmung mit 20 bis 25 % des Atmungszyklus mit einem Durchlauf von etwa jede 5 s. Mit diesen Daten bestimmt Kleiner das Atmungsvolumen auf 0,62 l je Atmungsvorgang. Daraus wurde eine Schallleistung von 11 nW bzw. Schallleistungspegel berechnet [10]. $L_W = 40{,}41$ dB. Die Atmungsgeräusche selbst weisen nach Kleiner [10, Abb. 2] für eine gesunde männliche Person einen frequenzabhängigen Schallleistungspegel – hier zu sehen in Abbildung 2.1 Kurve A – mit einem Maximum bei 250 Hz auf. Oberhalb dessen fällt die Kurve um etwa 2-3 dB/Oktave ab. Der maximal gültige Frequenzbereich ist von 125 Hz bis 4 kHz beschränkt und die Atemgeräusche von lediglich zwei Personen der gemessenen Probanden erreichten gültige Ergebnisse über diesen Frequenzbereich. Zusätzlich konnte Kleiner keine Daten von Frauen erhalten. Er vermutete, dass die Atemgeräusche der Frau durch das geringere Luftvolumen und die weniger stark ausgeprägte Nasenbehaarung bedingt sei, was zu geringen Turbulenzen des Luftstromes führe, welche wiederum die Schallentstehung deutlich reduzieren würden und demnach für ihn nicht messbar seien. [10]

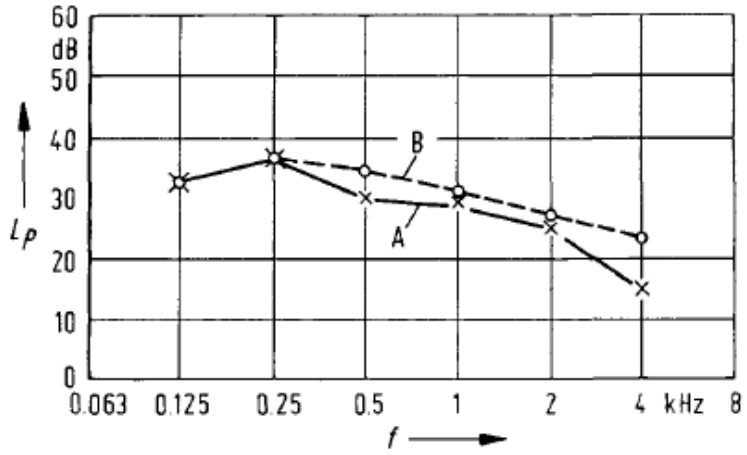


Abb. 2.1: Schallleistung einer gesunden, männlichen Person (Kurve A) und berechnete Schallleistung in einem idealisierten Raum (Kurve B) ([10, Abb. 3])

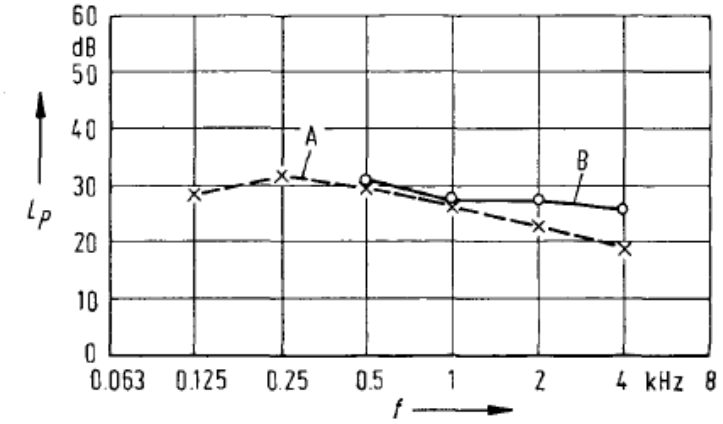


Abb. 2.2: Schallleistung des modellierten Publikumsgeräusch (Kurve A) und Schallleistung aus den tatsächlichen Messwerten im Göteborg Theater (Kurve B) ([10, Abb. 6])Kleiners Berechnung (A) und Messung (B) des Schallleistungspegels im Göteborg Theather

Kleiner führte anhand dieser Daten eine theoretische Berechnung mit seinem Schallleistungsmodell mittels der hier als Formel 3.3 angegebene Berechnungsvorschrift für das Stadttheater Göteborg durch. Diese Berechnung wurde durch die von ihm durchgeführten Messungen eines ruhigen und aufmerksamen Publikums bei laufendem Konzertbetrieb bestätigt. Neben den Angaben der 14 örtlich verschiedenen Messpositionen und einer Messdauer von je 15 Minuten, unterteilt in 20 ms Blöcke, fehlen weitere Angaben, wie der Publikumsgeräuschpegel je Oktavband bestimmt wurde. Abbildung 2.2 zeigt die für das Göteborg Theather berechnete Schallleistung (Kurve A) und die aus den Messergebnissen berechneten Werte (Kurve B). [10, Abb. 6] Die gültigen Messergebnisse zeigten etwas höhere Werte von 1 bis 4 kHz relativ konstant um die 30 dB, währenddessen die Modellwerte in diesem Bereich mit ca. 6 dB pro Oktave abfallen.

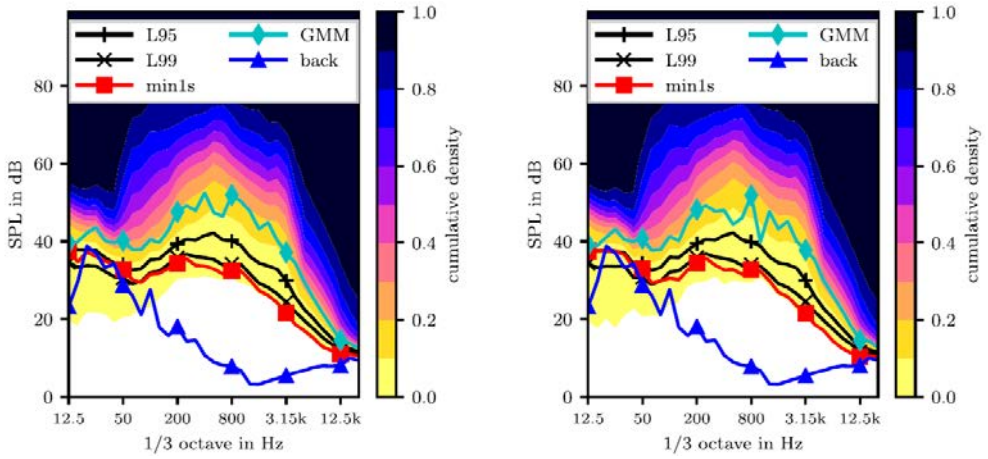


Abb. 2.3: Gemessene Schalldruckpegelverläufe zweier Aufführungen der Verdi-Oper *Un Bello in Maschera* in der Bayerischen Staatsoper. Dargestellt ist das technische Hintergrundgeräusch (blau) und der minimale, über eine Sekunde gemessene Schalldruckpegel $L_{min,1s}$ als Maß für das aufmerksame Publikum (rot) [13, Abb. 4 (e) und (f)]

Neben den von Kleiner getätigten Aufnahmen während eines Konzertes wurden diverse weitere Messungen des Publikumgeräusches durchgeführt.

Melnikov et al. führten Messungen in drei Opernhäusern der Schalldruckpegel von Aufführungen durch. Die Autoren verwendeten zur Auswertung den Wert $L_{min,1s}$, der die Sekunde des geringsten Schalldruckpegels repräsentiert. Abbildung 2.3 zeigt zwei Messungen der Oper *Un Bello in Maschera* in der Bayerischen Staatsoper. Zu erkennen ist in beiden Fällen, dass das Publikumsgeräusch von etwa 36 dB bei 250 Hz auf 22 dB bei 4 kHz abfällt. [13]

Luykx untersuchte das Publikums- und technische Hintergrundgeräusch im Musikgebouw in Amsterdam. Er fand heraus, dass das Publikumsgeräusch in ruhigen Situationen sehr wenig Frequenzanteile unterhalb 250 Hz aufweise. Oberhalb von 500 Hz ergab die Messung des Publikums $L_{p,diff,A} = 25\,\mathrm{dB(A)}$. Den Berechnungen von Luykx zu Folge lag der pro Person abgegebene A-bewertete Schallleistungspegel bei $L_{\mathrm{W,A}} = 19\,\mathrm{dB(A)}$. [15]

Jeong et al. untersuchten das Publikumsgeräusch in Konzertsituation. Es wurden Messungen in fünf Konzertsälen über die gesamte Konzertlänge aufgenommen (2-3 h, 4-5 verschiedene Mikrofonpositionen). Die Messdaten wurden mit drei normalverteilten Gaußkurven unter der Annahme, dass diese unabhängig von einander sind, approximiert. Diese drei Kurven setzen sich aus den Parametern Orchester, Solist bzw. Sänger und dem gemischten Hintergrundrauschen zusammen. Im unbesetztem Zustand wurde zudem die Nachhallzeit und das technische Hintergrundgeräusch gemessen. Die Verteilung des Publikumsgeräusches wurde nach energetischer Subtraktion mit dem technischen

Hintergrundgeräusch aus dem gemischten ermittelt. Die Autoren stellten fest, dass das Publikumsgeräusch mit dem technischen Hintergrundgeräuschpegel stark korreliert. [11]

Böldt untersuchte den Einfluss der Aufmerksamkeit unterschiedlicher Publika in Theather- und Opernhäusern. Wie auch Jeong et al. kam er zu dem Schluss, dass sich das Publikumsgeräusch an das Hintergrundgeräusch anpasse. Der von Böldt als markant festgestellte Frequenzbereich von 250 - 8 kHz deckt sich im unteren Frequenzbereich mit den von Kleiner ermittelten Ergebnissen. Zudem teilte er die Veranstaltungen anhand des dramaturgischen Verlaufs in Zeitabschnitte und konnte sowohl einen u-förmigen als auch einen invertiert u-förmigen Verlauf feststellen. Je Zeitabschnitt konnte er beginnend zwischen dem 250 Hz und dem 500 Hz bis zum 4 kHz Oktavband eine Differenzierung der spektralen Verläufe des Publikumsgeräusches feststellen. Oberhalb und unterhalb dieses Bereiches überschnitten sich seine Messdaten. Zudem stellte er große Unterschiede der im vom Publikum erzeugten Geräuschpegel innerhalb einer Veranstaltung fest. Für die Veranstaltung im Konzertsaal der Universität der Künste Berlin (UdK) nennt er einen Unterschied von 9 dB (37 dB(A) als untere und 45 dB(A) als obere Grenze). Die Beschreibung des Publikumsgeräuschpegels mittels eines einzelnen Breitbandpegels für eine gesamte Veranstaltung sei daher unzureichend. [12]

2.2 Grundlagen Synthese

In diesem Kapitel werden die Grundlegenden Begriffe einer Klangsynthese kurz erläutert und im Bezug zum Forschungsstand über das vom Publikum erzeugte Geräusch ein möglicher Algorithmus zur Synthese jener Geräusche aufgezeigt. Eine Entwicklung eben dieses Synthese-Algorithmus wurde jedoch nicht vorgenommen.

Anhand der Art des Algorithmus werden die notwendigen Messungen und Aufnahmen erläutert.

Abbildung 2.4 zeigt einen Überblick nach Smith [16] aus dem Jahr 1991 über die grundlegenden Synthesearten in den übergeordneten Kategorien. In jeder Kategorie sind die einzelnen Algorithmen aufgelistet.

Die Kategorie Processed Recording verarbeitet – wie der Name unschwer erkennen lässt – bereits aufgenommene Sounds. Diese werden bestimmten Transformationen unterworfen (bspw. Wavelet), in kleine Abschnitte ("Grains") unterteilt und neu angeordnet (Granularsynthese), oder aber vollständig mit einander kombiniert (Sampling). Spectral Model bedient sich der Nachbildung des mittleren spektralen Verlaufes über die Zeit. Je nach spektraler Hüllkurve und Signalart werden dabei verschiedene Ansätze verwendet, beispielsweise Sinus- und Rauschmodelle für rauschhafte Signale mit tonalen Komponenten. Beim Physical Modeling wird das Verhalten einer realen Quelle nachgebildet, beispielsweise das Schwingen einer Saite oder das Übertragungsverhalten eines Gitarrenverstärkers. Als letzte Kategorie nennt Smith Abstract Algorithm, deren Algorithmen sich aus anderen

Processed Recording	Spectral Model	Physical Model	Abstract Algorithm
Concrète	Wavetable F	Ruiz Strings	VCO,VCA,VCF
Wavetable T	Additive	Karplus-Strong Ext.	Some Music V
Sampling	Phase Vocoder	Waveguide	Original FM
Vector	PARSHL	Modal	Feedback FM
Granular	Sines+Noise (Serra)	Cordis-Anima	Waveshaping
Prin. Comp. T	Prin. Comp. F	Mosaic	Phase Distortion
Wavelet T	Chant		Karplus-Strong
	VOSIM		
	Risset FM Brass		
	Chowning FM Voice		
	Subtractive		
	LPC		
	Inverse FFT		
	Xenakis Line Clusters		

Abb. 2.4: Taxonomie der Klangsynthese nach Smith [16, Abb. 2]

Fachgebieten bedienen, z. B. die aus der Radiotechnik bekannte Frequenzmodulation [17, S. 3]. Die Grafik von Smith enthält alle klassischen Synthesarten. Jedoch haben sich durch Verbesserung in der Signalprozessorleistung weitere Syntheseformen entwickelt: Hierbei sind neuronale Netze und Deep Learning als weitere Kategorien der Synthesearten zu nennen.

Die Synthese eines nachfolgend beschriebenen Publikums erfordert die Überlagerung unterschiedlicher Synthesearten aufgrund der verschiedensten Signale, die ein Publikum erzeugt. Diese reichen von rauschhaften Signalen, wie Atmungs- oder Bewegungsgeräuschen, bis hin zu transientenreichen Signalen. Neben den zeitabhängigen spektralen Eigenschaften spielen zudem auch die statistischen eine große Rolle. Die Auftrittshäufigkeit eines Signals kann den Charakter des resultierenden Synthesesignals wesentlich beeinflussen. Für die Entwicklung eines Synthese-Algorithmus von einem Publikum in Konzertsituation ist es demnach nicht ausreichend, lediglich die mittleren spektralen Eigenschaften, bzw. eine Schallleistungsbestimmung dessen, zu kennen. Daher ist neben einer Analyse der mittleren Schallabstrahlung auch die Erstellung eines Datensatzes zur adaptiven Analyse von Audiodaten und statistischen Bestimmung der Häufigkeiten für die bereits genannten Syntheseformen notwendig. Dies setzt hochauflösende Audioaufnahmen voraus, welche dann in einem Analyse-Resynthese-System, wie es Serra und Smith beschreiben [18], Parameter extrahieren, mittels derer schlussendlich die Synthese durchgeführt werden kann.

Grimaldi führten ebenfalls ein Recording zur Klangsynthese von allgemeinen Menschenansammlungen durch. Die Syntheseform wurde hier mittels einer Granularsynthese durchgeführt. Die Autoren zeigen, wie ein Recording für eine Datensatzerstellung durchgeführt werden kann [14]. Im späteren Verlauf wird auch auf das Publikum als Quelle mit den zu erwartenden Quellgeräuschen und Signalarten detaillierter eingegangen.

Die zugrunde liegende Forschung weist Lücken in der Analyse von Publikumsgeräuschen auf. Das betrifft vor allem die Schallleistungsbestimmung. Nicht nur, dass die bestehende Forschung unzureichend dokumentiert ist, auch eine Durchführung auf dem aktuellen Stand der Technik, samt der daraus resultierenden genaueren Ergebnisse, ist zwingend erforderlich. Zwar stellt die Studie von Kleiner mit den damals zur Verfügung stehenden Mitteln in Form einer Bandmaschine als Aufzeichnungsmedium und einem analogen Pegelmesser eine beachtliche messingenieurstechnische Leistung dar, jedoch bietet die heutige Digitaltechnik deutlich bessere Grundvoraussetzungen im Messalltag. Es ist zu erwarten, dass einige Ergebnisse zur damaligen Forschung ergänzt werden können. Ebenso führte Kleiner seine Schallleistungsbestimmung von Atemgeräuschen nicht nach einem normativen Verfahren durch. Die Normreihe der ISO 374x stellt eine Verfahrenssammlung dar, welche auf Hallraum- und den Hüllflächenverfahren für unterschiedlichste Messumgebungen und Quelldefinitionen basiert. Weitere Forschungen beschäftigten sich mit verschiedenen Auswertungsformen von Messungen in einer realen Konzertsituation. Eine Analyse der Publikumsgeräusche im Labor wurde nach Kleiner nicht mehr durchgeführt.

Für Synthese-Algorithmen werden vermehrt Analyse-Resynthese-Algorithmen eingesetzt. Dies setzt qualitativ hochwertige Vorlage-Audiodateien voraus.

3 Methoden

Der Stand der Forschung legt die Notwendigkeit einer Schallleistungsbestimmung mittels eines normativen Verfahrens und die Durchführung dessen im Labor nahe. Im Folgenden wird nach einer Definition der Quelle die Auswahl des Verfahrens anhand der Quelleigenschaften, Prüfumgebung und Auflösung der Ergebnisse dargelegt und deren Eignung geprüft. Des Weiteren werden die notwendigen Tonaufzeichnungen für einen Analyse-Resynthese-Algorithmus dargelegt.

Aufgrund der zu erwartenden niedrigen Pegel wird im Folgenden detailliert auf die Quelleigenschaften, die zur Verfügung stehenden Prüfräumen, die Eignung der Verfahren für die Quelle und das zur Verfügung stehende Equipment samt der gewünschten Form der Ergebnisse eingegangen. Das verwendete Verfahren wurde anhand der DIN EN ISO 3740, die einen Leitfaden zur Normauswahl darstellt, ermittelt. Zusätzlich wurden die Quellgeräusche klassifiziert und eine Pegelabschätzung getätigt. Anhand der Quellbeschreibung, Prüfumgebungen, dem zu erwartenden Schalldruckpegel am jeweiligen Mikrofon mit Daten aus der Literatur und spektralen Auflösung wurde das Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1 nach ISO 3741 ausgewählt.

Für Vergleichszwecke und zur Erstellung einer Vorlage und eines Datensatzes für ein Analyse-Resynthese-System wurden Tonaufnahmen im RaR der TU Berlin mit gleicher Konzertbestuhlung und Studiomikrofonen durchgeführt. Dabei wurde ein Verfahren erarbeitet, welches möglichst viele vom Publikum erzeugte Geräusche abdeckt, gleichzeitig einen geringen Aufwand für die teilnehmenden Personen mit sich bringt, ähnlich dem, wie es Grimaldi et al. durchgeführt haben [14].

3.1 Quellbeschreibung

Für die Auswahl eines geeigneten Messverfahrens sind die zu erwartenden Quellsignale und deren pegeltechnische Eigenschaften abzuschätzen. In diesem Kapitel werden die von der Quelle erzeugten Schallereignisse qualitativ erläutert.

Die nachfolgende Auflistung zeigt die Definition der Quellgeräusche nach Zuständen, welche im späteren Verlauf genauer definiert werden.

1. Zustand: Atemgeräusche
2. Zustand: leichte Bewegungsgeräusche
   Reibung auf Stuhl (Textil auf Polsterung)
   Stuhlknarzen
   Stöße
3. Zustand: weitere Aktivitätsformen:
   Flüstern: Bitten um Ruhe, „psscht“
   Bobonpapier und Taschentücher
   starke Bewegungen im Stuhl

Diese Zustände werden in Tabelle 3.1 Schallenstehungseffekten und deren Signalbeschreibung zugeordnet.

Tab. 3.1: Zustände und die zu erwartenden Geräusche

Zustand	Entsprechung	Signalbeschreibung
1. Zustand	Strömungsrauschen	stochastisch
2. Zustand	Reibungseffekte	stochastisch, tonal
	Stoß	transient
	Stuhlknarzen	transient, tonal
3. Zustand	Reibung, Knistern	stochastisch, transient, tonal
	Reißen	transient, tonal
	Sprache	tonal, stochastisch, transient
	Knarzen	transient, tonal

Atemgeräusche lassen sich als zyklostationäres Rauschen beschreiben, welche nach Kleiner mit der Periode des Atemzyklus den Ausatmungsvorgang als dominierenden Anteil definieren [10]. Weitere Reibungseffekte durch Bewegung auf dem Stuhl sind in die Kategorie der instationären, stochastischen Prozesse einzuordnen. Tonale und transiente Anteile sind den deterministischen Signalen zuzuordnen. Erstere können sowohl rein periodische als auch quasi-periodische Signale enthalten. Letztere sind nicht periodisch. Der Frequenzbereich bei reinen Atemgeräuschen ist nach dem Stand der Forschung im Bereich von 100 Hz bis 4000 Hz als sinnvoll einzuschätzen.

Im Kapitel 2.2 wurden die grundlegenden Begrifflichkeiten erörtert. Tabelle 3.1 ordnet den Entstehungsmechanismen Signalformen zu, welche sich in die in Abbildung 2.4 dargestellten Kategorien einordnen lassen. Im Großteil werden erwartungsgemäß Spektralmodelle und Sinus-Rausch-Transienten-Modelle und verwandte Arten zur Anwendung kommen. All diese Verfahren extrahieren Parameter aus hochwertigen Aufnahmen.

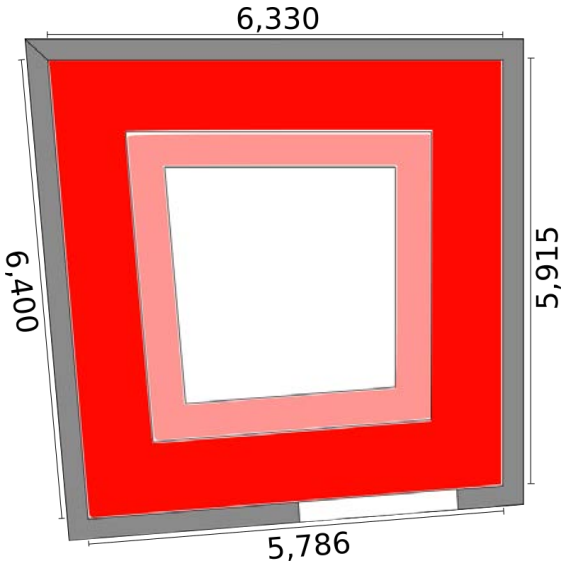


Abb. 3.1: Grundriss des Hallraums der TUB mit eingezeichneten Wandabständen

3.2 Beschreibung der zur Verfügung stehenden Laborräume

Die TU Berlin bietet mehrere Prüfräume, in welchen Messungen unterschiedlichster Art und Genauigkeit durchgeführt werden können. In diesem Kapitel werden die relevanten Räume mit ihren Eckdaten kurz vorgestellt.

Der Hallraum der TU Berlin ist nach ISO 3741 klassifiziert [19]. Tabelle 1 aus dieser Norm [20, S. 20] legt die Anforderungen für das minimale Raumvolumen V des Hallraums in Abhängigkeit zum tiefsten auszuwertenden Terzband fest. Mit einem Raumvolumen von $V_{Hall} = 200{,}88\,\mathrm{m}^3$ ist der Hallraum nach Norm groß genug für die Auswertung bis zum 100 Hz Terzband.

Abbildung 3.1 zeigt den Grundriss des Hallraums mit eingetragenen Wandabstandskriterien der Quelle (rot) und der Mikrophone (rosa), welche allen Normen gemein sind, bei denen das Hallraumverfahren zu Grunde liegt. Im weißen Bereich lassen sich die Quellen frei positionieren.

Die Nachhallzeit T_{60} soll in Terzbändern, welche kleiner als 6,3 kHz sind, die in Formel 3.1 angegebene Ungleichung erfüllen. S_{Hall} entspricht der gesamten Innenraumoberfläche des Hallraumes und beträgt $206{,}95\,\mathrm{m}^2$. Für Frequenzen unterhalb f – berechnet in Formel 3.2 – sollte der mittlere Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$ aller Oberflächen des Hallraums den Wert 0,16 nicht überschreiten. Für Frequenzen gleich oder oberhalb von f liegt der Schallabsorptionsgrad bei einer Obergrenze von 0,06 nicht. [20, S. 39].

$$T_{60} > \frac{V_{Hall}}{S_{Hall}} \tag{3.1}$$

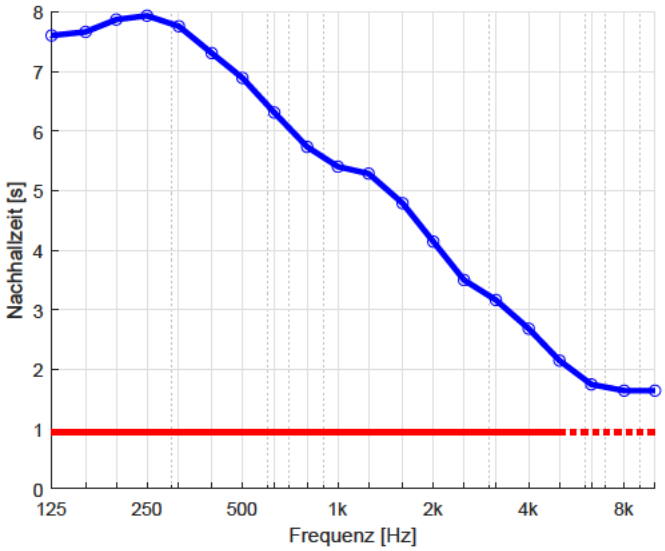


Abb. 3.2: Nachhallzeit im leeren Zustand (blau), die Mindestnachhallzeit (rot) nach Formel 3.1 berechnet und über die normative Grenze von 6,3 kHz hinaus verlängert (rot gestrichelt)

$$f = \frac{2000}{V^{\frac{1}{3}}} \tag{3.2}$$

Für den Hallraum ergibt sich ein Grenzwert für die Nachhallzeit, der nicht von $T_{grenz} = 0{,}97\,\mathrm{s}$ unterschritten werden darf. Abbildung 3.2 zeigt die Ergebnisse einer vorab getätigten Messung der Nachhallzeit im leeren Hallraum (blaue Kurve) und der Minimalgrenze (rot). Der Grenzwert wurde über die in der Norm definierten maximalen Frequenz von 5,3 kHz erweitert. In diesem Frequenzbereich tritt verstärkt Luftabsorption auf. Eine Bestimmung der Wandabsorption ohne den Anteil der Luftabsorption gestaltet sich also ohne Weiteres als schwierig. Da jedoch die Nachhallzeit auch oberhalb des normativ definierten Frequenzbereichs länger und somit die gesamte Absorption inklusive der Luftabsorption kleiner als die geforderten maximalen Absorptionswerte der Wand ist, stellt der Hallraum auch im hohen Frequenzbereich ein gutes Diffusfeld bereit.

Der reflexionsarme Raum (RaR) der TU Berlin ist nach ISO 3745 zertifiziert [21] und weißt eine untere Grenzfrequenz von 63 Hz auf. Oberhalb dessen ist der RaR nahezu reflexionsfrei. Mit seinem Volumen von $V_{RaR} = 1070\,\mathrm{m}^3$ und einer begehbaren Fläche von $A_{W,RaR} = 126\,\mathrm{m}^2$ können alle Verfahren von Freifeldmessungen inklusive aller Genauigkeitsklassen durchgeführt werden. Auch große Quellanordnungen lassen sich hier ohne Einschränkungen installieren.

3.3 Quellabschätzung

Für die Auswahl des geeigneteren Verfahrens wird im Folgenden eine Pegelabschätzung der zu erwartenden Schalldruckpegel an den Mikrofonpositionen auf Basis der Schallleistungsergebnisse von Kleiner durchgeführt und miteinander verglichen. Dies dient zur Abschätzung der zu erwartenden Messdynamik, welche nach unten durch das Eigenrauschen der Messkette begrenzt wird. Die in Kapitel 3.1 festgelegte Quelle wurde hierbei in die vorgehend beschrieben Messräume virtuell gesetzt und daraus die zu erwartenden Schalldruckpegel an den jeweiligen Mikrofonpositionen berechnet.

In Zusammenarbeit mit einem Berliner Sitzhersteller wurde eine Auswahl an Konzert- und Opernhausstühlen ausgewählt. Da auch die Bepolsterung Einfluss auf die Schallentstehung nehmen kann, wurden fünf verschiedene Modelle ausgewählt, um Ergebnisse über ein Mittel verschiedener Stühle zu erzielen. Die Stühle sind in Tabelle 3.10 aufgelistet. Dabei handelt sich um Sitzplätze, wie sie aktuell in Konzert- und Opernhäusern, wie dem großen Sendesaal des RBB, in der Oper Wuppertal, im Konzertsaal der Universität der Künste, in der Stadthalle Chemnitz und in der Oper Leipzig, installiert sind. Die Wahl verschiedener Stühle unterliegt dem Grund, dass ein Mittel der Schallentstehung unabhängig einer spezifischen Bestuhlung bestimmt werden soll. Dieselben Stühle wurden sowohl für die Hallraummessung als auch für die Tonaufzeichnung im RaR verwendet.

Zur Berechnung des Diffusfeldschalldruckpegels aus Schallleistungspegel gilt folgende Formel:

$$L_{p,diffus} = L_W + 10 \cdot log\frac{4}{A} + 10 \cdot log(N) \tag{3.3}$$

L_W stellt den Schallleistungspegel, A die äquivalente Absorptionsfläche des Raumes und N die Anzahl der Personen dar.

Für den Freifeldschalldruckpegel gilt folgende Formel:

$$L_p = L_W - |10 \cdot log\frac{\gamma}{S}| \tag{3.4}$$

γ beschreibt die Richtwirkung der Quelle und $S = 4\pi r^2$ die Kugeloberfläche der Schallausbreitungsfläche mit dem Abstand $r = 4{,}2\,\mathrm{m}$ zur Quelle. r berechnet sich zu zwei mal der größten Quellausdehnung d_0 nach DIN EN ISO 3745 [22]. Die Quelle wurde hierbei einreihig angenommen und das akustische Zentrum mittig festgelegt.

Tabelle 3.2 zeigt den Vergleich der Schalldruckpegel, die mit Hilfe der Formeln 3.3 und 3.4 aus Schallleistungspegeln von Kleiners Messergebnissen (Subject No. 3) berechnet wurden. Für den Hallraum wurde zusätzlich noch die eingebrachte Absorptionsfläche nach Tabelle 3.3 für fünf männliche Personen mit ebenso vielen Polsterstühlen berücksichtigt und in der dritten Spalte der Tabelle 3.2 dargestellt.

Tab. 3.2: Abgeschätzte Schalldruckpegel aus den Schallleistungsangaben in der Literatur für 5 Personen für beide Schallleistungsverfahren und für das Hüllflächenverfahren mit einem Messradius von $r = 4{,}2\,\mathrm{m}$

Oktavbandmittenfrequenz Hz	Schätzung der Schalldruckpegel dB gemäß Kleiners Werte		
	RaR	Hallraum unkorrigiert	Hallraum korrigiert
125	16,53	39,72	37,67
250	20,53	43,91	41,20
500	14,53	37,29	33,96
1000	13,53	35,24	31,79
2000	10,53	31,09	27,90
4000	-2,47	16,20	13,67
Total	29.97	52.61	49.82

Tab. 3.3: Typische äquivalente Absorptionsflächen für die quellrelevanten Parameter. Auszug aus Tabelle G.2 DIN EN ISO 18041 [23, Anhang G]

Art	*A* in Oktavbändern					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
männliche Person im Anzug, sitzend	0,15	0,25	0,55	0,80	0,90	0,90
einfacher Polsterstuhl mit Textilbezug	0,15	0,25	0,30	0,35	0,40	0,40

3.4 Auswahl des Verfahrens

Im Folgenden werden die Verfahren gegenübergestellt und die Eignung des Hallraumverfahrens der Genauigkeitsklasse 1 nach ISO 3741 anhand der zuvor getätigten Quellbeschreibung, Pegelabschätzung und unter Berücksichtigung der zu messenden Signale dargelegt.

Die Normreihe der DIN EN ISO 374x ermöglicht die Schallleistungsbestimmung unter verschiedensten Bedingungen, welche die Genauigkeit des Verfahrens, Eigenschaften der Prüfumgebung und der Quelle (samt abgestrahlter Signalarten) und die Form der Ergebnisse betrifft. Die DIN EN ISO 3740 [24] stellt hierfür einen Leitfaden zur Auswahl des geeignetsten Verfahrens dar.

Die Tabelle 3.4 zeigt den Ausschnitt der Tabelle A.2 der Norm, welcher die bestimmbaren Signalarten der Quelle und die auswertbaren Ergebnisse der Schallleistungspegel beinhaltet. Da für eine sinnvolle Quellbeschreibung frequenzabhängige Daten unerlässlich sind, scheiden jene Verfahren, die nur einen Einzahlwert als Ergebnis zulassen, aus. Dies betrifft die DIN EN ISO 3746 [25]. Mit den übrigen Verfahren lassen sich die notwendigen Geräuschtypen der Quelle in mindestens Oktavbandpegeln bestimmen. DIN EN ISO 3747 [26] stellt jedoch ein in-situ Verfahren dar, welches einerseits seine Vorteile, anderseits auch Nachteile durch die in der üblichen Aufstellungssituation befindlichen Quelle darstellt. Das härteste Kriterium aber bildet die Anforderung an das Fremdgeräusch. Im Labor lassen sich häufig geringere Fremdgeräuschpegel realisieren, als ein sich im Betrieb befindender Konzertsaal. Zudem ist die Messung dort aufgrund der Notwendigkeit eines besetzten Saales nur während eines Konzertes praktikabel. Die Wahl der Methodik und die Auswertung der Ergebnisse sind dank dieses Umstandes sehr aufwendig, wie die ausgewählte Literatur (siehe Hodgson et al. [9], Jeong et al. [11], Melnikov et al. [13] und Böldt [12]) zeigt. Aus diesen Gründen scheidet die letzte Norm der Reihe aus. Die Tabelle 3.5 zeigt die Genauigkeitsklasse, Prüfumgebung und das Quellvolumen. Die Quelldefinitionen und -abschätzungen in den Kapiteln 3.1 und 3.3 stellen harte Kriterien an die Prüfumgebung. Diese fordern eine kontrollierte Prüfungsumgebung, wie sie in einem reflexionsarmen Raum oder einem Hallraum gegeben sind. Daher entfallen auch die Normen DIN EN ISO 3743 Teil 1 und 2 [27, 28]. Teil 2 ist zudem auf kleine transportable Quellen beschränkt. Des Weiteren sind die Ergebnisse der Studie von Kleiner sowohl auf dem heutigen Stand der Technik, als auch auf dem Stand der Verfahren zu wiederholen. Aus diesem Grund ist die Form der Ergebnisse in Terzbändern wünschenswert.
Die übrigen Normen - DIN EN ISO 3741 [20], DIN EN ISO 3744 [29] und DIN EN ISO 3745 [22] - stellen zwei verschiedene Verfahren dar: zum einen das Hüllflächenverfahren nach DIN EN ISO 3744 (Genauigkeitsklasse 2) und DIN EN ISO 3745 (Genauigkeitsklasse 1), welches einer Freifeldmessung entspricht, zum anderen das Hallraumverfahren nach DIN EN ISO 3741 (Genauigkeitsklasse 1), welches einer Diffussfeldmessung gleicht.

Tab. 3.4: Vergleich der Messverfahren nach DIN EN ISO 3740 [24]

Internationale Norm	Charakter des Geräuschs	Ermittelbare Schall-leistungspegel
ISO 3741	(un-)gleichförmig, schwankend Einzelschallimpulse, breitbandig Einzelton	A-bewertet Terz- oder Oktavpegel
ISO 3743-1	(un-)gleichförmig, schwankend, Einzelschallimpulse	A-bewertet Oktavpegel
ISO 3743-2	(un-)gleichförmig, schwankend schwankend, Einzelschallimpulse, breitbandig Einzelton	A-bewertet Oktavpegel
ISO 3744	alle	A-bewertet Terz- oder Oktavpegel
ISO 3745	alle	A-bewertet Terzpegel
ISO 3746	alle	A-bewertet
ISO 3747	(un-)gleichförmig, schwankend Einzelschallimpulse, breitbandig	A-bewertet Oktavpegel

Tabelle 3.6 stellt die Quelleigenschaften mit den Signalklassen, die mit der DIN EN ISO 3741 messtechnisch erfasst werden können, gegenüber. Es ist zu erkennen, dass alle relevanten Signaltypen, welche die Quelle erwartungsgemäß abstrahlt, von der Norm abgedeckt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Schallleistungsbestimmung nach DIN EN ISO 3741 den geeignetsten Kompromiss aus bestimmbaren Signalanteilen, Effizienz an Platz und Anzahl der Personen samt Mikrofonpositionen und mit dem Hallraumverfahren darstellt, welches den höchsten absoluten zu erwartenden Schalldruckpegel an den einzelnen Mikrofonpositionen ermöglicht. Das Hüllflächenverfahren bietet zwar durch die Größe des RaRs der TUB eine komfortablere Quellpositionierung, jedoch ist einerseits nach DIN EN ISO 3745 die Anzahl von mindestens 20 - ggf. 40 - Mikrofonpositionen für Versuche an Personen mit nur einem Messmikrofon ungeeignet und anderseits besteht immer noch die Problematik des geringen Schalldruckpegels für alle Normen, denen das Hüllflächenverfahren zu Grunde liegt. Die vorhandene Messdynamik wird vom Hallraumverfahren besser ausgenutzt.

Tab. 3.5: Vergleich der Messverfahren nach DIN EN ISO 3740 [24, Tabelle A.2]

Internationale Norm	Genauigkeitsklasse des Verfahrens	Prüfumgebung	Volumen der Quelle
ISO 3741	1	Hallraum, der besonderen Anforderungen entspricht	$< 2\,\%$ des Raumvolumens
ISO 3743-1	2	Raum mit schallharten Wänden	$< 2{,}5\,\%$ des Raumvolumens
ISO 3743-2	2	Sonderhallräume	vorzugsweise $< 1\,\%$ des Raumvolumens
ISO 3744	2	reflexionsarmer Halbraum, im Freien oder großen Raumen	ohne Beschränkung von Prüfumgebung begrenzt
ISO 3745	1	reflexionsarmer Raum oder Halb-Raum mit festgelegten Anforderungen	char. Abmessung kleiner als halber Messradius
ISO 3746	3	keine besondere Umgebung	ohne Beschränkungen von Umgebung begrenzt
ISO 3747	2 und 3	keine besondere Umgebung, ausreichend hallig, Quelle nicht transportabel	ohne Beschränkungen von Umgebung begrenzt

Tab. 3.6: Gegenüberstellung Quelleigenschaften und mit der Norm DIN EN ISO 3741 bestimmbare Signaltypen

Quelleigenschaften	DIN EN ISO 3471
stochastisch	(un-)gleichförmig
transient	Einzelschallimpulse
tonal	Einzelton

3.5 Schallleistungsbestimmung nach dem Hallraumverfahren Genauigkeitsklasse 1 gemäß DIN EN ISO 3741

In diesem Kapitel wird die Schallleistungsbestimmung nach dem Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1 gemäß DIN EN ISO 3741 beschrieben. Das Direktverfahren benutzt die äquivalente Absorptionsfläche des Hallraumes, um die Schallleistungs- und Schallenergiepegel zu bestimmen. Die Schallleistungsbestimmung beinhaltet einen interessierenden Frequenzbereich von 100 Hz bis 10 kHz. Erweiterungen zu tiefen Frequenzen bis 50 Hz sind unter bestimmten Umständen möglich. Für die betrachtete Quelle ist dies gemäß des Forschungsstandes jedoch nicht erforderlich. Es sind mindestens sechs sogenannte Anfangspositionen zu vermessen, welche je nach Standardabweichung s_M über die Messpositionen berechnet, nach Formel 10 und der Tabelle 4 der Norm, erhöht werden müssen. Gegebenenfalls ist auch die Anzahl der Quellpositionen nach Formel 12 und Tabelle 5 der Norm zu erhöhen. [20, S. 19ff] Die Quelle muss, wenn es in einer Geräuschnorm nicht anders vorgeschrieben ist, auf dem Boden und mit mindestens 1,5 m Abstand von jeder Wand aufgestellt werden. Bei mehreren Quellpositionen muss der Abstand der Positionen mindestens $\lambda/2$ der tiefsten auszuwertenden Terzbandmittenfrequenz betragen. Bei rechtwinkligem Grundriss des Hallraums ist die Quelle asymmetrisch zur Grundfläche aufzustellen. Der Hallraum der TU Berlin weißt jedoch keinen rechtwinkligen Grundriss auf.

Die Norm nennt für Frequenzen von 160 Hz und darunter eine notwendige Mindestmessdauer von 30 s. Für Frequenzen von 200 Hz und darüber sind es mindestens 10 s. Bei zeitlich schwankenden gemessenen Schalldruckpegeln einer Mikrofonposition wird empfohlen, die Messdauer zu erhöhen. [20, S. 19]

Die Mikrofonpositionen sind so zu wählen, dass zu jeder Begrenzungsfläche der Abstand mindestens 1 m beträgt, zur Quelle d_{min} nach Formel 3.5. Der Abstand zwischen den Mikrofonpositionen liegt ebenso bei mindestens $\lambda/2$ der am tiefsten auszuwertenden Terzbandmittenfrequenz.

$$d_{min} = D_1 \cdot \sqrt{\frac{V_{Hall}}{T_{60}}} \tag{3.5}$$

D_1 ist nach Norm standardmäßig auf 0,08 zu setzen, jedoch empfiehlt die Norm für Frequenzen unter 5 kHz D_1 gleich 0,16 zu setzen. V_{Hall} ist das Volumen und T_{60} die frequenzabhängige Nachhallzeit des Hallraums.

Hinsichtlich des Fremdgeräusches sieht die Norm zwei Kriterien vor: zum einen das Absolutkriterium und zum anderen das Relativkriterium. Letzteres legt die Berechnung der Fremdgeräuschkorrekturen K_{1i} fest. Hierbei wird die Schalldruckpegeldifferenz zwischen der Messung mit eingeschalteter Quelle und jener ohne Quelle, sprich des gemessenen Fremdgeräusches, bestimmt. Das Kriterium teilt sich in Frequenzbereiche auf: Liegt der Signalrauschabstand im Frequenzbereich mit Terzbandmittenfrequenzen von 250 Hz bis 5000 Hz zwischen 10 und 15 dB und unterhalb von 200 Hz sowie oberhalb von 6300 Hz zwischen 6 und 15 dB, sind die Formeln 3.7 zur Fremdgeräuschkorrektur anzuwenden. Trifft die Bedingung nicht zu, so ist für den Fall $\Delta L_{pi} \geq 15\,\text{dB}$ $K_{1i} = 0$. Für den anderen Fall $\Delta L_{pi} < 10\,\text{dB}$ ist $K_{1i} = 0{,}46\,\text{dB}$ (Wert für $\Delta L_{pi} = 10\,\text{dB}$) zu setzen. Trifft die Bedingung für die Frequenzränder nicht zu, so gilt $K_{1i} = 1{,}26\,\text{dB}$ (Wert für $\Delta L_{pi} = 6\,\text{dB}$). [20, S. 24f]

$$K_{1i} = -10 \cdot log\Big(1 - 10^{-0.1 \cdot \Delta L_{pi}}\Big)\,\text{dB} \tag{3.6}$$

$$\Delta L_{pi} = L'_{pi(ST)} - L_{pi(B)} \tag{3.7}$$

$L'_{pi(ST)}$ ist der zeitlich gemittelte Terzbandschalldruckpegel in dB der Quelle und $L_{pi(B)}$ der des Fremdgeräuschs an der i-ten Mikrofonposition.

Das Absolutkriterium legt eine Obergrenze des absoluten gemessenen Schalldruckpegels des Fremdgeräusches dar. Die Werte sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Bei Unterschreitung des gemessenen Fremdgeräuschs mit den genannten Pegelwerten gelten die Fremdgeräuschkriterien der Norm als eingehalten. Sollte gleichzeitig das Relativkriterium unterschritten werden, so strahlt die Quelle in den betreffenden Terzbändern wenig Schall ab und die ermittelten Werte sind als Obergrenze zu interpretieren und kenntlich zu machen:
In sämtlichen Ergebnissen und Abbildungen *„deutlich darauf hingewiesen werden, dass die Werte in diesen Terzbändern eine obere Grenze des Schallleistungspegels der zu untersuchenden Geräuschquelle darstellen.“* [20, S. 25]

Der Schalldruckpegel des Fremdgeräuschs $L_{pi(B)}$ ist unmittelbar vor oder nach einer Messung der Quelle für jedes Terzband im interessierenden Frequenzbereich an jeder Mikrofonposition i zu bestimmen. Die Dauer dieser Messung muss mit der Dauer der Quellmessung übereinstimmen. Die Schallleistungsbestimmung nach der ISO 3741 wird unter meteorologischen Bezugsbedingungen durchgeführt. Um eine Korrektur zu den tatsächlichen Bedingungen bewerkstelligen zu können, dürfen die meteorologischen Bedingungen die in Tabelle 3 angegebenen Schwankungen nicht überschreiten [20, S. 14].

Die Korrektur für die von den Bezugsbedingungen abweichenden meteorologische Messbedingungen werden mit den Korrekturfaktoren C_1 und C_2 durchgeführt. C_1 stellt dabei die Korrektur der unterschiedlichen Bezugskenngrößen für die Bildung des Schalldruckpegels und des Schallleistungspegels in Abhängigkeit der Schallkennimpedanz der Luft unter den meteorologischen Bedingungen zur Messzeit dar. C_2 bezieht sich auf die Korrektur der Strahlungsimpedanz zur Anpassung der unter Messbedingungen sich ergebenen Schallleistung an eine Schallleistung unter meteorologischen Bezugsbedingungen. Die Berechnung erfolgt nach entsprechenden Formeln, welche in den Symbolerklärungen zur Schallleistungsformel – Formel 20 in der Norm – angegeben ist. [20, S. 27]

Nach der Fremdgeräuschkorrektur je Mikrofonposition wird der Schalldruckpegel in Terzbändern nach Formel 3.8 über die Messpositionen gemittelt. Dieser gemittelte Bandschalldruckpegel wird nun mittels verschiedener Raumkorrekturen und den Korrekturfaktoren in den Schallleistungspegel L_W der Quelle nach Formel 3.9 umgerechnet.

$$\overline{L_{p(ST)}} = 10 \cdot log\left(\frac{1}{N}\sum_{i}^{N} 10^{0.1 L_{pi(ST)}}\right) \tag{3.8}$$

$L_{pi(ST)}$ ist der hinsichtlich des Fremdgeräuschs korrigierte Schalldruckpegel der i-ten Mikrofonposition in Terzbändern, N ist die Anzahl der Mikrofonpositionen.

$$L_W = \overline{L_{p(ST)}} + 10 \cdot log\frac{A}{A_0} + 4{,}34 \cdot \frac{A}{S} + 10 \cdot log\left(1 + \frac{Sc}{8V_{Hall}f}\right) + C_1 + C_2 - 6 \tag{3.9}$$

$\overline{L_{p(ST)}}$ ist der Mittelwert der zeitlich korrigierten und über Mikrofon- und ggf. Quellpositionen gemittelten Terzbandschalldruckpegel der zu untersuchenden Quelle in Dezibel. A entspricht der äquivalenten Absorptionsfläche des Prüfraumes in m^2, $A_0 = 1\,\mathrm{m}^2$, S der Gesamtoberfläche des Prüfraumes in m^2, c ist die unter den meteorologischen Bedingungen zum Messzeitpunkt ergebene Schallgeschwindigkeit, V_{Hall} das Volumen des Prüfraumes und f die Terzmittenfrequenz der Messungen.

Überschreitet die Standardabweichung über die Messpositionen der gemessenen Terzbandschalldruckpegel 1,5 dB in einem oder mehreren Terzbändern, so ist entweder nach Tabelle 4 der Norm die Anzahl der Mikrofonpositionen zu erhöhen, oder die Messvorrichtung und der Raum sind im Hinblick auf eine gültige Eignungsprüfung zu verändern [20, S. 20]. Die Norm nennt auch die Option, die Anzahl der Quellposition zu erhöhen. Die Norm legt für die Messunsicherheit eine Berechnung der gesamten Standardabweichung σ_{tot} aus einer Superposition der Vergleichsstandardabweichung des Verfahrens σ_{R0} und der Standardabweichung betreffend Aufstellungs- und Betriebsunsicherheit σ_{omc} fest.

Die erweiterte Unsicherheit U berechnet sich aus der gesamten Standardabweichung und dem Erweiterungsfaktor k. σ_{R0} lässt sich entweder aus Wiederholungsmessungen oder Ringversuchen bestimmen, oder, falls dies nicht möglich sein sollte, aus den in Tabelle 6 der Norm angegebenen Erfahrungswerten. [20, S. 35] Ähnliches gilt für σ_{omc}. Für die Wiederholungsmessungen wird entweder an einer Position mit dem höchsten Schalldruckpegel L_{pi} oder gemittelt über die Messfläche gemessen. Auch hier muss das Fremdgeräusch korrigiert werden. Bei geringen Zeitvarianzen bezüglich des Schallleistungspegels und bei geeigneter Definition des Verfahrens nennt die Norm einen Wert für σ_{omc} von 0,5 dB. Bei bspw. stark schwankendem Materialfluss kann dieser Wert 2 dB und bei Extremfällen sogar 4 dB betragen. [20, S. 33]

Die erweiterte Messunsicherheit U hängt vom Vertrauensgrad ab. Bei einer Normalverteilung entspricht diese 95 % resultierend in $k = 2$. Bei Anwendung auf eine einseitige Normalverteilung beträgt k gleich 1,6. [20, S. 32]

3.6 Messequipment

In diesem Kapitel wird das verwendete Equipment beschrieben und dessen Eignung für den jeweiligen Einsatz dargelegt. Da die Anforderungen sehr unterschiedlich sind, wurde separates Equipment für die Messung und die Tonaufzeichnung verwendet. Die Anforderungen an das Messequipment für die Schallleistungsbestimmungen sind vorrangig durch die Norm und den Diffusfeldpegel im Hallraum bestimmt. Es wird in der ISO 3741 ein Messsystem der Genauigkeitsklasse 1 gefordert, welches für Diffusfeldmessungen ausgelegt sein muss. Außerdem sind bedingt durch den zu erwartenden niedrigen Schalldruckpegel der Quelle hohe Anforderungen an das Eigenrauschen des gesamten Messsystems gestellt. Entgegen zur Messung im Hallraum sind die Anforderungen an das Messsystem für die Tonaufzeichnung durch das Eigenrauschen der Signalkette gekennzeichnet. Da das Mikrofon den größten Anteil daran hat, ist hier ein Mikrofon mit niedrigem Eigenrauschen zu wählen.

3.6.1 Hallraum

Für die Messung im Hallraum wurde ein Norsonic NOR145 Handschallpegelanalysator (Abbildung 3.3 mit Eichstempel: 2019-10) und als Mikrofon ein Low-Noise Messmikrofon der Genauigkeitsklasse 1 von Gras Fabrikat 47HC (Abbildung 3.4(a) zeigt die Seriennummer und (b) den Eichstempel: 2019-01) verwendet. Wie die Norm es fordert handelt es sich hierbei um ein Messsystem der Genauigkeitsklasse 1 [30].

Abb. 3.3: Messinstrument von Norsonic Fabrikat NOR145

(a)

(b)

Abb. 3.4: Photographien des Messmikrofons Gras 47HC: mit Eichstempel (a) und Seriennummer (b)

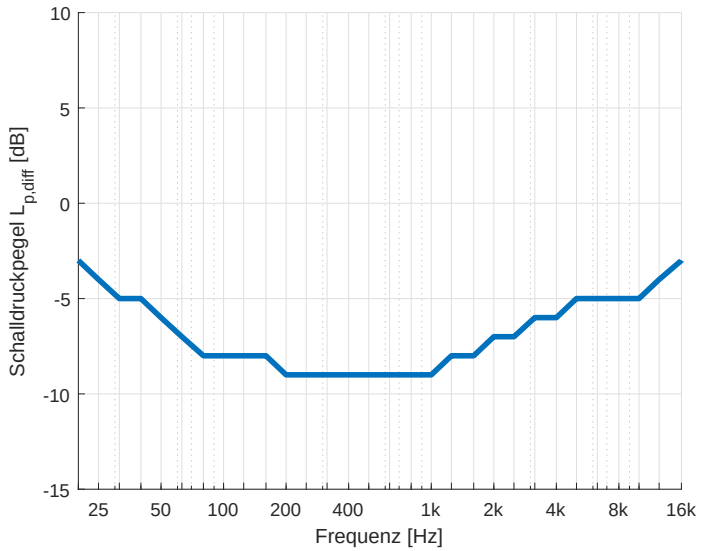


Abb. 3.5: Äquivalenter Schalldruckpegel der Eigenstörspannung des Gras 47HC Messmikrofons in Terzbändern nach Herstellerangaben [32].

Das Gras 47HC ist ein freifeldentzerrtes Mikrofon, d. h. es weist im Freifeld einen linearen Frequenzgang auf. Im Diffusfeld fällt es aufgrund der Entzerrung zu hohen Frequenzen hin ab. Der Handschallpegelanalysator NOR145 enthält jedoch eine Korrektur für freifeldentzerrte Mikrofone, um bei Diffusfeldmessungen ebenfalls einen linearen Frequenzgang zu ermöglichen. Abbildung 3.5 zeigt den äquivalenten Schalldruckpegel der Eigenstörspannung des Mikrofons. Mit einem Breitbandpegel von 6,5 dB(A) stellt das Gras 47HC eines der derzeit rauschärmsten Messmikrofone dar, die am Markt erhältlich sind [31].

3.6.2 Tonaufzeichnung

Für die Tonaufzeichnung wurde folgendes Equipment verwendet:

1. Mikrofone: *Neumann TLM103*
2. Interface: *RME Fireface UC*
3. Mikrohfonvorverstärker: *RME Micstasy*
4. Messmikrofon: *iSemCon EMX-7150*
5. Verstärker: *Yamaha P2500S*
6. Lautsprecher: *Yamaha CBR-15*

Die Mikrofone stellen mit dem Neumann TLM103 hochwertige Studiomikrofone mit extrem niedrigen Eigenrauschen von 7 dB(A) dar [33]. Da diese Breitbandrauschwerte lediglich 0,5 dB schlechter sind als selbige des Messmikrofons von Gras, ist der Mikrofontyp für eine Tonaufzeichnung im reflexionsarmen Raum gut geeignet.

Als Recordinginterface für die AD-Wandlung wurde ein RME Fireface UC verwendet. Die Werte der rückseitigen Line-Eingänge sind in Tabelle 3.7 dargestellt. [34] Die Rauschwerte, repräsentiert durch den THD+N Wert, stellen sehr gute Grundvoraussetzungen für das Recording, auch von sehr geringen Signalpegeln. Mit der Referenz von $+10\,\mathrm{dB_U}$ bei $0\,\mathrm{dB_{FS}}$ ergibt sich eine Messdynamik von 110 dB. Auch die Frequenzgangwerte mit einer Toleranz von ±0,1 dB von 20 Hz bis 100 kHz bestätigen dies.

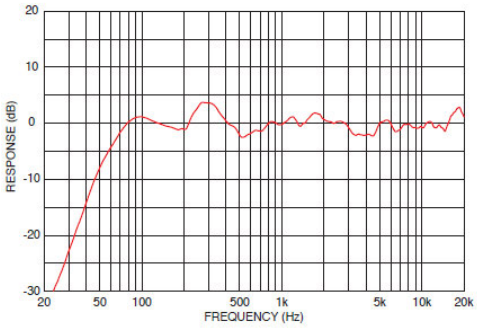
Tab. 3.7: Technische Daten der rückseitigen Line-Eingänge des RME Fireface UCs

Parameter	Wert
Eingangsimpedanz	2 kΩ
THD+N @ 30 dB Gain	< -100 dB, < 0.001%
CMRR 200 Hz – 20 kHz	> 70 dB
Channel separation	> 120 dB
Frequency response ±0.1 dB	20 Hz – 100 kHz
Maximum input level Gain -9 dB:	+30 dBu
Referenz @ 0 dBFS	+10 dBu

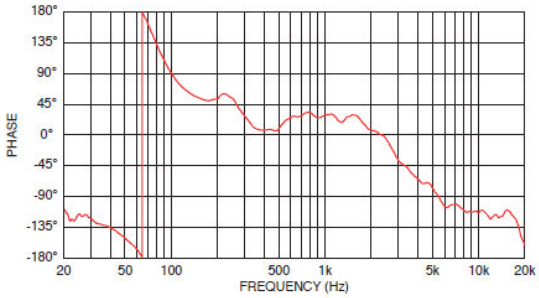
Für die Mikrofonvorverstärkung und Bereitstellung der 48 V Phantomspeisung wurde ein RME Micstasy verwendet. Dessen Werte sind in Tabelle 3.8 dargestellt. Auch hier sind die beiden relevantesten Werte der THD+N und der Frequenzgang, welche mit dem des Fireface UC identisch sind. Bei dem Lautsprecher, welcher für die Instruktionen und die Vergleichskalibrierung genutzt wurde, handelt es sich um einen passiven Lautsprecher von Yamaha der CBR Serie. Dessen Frequenzgänge sind in der Abbildung 3.6 – Amplituden- (a) und Phasengang (b) – dargestellt. Für die Endverstärkung wurde eine ebenfalls von Yamaha hergestellte Endstufe verwendet. Die Werte der P2500S sind in Tabelle 3.9 aufgelistet [36].

Tab. 3.8: Technische Daten der rückseitigen Line-Eingänge des RME Micstasy

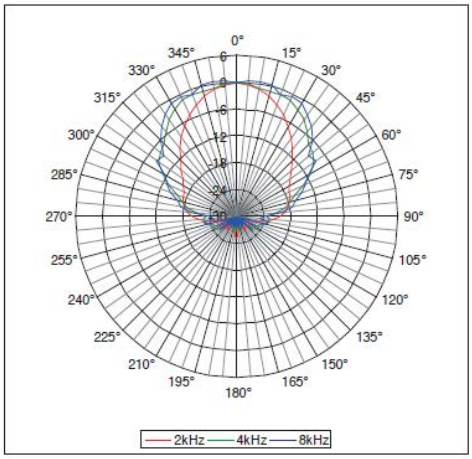
Parameter	Wert
Eingangsimpedanz	2 kΩ
THD+N @ 30 dB Gain	< -100 dB, < 0.001%
CMRR 200 Hz – 20 kHz	> 70 dB
Channel separation	> 120 dB
Frequency response ±0.1 dB	20 Hz – 100 kHz
Maximum input level Gain -9 dB:	+30 dBu
Referenz @ 0 dBFS	+10 dBu



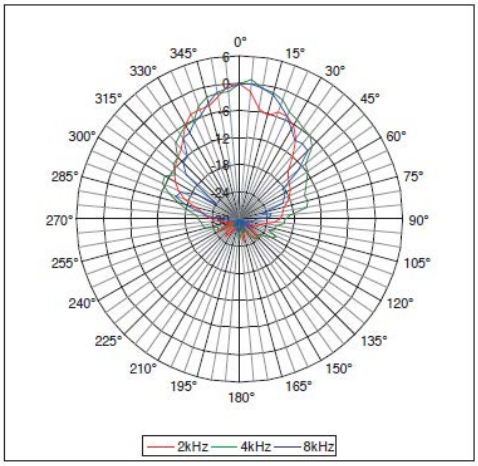
(a)



(b)



(c)



(d)

Abb. 3.6: Frequenzgänge und Richtdiagramme des Yamaha CBR15 nach Herstellerangaben [37]: Amplitudengang (a), Phasengang (b), Polar horizontal (c), Polar vertikal (d)

Tab. 3.9: Technische Daten der Yamaha P-2500S Endstufe

Parameter	Wert
@ 1 kHz THD+N = 1 %	390 W x 2
20 Hz ̃20 kHz THD+N = 0,1 %	350 W x 2
SNR 20 Hz 20 kHz	104 dB
Frequency Response $R_L = 8\,\Omega, P = 1\,\mathrm{W}$, 20 Hz-50 kHz	+0 dB, -1,5 dB

Die Werte des Lautsprechers stellen, wenn sie der ungeschönten Wahrheit entsprechen, sehr gute Grundvoraussetzungen. Aus eigener Erfahrung, sowohl privat als auch im Messalltag, stellt die Kombination aus dem RME Fireface UC und den Yamaha CBR15 – in Kombination einer leistungsstarken und klangneutralen Endstufe, sowie guten Messmikrofonen – ein gutes Messsystem bereit. Die Endstufe von Yamaha ist mit ihren 250 Watt Leistung im Stereobetrieb je Seite zwar die leistungsschwächste der Serie, für den Zweck der Anweisungsausgabe im RaR und zur Referenzkalibrierung reicht diese jedoch vollkommen aus. Für bauakustische Messungen – bspw. Messungen von Fensterschalldämmmaßen – bedarf es jedoch einer leistungsstärkeren Endstufe. Der sehr lineare Frequenzgang, welcher im Bereich von 20 Hz bis 50 kHz lediglich Abweichungen von -1,5 dB laut Datenblatt des Herstellers aufweist, liefert für eine Referenzkalibrierung sehr gute Bedingungen.

Für die Vergleichskalibrierung wurde ein Messmikrofon der Firma iSemCon Fabrikat EMX-7150 verwendet. Dieses Mikrofon weist einen Klasse 1 Frequenzgang auf [38]. Die Freifeldamplituden- (rot), Diffusfeldamplituden- (grün) und Phasenfrequenzgänge (blau) sind in Abbildung 3.7 aus dem Kalibrierschrieb des Herstellers dargestellt [39]. Deutlich zu erkennen ist, dass die Abweichung vom ideal linearen Frequenzgang sehr gering ausfällt und daher für die Quelle zu vernachlässigen ist. Der Übertragungskoeffizient ist nach eben jenem Kalibrierschrieb mit 6,37 $\frac{\mathrm{mV}}{\mathrm{Pa}}$, das Eigenrauschen wird mit 26 dB(A) angegeben. Letzteres spielt hierbei eine geringere Rolle, da dieses Mikrofon lediglich als Referenz einer Vergleichskalibrierung der TLM103 Mikrofone über einen Lautsprecher genutzt wurde. Als Aufzeichnungsmedium wurde ein Laptop mit Cubase Pro 8 genutzt.

Das Setup ermöglicht hochauflösende und sehr rauscharme Aufnahmen. Die Verwendung des Lautsprechers erlaubt zum einen eine Referenzkalibrierung der TLM103 und zum anderen mit dem Laptop und Cubase die Vorproduktion der gesamten Aufnahmesession, wodurch der Ablauf jedes Aufnahmedurchgangs exakt gleich ist.

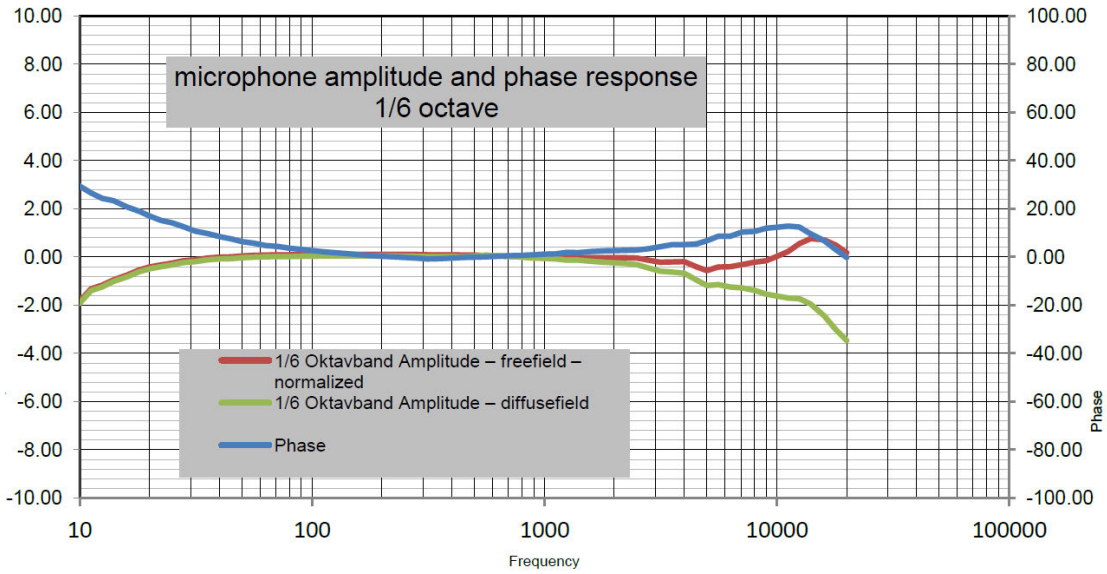


Abb. 3.7: Kalibrierschrieb des EMX-7150 vom Hersteller iSemCon GmbH. Enthalten sind Freifeldamplitudenfrequenzgang (rot), Diffusfeldfrequenzgang (grün) und der Phasenfrequenzgang (blau) aufgelöst jeweils in 1/6-Oktavbändern [39]

3.7 Durchführung

Im Folgenden wird auf die Umsetzung der vorhergehenden Verfahren eingegangen. Es werden für die Schallleistungsbestimmung der Aufbau sowie die Einhaltung der normativen Bestimmungen dargelegt. Zum anderen wird der Aufbau und die Durchführung der Tonaufzeichnung näher erläutert.

3.7.1 Hallraum

Die Stühle wurden in zwei Reihen versetzt positioniert: Die erste Reihe beinhaltete zwei und die zweite Reihe drei Stühle. Für den stabilen Stand wurden drei Stühle auf eine Spanplatte geschraubt. Tabelle 3.11 zeigt die Abmessungen der beiden Sitzreihen und die Gesamtgrundfläche S_Q und das Gesamtvolumen V_Q der Quelle. Die Höhe der Quelle schließt dabei vollständig die sitzenden Personen mit ein, d. h. vom Boden des Hallraumes bis einschließlich hin zum Haaransatz. Bei einem Volumen des Prüfraumes $V_{Raum} = 200{,}88\,\mathrm{m}^3$ ergibt sich, dass die Quelle 1,68 % des Prüfraumvolumens einnimmt und somit unterhalb der normativen Obergrenze von 2 % liegt. Für die Bestimmung der Schallleistungspegel wird die Quelle aus diesen Komponenten als eine Gesamtquelle betrachtet.

Tab. 3.10: Auflistung der verwendeten Bestuhlung inklusive der Nummerierung

Stuhl	Typ	Nr.
rbb Großer Sendesaal	Konzerthausstuhl	1
Oper Wuppertal	Opernstuhl	2
UdK Berlin Konzertsaal	Konzerthausstuhl	3
Stadthalle Chemnitz	Konzerthausstuhl	4
Oper Leipzig	Opernstuhl	5

Tab. 3.11: Quellabmessungen nach Sitzreihen und Gesamt

Reihe	Länge m	Breite m	Höhe m	Volumen m^3
1. Reihe	1,25	0,80	1,30	1,30
2. Reihe	2,00	0,80	1,30	2,08
Gesamt	—	1,60	1,30	3,38

Abbildung 3.8 zeigt den Grundriss der Messanordnung inklusive sämtlicher Abstandskriterien, welche in Tabelle 3.12 zusätzlich angegeben sind, nebst dieser noch die Messpositionen. Letztere sind in Tabelle 3.13 in Form von karthesischen Koordinaten mit Ursprung in der linken unteren innenseitigen Raumecke zusehen und in Abbildung 3.8 eingetragen. Die sechs Messpositionen wurden aufgrund von nur einem Messmikrofon separat und sequentiell gemessen. Im Gegensatz zur Norm, die besagt, dass die Fremdgeräuschmessung „*entweder unmittelbar bevor oder unmittelbar nachdem die Schalldruckpegel der zu untersuchenden Geräuschquelle gemessen wurden,* [...] *an jeder Mikrofonposition*“durchzuführen sei [20, S. 19], wurde diese vor und nach der gesamten Messung aller Positionen durchgeführt. Dies geschah aus dem folgendem Grund, dass die Versuchspersonen nicht vor oder nach jeder Messposition den Hallraum verlassen müssen. Die beiden Fremdgeräuschmessungen wurden sowohl über die Position als auch insgesamt gemittelt. Abbildung 3.9 zeigt die unbesetzte Anordnung der Hallraummessung.

Tabelle 3.14 zeigt die mittleren meteorologischen Bedingungen über den gesamten Messzeitraum. Diese Werte stellen die Berechnungsgrundlage für die Korrekturfaktoren C_1 und C_2 dar.

Tab. 3.12: Abstandskriterien nach DIN EN ISO 3741 [20]

Position	Mindestabstand
Quelle Wände	1,5 m
Quelle Quelle	$\lambda_{100\,\mathrm{Hz}}/2 = 1{,}715\,\mathrm{m}$
Mikrophon Wände	1 m
Mikrofon Quelle	$d_{min} = 1{,}38\,\mathrm{m}$
Mikrofon Mikrofon	$\lambda_{100\,\mathrm{Hz}}/2 = 1{,}715\,\mathrm{m}$

Tab. 3.13: Tatsächliche Messpositionen

Messposition	x-Koordinate	y-Koordinate	z-Koordinate
A_1	2,89	1,43	1,04
A_2	4,27	2,02	2,09
A_3	4,63	3,47	1,04
A_4	4,58	5,01	2,09
A_5	1,09	1,15	1,04
A_6	0,84	2,83	3,09

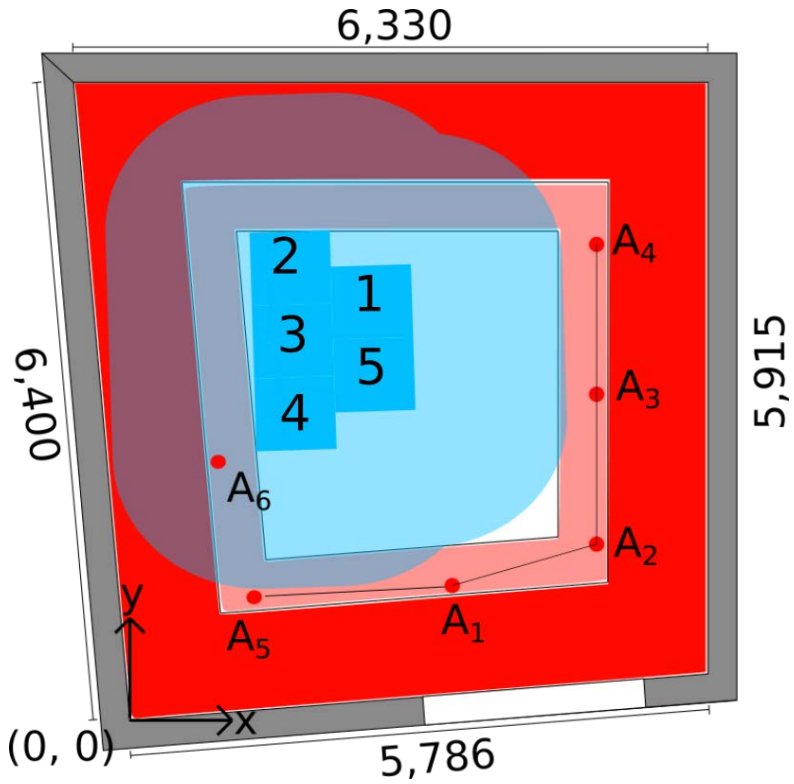


Abb. 3.8: Grundriss des Hallraums mit den Messbedingungen

Abb. 3.9: Foto der Anordnung im Hallraum mit leeren Konzertstühlen

Tab. 3.14: Meteorologische Bedingungen zum Messzeitpunkt

	Temperatur °C	Luftfeuchtigkeit %	statischer Luftdruck kPa
Mittelwert	16,3	52,9	98,30
Abweichung vom	+0,4	+1,1	+0,02
Mittelwert	−0,6	−3,7	−0,01

Tabelle 3.15 und 3.16 beschreibt die Versuchspersonen auf den Stühlen. Alle Personen waren gesund und sind in annähernd konzerttypischer Kleidung erschienen.

Der Dynamikbereich des Publikumsgeräusches wurde in drei Zustände unterteilt. Hierfür wurden Instruktionen an die teilnehmenden Personen definiert:

1. Stellen Sie Sich vor, dass Sie der Musik in einem Moment großer Spannung mit maximaler Aufmerksamkeit folgen und absolut bewegungslos auf Ihrem Sitz sind.
2. Stellen Sie Sich vor, dass Sie der Musik aufmerksam folgen, aber ohne quasi „den Atem anzuhalten“, d.h. Sie bewegen sich auf Ihrem Sitz, wie das bei einem längeren Konzertabend hin und wieder natürlicherweise geschieht.
3. Stellen Sie Sich vor, dass die Musik gerade ihre Aufmerksamkeit nicht vollständig in Anspruch nimmt. Sie interagieren mit den anderen Teilnehmern, flüstern mit Ihren Nachbarn oder holen etwas hervor, beispielsweise Bonbons und lutschen diese.

Dies entspricht den in Kapitel 3.5 zugeordneten Quellzuständen. Mit der ersten Instruktion wurde die untere Grenze des Dynamikbereiches abgedeckt. Daher wurden nur Atmungsgeräusche zugelassen. Mit der zweiten Instruktion wurde ein mittleres Szenario definiert und mit der dritten die absolute Obergrenze eines nicht aufmerksamen aber dennoch konzerttypischen Publikums.

Tab. 3.15: Daten der Versuchspersonen

VPn	Alter	Geschlecht	Größe m	Gewicht	Zustand
# 1	29	m	1,82	75	gesund
# 2	26	m	1,90	110	gesund
# 3	21	w	1,82	68	gesund
# 4	44	w	1,63	85	gesund
# 5	78	m	1,80	86	gesund

Tab. 3.16: Bekleidung der Versuchspersonen

VPn	Schmuck	Kleidung	Sonstiges
# 1	Festivalbändchen	Sacko, Jeans, Turnschuhe	—
# 2	nein	Jacket, Jeans, Turnschuhe	—
# 3	Ohrstecker	Abendkleid, Halbschuhe	Brille
# 4	Ohrstecker	Daunenjacke, Leggins, Halbschuhe	—
# 5	—	Jacket, Stoffhose, Halbschuhe	Brille, Hörgerät

Aufgrund der Quellausdehnung und der Positionierung der Diffusoren im Hallraum, ist eine zu erwartende ausreichende Erhöhung der Messpositionen nicht realisierbar. Daher bleibt zum einen die Erhöhung der Messzeit oder die Wiederholung und Mittelung an jeder Messposition. Erstere wurde aus obigen Gründen an jeder Messposition auf zwei Minuten gesetzt. Eine weitere Erhöhung der Messzeit oder gar Wiederholungsmessungen würde einen zu hohen Aufwand für die teilnehmenden Personen bedeuten.

Auch die Angabe der Messunsicherheit gestaltet sich schwierig, da weder die Quelle in einer Geräuschnorm klassifiziert ist, noch ausreichende Ringversuche getätigt wurden, um eine genauere Abschätzung der Standardabweichung σ_{omc} von der Quelle zu erhalten. Aus diesem Grund wurde auf eine Erhöhung der Quellpositionen verzichtet und bei der Abschätzung der erweiterten Unsicherheit U auf die normativen Empfehlungen zurückgegriffen.

Die Nachhallzeit wurde in Übereinstimmung der meisten Kriterien der DIN 3382 Teil 2 [40] durchgeführt: Es wurden die oben angegebenen Mikrofonpositionen mit jeweils zwei Quellpositionen, welche sich nach Abbildung 3.8 in der oberen rechten und unteren linken Ecke des Hallraums befanden. Daraus ergibt sich eine Sende-Empfängerpositionskombination von 12 Positionen. Als Verfahren wurde die Bestimmung mittels abgeschalteten Rauschen mit einer Dauer der Anregung von 8 s, welche knapp oberhalb der geschätzten längsten Terzbandnachhallzeit liegt, verwendet. Die Norm schreibt ebenso mindestens 12 Sender-Empfängerkombinationsmesspositionen mit einer Dauer des Anregungssignals von der Hälfte der geschätzten Nachhallzeit vor. Der geringste Abstand zwischen Sender und einer Empfängerposition betrug 0,85 m. Nach Formel 1 der Norm ergibt sich ein Mindestabstand von ungefähr 0,63 m. Entgegen der Norm, welche drei Durchläufe je Messposition vorschreibt, wurde die Anzahl der Messdurchläufe auf zwei verringert, um die Messung mit anwesenden Personen kurz zu halten.

Das verwendete Messmikrofon weist den Angaben des Herstellers nach eine Freifeldentzerrung auf. Das Messsystem NOR145 enthält jedoch eine Diffusfeldkorrektur, um für genau solche Fälle den Frequenzgang des Messmikrofons für die Diffusfeldmessung zu entzerren. Es sollten zusätzlich alle Messungen als Audiodatei aufgezeichnet werden, jedoch ist dies trotz Setzen der Aufzeichnungseinstellungen, sowie dem Aktivieren der Tonaufzeichnung leider nicht geschehen. Folglich liegen bedauernswerterweise keine Audiodateien der Messungen zu Kontrollzwecken vor.

3.7.2 Tonaufzeichnung

Die Tonaufzeichnung fand im reflexionsarmen Raum der TU Berlin statt. Es wurden Gruppen zu je maximal fünf Personen in einer Konzertsimulation aufgezeichnet. Die Simulation beinhaltet auch hier die drei in der Schallleistungsbestimmung im Hallraum forcierten Zustände. Zusätzlich sind weitere Aktivitätsformen, wie das Betreten und Verlassen des Saales, die Platzsuche und Applaus enthalten. Des Weiteren wurden Aufsteh- und Hinsetzgeräusche, sowie Huster und Nieser je Person aufgenommen. Die vollständigen Instruktionen sind unten dargestellt. Der Aufbau - zu sehen in Abbildung 3.10 - bestand aus denselben Stühlen wie die Schallleistungsbestimmung im Hallraum (siehe Tabelle 3.10). Entgegen der Aufstellung im Hallraum wurden im reflexionsarmen Raum die Stühle in einer Reihe aufgestellt, um einerseits das Übersprechen der Teilnehmer auf die Mikrofone zu reduzieren, aber dennoch Interaktion zwischen den Teilnehmern zu ermöglichen. Die Stühle wurden samt Holzunterlage auf den Gitterböden aufgestellt. Dies dient zur Körperschallentkopplung der Mikrofone, welche auf dem Netz im RaR in ca. 90 cm Abstand aufgestellt wurden.

Abb. 3.10: Darstellung des Versuchsaufbaus mit den fünf Konzertstühlen und den Mikrofonen

Im letzten Schritt wurden zusätzlich zur Konzertsimulation noch Nahfeldaufnahmen der Atemgeräusche von insgesamt sieben Personen getätigt: drei Frauen und vier Männer. Für diese Aufnahmen wurden die Personen angewiesen, sich so nah wie möglich dem Mikrofon anzunähern, aber dabei den Kopf seitlich zu drehen, um die strömende Atemluft an der Mikrofonkapsel vorbeiziehen zu lassen. Dies diente zur Vermeidung typischer Windgeräusche.

Um eine Vergleichbarkeit zwischen der Schallleistungsbestimmung im Hallraum und den Aufnahmen im reflexionsarmen Raum zu erzielen, wurde eine Vergleichskalibrierung der fünf Mikrofone durchgeführt. Hierfür wurde ein Messmikrofon von iSemCon, eine Endstufe und ein passiver Lautsprecher, beide von Yamaha, mit weißem Rauschen verwendet. Die Aufstellung ist exemplarisch für ein Mikrofon in Abbildung 3.11 dargestellt. Der Abstand zum Lautsprecher betrug 4 m. Die Aufnahme aller Dateien wurde in 24 Bit Auflösung und mit einer Abtastrate von 192 kHz durchgeführt.

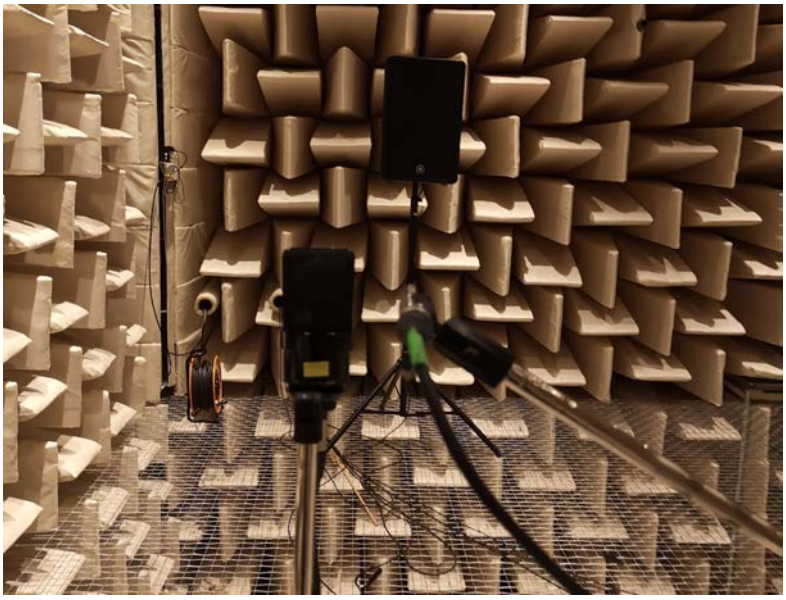


Abb. 3.11: Darstellung der Referenzkalibrierung.

Tab. 3.17: Timetable

Timecode	Phase	Subphase	Anweisung
00:00	Begrüßung	Datenerhebung	
00:02	Programmphase	Platzsuche	1
00:03		Hinsetzen und Applaus	2-3
00:04		Zustand 01	4
00:09		Zustand 02	5
00:14		Zustand 03	6
00:19		Applaus und gehen	7-9
00:20	Einzelereignis	Hinsetzen und Aufstehen	10
00:21		Husten	11
00:22		Niesen	12
00:23		Wechsel	13
00:35		Ende letzte Person	

Für die Tonaufnahmen wurde eine Cubase Session vorbereitet und alle Instruktionen vorproduziert. Die vollständige Auflistung dieser Instruktionen lautet wie folgt:

1. Stellen Sie Sich vor, sie betreten einen Konzertsaal vor einem klassischen Konzert. Suchen Sie Ihren Platz auf und sprechen Sie dabei mit den anderen Teilnehmern.
2. Nehmen Sie Platz auf Ihrem Sitz.
3. Beenden Sie die Gespräche, stellen Sie Sich vor, die Künstler betreten die Bühne und applaudieren Sie.
4. Beenden Sie den Applaus.
5. Stellen Sie Sich vor, dass Sie der Musik in einem Moment großer Spannung mit maximaler Aufmerksamkeit folgen und absolut bewegungslos auf Ihrem Sitz sind.
6. Stellen Sie Sich vor, dass Sie der Musik aufmerksam folgen, aber ohne quasi „den Atem anzuhalten“, d.h. Sie bewegen sich auf Ihrem Sitz, wie das bei einem längeren Konzertabend hin und wieder natürlicherweise geschieht.
7. Stellen Sie Sich vor, dass die Musik gerade ihre Aufmerksamkeit nicht vollständig in Anspruch nimmt. Sie interagieren mit den anderen Teilnehmern, flüstern mit Ihren Nachbarn oder holen etwas hervor, beispielsweise Bonbons und lutschen diese.
8. Applaudieren Sie
9. Beenden Sie den Applaus.
10. Stehen Sie auf. Die Personen mit den Stuhlnummern 2, 3, 4 und 5 verlassen bitte den Raum.
11. ||: Setzen Sie hin und stehen Sie danach wieder auf. Verharren Sie einen Augenblick in der jeweiligen Position. Wiederholen Sie dies, bis Sie neue Anweisungen erhalten.
12. Setzen Sie sich.
13. Setzen Sie sich hin. Husten Sie, so wie Sie das in einer Pause zwischen zwei Sätzen tun würden. Lassen Sie zwischen den Hustern eine kleine Pause. Wiederholen Sie dies, bis Sie neue Anweisungen erhalten.
14. Niesen Sie. Wiederholen Sie dies und lassen Sie zwischen den Niesern eine kleine Pause.
15. Stehen Sie auf und verlassen Sie den Raum. Wir bedanken uns für Ihre Teilnahme. :|| (Whd für jede Person)

Für die gesamte Aufnahmesession wurde eine halbe bis maximal Dreiviertelstunde eingeplant. Das Programm mit den Instruktionen wurde vollständig in Cubase 8 vorproduziert, sodass die Aufnahme mit den Anweisungen vollautomatisiert durchgeführt werden konnte. Dies diente zum einen der Gleichheit aller Durchläufe. Zum anderen war es dem Autor so möglich, selbst an den Aufnahmen teilzunehmen.

Tabelle 3.17 zeigt den Zeitplan. Die Aufnahmesession ist in zwei Phasen unterteilt: Phase 1 stellt die Programmphase mit allen Teilnehmern dar, während in Phase 2 Einzelschallereignisse jeder einzelnen Person aufgenommen wurden.

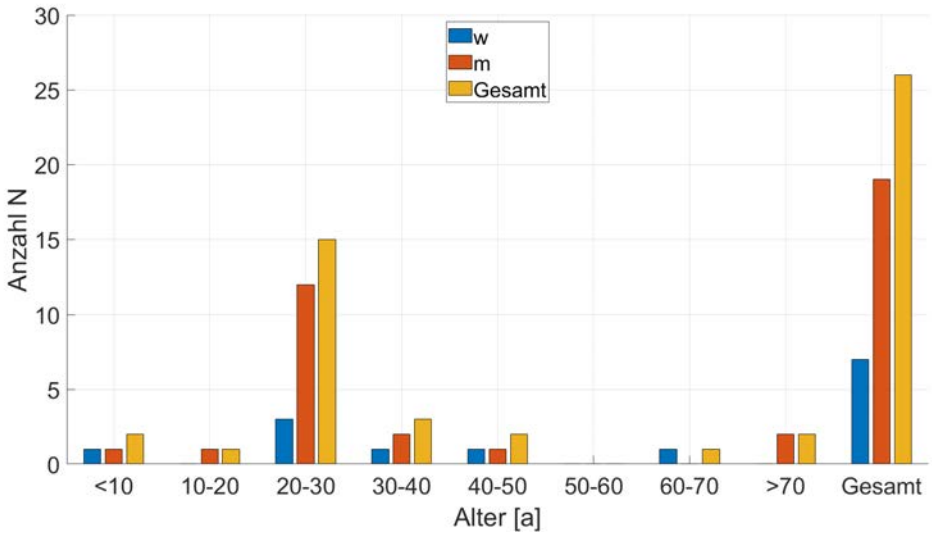


Abb. 3.12: Altersangaben der Teilnehmer: Frauen in rot, Männer blau und beide Geschlechter zusammen in schwarz

Das Programm stellt die Simulation eines Konzertbesuches dar. Es bestand aus dem Betreten des Saales, dem Platzsuchen, Applaudieren, den drei Zuständen, erneutem Applaudieren und letztendlich dem Verlassen des Saales. In der zweiten Phase wurden von jeder einzelnen Person Aufstehen, Hinsetzen, Husten und Niesen aufgezeichnet.

Zusätzlich zu den Aufnahmen wurden von den Teilnehmern anonym personenbezogenen Daten erhoben. Abbildung 3.12 zeigt die Altersverteilung in zehn Jahresabstufungen geschlechtergetrennt. Der Autor möchte hierbei darauf hinweisen, dass den Teilnehmern auch die Wahlmöglichkeit „divers“offen stand. Dass diese hier jedoch nicht aufgeführt ist liegt daran, dass kein Teilnehmer diese Wahlmöglichkeit in Anspruch genommen hat. Insgesamt haben 26 Personen teilgenommen, wovon einige mehrfach die Recordingprozedur durchliefen. Es nahmen 19 Männer und 7 Frauen teil, welche mehrheitlich eine Altersspanne von 20 bis 30 Jahren aufwiesen. Dies liegt an der vermehrten Teilnahme von Kommilitonen und Bekannten des Autors. Bemerkenswert ist hierbei, dass auch zwei Kinder unter zehn Jahren teilgenommen haben. Die Mehrheit aller Personen war größer als 1,70 m, wie in Abbildung 3.13 zu sehen ist. Der Durchschnitt wog in etwa 70 kg (Abbildung 3.14). Insgesamt wurden 40 Durchläufe aufgezeichnet.

Nahfeldaufnahmen

Im Rahmen der Tonaufzeichnung wurden von sieben Personen Nahfeldaufnahmen getätigt. Dabei wurden die Atmungsgeräusche von drei Frauen und vier Männern in zwei Gruppen aufgezeichnet. Unter den Personen befand sich auch der Autor, welcher in beiden Gruppen zu Kontrollzwecken ebenfalls mit aufgezeichnet wurde.

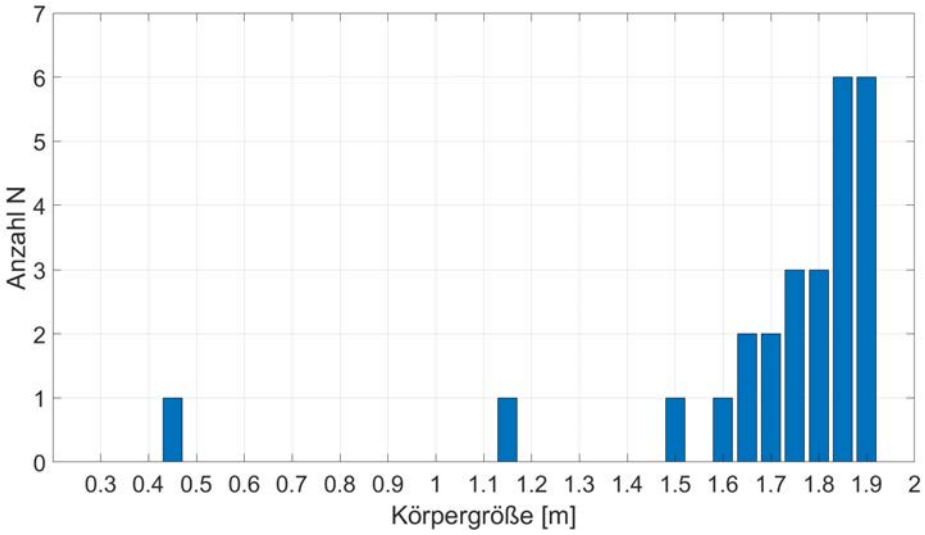


Abb. 3.13: Größenverteilung der Teilnehmer

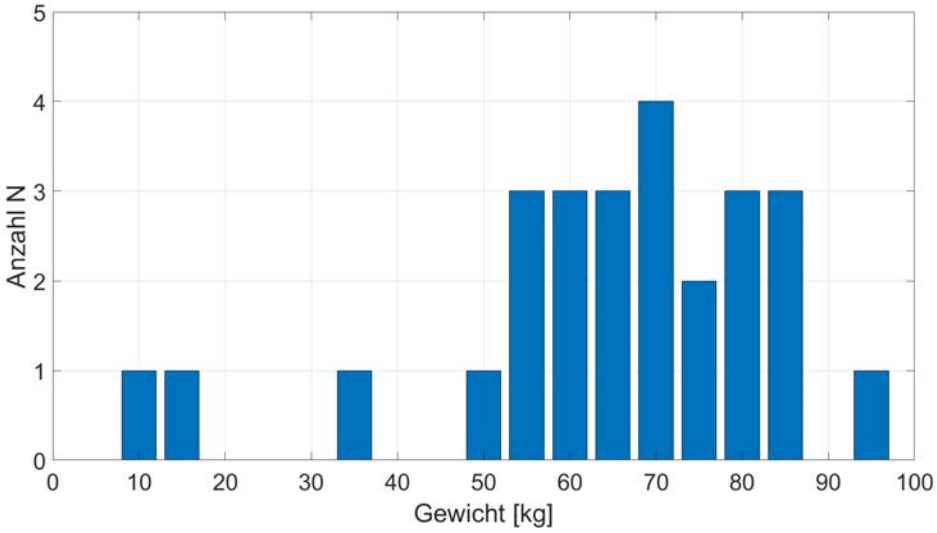


Abb. 3.14: Gewichtsverteilung der Teilnehmer

Insgesamt wurden acht Aufnahmen durchgeführt. Diese wurden bzgl. des Abstandes und des Nahbesprechungseffekts nach Schneider [41, S.335] korrigiert. Tabelle 3.18 zeigt die Eigenschaften und die Sitzposition anhand des Kürzels der Personen, die an den Nahfeldaufnahmen der Atemgeräusche teilgenommen haben. Das Kürzel So13 steht für den Tag der Aufnahme (Sonntag), die Uhrzeit betrug 13:00 Uhr. Die Zahl dahinter, bspw. 01, beschreibt die Sitznummer nach Abbildung 3.10 und Tabelle 3.10.

Tab. 3.18: Personeneigenschaften der Nahfeldaufnahmen

Personennummer	Kürzel	Alter	Geschlecht
01	So13 01	20-30	m
02	So13 02	20-30	m
03	So13 03	40-50	w
04	So13 04	20-30	m
05	So13 05	>70	m
06	So16 01	20-30	w
07	So16 03	wie 04	
08	So16 05	20-30	w

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse präsentiert. Zunächst wird auf die Schallleistungsbestimmung im Hallraum eingegangen. Die Nachhallzeit im leeren Raum sowie mit der Quelle, wie sie im Kapitel 3.3 abgeschätzt wurde, näher betrachtet. Das Fremdgeräusch wird mit möglichen Ursachen erläutert und mit dem Absolutfremdgeräuschkriterien der Norm verglichen. Mittels des Fremdgeräusches wird der gültige Frequenzbereich für die drei Quellzustände definiert.

Nach den Ergebnissen der Hallraummessung folgt die Betrachtung der Nahfeldmessungen, welche Analysen im spektralen Bereich sowie der Atemperiodendauer beinhaltet.

4.1 Messung im Hallraum

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Schallleistungsbestimmung nach dem Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1 nach DIN EN ISO 3741 präsentiert. Im ersten Teil wird auf das Fremdgeräusch im Vergleich zu den Absolutkriterien der Norm eingegangen. Ebenso wird das Eigenrauschen des Messmikrofons als eine dominante Rauschquelle betrachtet. Die gemessenen Nachhallzeiten des leeren Hallraumes, sowie mit der Quelle, werden mit den geschätzten Werten aus der Theorie verglichen. Auch ein Vergleich mit dem Mindestnachhallkriterium T_{grenz} wird gezogen. Die nach der Norm sich ergebenen Schallleistungspegel werden zu je einem Zustand inklusive der Standardabweichung über die Messposition s_M, sowie die sich ergebenen Schallleistungspegel der Fremdgeräuschmessungen. Anhand der gemessenen Diffusfeldpegel und des *SNR* wird der nach Norm einzugrenzende zusammenhängende interessierende Frequenzbereich dargelegt.

4.1.1 Nachhallzeit und Absorptionsflächen

Abbildung 4.1 zeigt die gemessenen Nachhallzeiten im besetzten und unbesetzten Zustand a) und die daraus berechneten äquivalenten Absorptionsflächen nach Sabine b), sowie deren Abschätzung aus der Theorie. Die Werte der Theorie wurden aus der Nachhallzeitmessung des Messtages zur besseren Vergleichbarkeit neu ermittelt. Zu erkennen ist, dass die tatsächlich gemessenen Werte nur geringfügig von der Schätzung mittels der auf die Quelle hochgerechneten äquivalenten Absorptionsflächen für einen gepolsterten Stuhl und einen Mann im Anzug nach DIN 18041 [23, Tabelle G.2] abweichen.

Tatsächlich ist diese Absorptionsfläche der Quelle etwas kleiner als die theoretisch berechnete. Den Hauptgrund bildet der Unterschied in den Abmessungen, dadurch bedingt das kleinere Verhältnis aus $V/A = V/(\Sigma_i \alpha_i S_i)$.

Auch der Grenzwert der Mindestnachhallzeit des leeren Raumes von 0,97 s wurde bis 6,3kHz, wie die Norm es fordert, eingehalten. Abbildung 4.1 c) zeigt dies deutlich. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Wände des Hallraumes ausreichend niedrige Absorptionsgrade aufweisen. Oberhalb der 6,3 kHz wird die Luftabsorption relevant, wodurch eine indirekte Bestimmung der Absorptionsgrade über die Nachhallzeit zu ungenauen Werten, bzw. zu hohen Absorptionsgraden, führt.

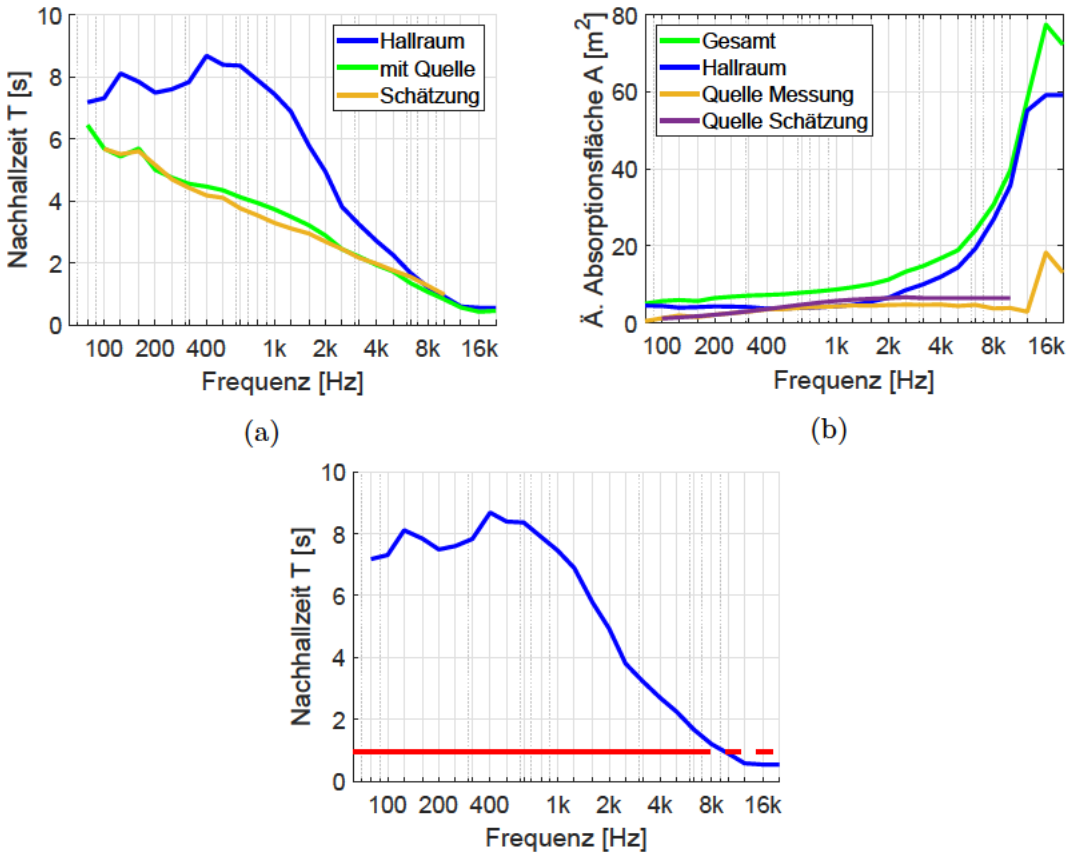


Abb. 4.1: Nachhallzeiten des leeren Raumes, zzgl. Quelle und der theoretischen geschätzten Quelle im Vergleich (a), deren äquivalente Absorptionsflächen und zusätzlich derjenigen Absorptionsfläche, welche sich aus der theoretischen Quellabschätzung ergeben hat, (b) und des leeren Raumes im Vergleich mit dem Grenzkriterium der Norm (c)

4.1.2 Fremdgeräusch

Abbildung 4.2 zeigt die Fremdgeräuschmessung inklusive gesamter Mittelung im Vergleich zum Absolutkriterium der Norm. Die Absolutkriterien der Norm wurden über alle Fremdgeräuschmessungen hinweg eingehalten. Im tieffrequenten Bereich besteht bis auf vereinzelte Ausreißer eine Pegeldifferenz des gemessenen Fremdgeräusches zu den Absolutkriterien von ca. 10 dB. Oberhalb von 400 Hz steigt der Abstand sogar auf ca. 12-15 dB an. Ab 4 kHz steigt das Fremdgeräusch um etwa 6 dB pro Oktave. In diesem Bereich ist das Fremdgeräusch auch über die Messwiederholung stark stationär und sogar über die Messpositionen hinweg, wie Abbildung 4.5 d) und e) zeigen. Die Standardabweichung der Mikrofonpositionen s_M beträgt über beide je Messposition gemittelten Fremdgeräuschmessungen $\leq$ 0,1 dB. Im Störgeräusch lassen sich folgende Anteile identifizieren: Tieffrequent ist die benachbarte Trafostation ausschlaggebend. Der Anstieg oberhalb 3125 Hz Terzbandes deutet auf die Grenze der Messkette hin. Die starke Stationarität dieses Rauschens bekräftigt diese Vermutung. Abbildung 4.3 zeigt das gemittelte Fremdgeräusch mit dem äquivalenten Schalldruckpegel der Eigenstörspannung des Messmikrofons und dem resultierenden Fremdgeräusch nach energetischer Subtraktion eben jenes mit dem äquivalenten Schalldruckpegel der Eigenstörspannung des Messmikrofons. Der Einfluss des Mikrofonrauschens ist ab 1 kHz sehr deutlich zu erkennen und bis ca. 6,3 kHz absolut dominierend. Oberhalb dessen könnte das Messgerät mit der AD-Wandlung und dem Quantisierungsrauschen das Fremdgeräusch stark beeinflussen. Jedoch liegen keine Daten bezüglich der Eigenrauschwerte des Messsystems vor. Dies ist auch nur mit einer Ersatzkapazität, welches die Mikrofonkapsel immitiert, sinnvoll zu messen. Das Messsystem stand jedoch nur zeitlich begrenzt zur Verfügung, weshalb eine solche Messung nicht durchgeführt werden konnte. Die starke Stationarität deutet jedoch auf eine konstante Rauschquelle hin.

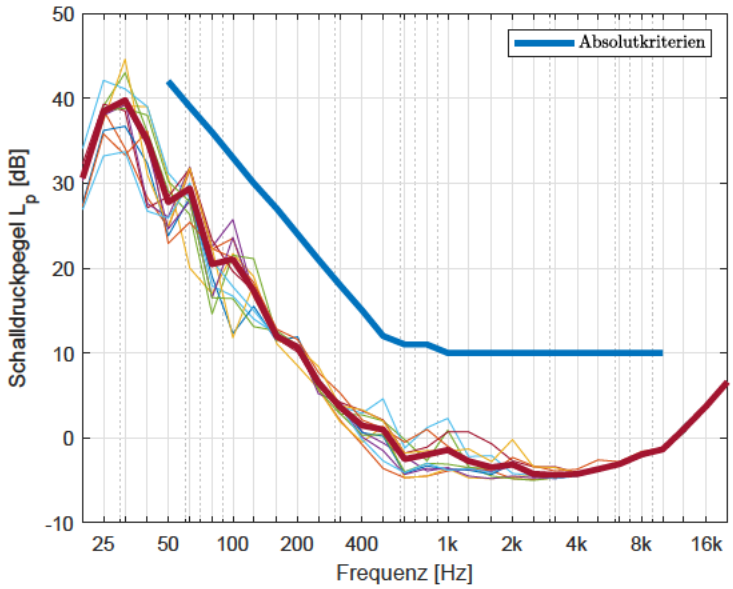


Abb. 4.2: Fremdgeräuschmessungen im Vergleich zu dem Absolutkriterium der DIN EN ISO 3741

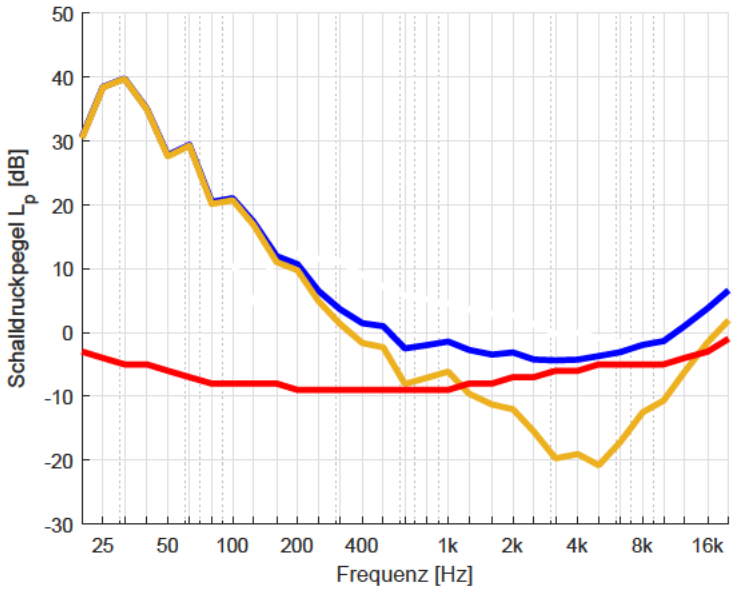


Abb. 4.3: Fremdgeräuschschalldruckpegel, Eigenrauschen des Mikrofons ohne weitere Messkette und restliches Fremdgeräusch

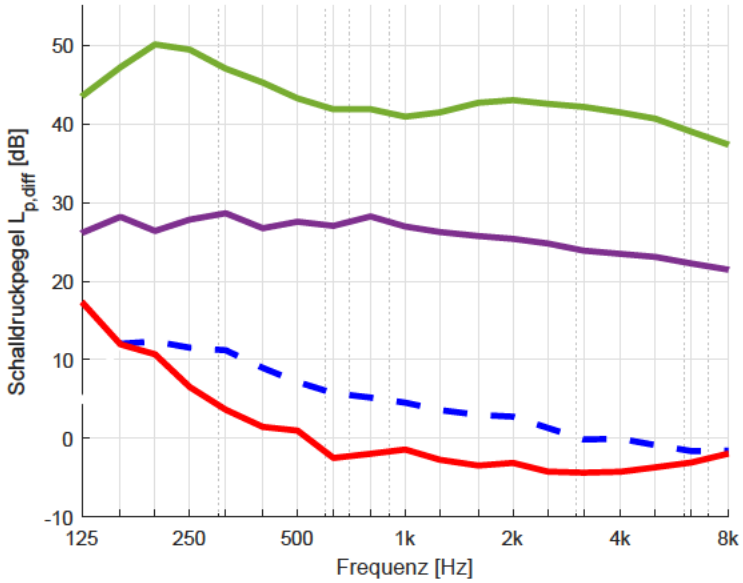


Abb. 4.4: Gemessene Diffusfeldschalldruckpegel des ersten (blau), des zweiten (violett) und dritten Zustandes (grün) mit dem gemittelten Fremdgeräusch (rot).

Diffusfeldpegel und interessierende Frequenzbereiche

Abbildung 4.4 zeigt die resultierenden Diffusfeldpegel der drei Zustände und des gemittelten Fremdgeräusches, welche sich aus dem Mittel der sechs Messpositionen ergeben. Im ersten Zustand konnten die Relativfremdgeräuschkriterien der Norm im gesamten Frequenzbereich nicht eingehalten werden. Es wurde sogar ein negativer *SNR* bei tiefen Frequenzen, trotz Einhalten der Absolutkriterien der DIN EN ISO 3741, festgestellt. Dies ist in der Abbildung durch eine gestrichelte Darstellung kenntlich gemacht. Im zweiten Zustand gilt dies für das 100 Hz Terzband. Hier wurden jedoch sowohl negative als auch positive Werte für den *SNR* ermittelt. Beim dritten Zustand sind lediglich zwei Korrekturfaktoren im 100 Hz Terzband ungleich 0. An Mikrofonposition A_2 gilt für $K_{1i} = 0{,}16\,\text{dB}$, korrespondierender $SNR = 14{,}41\,\text{dB}$, und an A_3 $K_{1i} = 0{,}61\,\text{dB}$, korrespondierender $SNR = 8{,}81\,\text{dB}$.

Tabelle 4.1 zeigt die interessierenden Frequenzbereiche je Zustand. Für den ersten Zustand wurde der Frequenzbereich nach unten hin auf das typische Maximum bei 250 Hz festgelegt. Oberhalb 4 kHz werden die Messwerte ebenfalls stark vom Fremdgeräusch beeinflusst, eine nennenswerte Abstrahlung der Quelle fand nicht mehr statt. Daher beläuft sich der größte zusammenhängende Frequenzbereich für den ersten Zustand von 250 bis 4000 Hz. Aufgrund der großen Schwankungsbreite bei tiefen Frequenzen wurde auch im zweiten Zustand der Frequenzbereich um ein Terzband mit 125 bis 10000 Hz eingeschränkt. Der dritte beinhaltet den vollständigen normativen Frequenzgang von 100 bis 10000 Hz.

Tab. 4.1: Eingeschränkter gültiger Frequenzbereich der Zustände

Zustand 01	Zustand 02	Zustand 03
250 Hz - 4000 Hz	125 Hz - 10 kHz	100 Hz - 10 kHz

4.1.3 Schallleistungen der Zustände

Die Abbildungen 4.5 a) bis d) zeigen die aus den Einzelmessungen nach Norm berechneten Schallleistungen der drei Betriebszustände. e) bis f) zeigen die in Anlehnung an die Norm berechneten Schallleistungspegel aus den ersten und zweiten Fremdgeräuschmessung samt des daraus gemittelten Fremdgeräusches. Diese dargestellten Schallleistungspegel stellen die Schallabstrahlung einer virtuellen Quelle dar, welche den gleichen Diffusfeldpegel erzeugt, wie das Fremdgeräusch. Bei Zustand 1 – Abb. a) – und Zustand 3 – Abb. c) – lässt sich ein eindeutiges Maximum um die 200 Hz-Marke identifizieren, gefolgt von einem recht starken Pegelabfall von ca. 6-7 dB je Oktave. Zwischen 400 Hz und 1 kHz verläuft der Schallleistungspegel im Zustand 3 relativ konstant. Oberhalb dessen ist eine breitbandige Erhöhung mit lokalem Maximum bei ca. 4 kHz zu erkennen.

Zustand 2 – Abb. b) – stellt die Ausnahme dar. Der Schallleistungspegel schwankt um ca. 28 dB bis 1 kHz und steigt dann leicht auf 30 dB bei 8 kHz an. Bei 315 Hz lässt sich jedoch ein lokales Maximum mit 30 dB erkennen. Der spektrale Verlauf ist bis auf diese kleinen Schwankungen relativ konstant. Auffällig beim zweiten und dritten Zustand sind die starken Pegelanteile bei hohen Frequenzen oberhalb von 1 kHz.

Für eine formale Angabe der erweiterten Messunsicherheit U wird auf die normativen Referenzwerte für Vergleichsstandardabweichung des Verfahrens σ_{R0} und der Standardabweichung betreffend Aufstellungs- und Betriebsunsicherheit σ_{omc}. Für die Quelle existiert kein Verfahren und dem zu Folge auch keine Verfahrensvergleichstandardabweichungen. Für die hier betrachtete Quelle ist $\sigma_{R0} =$ dB aus Tabelle 6 der Norm entnommen und nach Normempfehlung $\sigma_{omc} = 2$ dB festgelegt worden. Für die erweiterte Messunsicherheit ergibt sich daraus mit einem Eweiterungsfaktor von $k = 2$: $U = 5{,}6$ dB. Im Nachfolgenden wird detaillierter auf quellbedingte Varianzen eingegangen.

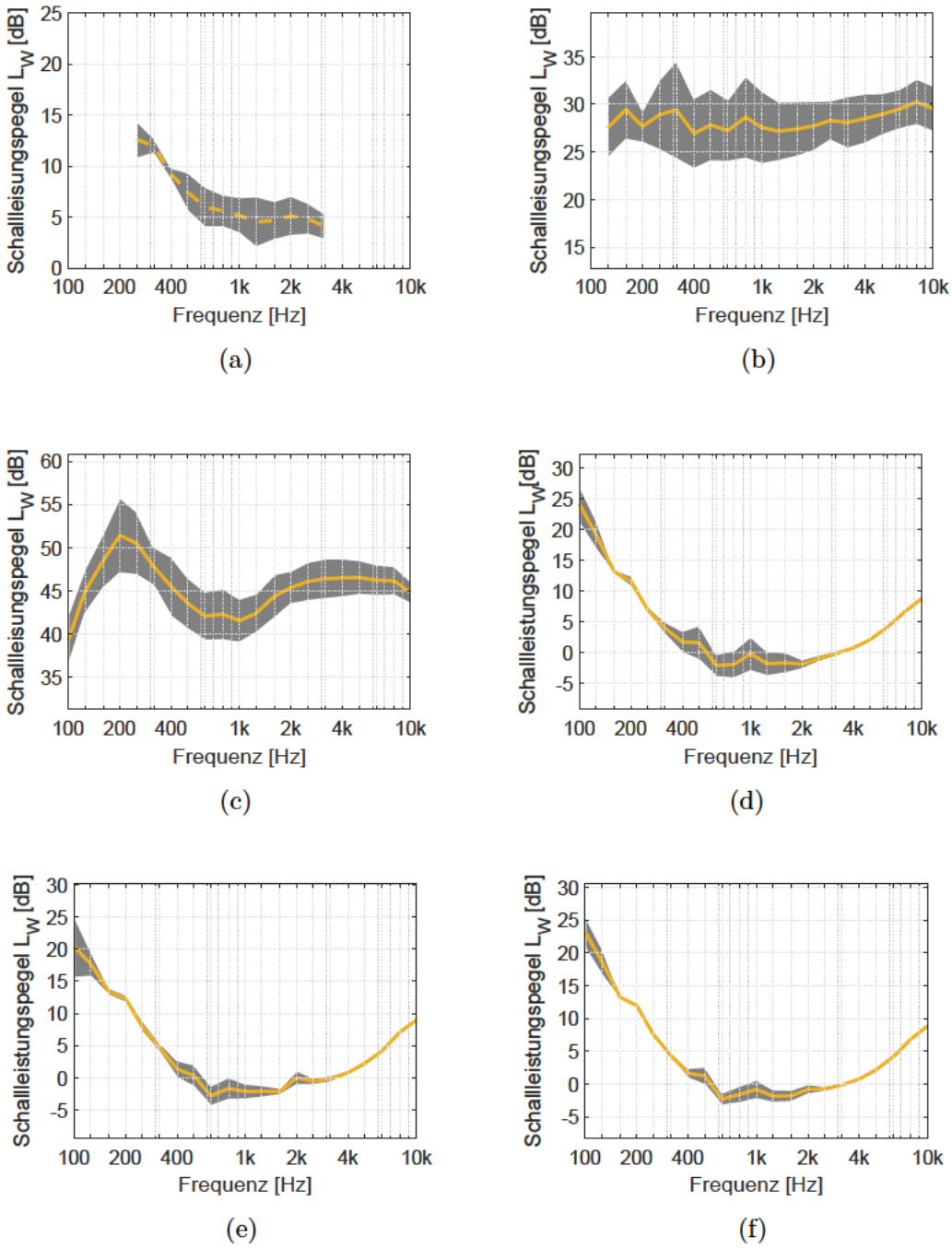


Abb. 4.5: Schallleistungspegel inklusive eingezeichnetem Bereich der Standardabweichung über die Messpositionen s_M für Zustand 1 (a), Zustand 2 (b), Zustand 3 (c), Fremdgeräusch 1 (d), Fremdgeräusch 2 (e) und gemitteltes Fremdgeräusch (f)

4.1.4 Analyse im Zeitbereich

In diesem Kapitel wird auf den Zeitverlauf der Messungen eingegangen. Die Standardabweichung über die Messpositionen der einzelnen Zustände erfordern nach Norm eine Erhöhung der Messposition, welche aufgrund der Quellabmessungen, Abstandskriterien der Norm und Anordnung der Segel im Hallraum nur unzureichend hätte durchgeführt werden können. Im Folgenden werden mögliche Gründe für die hoch ausfallende Standardabweichung s_M erörtert.

Abbildung 4.6 zeigt die Wasserfalldiagramme der über die Messpositionen je Block mit einer Blocklänge von 50 ms gemittelten Terzbandschalldruckpegel. Bei der Fremdgeräuschmessung 01 – Abb. d) – sind im Gegensatz zur zweiten Messung – Abb. e) – deutliche Peaks im mittleren Frequenzbereich zu erkennen. Dies lässt sich auf zwei bekannte Ursachen zurückführen:

1. Zu dem Messzeitpunkt waren die Versuchspersonen bereits anwesend, jedoch nicht im Prüfraum. Die Unterhaltungen konnten trotz der Positionierung der Versuchspersonen zum weit entferntesten Punkt der Prüfhalle, des Schließens der Zwischentür und dem Bitten nach möglichst leiser Unterhaltungen während der Messungen im *RTA* beobachtet werden.

2. Der Messplatz befand sich direkt angrenzend zum Hallraum. Die Bedienung des Messsystems und weitere Bewegungsgeräusche des Messingenieurs können ebenfalls einen Einfluss auf die Messung genommen haben.

Gerade auch im ersten Betriebszustand – Abb. (a) – sind solche Peaks zu erkennen. Bei der Messung von ausschließlich Atemgeräuschen, welche im Vergleich zu den Störpeaks deutlich stationärer zu erwarten sind, sollten jene Peaks aller Erwartung nach nicht vorkommen. Ursachen hierfür können einerseits die nicht ganz bewegungslosen Personen und wie oben bereits beschrieben der Einfluss des Messingenieurs sein. Bei den anderen beiden Betriebszuständen sind Bewegungsgeräusche erwünscht und daher können hier transiente Signale, wie z. B. Stuhlknarzen, vorkommen, d. h. sie sind teil der Quelle.

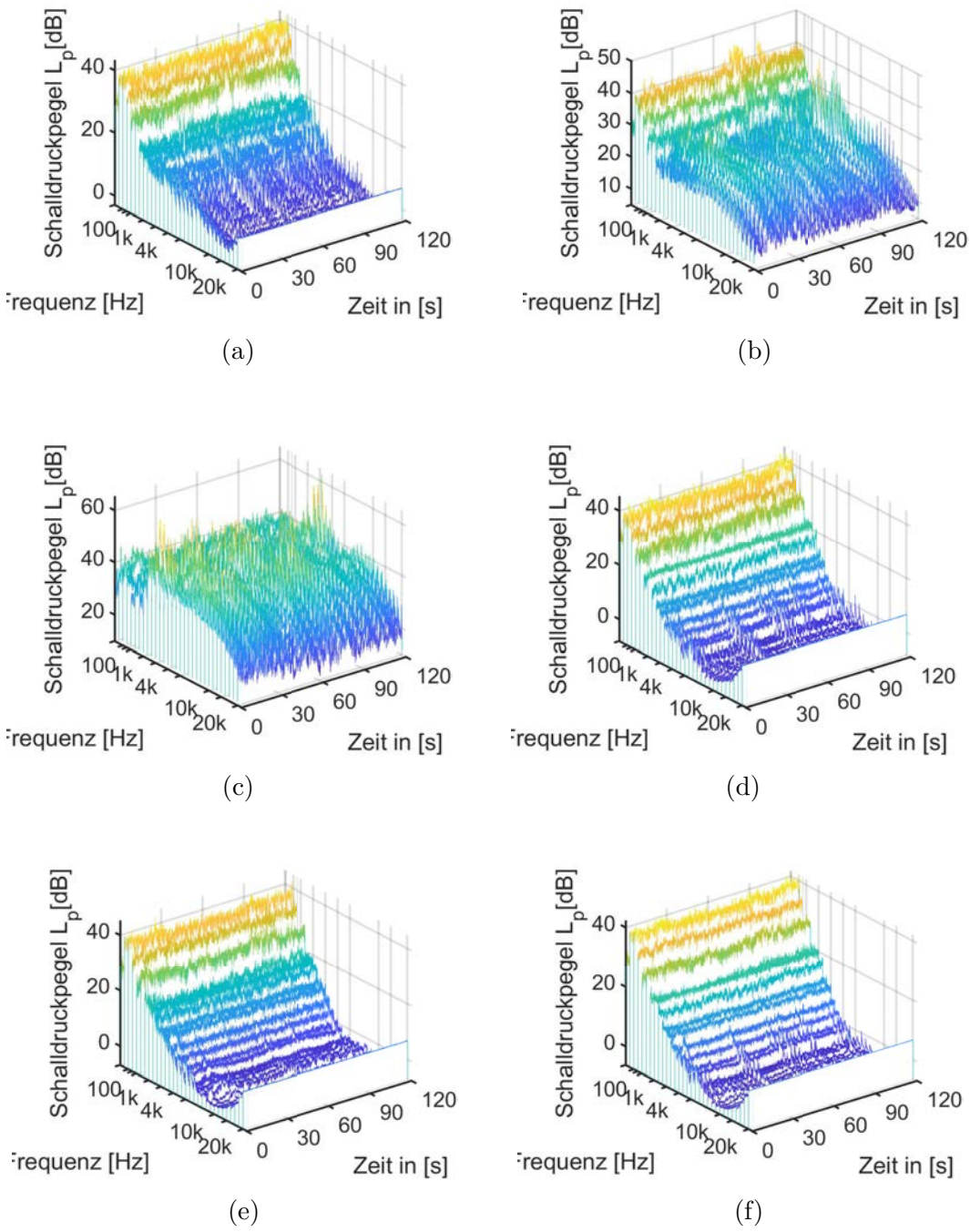


Abb. 4.6: Wasserfalldiagramme in Terzbändern über die Messzeit für Zustand 1 (a), Zustand 2 (b), Zustand 3 (c), Fremdgeräusch 1 (d), Fremdgeräusch 2 (e), gemitteltes Fremdgeräusch (f)

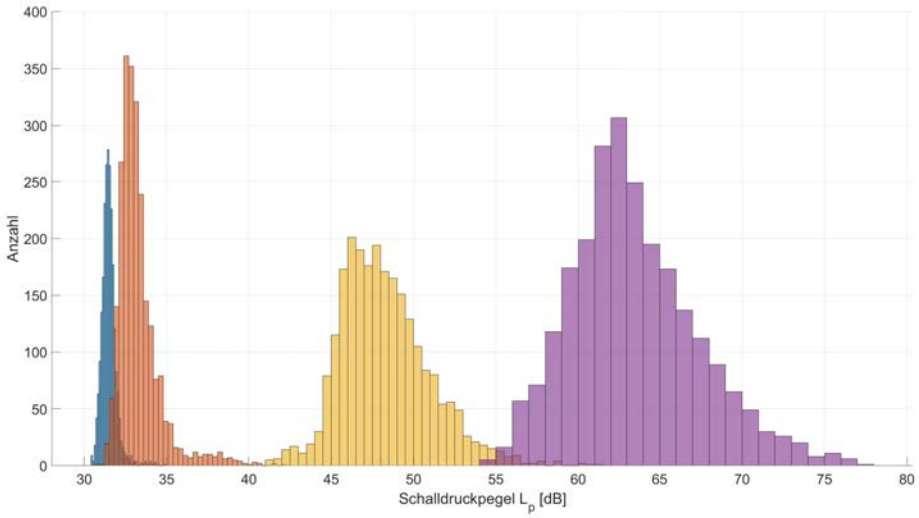


Abb. 4.7: Histogramme der Einzahlwerte des gemittelten Fremdgeräusches (blau) , des ersten Zustandes (ocker), des zweiten Zustandes (gelb) und des dritten Zustandes (violett)

Abbildung 4.7 zeigt die Histogramme über die Breitbandpegel des gemittelten Fremdgeräusches und der drei Zustände. Gut zu erkennen ist hier, dass die Verteilung des ersten Zustandes sehr nahe der Fremdgeräuschverteilung liegt und dass die Streuung ($\sigma = 1{,}34\,\mathrm{dB}$) deutlich geringer ausfällt als bei den anderen Zuständen (2,72 und 3,88 dB), wie Tabelle 4.2 zeigt. Die Werte für die Schiefe legen eine Rechtsschiefe für alle Messungen offen. Während im ersten Zustand diese mit einem Wert von 2,31 noch sehr stark ausfällt, nimmt sie im zweiten Zustand mit 0,71 und im dritten Zustand mit 0,6 deutlich ab. Mit der Wölbung verhält es sich ähnlich: Der erste Zustand weißt mit 10,5 einen hohen Wert für die Wölbung auf. Die Werte verschieben sich zu den Rändern der Verteilung hin, was das Auftreten einzelner Störanteile im ersten Zustand belegt. Im zweiten Zustand fällt die Wölbung mit einem Wert von 4,13 deutlich geringer aus, weil hier die Quelle mehr Schall abstrahlt. Am kleinsten ist die Wölbung im dritten Zustand mit einem Wert von 3,35.

Tab. 4.2: Statistische Eigenschaften der Messungen über die Messzeit

	Fremdgeräusch			Zustand		
	01	02	gemittelt	01	02	03
σ	0,58	0,62	0,47	1,34	2,72	3,88
Mittelwert	32,01	30,99	31,52	33,42	48,73	64,38
Median	31,93	30,91	31,46	33,00	47,92	62,91
Schiefe	0,73	2,89	1,99	2,31	0,71	0,6
Wölbung	2,34	21,27	12,24	10,5	4,13	3,35

Abbildung 4.8 zeigt die Histogramme aller Messpositionen als diffuse Summenschalldruckpegel je Zustand in einem Plot. Bei allen Zuständen ist eine Rechtsschiefe zu erkennen, welche durch einige wenige stark transiente Signale hervorgerufen wurde. In Zustand 1 – Abb. a) – wird dies besonders deutlich, in welchem sich in einem Pegelbereich von über 20 dB sehr wenige einzelne Pegelwerte befinden. Dies sind die bereits oben beschriebenen Störsignale.

Bei Zustand 2 – Abb. b) – ist zudem eine starke Schwankung der Medianwerte je Messposition zu erkennen. Dies lässt den Schluss zu, dass die Bewegungsgeräusche, hervorgerufen durch die Instruktion, "mäßig aufmerksam" starken Schwankungen unterworfen ist.

Beim dritten Zustand (c) fällt die Schwankungsbreite der Medianwerte je Messposition geringer aus als im zweiten Zustand. Auch die Rechtsschiefe ist im Vergleich zu den anderen Zuständen nicht ganz so stark ausgeprägt.

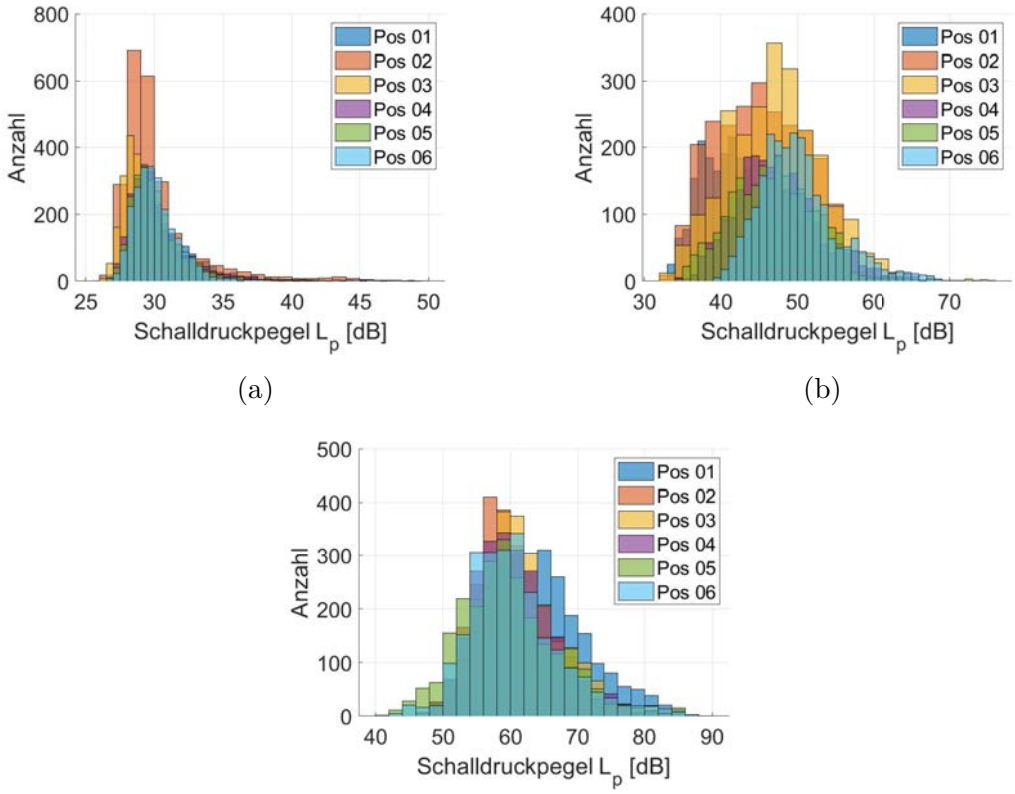


Abb. 4.8: Histogramme der Messpositionen des ersten Zustandes (a), des zweiten Zustandes (b) und des dritten Zustandes (c)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die hohe Standardabweichung über die Messposition zum einen quellbedingt und zum anderen der sequentiellen Messmethodik durch das Einkanalmesssystem geschuldet ist. Wenn alle Messposition simultan gemessen würden, dürfte erwartungsgemäß die Standardabweichung durch die zeitliche Kohärenz des Quellsignals mit gegebenenfalls eingehaltenem normativen Kriterium eben jener Abweichung über die Messpositionen geringer ausfallen.

4.2 Tonaufzeichnung

Im folgenden werden die acht Nahfeldaufnahmen der sieben Personen betrachtet, welche im Rahmen der Datensatzerstellung getätigt wurden. Abbildung 4.9 zeigt für den Zustand 1 den Schalldruckpegel im Freifeld aller Personen (gestrichelt) und im Mittel (durchgezogen) über eine Dauer von 2 Minuten und 28 Sekunden, normiert auf einen Abstand von $r = 0{,}01\,\mathrm{m}$ und um den Nahbesprechungseffekt nach Schneider [41, S. 335] korrigiert. Frauen sind in roter Farbe und Männer in türkis dargestellt. Der gesamte Mittelwert ist in schwarz eingezeichnet. Deutlich zu sehen sind die starken individuellen Unterschiede zwischen den einzelnen Personen, welche sich auf $\pm 10\,\mathrm{dB}$ belaufen können. Frauen erzeugen einen geringeren Schalldruckpegel als Männer.

In den Tabellen 4.3 bis 4.5 sind die statistischen Eigenschaften der Länge von den gesamten Atemzyklen (Tab. 4.3), dem Einatmungsvorgang (Tab. 4.4) und dem Ausatmungsvorgang (Tab. 4.5) je Person dargestellt. Zusätzlich sind je Geschlecht die Mittelwerte, Standardabweichungen, Schiefe, Wölbung, sowie Minimal- und Maximalwerte und die Werte der gesamten Stichprobe dargestellt. Es wurden für die Berechnung die Nahfeldaufnahmen je Person in einzelne Atemzyklen visuell und nach Gehör geschnitten. Die extrahierte Anzahl an Zyklen ist in den jeweiligen Tabellen in der letzten Spalte angegeben. Abweichungen in der Anzahl der Atemzyklen sind darauf zurückzuführen, dass die Aufnahmen nicht eindeutig geschnitten werden konnten. Für die Berechnungen wurden nur als vollständig identifizierte Atemzyklen, bzw. vollständig separierbare Ein- und Ausatmungsvorgänge, verwendet. Die Personen 1 bis 3 weisen geringere Datenmengen auf. Für einen Vergleich sollten sie nicht herangezogen werden.

Abbildung 4.10 zeigt die die Mittelwerte der Ein- (gepunktet) und Ausatmungsvorgänge (gestrichelt), geschlechterspezifisch – türkis Männer und rot Frauen – und normiert auf den Wert des Ausatmungsvorgangs der Männer bei 1 kHz. Bei den Herren zeigt sich um 315 Hz – maximale Schallentstehung – mit etwa 6 dB die größte Differenz zwischen Ein- und Ausatmen. Auffällig ist, dass Einatmungsvorgänge bei den Herren lediglich unterhalb 1 kHz geringere Schallabstrahlung als die Ausatmungsvorgänge hervorrufen. Oberhalb 800 Hz verlaufen die Kurven sehr gleichmäßig mit einer frequenzunabhängigen Differenz von 1 bis 3 dB. Oberhalb von 4 kHz ist ein starker Abfall zu erkennen, der die obere Grenze der Schallabstrahlung, wie auch bei der Messung im Hallraum, vermuten lässt.

Bei den Damen verhält es sich ähnlich. Jedoch ist hier sowohl die Pegeldifferenz zwischen Ein- und Ausatmungsvorgang als auch die Schallabstrahlung insgesamt deutlich geringer als bei den Herren.

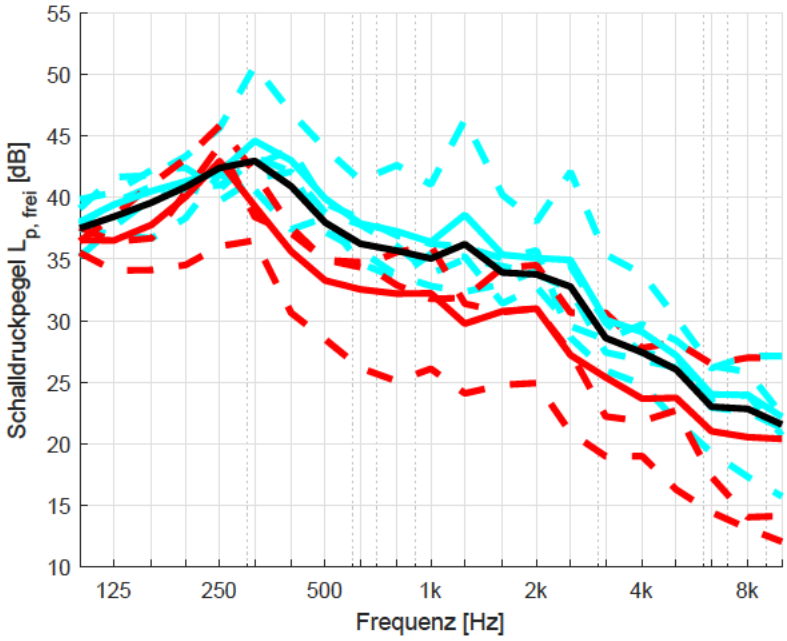


Abb. 4.9: Vergleich von Nahfeldaufnahmen im RaR verschiedener Personen. Türkis: männlich, rot: weiblich, schwarz: gesamter Mittelwert

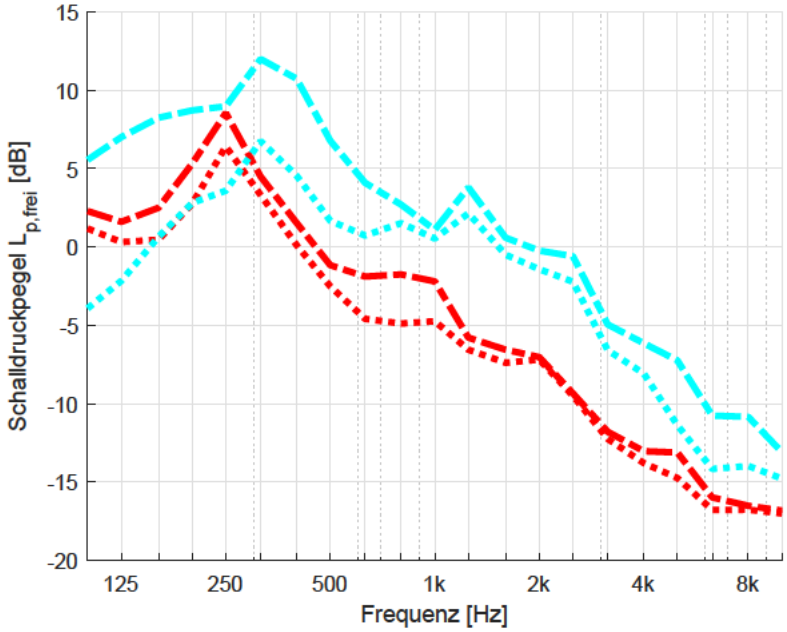


Abb. 4.10: Frequenzgänge in Terzbändern des Ein- (gepunktet) und Ausatemzyklus (gestrichelt) für Frauen in rot und für Männer in türkis normiert auf den Ausatemvorgang der Herren bei 1 kHz

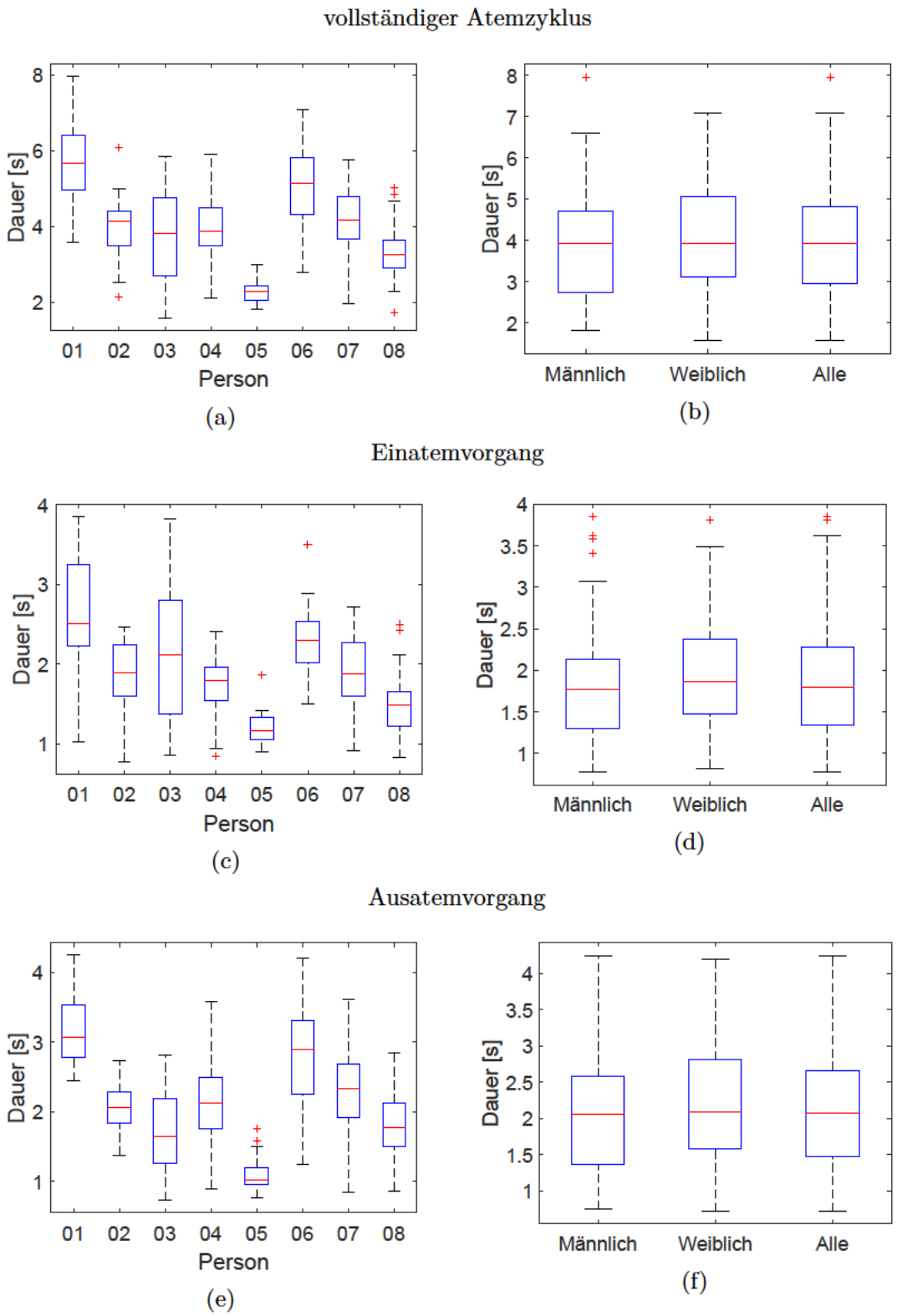


Abb. 4.11: Boxplots der Periodendauer des gesamten Atemzyklus, des Ein- und Ausatmungsvorgangs von jeder Person (linke Hälfte) und geschlechtergetrennt sowie die Gesamtverteilung (rechte Hälfte).

Tab. 4.3: Statistische Eigenschaften des gesamten Atemzyklus je Person

	σ [s]	Min [s]	Mean [s]	Max [s]	Wölbung	Schiefe	N Zyklen
01	1,10	3,58	5,64	7,96	3,34	-0,04	17
02	0,82	2,14	4,00	6,07	4,27	-0,12	25
03	1,30	1,57	3,80	5,83	2,10	-0,05	14
04	0,86	2,11	3,91	5,90	3,03	-0,06	32
05	0,32	1,81	2,29	2,99	2,93	0,77	32
06	1,03	2,78	5,10	7,08	2,52	-0,24	32
07	0,83	1,97	4,19	5,75	3,40	-0,48	32
08	0,74	1,73	3,29	5,02	3,59	0,47	32
Gesamt	1,03	1,57	4,03	7,08	3,15	0,03	216
Gesamt w	0,93	1,57	4,07	7,08	2,73	0,06	78
Gesamt m	1,19	1,81	4,00	7,96	3,39	0,01	138

Abbildung 4.11 zeigt von den Längen des vollständigen Atemzyklus, sowie des Ein- und Ausatmungsvorgangs, die Boxplots jeder einzelnen Person (links) geschlechtergetrennt, sowie alle zusammen rechts. Die individuellen Boxplots weisen starke Unterschiede in den Längen der Atemperiode auf.

Die individuellen Mittelwerte liegen im Bereich von 2,29 s bis 5,64 s.

Beachtlich ist, dass Person 5 sowohl eine kurze Atemperiode vorweist, als auch geringe Streuung um den Mittelwert mit einer Standardabweichung $\sigma = 0{,}32$ s im Vergleich zur über alle Personen ermittelten Standardabweichung von $\sigma = 1{,}03$ s. Bei der Person handelt es sich um einen über 70 Jahre alten Herren. Gleichzeitig weist diese Person den höchsten gemessenen Freifeldschalldruckpegel auf. Die längste Atemperiodendauer ist bei Person 1 mit Mittel 5,64 s und maximal 7,96 s zu finden. Person 6 weist die zweitlängste Atemperiodendauer mit 5,1 s im Mittel und 7,08 s maximal auf. Diese Person ist weiblich. Geschlechterspezifische Unterschiede hinsichtlich der Atemperiodendauern lassen sich nicht erkennen.

Person 5 weist die kürzeste Einatemdauer mit der geringsten Streuung mit einer mittleren Dauer von 1,19 s und Standardabweichung von 0,20 s auf. Beim Ausatemvorgang mit 1,09 s stellt es die geringste Dauer des Vorgangs dar. Bemerkenswert ist, dass der Ausatmungsvorgang kürzer ist, als der der Einatmung.

Generell lässt sich bei den Einatmungsvorgängen eine größere Streuung erkennen, als sie bei der Ausatmung der Fall ist. Im Mittel ist der Ausatmungsvorgang mit 2,15 s um 0,25 s länger als der Einatemvorgang.

Insgesamt ergabt sich im Mittel – auch geschlechterunspezifisch – eine mittlere Atemperiodendauer von etwa 4 s. Die Standardabweichung fiel bei den Damen etwas geringer aus.

Tab. 4.4: Statistische Eigenschaften der Einatmungsvorgänge je Person

	σ [s]	Min [s]	Mean [s]	Max [s]	Wölbung	Schiefe	N Zyklen
01	0,75	1,02	2,63	3,85	3,00	-0,18	16
02	0,49	0,77	1,83	2,46	2,68	-0,75	23
03	0,87	0,85	2,10	3,82	2,45	0,24	14
04	0,39	0,84	1,74	2,41	3,14	-0,52	32
05	0,20	0,89	1,19	1,86	5,78	1,07	32
06	0,46	1,49	2,26	3,49	3,40	0,32	32
07	0,42	0,90	1,90	2,71	2,61	-0,13	32
08	0,41	0,82	1,49	2,50	3,31	0,67	32
Gesamt	0,45	0,82	1,89	3,85	3,26	0,89	213
Gesamt w	0,41	0,82	1,95	3,82	3,05	0,40	78
Gesamt m	0,52	0,77	1,86	3,85	3,38	-0,10	135

Tab. 4.5: Statistische Eigenschaften der Ausatmungsvorgänge je Person

	σ [s]	Min [s]	Mean [s]	Max [s]	Wölbung	Schiefe	N Zyklen
01	0,53	2,44	3,01	4,25	2,59	0,57	16
02	0,37	1,37	1,97	2,73	2,39	-0,08	23
03	0,62	0,72	1,71	2,81	2,63	0,54	14
04	0,61	0,89	2,18	3,58	3,27	0,30	32
05	0,22	0,75	1,09	1,76	5,12	1,38	32
06	0,79	1,25	2,84	4,19	2,57	-0,21	32
07	0,61	0,85	2,29	3,60	3,47	-0,31	32
08	0,44	0,86	1,80	2,84	3,19	0,11	32
Gesamt	0,66	0,85	2,15	4,25	3,15	0,29	213
Gesamt w	0,63	0,72	2,12	4,19	2,80	0,15	78
Gesamt m	0,75	0,75	2,16	4,25	3,37	0,37	135

5 Auswertung

Die Ergebnisse zeigen, dass das Publikumsgeräusch mit 38 dB einen großen Dynamikbereich aufweisen kann und sich der spektrale Schwerpunkt mit zunehmender Unruhe bzw. geringerer Aufmerksamkeit im Publikum zu hohen Frequenzen hin verschiebt. Auch individuelle Unterschiede zwischen Personen konnten aufgezeigt werden. Die maximale Schallleistung lag im Mittel für alle Zustände in den Terzbändern von 200 bis 250 Hz. Dabei fiel die Schallabstrahlung der Atemgeräusche repräsentiert durch den ersten Zustand deutlich geringer aus, als die Literatur es hätte vermuten lassen. Die Schallleistung, im Maximum und normiert auf eine Person, ergab ca. 7 dB. Im zweiten Zustand betrug dieses Maximum ca. 25 dB und im Dritten rund 45 dB.

Weibliche Personen erzeugten im Mittel etwa 6 dB geringere Schalldruckpegel als männliche. Zwischen den Geschlechtern konnten jedoch keine Unterschiede hinsichtlich der Atemperiodendauer festgestellt werden. Der Atemzyklus war im Mittel gleich lang. Auch die Ein- und Ausatmungsvorgänge unterschieden sich nicht wesentlich. Kleiners Annahme von 5 s für eine Atemperiode erscheint mit den hier vorliegenden Daten doch etwas zu lang zu sein. Auch die Annahme von 20 % des Atemzyklus für den Ausatmungsvorgang konnte nicht bestätigt werden. Dies kann jedoch auch an der geringen Anzahl an Personen liegen, auf denen die hier ermittelten Daten beruhen.

Herausstechend unter allen Teilnehmern ist Person 5, welche sowohl die kürzeste Atemperiodendauer als auch die höchsten Freifeldpegel erzeugt hat. Interessant hierbei ist, dass es sich um eine über 70 Jahre alte, männliche Person handelt. Diese Person hat sehr wahrscheinlich in Folge der kurzen Atemdauer das volle Luftvolumen ein- und ausgeatmet, wodurch die Strömungsgeschwindigkeit höher ausfallen dürfte als bei den anderen Personen. Eine Hörprobe der Audiodaten bekräftigt diese Vermutung. Es liegen leider keine weiteren Daten von älteren Personen vor, womit eine altersbedingte Kurzatmigkeit bei gleichzeitigem vollen Ausnutzen des Lungenvolumens hätte bestätigt werden können. Bei dem altersbedingten Nasenhaarwuchs nennt Kleiner diesen als einen möglichen Grund für eine höhere Schallentstehung, es entstehen stärkere Turbulenzen in den Nasenkanälen [10]. Sollte die Art und Weise des oben beschriebenen Atemvorganges altersbedingt sein, so könnte man annehmen, dass die erzeugten Pegel in einer klassischen Konzertsituation bedingt durch den hohen Altersdurchschnitt leicht höher ausfallen, als die hier präsentierten Werte – vor allem Zustand 1 der Hallraummessung.

Der Einfluss des Nasenhaarwachstums bekräftigt diese Tendenz. Dies ist jedoch rein spekulativ und bedarf weiterer Forschung.

5.1 Interpretation der Quellzustände

Die Ergebnisse der Schallleistungsbestimmung einer Publikumsgruppe im Hallraum zeigen, dass das Publikumsgeräusch in einem großen Bereich variieren kann. Die maximale Schallleistung lag beim ersten Zustand im Terzband von 200 Hz, mit entsprechender Normierung auf eine Person mit maximaler Aufmerksamkeit und Bewegungslosigkeit, eine Schallleistung von 7 dB. Beim zweiten Zustand, welcher aufmerksamen, aber nicht bewegungslosen Personen entspricht, ist eine Leistung von 25 dB im 315 Hz Terzband je Person festzustellen. Personen mit mäßiger, aber für Konzerte noch typischer Aufmerksamkeit produzierten eine maximale Leistung von 45 dB im 200 Hz Terzband. Dies resultiert in einem maximalen Dynamikbereich von 38 dB.

Die durch den ersten Zustand repräsentierten Atemgeräusche stellen die untere Grenze des Dynamikbereiches, welcher von einem Publikum mit maximaler Aufmerksamkeit erzeugt wird, dar. Bedingt dadurch, dass die Quelle keine repräsentative Stichprobe eines konzerttypischen Publikums darstellt, fällt der Schallleistungspegel geringer aus, als er mit typischer Verteilung unter Berücksichtigung des Altersdurchschnitts und der daraus getätigten Annahme höherer Schallabstrahlung zu erwarten wäre. Des Weiteren lässt sich eine Anpassung des Publikumsgeräusches an das Fremdgeräusch bestätigen, wie Hodgson et al., Jeong et al. und Böldt bereits feststellen haben [9, 11, 12]. Zudem ist anzumerken, dass das Relativkriterium für Fremdgeräusche bei gleichzeitigem Einhalten des Absolutkriteriums der Norm nicht eingehalten wurde. Dies bedeutet, dass die Werte des ersten Zustandes als maximale Obergrenze der zu vermessenden Quelle zu interpretieren sind. Die ermittelten Werte stellen also Maximalwerte dar: Die gemessene Quelle strahlt in keinem Fall mehr Schall ab als die ermittelten Werte. Geringere Werte können zwar auftreten, jedoch konnten diese aufgrund des geringen *SNR* nicht bestimmt werden.

Der zweite Zustand soll mittels Instruktion (2) dem vom Publikum erzeugten Schall der mittleren Aufmerksamkeit entsprechen. Im Vergleich mit den anderen beiden Zuständen liegt die Schallleistung dieses Zustandes ungefähr mittig zwischen dem ersten und dritten. Der spektrale Schwerpunkt verlagert sich zu hohen Frequenzen hin resultierend in einem überraschenderweise relativ konstanten Frequenzgang.

Beim dritten Zustand ist zu bemerken, dass der Schallleistungspegel die Obergrenze eines äußerst unruhigen Publikums mit hoher Bewegungsaktivität darstellt. Die Atemgeräusche werden durch die deutlich lauteren Bewegungsgeräusche nicht mehr relevant, wenngleich der spektrale Verlauf unterhalb von 1 kHz den typischen Charakter der in der Literatur gefundenen Werte für die Atemgeräusche aufweist.

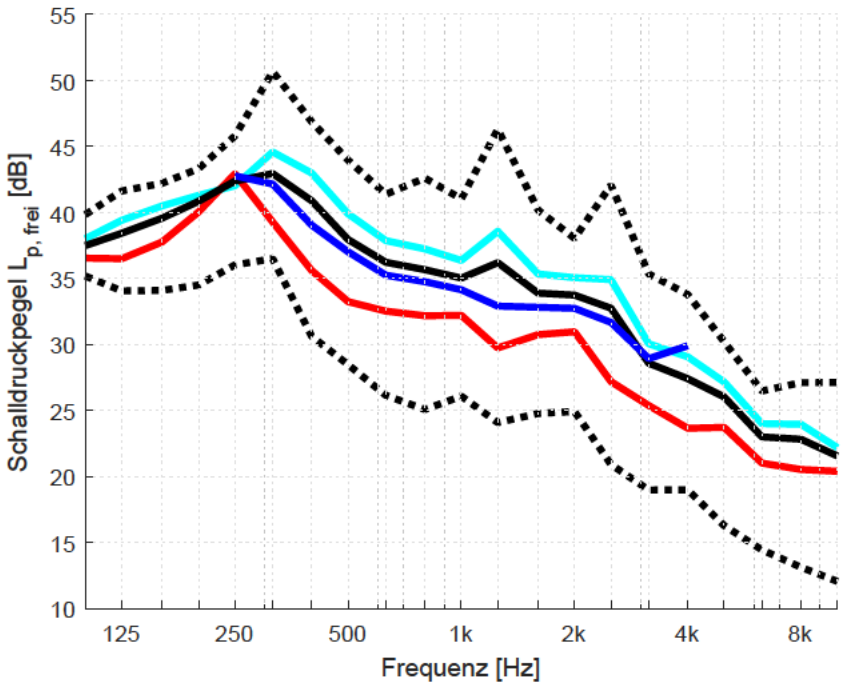


Abb. 5.1: Vergleich von Nahfeldaufnahmen im RaR verschiedener Personen mit gesamten Mittelwert (schwarz), Minimal- und Maximalwerte (schwarz gepunktet), dem Mittelwert aller männlichen Personen (türkis), dem Mittelwert aller weiblichen Personen (rot) und dem berechneten Freifeldpegel der Schallleistung aus dem ersten Zustand mit Achtelkugelcharakteristik, Normierung auf eine Person in dem Abstand von $r = 0{,}01\,\mathrm{m}$.

Das Maximum bei 250 Hz sticht hier am deutlichsten hervor. Auch hohe Frequenzen treten deutlich stärker in Erscheinung.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Je unruhiger sich das Publikum verhält, desto lauter ist es einerseits. Andererseits verschiebt sich der spektrale Schwerpunkt mehr Richtung hoher Frequenzen. Der von Böldt bereits in der Praxis festgestellte große Dynamikbereich von rund 10 dB zeigt sich erwartungsgemäß größer, nämlich mit ca. 38 dB Differenz zwischen dem erstem und dritten Zustand dieser Labormessung.

5.2 Interner Vergleich: Hallraum und Nahfeld

Abbildung 5.1 zeigt die Freifeldpegel der Atemgeräusche im Abstand $r = 0{,}01\,\mathrm{m}$ geschlechtergetrennt, der gesamte Mittelwert mit Minimal- und Maximalwerten und dem berechneten Freifeldpegel aus der Schallleistungsbestimmung des ersten Zustandes. Der Vergleich zwischen den Nahfeldaufnahmen im RaR und dem Freifeldschalldruckpegel aus dem Schallleistungspegel der Messung im Hallraum zeigt, dass der Einfluss der im Kapitel 4.1.4 genannten Störquellen – die wartenden Teilnehmer und Bewegungsgeräusche des Messingenieurs – nicht nennenswert ins Gewicht fällt.

Die Kurven stehen in guter Übereinstimmung zu einander, besonders in Beachtung der Streuung, die in den Atemgeräuschen der Nahfeldaufnahmen zu finden ist. Die starke Streuung der Atemgeräusche beeinflusst auch die Standardabweichungen s_M bei der Hallraummessung: Da sequentiell gemessen wurde, beziehen sich die Messdaten der einzelnen Messpositionen auf unterschiedliche Zeitpunkte. Dies kann zu einer erhöhten Standardabweichung über die Messposition führen. Die Quelle ist stark instationär, was ein möglicher Grund sein kann, dass die Standardabweichung über die Messpositionen s_M zu hoch ausgefallen ist.

Die Nahfeldaufnahmen der Atemgeräusche zeigen deutlich die Unterschiede zwischen den Geschlechtern: Die Atmungsgeräusche bei Frauen weisen im Mittel ca. 10 dB geringere Schallpegel auf als bei Männern. Auch spektral zeigen die Atemgeräusche bei Frauen geringere höherfrequente Anteile. Oberhalb des typischen Maximums bei rund 250 Hz fällt die Kurve deutlich stärker ab. Das Maximum bei Herren liegt bei 315 Hz, was entgegen der Erwartung höher liegt, als das von Frauen.

5.3 Externer Vergleich

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Schallleistung aus der Hallraummessung und den Nahfeldaufnahmen mit den Ergebnissen aus anderen relevanten Studien verglichen. Zunächst wird dieser Vergleich zwischen den Schallleistungswerten aus dem Hallraum mit jenen Werten gezogen, die Kleiner ermittelt hat. Im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse in Bezug zu einer Messung von Melnikov et al. [13] unter Realbedingungen während eines Konzertes in der Bayerischen Staatsoper gesetzt.

5.3.1 Schallleistung nach Kleiner

Abbildung 5.2 zeigt die ermittelten Schallleistungswerte auf eine Person normiert und im Oktavbandpegel je Zustand aufsummiert (identische Farbcodierung, wie in Abbildung 4.4). Zudem ist der Mittelwert von Kleiners Schallleistungswerten [10, Tab. 1] in türkis dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass Kleiners ermittelte Werte für Atemgeräusche von der Höhe der Pegelwerte eher zu den Werten des zweiten Zustandes passen. Der relative spektrale Verlauf deckt sich jedoch ganz gut mit dem ersten Zustand im Bereich von 250 Hz bis 2 kHz. Zwischen 2 und 4 kHz ist der Abfall bei Kleiners Werten deutlich höher.

Leider ist die Bestimmung der Schallleistung durch Kleiner unzureichend dokumentiert, um hier genauere Gründe für die Pegeldifferenz nennen zu können. Der interne Vergleich der im Rahmen dieser Arbeit getätigten Messungen zeigt jedoch die Konsistenz der im Hallraum bestimmten Ergebnisse.

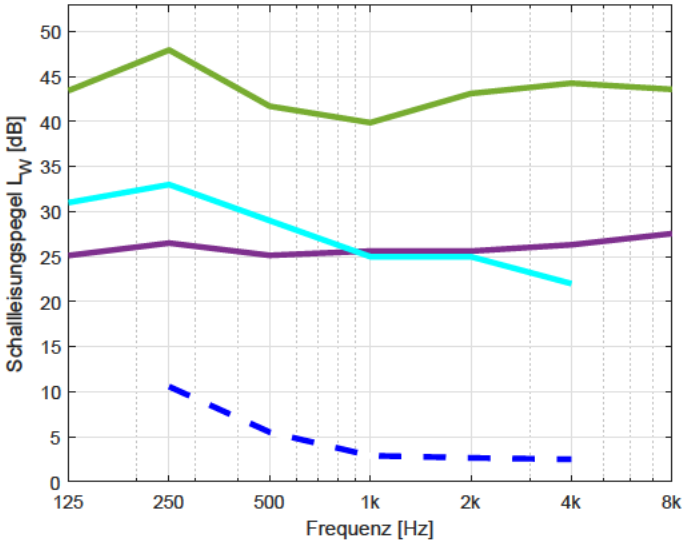


Abb. 5.2: Schallleistungspegel in Oktavbändern der drei Zustände (Zustand 1 blau, Zustand 2 violett und Zustand 3 grün), auf eine Person normiert, und Mittelwert aller Versuchspersonen nach [10, Tabelle 1] (türkis)

5.3.2 Vergleich mit Konzertmitschnitt

Die bisher getätigten Vergleiche der Messergebnisse beziehen sich auf Labormessungen. Inwieweit diese Laborergebnisse der einzelnen Zustände mit den im Feld unter realen Bedingungen einer Musikaufführung tatsächlich auftretenden Schalldruckpegeln übereinstimmen, zeigt ein Vergleich der aus den Schallleistungswerten der Zustände berechneten Diffusfeldschalldruckpegel mit den tatsächlich gemessenen Pegeln während der leisesten Sekunde eines Konzertes. Für die Bayerische Staatsoper wurden daher die Schallleistungswerte der drei Zustände in korrespondierende Diffusfeldpegel nach Formel 3.3 und zur Vergleichbarkeit in Oktavbänder umgerechnet. Die Bayerische Staatsoper hat ein Volumen von $V_{BayO} = 21000\,\mathrm{m}^3$ mit einer mittleren Nachhallzeit von $T_{60,M} = 1{,}24\,\mathrm{s}$ und einer Besetzung durch 2100 Personen. Abbildung 5.3 zeigt die damit berechneten Diffusfeldpegel für die drei Zustände aus den im Hallraum ermittelten Schallleistungspegeln im Vergleich zu den Messergebnissen des Diffusfeldschalldruckpegels der leisesten Sekunde des Konzertes im gleichen Raum [13, Abb. 4 (e)].

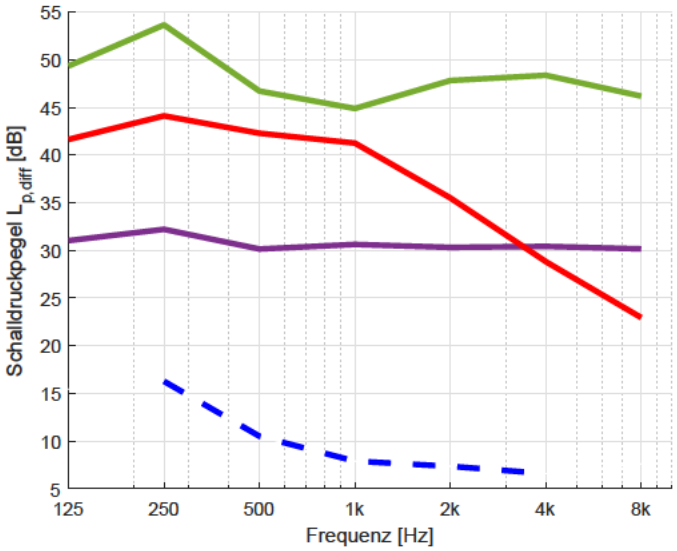


Abb. 5.3: Vergleich der aus der Schallleistungsmessung berechneten Diffusfeldpegel mit den in der Bayerischen Staatsoper gemessenen Diffusfeldpegel von Melnikov et al. [13, Abb. 4 (e)] in Oktavändern

Es zeigt sich, dass die Messwerte der leisesten Sekunde noch oberhalb der korrespondierenden Diffusfeldpegel vom zweiten Zustand liegen. Dies entspricht einem Verhalten, welches zwischen den Instruktionen „aufmerksam, nicht bewegungslos“ und „mäßig aufmerksam“ liegt. Es lässt sich der Schluss ziehen, dass sich ein Publikum auch im Moment größter Aufmerksamkeit nicht kollektiv und vollständig bewegungslos verhält. Es erscheint logisch, dass sich 2100 Personen in Konzertstühlen im Fortschreiten des Konzertes nicht absolut synchron bewegungslos verhalten.

Zu hohen Frequenzen fallen jedoch die im Opernhaus gemessenen Wert mit etwa 6 DB/Oktave ab: Ein Punkt stellt möglicherweise durch die größeren Abstände die höhere Absorption durch das Publikum selbst und die Bestuhlung dar, bevor die Geräusche in das Diffusfeld übergehen. Bedingt durch das größere Luftvolumen stellt die Luftabsorption einen weiteren Teilpunkt dar: Das Volumen der Bayerischen Staatsoper ist mit rund $V_{BayO} = 21000\,\mathrm{m}^3$ etwa 100-fach größer als das Volumen des Hallraumes von $V_{Hall} = 200{,}88\,\mathrm{m}^3$. Die Wege, die der Schall zurücklegt, sind demnach um ein Vielfaches höher als diejenigen, welche im Hallraum zurückgelegt werden mussten. Auch bei raumakustischen Modellsimulationen, welche häufig einen Maßstab von 1:10 oder 1:20 vorweisen, stellt das Luftvolumen ein nicht austauschbares Problem dar, welches im Nachhinein rechnerisch korrigiert werden muss, um gültige Ergebnisse zu erhalten [5]. Jedoch wird bei Messungen der Nachhallzeit bei Sälen dieser Größenordnung die Luftabsorption anteilig an der resultierenden äquivalenten Absorptionsfläche bestimmt und des Weiteren werden bei solchen Modellsimulationen im Maßstab auch die Spektren der Anregungssignale um den selben Faktor skaliert.

Ein zweiter Grund könnte die möglicherweise fehlerhafte Diffusfeldkorrektur im Messsystem darstellen: Da es sich bei dem Messmikrofon um ein freifeldentzerrtes Mikrofon handelt, erzeugt dies eine Überhöhung im Diffusfeld zu hohen Frequenzen hin. Dies sollte über eine Funktion, welche im Messsystem aktiviert wurde, korrigiert werden. Die Ergebnisse lassen daran jedoch Zweifel aufkommen. Leider wurden die Messungen vom Messgerät trotz vorgenommener Audioeinstellungen nicht mitgeschnitten, wodurch eine Kontrolle per Hörprobe entfällt.

Der Vergleich mit Melnikov et al. spiegelt sich auch in Kleiners Ergebnissen wieder: Da Kleiner gute Übereinstimmung mit seinen Schallleistungswerten und gemessenen Pegeln im Götheborg Theater erzielte, lässt es anhand der hier gefundenen Ergebnisse den Schluss zu, dass die Schallleistung aus Tabelle 1 von Kleiner Werte beinhalten, die eher dem zweiten Zustand entsprechen, sprich Atemgeräusche mit leichten Bewegungsgeräuschen. Ebenso die gemessenen Werte – hier in Abbildung 2.2 dargestellt – decken sich eher mit denen des zweiten Zustandes.

Luykx ermittelte einen A-bewerteten Breitband-Schallleistungspegel von 19 dB(A) pro Person. Die auf eine Person normierten und A-bewerteten Breitband-Schallleistungspegel betragen für Zustand 1 10,87 dB(A), Zustand 2 33,09 dB(A) und Zustand 3 50,13 dB(A). Luykx Wert reiht sich zwischen dem ersten und zweiten Zustand ein. Möglicherweise erzeugen die Laborbedingungen einen geringeren Wert als in der realen Konzertsituation. Da es hier jedoch an Daten fehlt und die Bewertung über den Breitbandpegel ungenau ausfällt [12], ist dies jedoch äußerst vage. Der Vergleich mit dem Konzertmitschnitt von Melnikov et al. zeigt aber auch, dass unter der Bedingung, dass man den zweiten Zustand zum Vergleich heranzieht, die Laborwerte geringer ausfallen als die im Feld bestimmten Werte. Möglicherweise stellt die Differenz eine Auswirkung der bereits mehrfach angedeuteten Diskrepanz in der Stichprobenverteilung bzgl. des Durchschnittsalters der Personen dar: Die Werte von Kleiner stammen aus einem Theater und nicht aus einem Opernhaus wie Melnikovs Ergebnisse. Dass sich die Werte des zweiten Zustandes tendenziell eher an Kleiners Ergebnissen orientieren, könnte an einem ähnlichen Altersdurchschnitt liegen. Hier bedarf es noch weiterer Forschung, um aus den vagen Vermutungen bezüglich des Alters und der Schallentstehung Klarheit zu schaffen.

Weitere Vergleiche mit Diffusfeldmessungen in realen Konzertsituationen gestalten sich in sofern schwierig, als dass in vielen Fällen die besetzte Nachhallzeit nicht verfügbar ist. Vergleiche mit der aus einer Simulation berechneten Nachhallzeit oder einer Schätzung aus dem unbesetzten Zustand führen zu fehlerhaften Ergebnissen, wodurch sich die Vergleichbarkeit zwischen den aus den Laborwerten mit jenen Schätzungen der Nachhallzeit und jenen gemessenen Diffusfeldpegeln, welche unter realen besetzten Bedingungen bestimmt wurden und sich folglich auf die tatsächliche Nachhallzeit beziehen, als schwierig gestaltet. Daher wurde auf weitere Vergleiche mit den Werten von Jeong et al. verzichtet.

6 Zusammenfassung

Die Analyse des vom Publikum erzeugten Geräusches brachte mehrere Erkenntnisse: Publikumsgeräusche sind starken Pegelschwankungen unterworfen. Dies wird zum einen durch die Pegelunterschiede zwischen den drei Zuständen – „aufmerksamund bewegungslos“, „aufmerksam, nicht bewegungslos“ und „mäßig aufmerksam“ – und zum anderen durch die starken individuellen Unterschiede bei Atemgeräuschen in den Nahfeldaufnahmen im RaR deutlich. Kleiners fehlende Ergebnisse für die Atemgeräusche von Frauen wurden somit mit dem heutigen Stand der Technik erweitert. Auch dass Frauen geringere Atemgeräusche erzeugen, konnte gezeigt werden. Zudem wurden auch die Unterschiede der Atemzyklen deutlich: Sowohl die Länge des gesamten Atemzyklus innerhalb einer Person als auch dessen Ein- und Ausatmungsteil schwanken relativ stark. Auch die individuellen Unterschiede zwischen den Personen zeigen eine hohe Streubreite.

Das Publikumsgeräusch in einer realen Konzertsituation ist nur schwer und in wenigen Zeitpunkten zugänglich: Es wird einerseits durch ein Orchester oder Theaterschauspieler überlagert, andererseits ist das technische Hintergrundgeräusch stets präsent. Die Bestimmung des Publikumsgeräuschpegels in einer Konzertsituation hat das Problem der Zugänglichkeit. Dies macht sich in der Literatur durch die gegebene Auflösung in Oktavbändern und unvollständigen Messergebnissen bemerkbar. Anhand der in dieser Arbeit durchgeführten Labormessung konnte das von einem Publikum erzeugte Geräusch detailliert zugänglich gemacht werden, was zum einen die spektrale Auflösung und zum anderen den Dynamikbereich betrifft.

Der Vergleich mit dem Diffusfeldpegel eines Konzertmittschnitts des dortigen anwesenden Publikums hat gezeigt, dass die Betrachtung von Atemgeräuschen eher theoretischer Natur ist: Ein Publikum befindet sich nie in Gänze und kollektiv still im jeweiligen Konzertstuhl, sodass in der Praxis neben den reinen Atemgeräuschen auch ein gewisser Anteil an Bewegungsgeräuschen hinzutritt. Dies führt soweit, dass tendenziell der durch die Instruktion (2) forcierte zweite Zustand dem in realer Situation sich ruhig verhaltenden und aufmerksamen Publikum entspricht. Dies spiegelt auch die subjektive Erfahrung wieder, dass ein Publikum von 1000 und mehr Personen sich nicht absolut synchron ruhig verhält. Für die Planung und Auslegung technischer Anlagen sollten daher die Werte des zweiten Zustandes als Planungsgrundlage herangezogen werden. Durch die Normierung der im Hallraum ermittelten Schallleistungswerte auf eine Person ist

eine Berechnung typischer Schalldruckpegel, welche von einem aufmerksamen Publikum beliebiger Größe in einem Raum erreicht werden können, möglich. Mit Hilfe der hier bestimmten Schallleistungswerte können im Vergleich zu den Noise Rating (NR), Noise Criterion (NC) oder Grenzkurven (GK), abhängig von der Publikumsgröße und den raumakustischen Parametern des Saales, bereits in der Simulation geeignete Werte für das von technischen Anlagen erzeugte Hintergrundgeräusch definiert werden. Es wird eine wirtschaftlich optimierte Planung ermöglicht. Die Ergebnisse lieferten an mehreren Stellen vage Hinweise auf eine Abhängigkeit des Alters bei der Schallentstehung, welche sich durch theoretische Überlegungen in der Literatur ebenso wiederfindet. Ein Versuch, welcher ähnlich wie die Nahfeldaufnahmen im RaR aufgebaut ist, könnte mit strikter Altersgruppierung die hier gefundenen Ergebnisse erweitern.

6.1 Limitation und weitere Forschung

Die hier gefundenen Ergebnisse unterliegen Einschränkungen. Neben der Diskrepanz zwischen Labor- und Feldversuchen bestehen Probleme kleiner Stichprobengrößen und unklaren Messergebnissen, welche im Nachgang sich nicht überprüfen lassen.

Bei den Ergebnissen aus der Schallleistungsbestimmung nach dem Hallraumverfahren weisen die Werte des ersten Zustandes einen solch geringen *SNR* auf, dass die Norm lediglich zulässt, die gemessenen Werte als Obergrenze zu interpretieren.

Bei den anderen beiden Zuständen ergibt sich folgende Problematik: Frequenzen oberhalb 1 kHz zeigen ungewöhnliche Werte. Möglicherweise stellt eine nicht korrekte Diffusfeldanpassung des freifeldenzerrten Messmikrofons die Ursache hierfür dar. Ob jedoch andere Probleme durch bspw. Einstreuungen diese Werte hervorgerufen haben, kann aufgrund fehlender Audioaufzeichnungen nicht überprüft werden. Es bleibt, einzig dem staatlich geeichten Messsystem zu vertrauen.

Die Resultate der Atemgeräusche und Atemperiodendauern basieren auf einer sehr kleinen Stichprobengröße. Die Generalisierbarkeit ist stark limitiert. Es bedarf weiterer Forschung, um allgemeingültigere Aussagen formulieren zu können: Zunächst stellt sich die Frage nach der hier formulierten Vermutung von Altersunterschieden in der Schallentstehung von Atemgeräuschen. Auch die Art der Atmung ist dabei vom großen Interesse.

Mit den hier gefundenen Ergebnissen sollen nun Parameter aus dem Datensatz für ein Analyse-Resynthese-System extrahiert werden. Mit diesem System wird es möglich sein, noch realistischere virtuelle akustische Konzertumgebungen zu erschaffen, in welcher sogar verschiedenste Reaktionen des Publikums abgebildet werden können. Der Einfluss der Stichprobenverteilung in dem hier erstellten Datensatz könnte dann bereits in einer Evaluation der Synthesealgorithmen aufgedeckt werden.

Quellenverzeichnis

[1] Krämer, J.; F. Schultz; M. Pollow und S. Weinzierl (2010): „Zur Schallleistung von modernen und historischen Orchesterinstrumenten I: Streichinstrumente." In: *Fortschritte der Akustik: 36. Deutsche Jahrestagung für Akustik*, 36 S. 889–890.

[2] Detzner, E.; F. Schultz; M. Pollow und S. Weinzierl (2010): „Zur Schallleistung von modernen und historischen Orchesterinstrumenten II: Holz-und Blechblasinstrumente." In: *Fortschritte der Akustik: 36. Deutsche Jahrestagung für Akustik*, 36 S. 891–892.

[3] Pätynen, J. und T. Lokki (2010): „Directivities of symphony orchestra instruments." In: *Acta Acustica united with Acustica*, 96(1) S. 138–167.

[4] Beranek, L. L. (2006): „Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption." In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(3) S. 1399–1410.

[5] Ahnert, W. und H.-P. Tennhardt (2008): „Raumakustik." In: Stefan Weinzierl (Hrg.) *Handbuch der Audiotechnik*, Kap. 5. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, S. 178–233.

[6] Weinzierl, S. und M. Vorländer (2015): „Room acoustical parameters as predictors of room acoustical impression: What do we know and what would we like to know?" In: *Acoustics Australia*, 43(1) S. 41–48.

[7] Weinzierl, S. et al. (2018): „Sound power and timbre as cues for the dynamic strength of orchestral instruments." In: *Journal of the Acoustical Society of America*, 144(3) S. 1347–1355.

[8] Böhm, C.; D. Ackermann und S. Weinzierl (2018): „Eine mehrkanalige und nachhallfreie Aufnahme von Beethovens 8. Sinfonie." In: *Fortschritte der Akustik – DAGA München* S. 112–115.

[9] Hodgson, M.; R. Rempel und S. Kennedy (1999): „Measurement and prediction of typical speech and background-noise levels in university classrooms during lectures." In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(1) S. 226–233.

[10] Kleiner, M. (1980): „On the audience induced background noise level in auditoria." In: *Acta Acustica united with Acustica*, 46(1) S. 82–88.

[11] Jeong, C.-H.; P. Marie; J. Brunskog und C. Møller Petersen (2012): „Audience noise in concert halls during musical performances." In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4) S. 2753–2761.

[12] Böldt, S. (2019): *Modellierung von Publikumsgeräuschen.* Masterarbeit, Technische Universität, Fakultät 1, Fachgebiet Kommunikationswissenschaft, Berlin.

[13] Melnikov, A. et al. (2019): „Sound pressure level limits for stage machinery noise in operas and theaters." In: *Applied Acoustics*, 156(156) S. 29–39.

[14] Grimaldi, V.; C. Böhm; S. Weinzierl und H. von Coler (2017): „Parametric Synthesis of Crowd Noises in Virtual Acoustic Environments." In: *Audio Engineering Society Convention*, 142(9744).

[15] Luykx, M. (2018): „Background noise level measurements with and without audience in a concert hall." In: *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 40(3) S. 613–617.

[16] Smith, J. O."(1991): „Viewpoints on the History of Digital Synthesis." In: *Proceedings of the International Computer Music Conference* S. 1—-10.

[17] Tolonen, T.; V. Välimäki und M. Karjalainen (1998): *Evaluation of modern sound synthesis methods.* Helsinki: Helsinki University of Technology.

[18] Serra, X. und J. Smith (1990): „Spectral modeling synthesis: A sound analysis/synthesis system based on a deterministic plus stochastic decomposition." In: *Computer Music Journal*, 14(4) S. 12–24.

[19] Tschakert, R. (????): *Reverberation Room.* Tech. rep., TU Berlin – Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik. URL `https://www.akustik.tu-berlin.de/fileadmin/fg23/Sonstiges/Technische_Einrichtungen/Reverberation_Room.pdf`. Zugriff am 29.10.2019.

[20] DIN (2010): *DIN EN ISO 3741: Akustik–Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1 (ISO 3741:2010); Deutsche Fassung EN ISO 3741: 2010.* Berlin: Beuth.

[21] Tschakert, R. (????): *Anechoic Room.* Tech. rep., TU Berlin – Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik. URL `https://www.akustik.tu-berlin.de/fileadmin/fg23/Sonstiges/Technische_Einrichtungen/Anechoic_Room.pdf`. Zugriff am 29.10.2019.

[22] DIN (2017): *DIN EN ISO 3745: Akustik–Bestimmung der Schallleistungs-und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen–Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume (ISO 3745: 2017); Deutsche Fassung EN ISO 3745: 2017.* Berlin: Beuth.

[23] DIN (2016): *DIN 18041: Hörsamkeit in Räumen– Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung.* Berlin: Beuth.

[24] DIN (2019): *DIN EN ISO 3740: Akustik–Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen — Leitlinien zur Anwendung der Grundnormen (ISO 3740:2019); Deutsche Fassung EN ISO 3740: 2019.* Berlin: Beuth.

[25] DIN (2011): *DIN EN ISO 3746: Akustik–Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 3 über einer reflektierenden Ebene (ISO 3746:2010); Deutsche Fassung EN ISO 3746:2010.* Berlin: Beuth.

[26] DIN (2011): *DIN EN ISO 3747: Akustik–Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Verfahren der Genauigkeitsklassen 2 und 3 zur Anwendung in situ in einer halligen Umgebung (ISO 3747:2010); Deutsche Fassung EN ISO 3747:2010.* Berlin: Beuth.

[27] DIN (2011): *DIN EN ISO 3743-1: Akustik–Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 für kleine, transportable Quellen in Hallfeldern – Teil 1: Vergleichsverfahren in einem Prüfraum mit schallharten Wänden (ISO 3743-1:2011); Deutsche Fassung EN ISO 3743-1: 2011.* Berlin: Beuth.

[28] DIN (2009): *DIN EN ISO 3743-2: Akustik–Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 für kleine, transportable Quellen in Hallfeldern – Teil 2: Verfahren für Sonder-Hallräume (ISO 3743-2:1994); Deutsche Fassung EN ISO 3743-2: 2009.* Berlin: Beuth.

[29] DIN (2011): *DIN EN ISO 3744: Akustik–Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene (ISO 3744:2010); Deutsche Fassung EN ISO 3744: 2010.* Berlin: Beuth.

[30] unknown (????): *NOR 145 Bedienungsanleitung.* Tech. rep., Norsonic – Tippkemper GmbH. Zugriff am 09.11.2019.

[31] unknown (2019): *Instruction manual–½" Low-noise Microphone System Type 47HC.* Tech. rep., GRAS Sound & Vibration. Zugriff am 19.12.2019.

[32] unknown (2019): *GRAS 47HC Noise Floor.* Tech. rep., GRAS Sound & Vibration. Zugriff am 29.10.2019.

[33] unknown (2010): *TLM103 Bedienungsanleitung.* Tech. Rep. 071761/A06, Georg Neumann GmbH. Zugriff am 15.07.2019.

[34] unknown (2019): *Bedienungsanleitung Fireface UC.* Tech. rep., RME. Zugriff am 20.07.2019.

[35] unknown (2019): *Bedienungsanleitung Micstasy.* Tech. rep., RME. Zugriff am 05.03.2019.

[36] unknown (????): *Yamaha P-S Series Owner's techreport.* Tech. rep., Yamaha Corp. URL `https://de.yamaha.com/files/download/other_assets/0/322310/P-S_datasheet.pdf`. Zugriff am 18.05.2020.

[37] unknown (2017): *Yamaha CBR Series Datasheet.* Tech. rep., Yamaha Corp. URL `https://de.yamaha.com/de/products/proaudio/speakers/cbr/downloads.html`. Zugriff am 18.05.2020.

[38] unknown (????): *iSemCon EMX-7150 Datasheet.* Tech. rep., iSemCon. URL `https://www.isemcon.net/ashop/datasheets/EMX7150-DE-r03.pdf`. Zugriff am 19.05.2020.

[39] unknown (2019): *iSemCon EMX-7150 Calibrationsheet.* Tech. rep., iSemCon. Zugriff am 19.05.2020.

[40] DIN (2008): *DIN EN ISO 3382-2: Akustik–Messung von Parametern der Raumakustik– Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen (ISO 3382-2:2008); Deutsche Fassung EN ISO 3382-2:2008.* Berlin: Beuth.

[41] Schneider, M. (2008): „Mikrofone." In: Stefan Weinzierl (Hrg.) *Handbuch der Audiotechnik*, Kap. 7. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, S. 313–419.

Anhang

A Messbericht

Quellbeschreibung

Bei der Quelle handelt es sich um fünf Personen auf Konzertstühlen, welche in Tabelle A.1 aufgelistet sind. Tabelle A.2 zeigt die Maße der Quelle. Abbildung A.1 zeigt die Position und Anordnung der Quelle mit den einzelnen Stühlen und den Messpositionen im Hallraum. Die Personen erschienen in konzerttypischer Kleidung. Bei den Stühlen 2, 3 und 4 sind handelte es sich um Festinstallationsstühle. Diese wurden für einen sicheren Stand auf eine Spanplatte geschraubt. Bei Stuhl 1 handelte es sich um einen freistehenden Stuhl. Stuhl 5 wurde mit Klebeband am Boden fixiert.

Tab. A.1: Auflistung der verwendeten Bestuhlung inklusive der Nummerierung

Stuhl	Typ	Nr.
rbb Großer Sendesaal	Konzerthausstuhl	1
Oper Wuppertal	Opernstuhl	2
UdK Berlin Konzertsaal	Konzerthausstuhl	3
Stadthalle Chemnitz	Konzerthausstuhl	4
Oper Leipzig	Opernstuhl	5

Tab. A.2: Quellabmessungen nach Sitzreihen und Gesamt

Reihe	Länge m	Breite m	Höhe m	Volumen m^3
1. Reihe	1,25	0,80	1,30	1,30
2. Reihe	2,00	0,80	1,30	2,08
Gesamt	—	1,60	1,30	3,38

Die Quelle wurde in drei Zuständen gemessen: dem ersten Zustand, welcher die Minimalschallentstehung widerspiegelt, dem zweiten als mittleren Zustand und dem dritten als absolute Obergrenze der möglichen Schallentstehung.

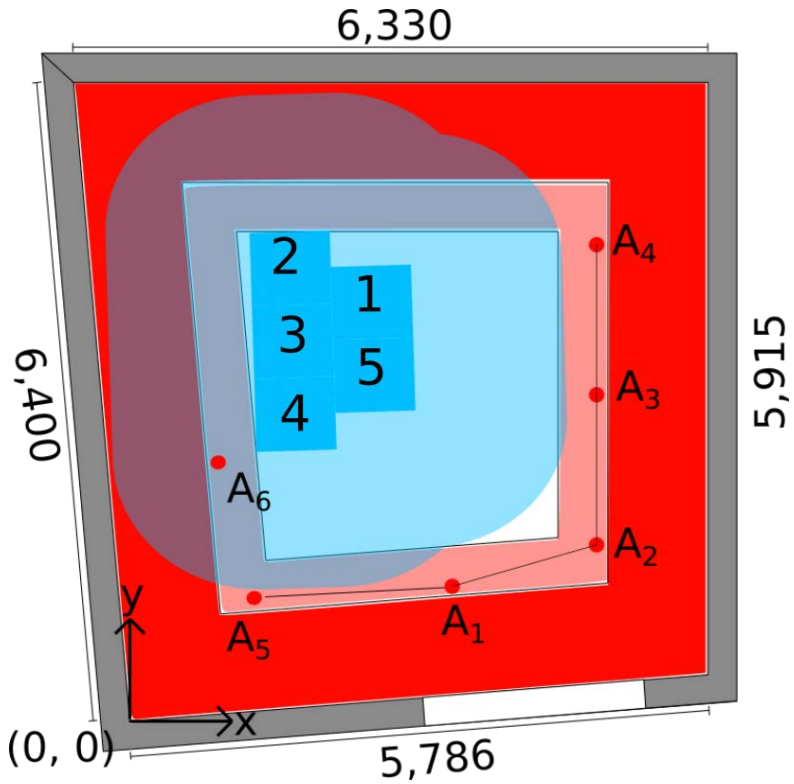


Abb. A.1: Grundriss des Hallraums mit den Messbedingungen

Meteorologische Bedingungen

Während der Messung wurden die Temperatur θ, die Luftfeuchtigkeit h und der statische Luftdruck p_s stündlich gemessen. Die Werte sind in Tabelle A.3 angegeben. Es lässt sich erkennen, dass alle Werte während der Anwesenheit der Versuchspersonen leicht erhöht sind, Die Werte liegen innerhalb der von der Norm DIN EN ISO 3741 geforderten Toleranzbereiche für die meteorologischen Bedingungen während des Messzeitraumes.

Tab. A.3: Meteorlogische Bedingungen zum Messzeitpunkt

Zeitpunkt	Temperatur °C	Luftfeuchtigkeit %	statischer Luftdruck kPa
18:00	15,7	49,2	98,29
19:00	16,0	53,4	98,30
20:00	16,2	53,4	98,32
21:00	16,4	53,7	98,32
22:00	16,7	54,0	98,30
23:00	16,5	53,8	98,29
Mittelwert	16,3	52,9	98,30
Abweichung vom	+0,4	+1,1	+0,02
Mittelwert	−0,6	−3,7	−0,01

alle Werte gerundet auf eine Nachkommastelle (Luftdruck in hPa gemessen und gerundet)

Messgeräte und Kalibrierung

Für die Messung wurden die in Tabelle A.4 aufgelisteten Geräte verwendet. Die Kalibrierung wurde vor Ort am Tag der Messung um 17:50 Uhr mittels Kalibrators bei 1 kHz mit 94 dB_{SPL} vorgenommen. Das Messmikrofon, der Handschallpegelmesser und der Kalibrator wurden vom Hersteller neu ausgeliefert und folglich das erste Mal benutzt. Der Hersteller hat eine Eichung durchführen lassen. Die Kalibrierung mit Schallpegelkalibrator bei 1 kHz und 94 dB Schalldruckpegel ergab dieselben Ergebnisse.

Tab. A.4: Verwendete Messgeräte

Typ	Hersteller	Modell	Seriennummer
Messmikrofon	Gras	47HC	348376
Handschallpegelmesser	Norsonic Tippkemper GmbH	NOR145	14529146
Kalibrator	Norsonic Tippkemper GmbH	NOR4583	???
Dodekaeder	Norsonic Tippkemper GmbH	???	???
Wetterstation	TFA Dostmann	KlimaGuard	???
Rauschgenerator	Acer Laptop mit Matlab	V7 Nitro	
Leistungsverstärker	K+H Telewatt	MB 140	

Akustische Daten

Die Messung fand am Freitag, den 13.12.2019, im Hallraum der TU Berlin statt. Verwendet wurde das Direktverfahren. Tabelle A.5 zeigt die Zeitstempel jeder einzelnen Messung.

Tab. A.5: Zeitstempel der Einzelmessungen

Messung	Position	Zeitstempel
Fremdgeräusch 01	A_1	18:08:16
	A_2	18:13:51
	A_3	18:19:07
	A_4	18:22:48
	A_5	18:25:52
	A_6	18:30:06
Zustand 01	A_1	18:43:34
	A_2	18:53:24
	A_3	18:56:42
	A_4	19:00:06
	A_5	19:04:15
	A_6	19:10:25
Zustand 02	A_1	19:19:26
	A_2	19:24:46
	A_3	19:28:17
	A_4	19:33:19
	A_5	19:37:41
	A_6	19:42:42
Zustand 03	A_1	19:51:52
	A_2	19:56:31
	A_3	20:00:14
	A_4	20:04:11
	A_5	20:08:09
	A_6	20:13:32
Nachhallzeit 01		21:33:20
Nachhallzeit 02		22:08:48
Fremdgeräusch 02	A_1	22:30:42
	A_2	22:23:27
	A_3	22:33:54
	A_4	22:26:10
	A_5	22:38:29
	A_6	22:19:34

Daten der Einzelmessungen

Tab. A.6: Gemessene Schalldruckpegel des ersten Betriebszustandes von allen Messpositionen in Terzbändern

Terzbandmitten-frequenz Hz	01 dB	02 dB	03 dB	04 dB	05 dB	06 dB
100	12,10	20,90	12,60	26,10	14,90	16,90
125	16,50	18,00	16,80	17,80	13,20	15,80
160	15,20	16,20	12,40	16,10	11,90	11,70
200	14,30	14,10	15,60	12,90	12,20	11,80
250	11,30	11,70	15,50	11,20	10,40	10,70
315	12,10	11,70	12,70	11,00	11,80	10,50
400	10,40	9,60	8,90	9,50	9,40	8,50
500	9,50	7,90	4,80	9,40	7,30	5,70
630	8,40	7,50	3,50	7,00	5,30	4,10
800	7,20	7,00	4,20	6,60	4,40	3,60
1000	6,60	6,70	3,10	5,90	3,90	2,80
1250	6,50	5,40	0,80	6,00	2,00	1,80
1600	5,40	4,90	0,80	4,50	1,80	2,20
2000	5,30	4,60	0,50	4,30	2,10	1,40
2500	3,60	3,20	0,00	2,30	0,40	0,50
3150	1,60	1,90	-1,20	0,30	-0,60	-0,60
4000	2,00	1,80	-1,10	0,50	-0,60	-0,80
5000	0,80	1,00	-1,60	-0,60	-1,20	-1,20
6300	0,10	0,50	-1,50	0,80	-1,20	-1,20
8000	0,50	0,50	-1,00	-0,50	-0,90	-0,70
10000	-0,20	-0,10	-0,90	-0,70	-0,70	-0,70

Tab. A.7: Gemessene Schalldruckpegel des zweiten Betriebszustandes von allen Messpositionen in Terzbändern

Terzbandmitten-frequenz Hz	01 dB	02 dB	03 dB	04 dB	05 dB	06 dB
100	17,10	21,60	16,70	27,60	22,10	26,40
125	22,10	23,60	24,60	29,10	28,30	29,70
160	22,90	27,30	25,80	30,50	28,80	31,40
200	23,90	25,90	25,10	27,60	26,70	28,60
250	21,20	29,00	24,60	30,50	30,00	28,30
315	21,10	24,10	25,20	33,80	32,80	27,60
400	20,80	23,10	25,60	28,00	30,60	28,60
500	21,40	23,80	26,70	28,30	30,10	31,20
630	21,10	24,80	26,70	28,00	28,50	30,30
800	21,10	24,50	26,00	30,20	32,30	30,40
1000	20,50	23,40	26,10	28,10	30,10	29,70
1250	21,10	23,20	26,10	27,20	28,10	29,20
1600	21,00	22,80	26,00	26,60	27,20	28,60
2000	21,00	23,10	26,20	26,00	25,70	28,40
2500	22,10	22,50	25,60	25,20	24,40	27,70
3150	19,40	21,90	24,80	24,30	23,40	27,40
4000	19,00	21,70	24,40	23,80	23,30	26,70
5000	19,50	21,50	23,90	23,30	22,90	26,00
6300	19,00	20,70	23,00	22,20	22,10	25,20
8000	17,20	20,20	22,30	21,30	21,60	24,50
10000	15,00	18,10	20,00	19,20	19,70	22,30

Tab. A.8: Gemessene Schalldruckpegel des dritten Betriebszustandes von allen Messpositionen in Terzbändern

Terzbandmitten-frequenz Hz	01 dB	02 dB	03 dB	04 dB	05 dB	06 dB
100	37,30	35,90	31,70	38,30	37,30	40,60
125	47,60	42,30	41,30	40,20	43,30	44,40
160	50,80	41,40	46,60	48,80	46,00	47,00
200	52,00	41,90	47,00	49,70	53,60	51,90
250	48,30	43,70	45,70	53,20	51,40	50,80
315	49,60	43,90	45,30	46,00	49,20	46,80
400	49,40	40,10	43,60	42,20	47,40	45,50
500	46,10	38,20	43,70	40,40	44,30	44,50
630	46,70	38,50	41,70	41,20	40,40	40,20
800	47,10	39,50	42,10	39,40	40,30	40,00
1000	44,70	39,70	42,70	38,50	38,90	39,10
1250	44,10	39,70	44,10	39,60	39,30	40,50
1600	46,20	39,80	44,20	40,40	40,70	43,00
2000	45,30	40,30	44,80	41,40	42,40	42,90
2500	45,30	40,60	44,70	39,70	42,10	41,50
3150	45,70	40,50	43,70	39,70	40,40	41,40
4000	45,20	40,20	42,50	39,50	39,80	40,00
5000	43,80	39,40	42,00	39,70	38,70	39,20
6300	42,00	37,70	40,00	38,20	37,40	37,80
8000	40,20	36,40	38,20	36,60	35,70	36,20
10000	36,80	34,50	35,10	33,90	33,10	33,70

Tab. A.9: Gemessene Schalldruckpegel der ersten Fremdgeräuschmessung von allen Messpositionen in Terzbändern

Terzbandmitten-frequenz Hz	01 dB	02 dB	03 dB	04 dB	05 dB	06 dB
100	23,50	21,70	25,70	21,50	16,70	19,60
125	16,60	19,00	16,80	21,10	14,00	17,30
160	11,60	11,10	12,00	12,10	12,20	11,70
200	10,40	8,50	11,00	10,80	10,70	10,10
250	5,70	5,80	5,20	5,70	7,00	6,10
315	2,10	1,90	4,20	2,80	3,70	4,20
400	-0,80	-0,50	0,70	2,70	2,90	3,20
500	-3,60	1,40	-0,60	2,00	4,60	2,10
630	-4,70	-4,70	-2,20	-0,20	-1,20	-1,80
800	-4,50	-4,50	-3,90	-2,70	1,20	-1,10
1000	-3,90	-3,60	-3,50	0,90	2,30	0,70
1250	-3,50	-4,70	-4,50	-3,40	-2,20	0,70
1600	-3,90	-4,80	-4,80	-4,50	-2,10	-0,70
2000	-4,80	-4,60	-4,50	-4,80	-4,20	-2,70
2500	-4,90	-4,40	-4,70	-5,00	-4,40	-3,40
3150	-4,70	-4,50	-4,60	-4,70	-4,50	-3,40
4000	-4,40	-4,30	-4,20	-4,30	-4,30	-4,10
5000	-3,80	-3,80	-3,80	-3,80	-3,70	-3,70
6300	-3,10	-3,10	-3,10	-3,10	-3,10	-3,10
8000	-2,10	-2,10	-2,20	-2,20	-2,10	-2,10
10000	-1,50	-1,50	-1,40	-1,40	-1,50	-1,50

Tab. A.10: Gemessene Schalldruckpegel der zweiten Fremdgeräuschmessung von allen Messpositionen in Terzbändern

Terzbandmitten-frequenz Hz	01 dB	02 dB	03 dB	04 dB	05 dB	06 dB
100	12,30	21,20	11,80	23,60	16,40	17,80
125	15,50	18,30	18,10	16,80	13,10	15,00
160	11,40	12,80	11,50	12,40	12,60	11,70
200	11,90	11,60	10,70	10,30	10,90	10,50
250	6,30	7,70	8,40	6,10	7,00	6,10
315	4,00	5,30	3,80	3,90	2,90	3,70
400	0,60	2,10	3,30	0,10	0,30	-0,20
500	0,20	1,10	2,00	-1,50	0,40	-2,70
630	-4,20	-0,50	-1,80	-4,30	-4,00	-4,10
800	-3,30	1,00	-1,50	-3,60	-3,00	-3,00
1000	-3,70	-1,00	-1,60	-3,70	-3,10	-3,80
1250	-3,80	-2,60	-1,30	-3,70	-3,50	-3,60
1600	-4,30	-4,10	-2,80	-4,00	-3,60	-4,10
2000	-3,00	-2,30	-0,20	-3,30	-2,90	-2,80
2500	-4,50	-3,30	-3,40	-4,60	-4,40	-4,30
3150	-4,70	-3,90	-3,50	-4,80	-4,70	-4,80
4000	-4,40	-3,70	-4,10	-4,40	-4,40	-4,50
5000	-3,80	-2,60	-3,80	-3,90	-3,90	-3,90
6300	-3,10	-2,80	-3,00	-3,10	-3,20	-3,20
8000	-1,80	-1,60	-1,70	-1,80	-1,90	-1,80
10000	-1,20	-1,20	-1,30	-1,20	-1,40	-1,20

Tab. A.11: Gemessene Schalldruckpegel des über die zwei Messungen gemittelten Fremdgeräuschs von allen Messpositionen in Terzbändern

Terzbandmitten-frequenz Hz	01 dB	02 dB	03 dB	04 dB	05 dB	06 dB
100	20,81	21,46	22,86	22,68	16,55	18,79
125	16,08	18,66	17,50	19,46	13,57	16,30
160	11,50	12,03	11,76	12,25	12,40	11,70
200	11,21	10,32	10,85	10,56	10,80	10,30
250	6,01	6,85	7,09	5,90	7,00	6,10
315	3,15	3,92	4,00	3,38	3,32	3,96
400	-0,04	0,99	2,19	1,59	1,79	1,82
500	-1,30	1,25	0,89	0,59	2,99	0,33
630	-4,44	-2,11	-2,00	-1,78	-2,38	-2,80
800	-3,86	-0,93	-2,54	-3,13	-0,41	-1,95
1000	-3,80	-2,11	-2,45	-0,82	0,39	-0,99
1250	-3,65	-3,52	-2,61	-3,55	-2,80	-0,94
1600	-4,10	-4,44	-3,69	-4,24	-2,79	-2,08
2000	-3,81	-3,30	-1,84	-3,99	-3,50	-2,75
2500	-4,70	-3,82	-4,00	-4,80	-4,40	-3,83
3150	-4,70	-4,19	-4,02	-4,75	-4,60	-4,04
4000	-4,40	-3,99	-4,15	-4,35	-4,35	-4,30
5000	-3,80	-3,16	-3,80	-3,85	-3,80	-3,80
6300	-3,10	-2,95	-3,05	-3,10	-3,15	-3,15
8000	-1,95	-1,84	-1,94	-2,00	-2,00	-1,95
10000	-1,35	-1,35	-1,35	-1,30	-1,45	-1,35

Ergebnisstabellen

Standardabweichung σ_M über Mikrofonpositionen

Tab. A.12: Standardabweichung über die Messpositionen je Betriebszustand und gemitteltes Fremdgeräusch in Terzbändern

Terzbandmitten-frequenz Hz	σ_M 01 dB	σ_M 02 dB	σ_M 03 dB	$\overline{\sigma_{M,Fremd_M}}$ dB
100	6,35	4,95	3,07	2,50
125	1,77	3,35	2,73	2,15
160	2,19	3,28	3,29	0,35
200	1,46	1,73	4,55	0,35
250	1,92	3,79	3,83	0,54
315	0,79	5,59	2,29	0,38
400	0,65	3,88	3,62	0,81
500	1,95	3,97	3,06	1,41
630	2,01	3,38	2,97	0,98
800	1,63	4,56	3,18	1,32
1000	1,80	3,98	2,62	1,48
1250	2,56	3,21	2,34	1,04
1600	1,94	2,98	2,61	0,94
2000	2,00	2,69	1,97	0,80
2500	1,59	2,13	2,30	0,44
3150	1,28	2,82	2,40	0,34
4000	1,37	2,69	2,32	0,16
5000	1,12	2,26	2,05	0,27
6300	1,00	2,15	1,84	0,08
8000	0,68	2,49	1,72	0,06
10000	0,32	2,48	1,33	0,05

Fremdgeräusch und *K1i*

Tab. A.13: Korrekturfaktoren des ersten Betriebszustandes über die Messpositionen in Terzbändern

Terzbandmitten-frequenz Hz	K1i 01 dB	K1i 02 dB	K1i 03 dB	K1i 04 dB	K1i 05 dB	K1i 06 dB
100	-	-	-	1,26	-	-
125	1,26	-	-	-	-	-
160	1,26	1,26	1,26	1,26	-	1,26
200	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
250	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
315	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
400	0,41	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
500	0,38	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
630	0,23	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
800	0,35	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
1000	0,42	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
1250	0,44	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
1600	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
2000	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
2500	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
3150	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
4000	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
5000	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
6300	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
8000	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
10000	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26

Tab. A.14: Korrekturfaktoren des zweiten Betriebszustandes über die Messpositionen in Terzbändern

Terzbandmitten-frequenz Hz	K1i 01 dB	K1i 02 dB	K1i 03 dB	K1i 04 dB	K1i 05 dB	K1i 06 dB
100	-	1,26	-	1,26	1,26	0,83
125	1,25	1,26	0,94	0,50	0,15	0,20
160	0,33	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00
200	0,24	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00
250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
315	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
630	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
800	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1600	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3150	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. A.15: Korrekturfaktoren des dritten Betriebszustandes über die Messpositionen in Terzbändern

Terzbandmitten-frequenz Hz	K1i 01 dB	K1i 02 dB	K1i 03 dB	K1i 04 dB	K1i 05 dB	K1i 06 dB
100	0,00	0,16	0,61	0,00	0,00	0,00
125	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
160	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
315	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
630	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
800	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1600	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3150	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. A.16: *SNR* des ersten Betriebszustandes über die Messpositionen in Terzbändern mit in rot markierte negativen Werten

Terzbandmitten-frequenz Hz	SNR 01 dB	SNR 02 dB	SNR 03 dB	SNR 04 dB	SNR 05 dB	SNR 06 dB
100	-8,71	-0,56	-10,26	3,42	-1,65	-1,89
125	0,42	-0,66	-0,70	-1,66	-0,37	-0,50
160	3,70	4,17	0,64	3,85	-0,50	0,00
200	3,09	3,78	4,75	2,34	1,40	1,50
250	5,29	4,85	8,41	5,30	3,40	4,60
315	8,95	7,78	8,70	7,62	8,48	6,54
400	10,44	8,61	6,71	7,91	7,61	6,68
500	10,80	6,65	3,91	8,81	4,31	5,37
630	12,84	9,61	5,50	8,78	7,68	6,90
800	11,06	7,93	6,74	9,73	4,81	5,55
1000	10,40	8,81	5,55	6,72	3,51	3,79
1250	10,15	8,92	3,41	9,55	4,80	2,74
1600	9,50	9,34	4,49	8,74	4,59	4,28
2000	9,11	7,90	2,34	8,29	5,60	4,15
2500	8,30	7,02	4,00	7,10	4,80	4,33
3150	6,30	6,09	2,82	5,05	4,00	3,44
4000	6,40	5,79	3,05	4,85	3,75	3,50
5000	4,60	4,16	2,20	3,25	2,60	2,60
6300	3,20	3,45	1,55	3,90	1,95	1,95
8000	2,45	2,34	0,94	1,50	1,10	1,25
10000	1,15	1,25	0,45	0,60	0,75	0,65

Tab. A.17: Terzbandmittenfrequenzen des ersten Betriebszustandes je Messposition, bei denen die Anforderungen der Norm an den *SNR* unterschritten wurden

01	02	03	04	05	06
100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00
160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00
200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00
250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00
315,00	315,00	315,00	315,00	315,00	315,00
1600,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
2000,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
2500,00	630,00	630,00	630,00	630,00	630,00
3150,00	800,00	800,00	800,00	800,00	800,00
4000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00
5000,00	1250,00	1250,00	1250,00	1250,00	1250,00
6300,00	1600,00	1600,00	1600,00	1600,00	1600,00
8000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
10000,00	2500,00	2500,00	2500,00	2500,00	2500,00
-	3150,00	3150,00	3150,00	3150,00	3150,00
-	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00
-	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00
-	6300,00	6300,00	6300,00	6300,00	6300,00
-	8000,00	8000,00	8000,00	8000,00	8000,00
-	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00	10000,00

Tab. A.18: *SNR* des zweiten Betriebszustandes über die Messpositionen in Terzbändern mit in rot markierte negativen Werten

Terzbandmitten-frequenz Hz	SNR 01 dB	SNR 02 dB	SNR 03 dB	SNR 04 dB	SNR 05 dB	SNR 06 dB
100	-3,71	0,14	-6,16	4,92	5,55	7,61
125	6,02	4,94	7,10	9,64	14,73	13,40
160	11,40	15,27	14,04	18,25	16,40	19,70
200	12,69	15,58	14,25	17,04	15,90	18,30
250	15,19	22,15	17,51	24,60	23,00	22,20
315	17,95	20,18	21,20	30,42	29,48	23,64
400	20,84	22,11	23,41	26,41	28,81	26,78
500	22,70	22,55	25,81	27,71	27,11	30,87
630	25,54	26,91	28,70	29,78	30,88	33,10
800	24,96	25,43	28,54	33,33	32,71	32,35
1000	24,30	25,51	28,55	28,92	29,71	30,69
1250	24,75	26,72	28,71	30,75	30,90	30,14
1600	25,10	27,24	29,69	30,84	29,99	30,68
2000	24,81	26,40	28,04	29,99	29,20	31,15
2500	26,80	26,32	29,60	30,00	28,80	31,53
3150	24,10	26,09	28,82	29,05	28,00	31,44
4000	23,40	25,69	28,55	28,15	27,65	31,00
5000	23,30	24,66	27,70	27,15	26,70	29,80
6300	22,10	23,65	26,05	25,30	25,25	28,35
8000	19,15	22,04	24,24	23,30	23,60	26,45
10000	16,35	19,45	21,35	20,50	21,15	23,65

Tab. A.19: *SNR* des dritten Betriebszustandes über die Messpositionen in Terzbändern mit in rot markierte negativen Werten

Terzbandmitten-frequenz Hz	SNR 01 dB	SNR 02 dB	SNR 03 dB	SNR 04 dB	SNR 05 dB	SNR 06 dB
100	16,49	14,44	8,84	15,62	20,75	21,81
125	31,52	23,64	23,80	20,74	29,73	28,10
160	39,30	29,37	34,84	36,55	33,60	35,30
200	40,79	31,58	36,15	39,14	42,80	41,60
250	42,29	36,85	38,61	47,30	44,40	44,70
315	46,45	39,98	41,30	42,62	45,88	42,84
400	49,44	39,11	41,41	40,61	45,61	43,68
500	47,40	36,95	42,81	39,81	41,31	44,17
630	51,14	40,61	43,70	42,98	42,78	43,00
800	50,96	40,43	44,64	42,53	40,71	41,95
1000	48,50	41,81	45,15	39,32	38,51	40,09
1250	47,75	43,22	46,71	43,15	42,10	41,44
1600	50,30	44,24	47,89	44,64	43,49	45,08
2000	49,11	43,60	46,64	45,39	45,90	45,65
2500	50,00	44,42	48,70	44,50	46,50	45,33
3150	50,40	44,69	47,72	44,45	45,00	45,44
4000	49,60	44,19	46,65	43,85	44,15	44,30
5000	47,60	42,56	45,80	43,55	42,50	43,00
6300	45,10	40,65	43,05	41,30	40,55	40,95
8000	42,15	38,24	40,14	38,60	37,70	38,15
10000	38,15	35,85	36,45	35,20	34,55	35,05

Schallleistungspegel L_W

Tab. A.20: Schallleistungspegel der Betriebszustände und des gemittelten Fremdgeräusches in Terzbändern

Terzbandmitten-frequenz Hz	L_W 01 dB	L_W 02 dB	L_W 03 dB	$L_W\overline{Fremd}$ dB
100	19,23	24,45	39,67	23,16
125	9,37	28,07	45,30	18,72
160	13,97	29,88	48,89	13,24
200	13,72	27,82	51,97	11,98
250	12,81	29,31	51,03	7,58
315	12,02	30,49	48,07	4,43
400	9,19	27,48	46,00	1,67
500	7,61	28,37	43,86	1,26
630	6,15	27,63	42,58	-2,28
800	5,72	29,31	42,88	-1,56
1000	5,30	28,08	41,89	-0,81
1250	4,79	27,54	42,67	-1,81
1600	4,82	27,74	44,70	-1,79
2000	5,29	28,01	45,56	-0,78
2500	4,95	28,51	46,31	-0,73
3150	4,16	28,43	46,69	-0,15
4000	5,06	28,80	46,79	0,79
5000	5,07	29,17	46,76	2,18
6300	5,66	29,69	46,43	4,15
8000	7,25	30,51	46,33	6,86
10000	8,42	29,78	44,91	8,86
Gesamt	20,84	41,93	59,88	25,48

Einschränkungen interessierender Frequenzgang

Da die Absolutkriterien der Norm in allen Terzbändern von 100 Hz bis 10 kHz eingehalten wurden, siehe Abbildung 4.2, kann bei geringem *SNR* angenommen werden, dass die Quelle in diesen Terzbändern eine geringe Schallabstrahlung aufweist. Deutlich zu erkennen ist, dass beim ersten Betriebszustand in den Terzbändern 100 Hz bis einschließlich 160 Hz größtenteils ein sogar negativer *SNR* aufgetreten ist. Dies bedeutet, dass das Fremdgeräusch während der Betriebszustandsmessung geringer war, als während den Fremdgeräuschmessungen. Aufgrund dieser Tatsache sind die eingeschränkten Frequenzbereiche in Tabelle A.21 angegeben. Die betroffenen Terzbänder sind in den jeweiligen Tabellen A.12 bis A.20 rot markiert.

Tab. A.21: Schallleistungspegel der Betriebszustände und des gemittelten Fremdgeräusches in Terzbändern

Zustand 1	Zustand 2	Zustand 3
250 Hz - 4 kHz	125 Hz - 10 kHz	100 Hz - 10 kHz

Erweiterte Messunsicherheit

σ_{R0} wurde Tabelle 6 der Norm entnommen und σ_{omc} nach Normempfehlung auf 2 dB festgelegt. [20, S. 35]. Mit Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt sich eine mittlere erweiterte Messunsicherheit von $U_M = 5{,}6\,\mathrm{dB}$.

B Elektronischer Anhang

Zum elektronischen Anhang zählen folgende Dateien:

1. alle Messdaten aus dem NOR145
2. alle Audiofiles, die im Rahmen der Tonaufzeichnung gemacht wurden
3. alle Audiofiles, welche aus den Nahfeldaufnahmen geschnitten wurden
4. sämtlicher Matlab-Code, der für diese Arbeit erforderlich ist
5. alle verwendeten Quellen als PDF-Datei