

Messung und Charakterisierung von Klängen der Lippenorgelpfeifen

Diplomarbeit

von

Christian Täsch



Institut für Elektronische Musik und Akustik
Universität für Musik und darstellende Kunst Graz

Vorstand: O.Univ.Prof. Mag. DI Dr. Robert Höldrich

Angefertigt am Fraunhofer-Institut für Bauphysik Stuttgart

In Cooperation with the Academy of Performing Arts Prague

Betreuer: Dr. rer. nat. Judit Angster
RNDr. Jan Stepánek

Stuttgart, im Juni 2003

Danksagung

Dank gilt vor allem meinen Kollegen aus der Arbeitsgruppe Musikalische Akustik, meiner Betreuerin Judit, die diese Arbeit möglich machte, sowie Stephan, Tilo, Martin, Andras, Mi und Sun.

Desweiteren danke ich allen Kollegen der Abteilung Raumakustik/Technische Akustik und ihrem Leiter Prof. Dr. Helmut Fuchs für ihre Unterstützung.

Einen besonderen Dank verdienen Jan Stepanek und Zdenek Otcenasek von der Music Faculty der Academy of Performing Arts Prag für ihre Mitbetreuung, insbesondere zu Fragen der subjektiven Akustik.

Für die aufnahmetechnische Mithilfe möchte ich mich bei Herrn Prof. Maier von der Fachhochschule Reutlingen bedanken.

Ganz herzlich möchte ich mich auch bei den Versucheteilnehmern des Hörtests, den Orgelintonateuren und den Studenten der Musikhochschule Stuttgart, für ihr Engagement und ihre leistungsstarken Ohren bedanken.

Zusammenfassung

Die Messung von Klängen ist in der Musikalischen Akustik entscheidend, wenn es um die Weiterentwicklung von Instrumenten, in diesem Fall der Lippenorgelpfeifen, geht. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse von Klängen, die sowohl objektive Meßtechnik als auch die subjektive Wahrnehmung einschließt. Die Bestimmung von Klangunterschieden innerhalb eines Registers ist Inhalt der Forschung. Dazu wurde ein Register untersucht, das 2 verschiedene Pfeifenbauarten, Holz-gedackt und Metall-offen, enthält. Die Übergangsstelle enthält einen deutlichen Sprung im Klangcharakter und diente deswegen als Ausgangspunkt der Arbeit. Die geeignete Aufnahmetechnik für in-situ Aufnahmen wurde zusammengestellt. Dabei sollten die aufgenommenen Klänge für die Signalanalyse und einen Hörversuch verwendbar sein. Die Analysealgorithmen wurden implementiert und angewendet und die Signale weiterverarbeitet, so daß objektive Klangparameter aufgestellt werden konnten. Ein Hörversuch, dessen Ziel es war, bestehende Klangunterschiede zu detektieren, wurde konzipiert und mittels ausgewählter Testpersonen durchgeführt. Hierbei wurde auch ein spezifisches Klangvokabular aufgestellt.

Abstract

The measuring of sound is a crucial task in musical acoustics when optimizing musical instruments like the Flue Organ pipes. This work is concerned with sound analysis, including objective measurements and perception. The research's aim is to determine differences in sound within one pipe rank. For this purpose 2 different sorts of pipes, closed wooden pipes and open metal pipes, which appear in one rank were investigated. This represents a starting point of the work as a decisive transition in sound character shows up here. Suitable techniques of in-situ recording have been arranged. The recorded signals should be used for signal analysis and subjective tests. Algorithms of analysis have been implemented and used and the signals have been processed in order to get out objective parameters. A listening test aiming to detect global differences in sound was developed and performed with special test persons and the specific wording was collected.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Klangerzeugung	3
2.1	Komponenten des Systems Lippenpfeife	4
2.2	Der Klang	8
2.3	Schallabstrahlung	10
2.4	Bauformen, Mensurierung, Intonation	10
3	Aufnahmetechnik	15
3.1	Messaufbau	15
3.2	Raumakustik und Messpunkte	16
3.3	Mikrofonie	21
3.4	Kalibrierung	22
3.5	Reproduktion der Originallautstärke	23
4	Signalanalyse	24
4.1	Zeitsignal	24
4.2	Analysealgorithmen	24
4.3	Analyseparameter	32
4.4	Analysematrizen	34
5	Objektive Größen	37
5.1	Lautstärke	37
5.2	Stationäre Amplituden der Teiltöne	37
5.3	Einschwingverhalten der Teiltöne	38
5.4	Frequenzschwerpunkt	39
5.5	Verhältnis harmonische - nichtharmonische Anteile	41
5.6	Einschwingzeit	43
5.7	Modulationen	44

6 Hörversuch	45
6.1 Entwurf des Hörversuchs	45
6.2 Statistische Grundlagen und Auswertung	49
6.3 Auswertung der verbalen Beschreibungen	53
7 Ergebnisse	56
7.1 Ergebnisse des Hörversuchs	56
7.2 Vergleich subjektiv - objektiv	59
7.3 Ergebnisse der Signalanalyse und Korrelationen mit subjektiven Aussagen	60
7.4 Zusammenfassung und Ausblick	68
A Meß- und Wiedergabeequipment	72
B Matlab Funktionen	73
B.1 SPLeff	73
B.2 harmonics	73
B.3 freqmes	74
B.4 centroidspec	75
B.5 centroidharm	76
B.6 ratio harmonic to noise	77
B.7 harmoamp	78
C Attribute	79
C.1 Kategorien mit häufigsten Attributen	79
C.2 Gesamtprotokoll	81
D Trackliste der beiliegenden CD	98

1 Einleitung

Diese Diplomarbeit ist Teil eines Projektes mit dem Titel: „Development of an Innovative Organ Pipe Design Method“, das von der Europäischen Union unterstützt wird. Es gehört zur Gruppe der „CRAFT“ Projekte, die sich zum Ziel gesetzt haben, klein- und mittelständische Handwerksunternehmen durch Forschung zu fördern. In diesem Projekt arbeiten Orgelbaufirmen verschiedener europäischer Schulen mit der Arbeitsgruppe „Musikalische Akustik“ des Fraunhofer Instituts für Bauphysik (IBP) zusammen.

Der Klang einer Orgel ist der Hauptfaktor im Wettbewerb des Orgelbaus und das Aushängeschild jeder Orgelbaufirma. Das Projekt wurde ins Leben gerufen, weil die Klangqualität innerhalb der Labialregister ¹ trotz Jahrhunderte alter Orgelbautradition noch verbesserungswürdig ist.

Die klangliche Optimierung der Pfeifen hängt mit Veränderungen ihrer Bauweise zusammen. In der Geschichte des Orgelbaus hat es immer wieder neue Vorschläge und Normen zur Mensurierung ² der Pfeifen gegeben, die allerdings auf experimentellen Wege und ohne die heutigen Kenntnisse der objektiven und subjektiven Akustik bestimmt worden sind, aber noch Anwendung finden. Das führt in der Praxis oft zu hohem Zeit- und Geldaufwand, weil die klangliche Anpassung der Pfeifen zueinander und die Einstellung der Pfeifen auf den Raum viele Nachbesserungen nötig macht.

Neue Messuren, die einen homogenen Klangcharakter innerhalb der Register für verschiedene Raumgrößen garantieren, sind das Ziel der Forschung. Hierfür muß an der physikalischen Modellierung der Pfeifen unter Berücksichtigung des empfundenen Klanges gearbeitet werden. Da die bestehenden Methoden der Schallmessung keine guten Aussagen bezüglich der Wahrnehmung komplexer musikalischer Klänge liefern können, müssen diese objektiven Methoden durch gewonnene Erkenntnisse aus der subjektiven Akustik ergänzt werden.

Als erstes sollen in dieser Arbeit physikalische Aspekte gezeigt werden, um ein Verständnis über den zu untersuchenden Klangerzeuger zu geben. Dabei werden exemplarisch 2 Pfeifenarten herausgegriffen, die sich deutlich in ihrem Klang unterscheiden, aber dennoch oft zusammen in einem Register vertreten sind, gedackte (geschlossene) Holzpfeifen und offene Metallpfeifen.

Dann wird die erforderliche Aufnahmetechnik beschrieben, die die geeigneten Si-

¹Register sind Gruppen von Pfeifen mit gleichem Klangcharakter, Labialregister sind Orgelregister mit Labial- oder Lippenpfeifen

²Maße bzw. Maßverhältnisse, die für die Herstellung einer Orgelpfeife eines bestimmten Klangcharakters wichtig sind

gnale für objektive Analyse und Hörversuche liefern soll.

Wie die Signale auf objektive Weise analysiert und weiterverarbeitet werden, ist Inhalt der nächsten Kapitel.

Der subjektive Hörversuch wird im Anschluß vorgestellt und seine Ergebnisse zusammen mit den Ergebnissen aus der objektiven Analyse diskutiert.

2 Klangerzeugung

Die Lippen- oder Labialpfeifen gehören zur sehr alten Familie der Flöteninstrumente wie die Block- und die Querflöte. Im ersten Kapitel sollen wichtige physikalische Zusammenhänge erklärt werden, die zum Verständnis des komplexen Instrumentes beitragen. Zuerst einige wichtige Begriffe:

Stationärer Zustand Im stationären Zustand eines Schwingungssystems ist die zugeführte Energie gleich den Energieverlusten.

Einschwingvorgang Als Einschwingvorgang bezeichnet man den Zustand des Systems ab dem Zeitpunkt der Energiezufuhr bis zum stationären Zustand.

Klangcharakter Jeder stationäre musikalische Klang kann durch die Eigenschaften Lautheit, Tonhöhe, Tondauer und Klangfarbe beschrieben werden. Diese Einteilung ist aber zur Unterscheidung der verschiedenen Instrumente nicht ausreichend, weil der charakteristische Einschwingvorgang, Rauschkomponenten und zeitliche Änderungen in Lautheit, Tonhöhe und Klangfarbe ebenfalls zu einem Instrumentenklang gehören [1]. Alle diese Merkmale prägen den Klangcharakter und machen einen Klang einem Instrument oder einem Orgelregister zurechenbar.

Reflexion Schallwellen die sich in einem eingeschlossenen Luftvolumen bewegen, werden am Rand dieses Volumens reflektiert. Dabei findet im Fall eines offenen Rands eine Phasenumkehr um π statt und aus einer positiven Druckwelle wird eine negative reflektierte Welle. Der Druck ist am Rand minimal, die Schnelle maximal. Bei geschlossenem Rand bewegt sich die reflektierte Welle gleichphasig zu einfallenden Welle. Der Druck hat hier am Rand ein Maximum und die Schnelle ein Minimum.

Resonanz Bei gewissen Frequenzen kommt es zu konstruktiver Superposition zwischen einfallender und reflektierter Welle und es bildet sich eine stehende Welle aus. Diese Zustände heißen Eigenmoden und die entsprechenden Frequenzen Eigenresonanzfrequenzen. Sie sind abhängig von der Größe und Form des Luftvolumens und von den Randbedingungen. Es können longitudinale, als auch transversale und gemischte Eigenmoden auftreten.

2.1.1 Das Erregungssystem

Die Schwingung des Luftbandes entsteht durch strömungsmechanische Effekte am Oberlabium. Es findet eine Wirbelablösung des Luftstrahls an der Kante statt, dadurch entstehen Über- und Unterdruckgebiete, und der Strahl pendelt zwischen den beiden Strömungsrichtungen [2]. Den Ton, der allein durch diese Luftbandschwingung erzeugt wird, nennt man Schneidenton. Er tritt nicht nur an realen Orgelpfeifen, sondern auch an Schneidentonmodellen, d.h. Pfeifenfußmodellen ohne Resonator auf. Messungen an Schneidentonmodellen haben gezeigt, daß das stationäre Spektrum des Schneidentons einige nichtharmonische Moden und einen hohen Rauschanteil enthält [2], wie in Abb. 2.2 zu sehen.

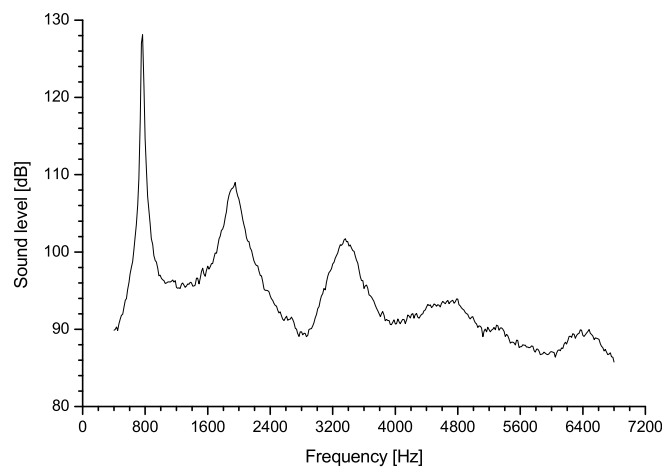


Abbildung 2.2: Typisches Stationärspektrum eines Klanges, erzeugt von einem Schneidentonmodell [2]

Das schwingende Luftband, und damit der Schneidenton wird durch folgende Größen beeinflusst:

- Kernspaltenweite
Sie wirkt sich auf die Ausströmgeschwindigkeit und die Führung des Luftstrahls aus. Hierbei ist auch die Position des Kerns entscheidend. Wird der Kern nach unten oder oben gedrückt, verändert sich die Richtung des Luftstrahls.
- Höhe des Aufschnitts
Dieser Parameter bestimmt die Länge des Luftbandes und damit seine Schwing-

fähigkeit und die Frequenzen der Schneidentonmoden. Bei zu hohem Aufschnitt verliert sich das Luftband in Turbulenzen, bei zu niedrigem Aufschnitt wird der Strahl nur geteilt.

- Position des Oberlabiums
Liegt das Oberlabium in Bezug zur Kernspalte weiter außen bzw. innen, so wird dem Luftband eine Vorzugsrichtung gegeben, und es ist weniger leicht in die andere Richtung zu kippen.
- Winddruck
Mit zunehmendem Winddruck erhöht sich die Ausströmgeschwindigkeit an der Kernspalte.

Diese physikalischen Parameter können beim Intonieren der Pfeifen (erklärt in 2.4.2) verändert werden und wirken sich stark auf den Klang aus.

2.1.2 Der Resonator

Der Resonator besteht aus einem Rohr, das eine Luftsäule einschließt, die durch eine Serie von longitudinalen Eigenmoden charakterisiert ist. Transversalmoden treten in höheren Frequenzbereichen ebenfalls auf. Die Entstehung der ersten drei Eigenresonanzen in offenen und einseitig geschlossenen Rohren wird in [3] beschrieben und sei in Abb. 2.3 illustriert. Man kann an den Druckverläufen erkennen, daß am beidseitig geöffneten Rohr näherungsweise Eigenfrequenzen auf allen Vielfachen der Grundfrequenz entstehen, während am einseitig geöffneten Rohr näherungsweise nur die ungeradzahigen Vielfachen der Grundfrequenz entstehen.

Wichtige Beschreibungsgrößen des Resonators sind:

- Zahl der Öffnungen
Beidseitig geöffnete Resonatoren kommen bei offenen Pfeifen zum Einsatz und einseitig geöffnete bei den gedackten Pfeifen. Auch Zwischenformen, zum Beispiel die Halbgedackten existieren.
- Länge des Resonators
Man muß zwischen physikalischer Länge L_0 des Rohres und effektiver oder akustischer Länge L' der schwingenden Luftsäule unterscheiden [4]. Dies beruht auf der Tatsache, daß die Luftsäule nicht an der Pfeifenmündung aufhört zu schwingen, sondern über die Mündung hinaus schwingt. Deshalb die physikalische Pfeifenlänge kürzer ist als die effektive. Durch diesen Vorgang ist Schallabstrahlung überhaupt erst möglich.

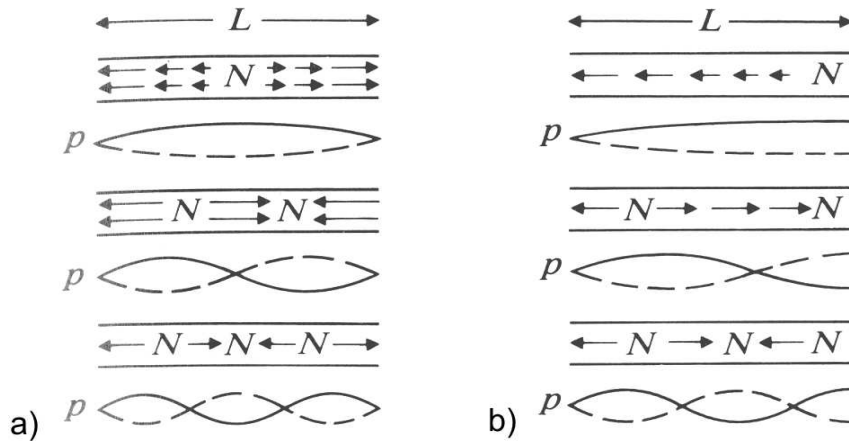


Abbildung 2.3: Schnelle- und Druckverlauf im a) offenen und b) einseitig geschlossenen Rohr. N kennzeichnet die Punkte minimaler Schnelle [3]

Die effektive Länge bestimmt die Frequenzen und Wellenlängen λ der Eigenmoden. Für die erste Eigenmode gilt:

Für offene Rohre:

$$L' = \lambda/2 \quad (2.1)$$

Für geschlossene Rohre:

$$L' = \lambda/4 \quad (2.2)$$

Zwischen effektiver und physikalischer Länge besteht folgender Zusammenhang,

$$L' = L_0 + \Delta_e + \Delta_m \quad (2.3)$$

wobei Δ_e und Δ_m die sog. Mündungskorrekturen darstellen. Der Index e steht für end, m für mouth. Die Mündungskorrekturen sind nach [4] frequenzabhängig. Das heißt, daß sich die stehenden Wellen im Rohr asymmetrisch aufbauen [5]. Deshalb stehen die Eigenmoden des Rohres nicht in ganzzahlig vielfachem Verhältnis.

- Form des Rohres

Die Form des Rohres im Längsschnitt bestimmt den spektralen Aufbau der

Eigenmoden. Bei konischen Rohren werden die Eigenmoden relativ zu einem parallelen Rohr, nach oben gestaucht bzw. verschoben, bei trichterförmigen Rohren nach unten, je nach Öffnungswinkel. Es ist möglich bei einem bestimmten Öffnungswinkel die Eigenmoden des Resonators „harmonisch“ zu machen, d.h. in ein ganzzahlig vielfaches Verhältnis zu bringen. Die Form des Querschnitts (rund, quadratisch, rechteckig) ist für die Ausbildung der longitudinalen Eigenmoden vernachlässigbar.

- Frequenzen und Güte der Eigenmoden

Die Eigenresonanzfrequenzen ergeben sich wie schon gesehen aus der Rohrlänge, der Form des Rohres und den Mündungskorrekturen. Der Güte- oder Q-Faktor macht eine Aussage hinsichtlich ihrer Resonanzschärfe.

$$Q = f_M / \Delta f \quad (2.4)$$

f_M ist die Mittenfrequenz und Δf die Bandbreite der Resonanzkurve bis zum 3dB Abfall.

Ein hoher Q-Faktor läßt schmalbandigere Resonanzen und eine höhere Fähigkeit zur Energiespeicherung zu, was sich auf die Länge des Ein- und Ausschwingvorgangs auswirkt. Die Güte wird vom Verhältnis Länge/Durchmesser des Resonators bestimmt. Dieses Verhältnis ist im Orgelbau als Weitenmessur bekannt. Je weiter das Rohr, desto kleiner die Güte der Eigenmoden und desto weniger und flachere Eigenmoden treten auf, wie in Abb. 2.4 gezeigt.

2.2 Der Klang

Der letztendlich erzeugte Klang wird von der Kopplung des oszillierenden Luftbandes und dem Resonator bestimmt. Richtet sich der Strahl ins Resonatorrohr, so regt er dieses impulsartig an und es entsteht augenblicklich ein positiver Schalldruck im Rohr, welcher das Luftband wieder herauskippen läßt und eine laufende Druckwelle im Rohr verursacht. Deren reflektierte Welle kann, wenn sie wieder am Labium angelangt ist, einen negativen Schalldruck erzeugen und den Strahl wieder ins Pfeifeninnere lenken. Dieser Vorgang wiederholt sich aufgrund der immer gleichen Laufzeiten im Rohr und eine periodische Schwingung entsteht. Die Luftbandschwingung regt den Resonator auf seinen Eigenmoden an und der Resonator prägt der Luftbandschwingung seine Grundfrequenz gemäß seiner ersten Eigenmode auf, so daß die Luftbandschwingung auf der ersten Eigenmode „einrastet“. Ist es die zweite Eigenmode erhält man den überblasenden Betriebszustand.

Die genauen Zusammenhänge dieses Prozesses sind noch nicht geklärt. Fest steht

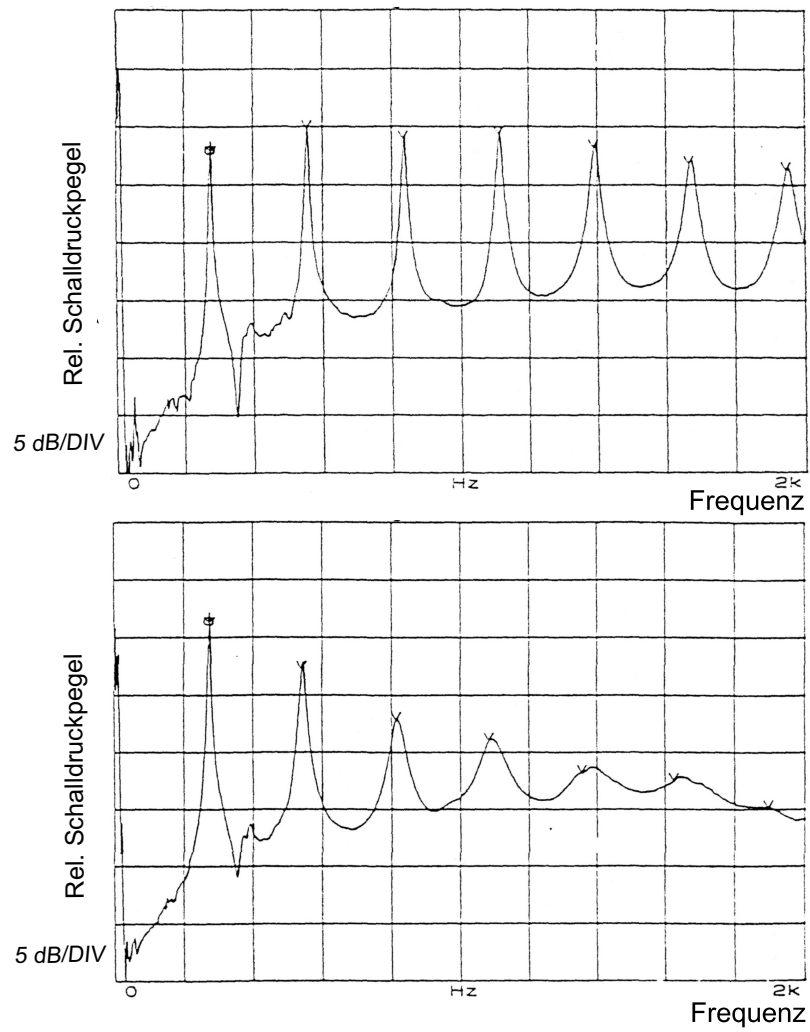


Abbildung 2.4: Eigenresonanzen zweier offener Rohre; oben: enge Mensur unten: weite Mensur [5]

allerdings, daß der Schneidenton am Anfang des Klanges präsent ist, mit der einsetzenden Resonatorrückwirkung verändert wird, aber nicht verschwindet. Da diese Klangphänomene Teil des Einschwingvorgangs sind, tragen sie maßgeblich zum jeweiligen Klangcharakter der Pfeife bei und verleihen ihm die „Würze“ [6]. Der erzeugte Stationärklang des Systems Lippenpfeife wird in [5] ausführlich beschrieben. 2 typische Stationärspektren sind in Abbildung 2.5 gezeigt. Die im Klang zu erkennenden Resonatoreigenmoden sind mit Pfeilen gekennzeichnet.

2.3 Schallabstrahlung

Die Schallabstrahlung findet hauptsächlich an den Öffnungen der Pfeife statt. Die Beeinflussung der Abstrahlung durch Oberflächenschwingungen der Wände ist nur selten zu beobachten [5].

Bei offenen Pfeifen sind die verschiedenen Mündungskorrekturen an offenem Ende und Labium dafür verantwortlich, daß die Abstrahlung für beide Öffnungen unterschiedlich ist, wie Abb. 2.6 zeigt. Dadurch ergeben sich die verschiedenen Formantstrukturen und das charakteristische Minimum im unteren Bild [5].

Bei tiefen Frequenzen, wenn die Wellenlänge viel größer ist als die Öffnung, kann man die Öffnung als Punktstrahler auffassen und die Abstrahlung erfolgt nahezu kugelförmig. Zu höheren Frequenzen stellt sich eine Richtwirkung ein. Es findet eine starke Bündelung in der Horizontalebene um die Mundöffnung statt und eine weniger starke Bündelung in der Vertikalebene.

Offene Pfeifen kann man als Doppel-Punktschallquellen auffassen. Daher ergibt sich ein Interferenzfeld um die Pfeife.

2.4 Bauformen, Mensurierung, Intonation

Das Instrument Orgel lebt von der Klangfülle der vielen Register, deren Pfeifen wohldefinierten Maßen und Maßverhältnissen, den Messuren unterliegen. Eine gute Übersicht wird in [7] gegeben. In der Tradition des Orgelbaus haben sich viele Vorschläge zur Mensurierung entwickelt, die auf empirischen Versuchen der Orgelbauer basieren und den epochalen Klangidealen unterliegen.

Die Längenmessur fixiert die Tonhöhe¹. Die Weitenmessur gibt das Verhältnis Länge zu Durchmesser vor, was die Güte und Anzahl der Eigenmoden beeinflusst. Generell kann man sagen, daß eng mensurierte Pfeifen einen streicherartigeren, also obertonreicheren Klang hervorbringen als weit mensurierte Pfeifen, die flötenartiger und grundtöniger klingen. Die Größe des Raumes, in dem die Orgel

¹bei Verwendung von Stimmvorrichtungen am offenen Ende kann die Tonhöhe auch später noch beeinflusst werden

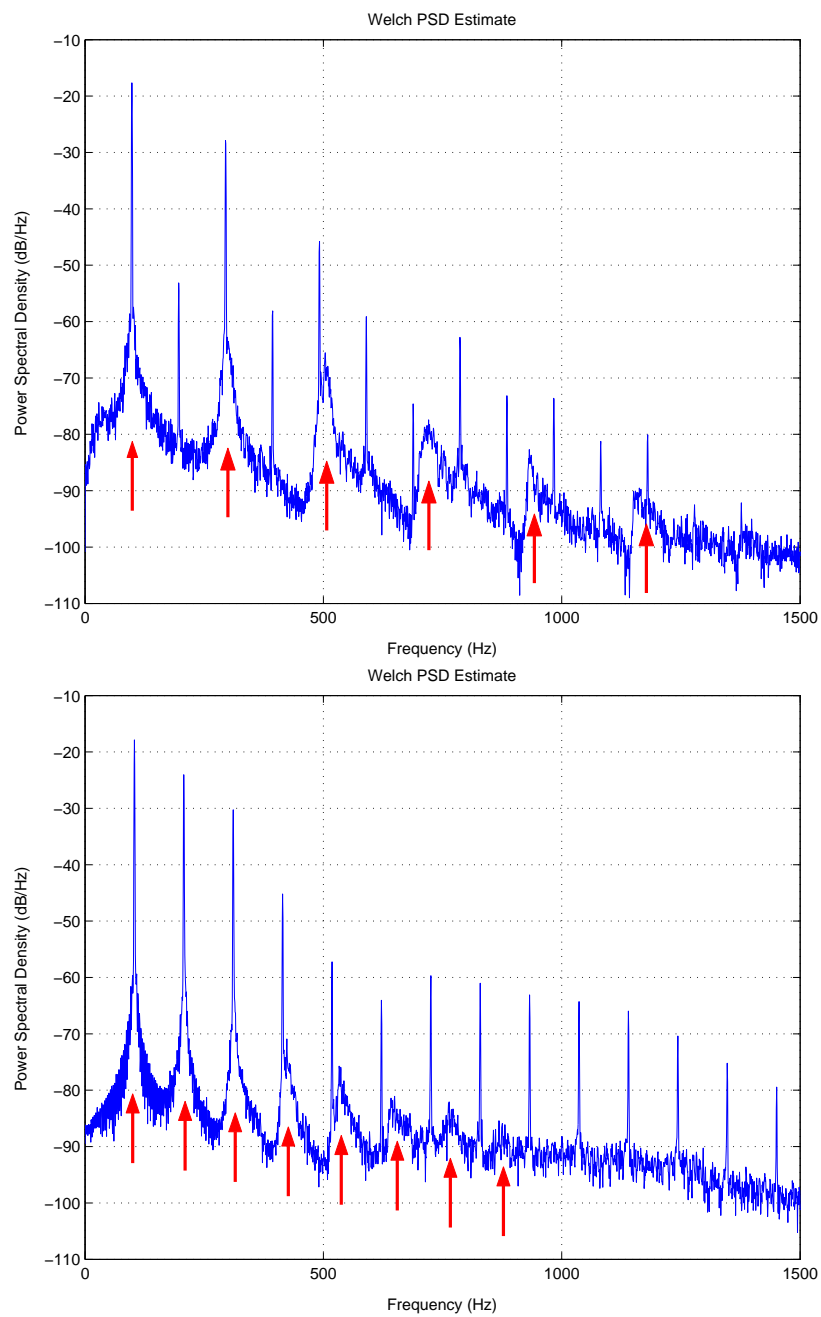


Abbildung 2.5: Stationärspektren klingender Lippenorgelpfeifen; oben: Ton G eines Holz-Gedackts, unten Ton Gis von Metall-Offen

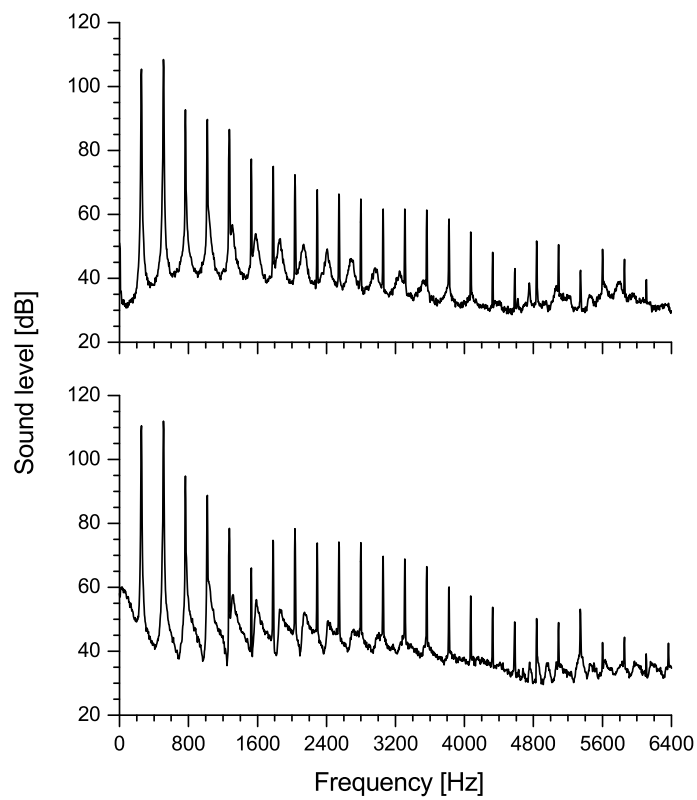


Abbildung 2.6: Stationärspektren einer offenen Lippenorgelpfeife, oben: am offenen Ende, unten: am Labium [5]

stehen soll geht ebenfalls mit in die Weitenmessur ein.

2.4.1 Übergänge

Im Orgelbau findet man viele Register, die mehrere Bauformen enthalten. Dies hat fertigungstechnische Gründe. Zum Beispiel können Pfeifen hoher Lage nicht unendlich klein gebaut werden, so daß man zu doppelt so langen überblasenden Pfeifen übergeht.

Im hier untersuchten Prinzipal 8' Register sind die offenen Metallpfeifen im Baß durch das Holzgedackt, oder Bourdon ergänzt. In Bild 2.7 sind beide Bauformen nebeneinander gezeigt. Warum man nicht offene Metallpfeifen im Baß weiterbaut, hat bautechnische Gründe. Hier spielt die Einbaulänge, das Gewicht, der Preis und die Verformbarkeit des Materials eine Rolle.

Der Übergang ergibt 2 verschiedene Klangcharaktere im Register, was in dieser tiefen Tonlage in Kauf genommen wird.

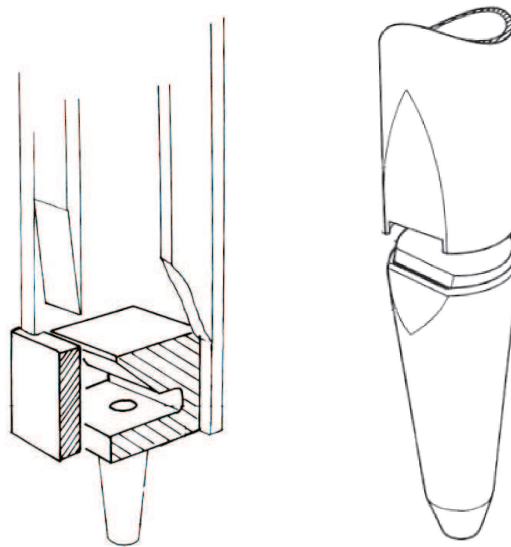


Abbildung 2.7: Schnitte durch Mundöffnungen der Holz- und Metallpfeifen

2.4.2 Intonation

Nach dem Bau der Pfeifen, müssen sie noch zur klanglichen Reife gebracht werden, was in der Kunst der Intonation geschieht. Dies beinhaltet sehr feine Veränderungen der Parameter des Erregungssystems gemäß 2.1.1, also an der Pfeifen-

fußöffnung, am Kern und am Oberlabium ², und läßt Änderungen an Lautstärke, Tonhöhe und Klangcharakter zu. Holzpfeifen sind in der Intonation eingeschränkt, da das Material keine reversiblen Intonationsschritte zuläßt.

Die Intonationsschritte haben einen starken Einfluß auf das Einschwingverhalten (die Ansprache) und den Stationärklang, wie aus [8] hervorgeht.

Aufgaben der Intonation sind:

- Abstimmung der einzelnen Pfeifen
- Balance des Klangcharakters über ein Register
- Balance der Klangcharaktere über alle Register. Bestmögliche Klangverschmelzung beim Ziehen mehrerer Register.
- Hohe Verständlichkeit und Tragfähigkeit im Raum ³

²Im Falle von Stimmvorrichtungen auch an der oberen Pfeifenöffnung

³eine gute Tragfähigkeit ermöglicht das differenzierte Hören einer musikalischen Stimme im Raum

3 Aufnahmetechnik

Da das Ziel ist, bestehende Klangunterschiede an Übergangsstellen zu untersuchen, ist der erste Schritt, die Klänge von jenen Pfeifen aufzunehmen, die fertig für einen entsprechenden Übergang und für den Raum ausintoniert und in Gebrauch sind. Daher kamen nur in-situ ¹ Aufnahmen in Frage. Aufnahmeobjekt war die Orgel einer evangelischen Gemeinde Stuttgarts, die über die gewünschten Übergangsstellen zwischen gedackten Holzpfeifen und offenen Metallpfeifen verfügte.

Der aufgenommene Tonumfang umfaßte 16 Töne und erstreckte sich vom C_2 bzw. Großem C bis zum Dis_3 bzw. kleinem dis. Der Übergang befindet sich genau in der Mitte zwischen G_2 und Gis_2 .

Die Findung der Aufnahmetechnik war mit dem Ziel verbunden, geeignete Signale für den Hörtest bei gleichzeitiger Kompatibilität zur Signalanalyse zu produzieren.

3.1 Messaufbau

Abb. 3.1 zeigt die verwendeten Geräte. Eine Beschreibung des Meßequipments befindet sich in Anhang A.

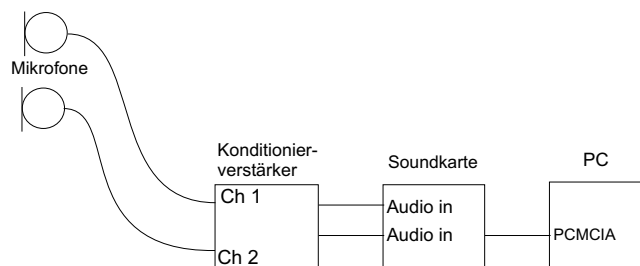


Abbildung 3.1: Meßaufbau

Die Aufnahmen wurden mit einer Abtastrate von 44100 Hz und einer Auflösung von 16 Bit erstellt. Software für Recording und Schnitt war „Samplitude“².

¹an Ort und Stelle

²Produkt der Firma Magix, Version 7, Classic

3.2 Raumakustik und Messpunkte

3.2.1 Raumakustik

Eine exakte Beschreibung der Raumwirkung war nicht Inhalt dieser Arbeit. Mehrere wichtige Punkte sollen jedoch herausgegriffen werden:

- Nachhallzeit und Hallradius
Eine Messung der Nachhallzeit war für die Untersuchung nicht notwendig. Die abgeschätzte Berechnung erfolgt über die Formel von Sabine:

$$T_{60} = 0.163 \frac{V}{A} [s] \quad (3.1)$$

wobei V ...Raumvolumen;

A ...äquivalente Absorptionsfläche, $A = \sum S_i \cdot \alpha_i$ bestehend aus der Summe aus A_i Einzelflächen mit α_i zugehörigen Absorptionsgraden;

Die genauen Raummaße konnten nicht in Erfahrung gebracht werden. Das Raumvolumen lag im Bereich 1200 m^3 , die äquivalente Absorptionsfläche wird unter Berücksichtigung der Baumaterialien und der Bestuhlung auf 100 m^2 geschätzt. Damit erhält man eine Nachhallzeit von 1.956 s. Dies ist für die kleine Kirche ein realistischer Wert.

Der Hallradius in geschlossenen Räumen mit einer Nachhallzeit $> 0.5 \text{ s}$ berechnet sich zu (gemäß Cremer):

$$r_h = 0.057 \sqrt{\frac{V}{T_{60}}} [m] \quad (3.2)$$

Das ergibt hier näherungsweise 1.4 m. Innerhalb des Hallradius ist die Direktschallenergie höher als die Diffusschallenergie. Zur Detektion der Einschwingvorgänge wählt man deshalb Meßpunkte nah an der Quelle, weil hier die störenden Anteile aus Reflexionen durch den hohen Direktschallpegel überdeckt werden. So erhält man Einblick in die akustische Einschwingcharakteristik der Pfeife.

- Das komplexe Modalfeld im Raum ist Grund dafür, daß jeder Raumpunkt eine eigene Übertragungsfunktion besitzt, die den Klängen aufgeprägt wird. Feststehende Mikrofone liefern deshalb immer nur punktuelle Informationen aus ihrer Perspektive innerhalb des Schallfeldes im Raum. In Abbildung 3.2 soll verdeutlicht werden, wie unterschiedlich die Stationärspektren für die verschiedenen Positionen ausfallen können.

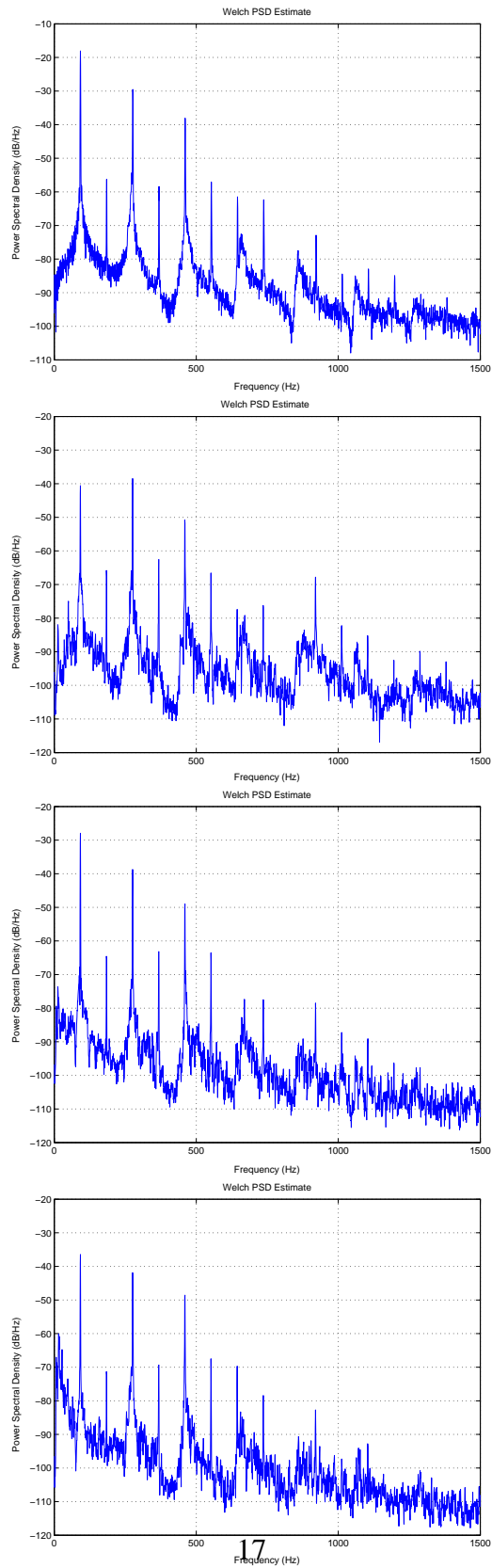


Abbildung 3.2: Stationärspektren des Tones Fis einer Holzgedackten; von oben nach unten: Pos 1, Pos 2, Pos 3, Pos 5

3.2.2 Nahfeldmessungen

Bei dieser Methode befindet sich der Meßpunkt sehr nah an der Quelle, also einer Öffnung, in diesem Fall dem Labium.

Nahmessungen innerhalb des Hallradius sind in-situ die einzige Möglichkeit, raumunabhängige Signale zu erzeugen. So erhält man Meßsignale, in denen nur die Akustik der Pfeife zum Tragen kommt. Dabei wird der Meßpunkt so nah am Labium gewählt, daß auch das Interferenzfeld, daß durch die beiden Pfeifenöffnungen entsteht, keinen Einfluß auf das Meßsignal hat.

Messungen im Nahfeld sind stark abstandsabhängig und sensibel. Kleinste Ortsveränderungen des Meßpunktes ergeben schon große Änderungen in der Amplitude des Meßsignals. Deswegen ist für eine reproduzierbare Messung die korrekte Positionierung des Meßmikrofons besonders wichtig. Wie in Abb. 3.3 zu sehen, lag der Meßpunkt 3 cm von der unteren Kante des Pfeifenmundes entfernt, mittig unterhalb des Labiums, um das schwingende Luftband nicht zu beeinflussen und ein Aufblasen auf das Mikrophon zu vermeiden.

Die Signale sind für die Hörtests wegen der fehlenden Räumlichkeit und der damit verbundenen Unnatürlichkeit unzulässig.



Abbildung 3.3: Mikrofonanordnung der Nahmessung

3.2.3 Mikrofonpositionen für den Hörversuch

Mikrofonpositionen im Raum wurden gewählt, um die geeigneten Signale für den Hörversuch aufzunehmen. Der Ansatz war, die Klänge verschiedener Raumpunkte im Hörversuch darzubieten, um zu untersuchen, wie stark Klangunterschiede

vom Raum abhängen, bzw. ob gewisse Klangmerkmale über verschiedene Raumpositionen erhalten bleiben.

Die Positionen entsprechen den Punkten, die der Intonateur während seiner Arbeit aufsucht, um die Klänge abzuhören:

- Der Spieltisch, da der Klang wichtig ist, den der Spieler erhält. Dieser Aufnahmeort lag in etwa in Ohrenhöhe des Spielers. Angesichts der kleinen Orgel befindet sich dieser Punkt noch sehr nah an den Pfeifen
- Weitere Punkte in der Nähe der Orgel, z.B. auf beiden Seiten des Balkons
- Punkte in der Raummittle, um den Klang zu prüfen, den das Publikum erhält.

Abb. 3.4 skizziert die Aufnahmeorte im Raum und Tabelle 3.1 gibt eine Beschreibung der verwendeten Mikrofonpositionen.

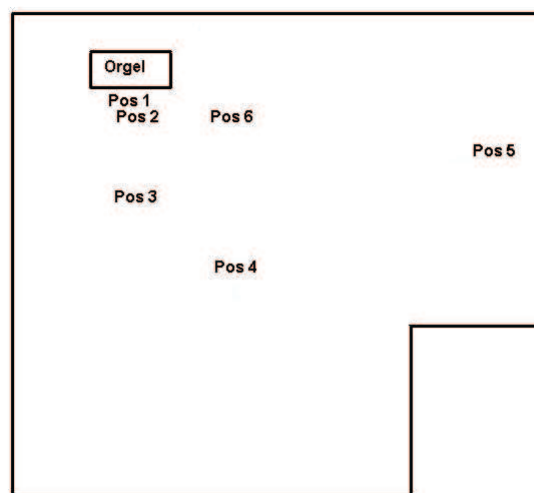


Abbildung 3.4: Grundriß des Kirchensaals mit den Mikrofonpositionen

3.2.4 Reproduzierbarkeit der Klänge

Das Ziel, ein und denselben Klang von unterschiedlichsten Blickwinkeln aufzunehmen, konnte nur bedingt erreicht werden. Da nicht genügend gleichartige Mikrofone samt Speisegeräten und Konditionierverstärkern vorhanden waren, konnte keine gleichzeitige Aufnahme aller Positionen durchgeführt werden. Das Instrument Orgel läßt andererseits keinen exakt reproduzierbaren Ton zu, da die

Pos 1	mono, Nahfeld 3 cm von Labium
Pos 2	stereo, am Spieltisch
Pos 3	stereo, 4 m mittig vor Orgel, 2,2 m Höhe
Pos 4	stereo, mitten in Kirche, 8 m von Orgel, 2,5 m Höhe
Pos 5	stereo, in einer Kirchenecke, 10 m von Orgel, 2,5 m Höhe
Pos 6	stereo, 2 m rechts von der Orgel, 2,5 m Höhe

Tabelle 3.1: Beschreibung der Mikrofonpositionen.

mechanische Traktur auf verschiedene Anschlagstärken reagiert und die Pfeifen härter oder weicher einschwingen läßt.

Man benötigte einen „artificial finger“, der immer denselben Anschlag produziert und machte Versuche mit einem Hilfsgerät für Intonateure, einer ferngesteuerten Anschlagmaschine, die auf das Manual gesetzt wird, siehe Abb. 3.5.

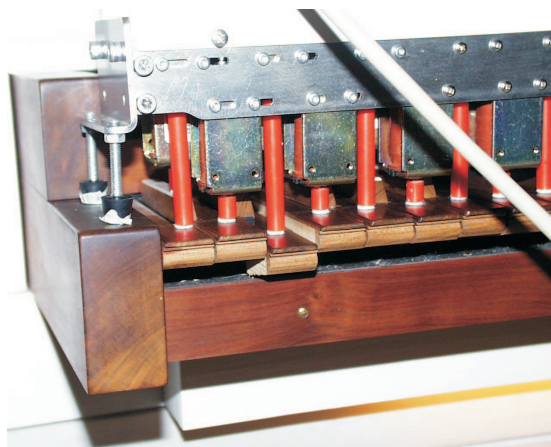


Abbildung 3.5: Anschlagmaschine

Dieses Verfahren zeichnete sich leider auch durch die Erzeugung zusätzlicher Anschlaggeräusche aus. Dies fiel für die Nahaufnahmen nicht störend aus, hinterließ aber in den räumlicheren Positionen deutlich hörbare Fremdgeräusche.

Position 2 bis 6 wurden deswegen per Hand eingespielt, wobei der Spieler gewissenhaft darauf achtete, daß die Anschlagstärke gleich blieb.

Ein weiterer Faktor, der die Reproduzierbarkeit einschränkt, liegt in der Klangerzeugung selbst. Die Strömungsführung im Pfeifenfuß kann zwei verschiedene Zustände annehmen und die Pfeife unterschiedlich einschwingen lassen [2].

3.3 Mikrofonie

Für die Findung der Mikrofonie waren folgende Überlegungen wichtig:

Messung des absoluten Schalldruckpegels Dies ist nur mit einem kalibrierfähigen Meßmikrofon und -system möglich (beschrieben in A). Die Bestimmung des absoluten Schalldruckpegels kann hilfreich bei der späteren Betrachtung der Klänge und beim Vergleich verschiedener Register und verschiedener Orgeln sein.

Übertragungseigenschaften Nur mit dem Einsatz hochlinearer Meßmikrofone kann man den Einfluß des Mikrofons auf das Klangbild minimieren. Dies ist für die objektive Analyse, sowie für die Darbietung der Klänge im Hörversuch erwünscht. Die verwendeten Meßmikrofone sind darüberhinaus sehr empfindlich, was sich bei den geringen Schalldruckpegeln, die von einzelnen Orgelpfeifen ausgehen, positiv ausgewirkt hat.

Stereo-mono Es ist stets das Ziel, daß die abgehörten Klänge auch analysekompatibel sind. Deswegen käme für die Aufnahmen eigentlich nur mono in Frage, weil auch die Analyse nur einen Kanal berücksichtigen kann ³.

Mono-Aufnahmen im Raum sind jedoch, wie in 3.2.1 beschrieben, stark durch Raummoden eingefärbt und abhängig von der Mikrofonposition und vom ertönenden Klang sehr unterschiedlich in Pegel und Spektrum, was das Klangbild sehr unnatürlich erscheinen läßt.

Da aber der erste Schritt im Hörversuch die Detektion der real existierenden Klangunterschiede sein sollte, mußte man zur bestmöglichen Aufnahme- und Wiedergabeform greifen, die ein natürliches Abhören der Originalsituation ermöglicht.

Deswegen ging man zu Stereo-Aufnahmen über, die dem Gehör die 2 kanaligen Signale liefert, die es für eine natürliche Klangempfindung braucht. Es wurde deshalb eine AB-Stereoanordnung zweier Druckempfänger-Meßmikrofone mit Mikrofonbasis von 17 cm, also dem durchschnittlichen Ohrabstand gewählt, so daß zwischen den Kanälen gehörrichtige interaurale Laufzeitdifferenzen vorlagen ⁴ Die Mikrofone wurden beide parallel auf einer Schiene montiert und zeigten bei den Aufnahmen in Richtung Quelle. Abb. 3.6 zeigt die Stereo-Mikrofonanordnung.

³Die Frage, wie der Mensch seine 2 Gehörkanäle auswertet, ist sehr komplex. Es existieren dennoch Stereo-Analysesysteme auf Kunstkopf-Basis. Diese waren aber nicht verfügbar

⁴Es wurden noch andere Stereo-Mikrofoniearten, Kugel-Trennkörperstereofonie und Kunstkopf getestet, die gehörrichtige Laufzeit- und Intensitätsunterschiede erzeugen und vor allem wegen ihrer guten räumlichen Abbildung für Kopfhörerwiedergabe bekannt sind. Gegen diese Techniken sprachen allerdings meßtechnische Gründe, die Tatsache, daß keine Nahfeldmessung und keine Kalibrierung möglich ist.

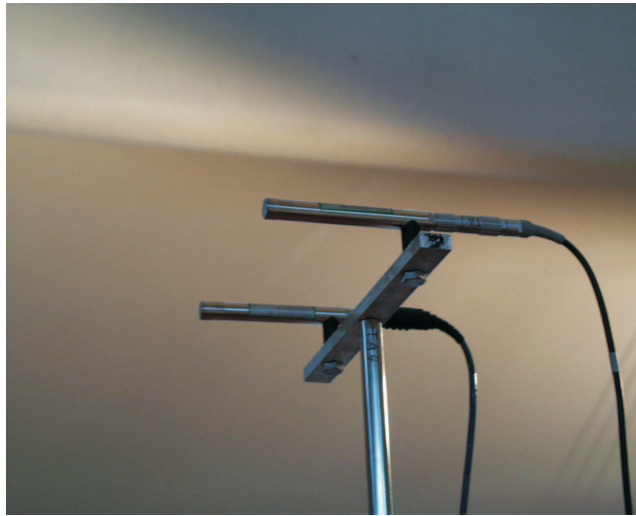


Abbildung 3.6: Stereo-Mikrofonanordnung für die Raummessungen

3.4 Kalibrierung

Hierzu wurde ein definiertes Testsignal von 250 Hz mit dem absoluten Schalldruckpegel $P = 124.1$ dB in definiertem Abstand zum Mikrofon erzeugt. Die hierfür gültigen Werte für Luftdruck, Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit wurden gemessen und waren innerhalb der tolerierten Grenzen. Das Testsignal ist bereits auf den Bezugsschalldruck von $2 * 10^{-5} Pa$ geeicht. Der aufgezeichnete Schallpegel ist von der Verstärkung V am Koditionierverstärker ⁵ abhängig und errechnet sich zu $P + V = 124.1 - 20 = 104.1$ dB

Dieser Wert ist ein Absolutwert, der nun den aufgezeichneten Spannungswerten zugeordnet werden soll. Die Spannungswerte haben ihren Nullpunkt am Vollausschlag der Skala (0 dB, end of scale), und werden als dB Werte mit negativem Vorzeichen angezeigt. Man ermittelt nun mit dem peak-meter in der recording-software den Spitzenwert L des aufgezeichneten Signals. Er liegt bei -3.6 dB. 104.1 dB absoluter Schalldruckpegel entsprechen also -3.6 dB. Daraus ergibt sich für den Vollausschlag der Skala bei 0 dB ein absoluter wert von $104.1 + 3.6 = 107.7$ dB. Nun ist der Kalibriervorgang abgeschlossen. Der berechnete Wert für Vollausschlag L_{eos} wird allgemein so berechnet.

$$L_{eos} = P + V - L[dB] \quad (3.3)$$

⁵Die Verstärkung konnte in 10 dB Schritten geregelt werden, für diesen Fall mußte eine Verstärkung von -20 dB (Dämpfung) eingestellt werden

Alle nun aufgezeichneten Signale kann man in absolutem Schalldruckpegel ausdrücken, indem man ihre (logarithmierten) Amplituden mit L_{eos} addiert.

Für eine Veränderung der Verstärkereinstellung bei der Aufzeichnung muß eine neue Skalierung vorgenommen werden. Dadurch verschiebt sich der Wert für Vollausschlag auf der Skala genau umgekehrt um den Wert der Verstärkung⁶.

3.5 Reproduktion der Originallautstärke

Für den Hörversuch sollte die Reproduktion der Originallautstärke des Schallerignisses am Ohr der Testperson erfolgen. Lautstärkeveränderungen verändern die Klänge, denn man verschiebt das Signal in einen anderen Empfindlichkeitsbereich des Gehörs, der eine andere spektrale Bewertung des Schalles verursacht.

Eine Messung der erzeugten Lautstärke durch den Kopfhörer am Trommelfell der Testperson war nicht durchführbar. Daher wurde dieser Abgleich subjektiv, durch Vergleich der Originallautstärke mit dem aufgenommenen Kopfhörersignal, das von der Aufnahme-Wiedergabekette produziert wird, vor Ort vorgenommen.

⁶Für die Meßpunkte im Raum (Pos 2 - Pos 6) wurde die Verstärkung um 20 dB erhöht, so daß mit einem Wert von $107.7 - 20 = 87.7$ dB für Vollausschlag gerechnet wurde.

4 Signalanalyse

Dieses Kapitel behandelt die objektive Analyse der aufgenommenen Signale auf Basis der Fourier Transformation.

Die aufgenommenen Signale sind Spannungswerte, die den Druckwerten der detektierten Schallwellen entsprechen. Sie liegen durch die A/D Umsetzung in digitaler Form vor. Damit ist die Möglichkeit der diskreten Signalverarbeitung mittels eines Rechners gegeben.

Als Umgebung für die Verarbeitungsschritte diente das mathematische Programmpaket „MATLAB“¹, das viele relevante Routinen beinhaltet (Signal Processing Toolbox) und eigene Programmierung zuläßt.

4.1 Zeitsignal

Die .wav Datei beinhaltet die diskrete Zeitfunktion des aufgenommenen Klages. Sie ist in Abb. 4.1 dargestellt. Es sind die 3 wichtigen Signalabschnitte gekennzeichnet.

- Einschwingvorgang. Hier ist das Signal als transient² einzustufen.
- Stationärklang. Aufgrund der periodischen Klangerzeugung hat das Signal ein hohes Maß an Periodizität, aber auch nichtperiodische Anteile.
- Ausschwingvorgang. Dieser Klangabschnitt ist für die Beurteilung des Klangcharakters bei Instrumenten, die einen stationären Klang besitzen, unwichtig [1] und wird deshalb nicht weiter untersucht. Der Ausschwingvorgang wird meistens vollständig durch die Raumantwort überdeckt.

4.2 Analysealgorithmen

4.2.1 DFT und FFT

Nach Gleichung 4.1 läßt sich eine diskrete periodische Funktion $x[n]$ der Länge N mittels N -Punkte-DFT in eine diskrete Funktion $X[k]$, ebenfalls mit der Länge N überführen.

¹Produkt der Firma The MathWorks, Inc, Version 6

²transiente Signale sind endliche, nichtperiodische Signale

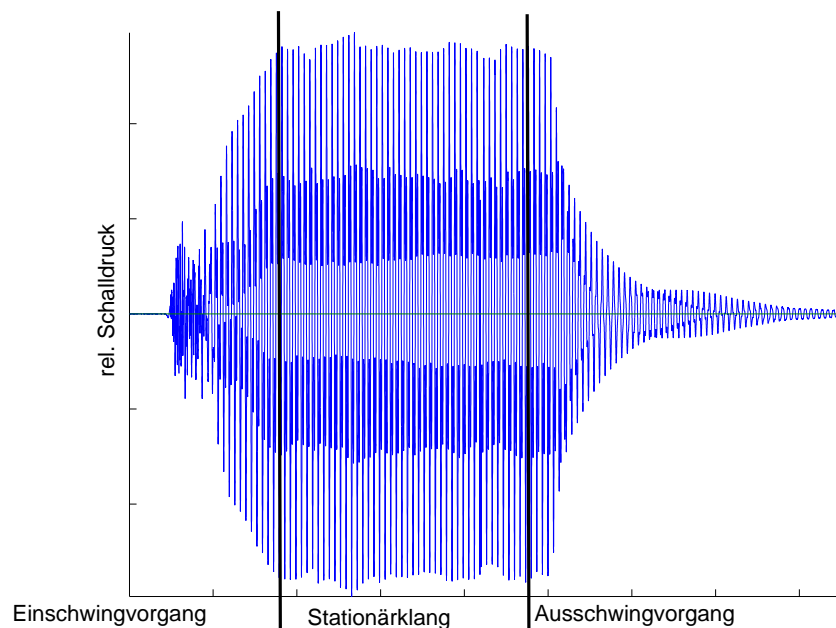


Abbildung 4.1: Zeitdarstellung eines Lippenorgelpfeifenklanges

$$X_p[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x_p[n] e^{-j(2\pi/N)kn} \quad (4.1)$$

$$n = 0, 1, 2 \dots N - 1$$

$$k = 0, 1, 2 \dots N - 1$$

Durch die diskrete Fourier-Transformation wird $x_p[n]$, wenn im Zeitbereich gegeben, zu einer Funktion der Frequenz $X_p[k]$ mit ganzzahligen Werten k . $X_p[k]$ enthält dabei nur die Beiträge, die Vielfache der Grundfrequenz von $x_p[n]$, einschließlich des Beitrags bei $k=0$, sind [9].

Der Index p steht dabei für periodisch, beide Funktionen sind unendlich periodisch mit der Periode N . Daher liefert schon eine Periode, das Basisintervall, genügend Information um die Funktion vollständig zu beschreiben. Da im Realfall keine absolut periodischen und unendlichen Signale existieren, unterliegt die Analyse realer Signale mittels DFT stets Fehlern.

Mittels der FFT³ wird unter verringertem Rechenaufwand die DFT erstellt. Wie später noch gezeigt wird, sind im hier verwendeten FFT-Algorithmus für N nur ganzzahlige Potenzen von 2 gemäß $N = 2^M$ zulässig.

³Fast Fourier Transform, Algorithmus zur schnellen Berechnung der DFT [9]

Frequenzauflösung

Der Abstand der Frequenzwerte von $X[k]$ ist $\Delta f = f_s/N$ (wobei f_s : Abtastrate) und nimmt bei größer werdendem N ab, was eine höhere Frequenzauflösung der DFT bedeutet.

In Tabelle 4.1 kann man sehen, daß man bei der DFT einen Kompromiß aus ihrer Länge N und damit der Meßzeit und ihrer Frequenzauflösung eingehen muß.

N [samples]	Δf [Hz]
256	172.27
512	86.13
1024	43.07
2048	21.53
...	...
65536	0.67

Tabelle 4.1: Zusammenhang zwischen der FFT-Länge N und deren Frequenzauflösung bei einer Abtastrate von 44100 Hz

Skalierung und Darstellung

Da das Ergebnis der Transformation nach 4.1 komplex ist, muß zuerst der Absolutbetrag $|X(k)| = \sqrt{Re^2 + Im^2}$ gebildet werden, wodurch man das interessierende Amplitudenbetragsspektrum erhält. Dieses Spektrum ist achsensymmetrisch zur halben Abtastrate $f_s/2$. Der interessierende Bereich enthält demnach die nach dem Abtasttheorem gültigen Frequenzen, die kleiner sind als $f_s/2$.

Die Amplitudendarstellung erfolgt als Schalldruckpegel in dB, was einen ersten gehörmässigen Verarbeitungsschritt darstellt, weil die logarithmische Skalierung eher dem menschliche Lautstärkeempfinden entspricht. Zur Darstellung in absolutem Schalldruckpegel werden die dB Werte auf den Vollausschlag, der aus der Kalibrierung (siehe 3.4) hervorgeht, bezogen.

4.2.2 FFT mit laufendem Zeitfenster

Die Erstellung zeitabhängiger Spektren, sog. „Spektrogramme“, wird mit Hilfe eines „sliding window“ bewerkstelligt (MATLAB Funktion „specgram“) [10]. Durch diese Form von Zeit-Frequenz-Amplitudendarstellung kann man das zeitliche Verhalten des Klanges, insbesondere im Einschwingvorgang verfolgen.

Der Algorithmus heißt „laufendes Zeitfenster“ weil er das Signal in zeitlich versetzte Signalabschnitte, Zeitfenster, zerteilt, die sich überlappen können.

Auf jedes dieser Zeitfenster wird eine FFT berechnet. Die Zeitauflösung hängt

von der FFT-Länge ab, denn kürzere Zeitfenster detektieren auch kürzere zeitliche Änderungen. Man geht daher zur STFT („Short Time Fourier Transform“) über.

Overlap Der „Overlap“ legt dabei die Größe des überlappenden Bereichs der Zeitfenster fest. Die „Sprungweite“ ist das Zeitintervall, um das die Zeitfenster zueinander versetzt sind und berechnet sich aus $N - \text{Overlap}$.

Ein größerer overlap bei gleichbleibender FFT-Länge bedeutet eine Glättung der Kurven und kürzere Zeitsprünge. Es werden mehr Spektren pro Zeit erstellt, die allerdings immer ähnlichere Werte aufweisen, weil die Zeitfenster immer weiter zusammen liegen.

4.2.3 Synchronisation auf die Grundfrequenz

Die Frequenzauflösung einer STFT mit $N=512$ liegt bei der ursprünglichen Abtastrate von 44100 Hz bei 86.13 Hz. Dieser große Frequenzabstand bietet nur noch eine schlechte Detektion der schmalbandigen Teiltöne, die jedoch Hauptbestandteil des Klanges sind.

Um dies zu ändern, nutzt man die Eigenschaften der Fourier Transformation für periodische Signale aus. Demnach enthält das Frequenzspektrum einer periodischen Zeitfunktion mit Periode N nur ganzzahlig vielfache Anteile der Grundfrequenz. Wenn die durch die FFT möglichen Spektrallinien genau mit den Teiltönen des Klanges koinzidieren, spricht man von Synchronisation. Man paßt die Grundfrequenz-Periodendauer und die Zeitfensterlänge N einander an. Dies kann durch variable FFT-Länge, die genau einer und mehrerer Periodenlängen entspricht, erreicht werden, oder durch eine Veränderung der Abtastrate des Originalsignals. Die zweite Variante („resampling“) wird hier benutzt, da sie eine leichtere Weiterverarbeitung der Frequenzfunktion zuläßt. Die Abtastrate f_s wird soweit verändert, daß eine oder mehrere Perioden des Signals genau in einen Zeitausschnitt der Länge N passen. Dieser Ansatz vermeidet bei ideal periodischen Signalen die sog. „Leckeffekte“ oder „spektrale Diffusion“ (siehe [9])⁴.

Unsynchronisierter Fall Abb. 4.2 (oben) zeigt die Zeitfunktion mit $N = 512$ Samplewerten eines synthetisch erzeugten periodischen Testtons mit mehreren

⁴Ein endlicher, durch ein Fenster ausgeschnittener Signalabschnitt entspricht im Frequenzbereich der (zirkulären) Faltung der DFT des nun periodischen Signalausschnitts mit der DFT der Fensterfunktion. Bei Synchronisation ist das Ergebnis korrekt, weil sich der Signalausschnitt zu einer vollkommen periodischen Funktion zusammensetzen läßt und das Ergebnis identisch mit der Transformation einer unendlich periodischen Funktion ist. Im unsynchronisierten Fall entstehen dagegen Sprungstellen, die sich im Spektrum als nichtharmonische Frequenzen bemerkbar machen und nach der Faltung eine „verschmierte“ Version des Spektrums liefern.

harmonischen Teiltönen und 1000 Hz Grundfrequenz in der Originalabtastrate. Man erkennt, daß der Ausschnitt keine gerade Anzahl an Perioden beinhaltet. Die zugehörige Frequenzfunktion (unten) unterliegt Leckeffekten. Sie trifft die Teiltöne nicht genau. Dadurch sind mehrere Frequenzlinien, sog. „bins“, in der Nähe der Teiltöne ungleich Null, und die Amplitude der Teiltöne wird nicht korrekt detektiert.

Synchronisierter Fall Abb. 4.3 (oben) zeigt die Zeitfunktion des gleichen Testtons nach dem resampling. Nun passen exakt 8 Perioden in den 512 Samples langen Zeitausschnitt. Dadurch sind in der Frequenzfunktion (unten) die nichtharmonischen bins Null und die harmonischen bins detektieren die Teiltöne exakt. Diese Methode ist für Orgelklänge gut geeignet, da ihre (stationären) Signale ein hohes Maß an Periodizität aufweisen. Sobald größere Modulationen in der Grundfrequenz auftreten, wie bei anderen Musikinstrumenten, läßt sich auch keine genaue Synchronisation mehr erreichen.

4.2.4 Frequenzmessung

Um die neue Abtastrate zu bestimmen, muß erst die Grundfrequenz bestimmt werden.

Es wurde eine Grundfrequenzmessung mittels FFT implementiert (MATLAB Funktion „freqmes“ siehe B.3). Hier wird zuerst die Abtastrate eines stationären Ausschnitts des Signals soweit heruntergesetzt, daß nur noch ein schmales Band um die Grundfrequenz existiert. Auf dieses Band läßt sich nun, vorausgesetzt der Signalausschnitt ist lang genug, eine FFT großer Länge berechnen (z.B. $2^{16} = 65536$).

Danach wird das Maximum in der Frequenzfunktion gesucht, das die Grundtonfrequenz f_G darstellt⁵ Die Frequenzauflösung ergibt sich aus dem Quotienten aus neuer samplerate /FFT Länge. Eine Genauigkeit von $0.01f_G$ wurde akzeptiert.

4.2.5 Resampling

Man erhält die neue Abtastrate f_r indem man die Anzahl der Samples pro Grundfrequenz-Periode P als ganzzahligen Teiler von N wählt und so jede N/P-te Frequenz der FFT auf eine Vielfache der Grundfrequenz triggert.

Beispiel: Die FFT-Länge N ist 512. Um 8 Perioden in ein Zeitfenster einzupassen, soll jede Periode 64 Samples umfassen. Dadurch ergibt sich im Frequenzbereich,

⁵Eine Fehlerquelle ist die Wahrscheinlichkeit, daß höhere Teiltöne eine größere Amplitude als der Grundton aufweisen und als Maximum detektiert werden. Dies läßt sich aber aufgrund der ungefähren Kenntnis der Tonhöhe korrigieren.

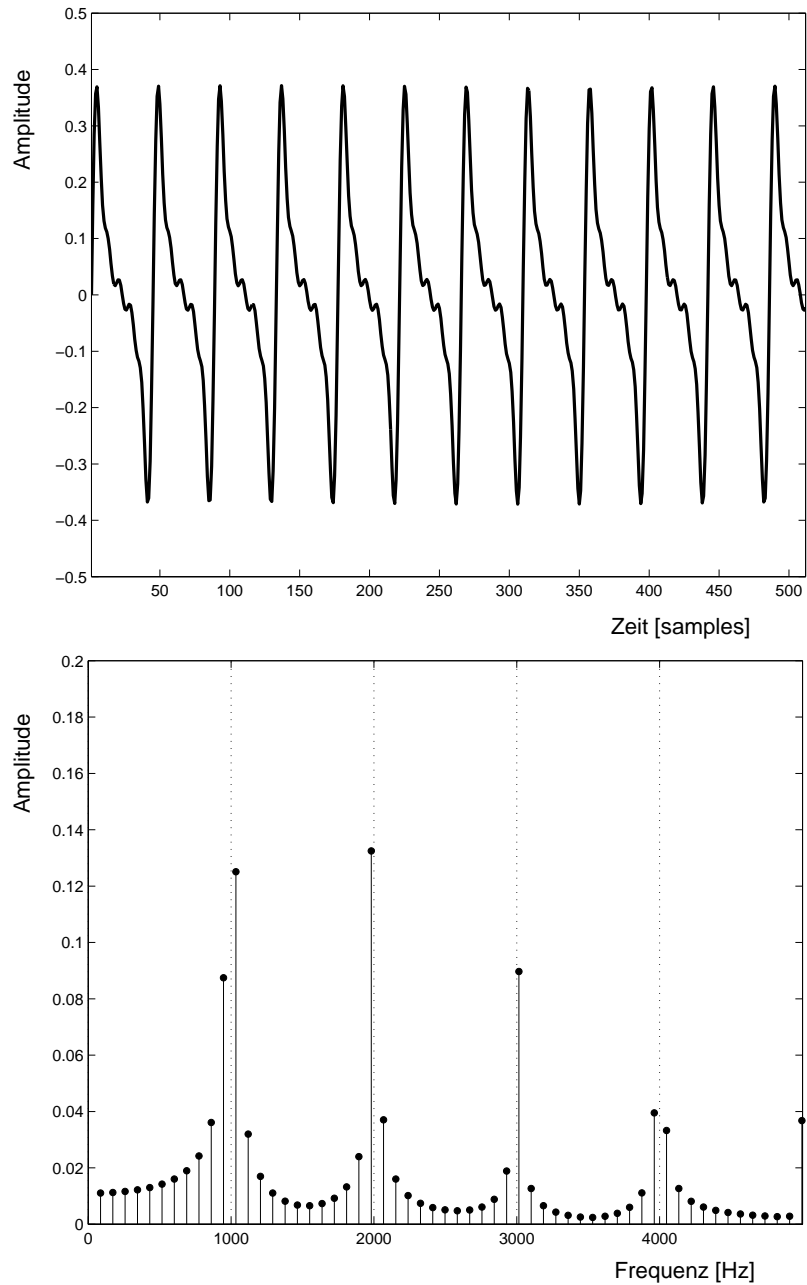


Abbildung 4.2: Zeitfunktion und Ausschnitt aus der Frequenzfunktion eines Testtons mit Grundtonfrequenz 1000 Hz und mehreren Teiltönen @44100 Hz; N=512

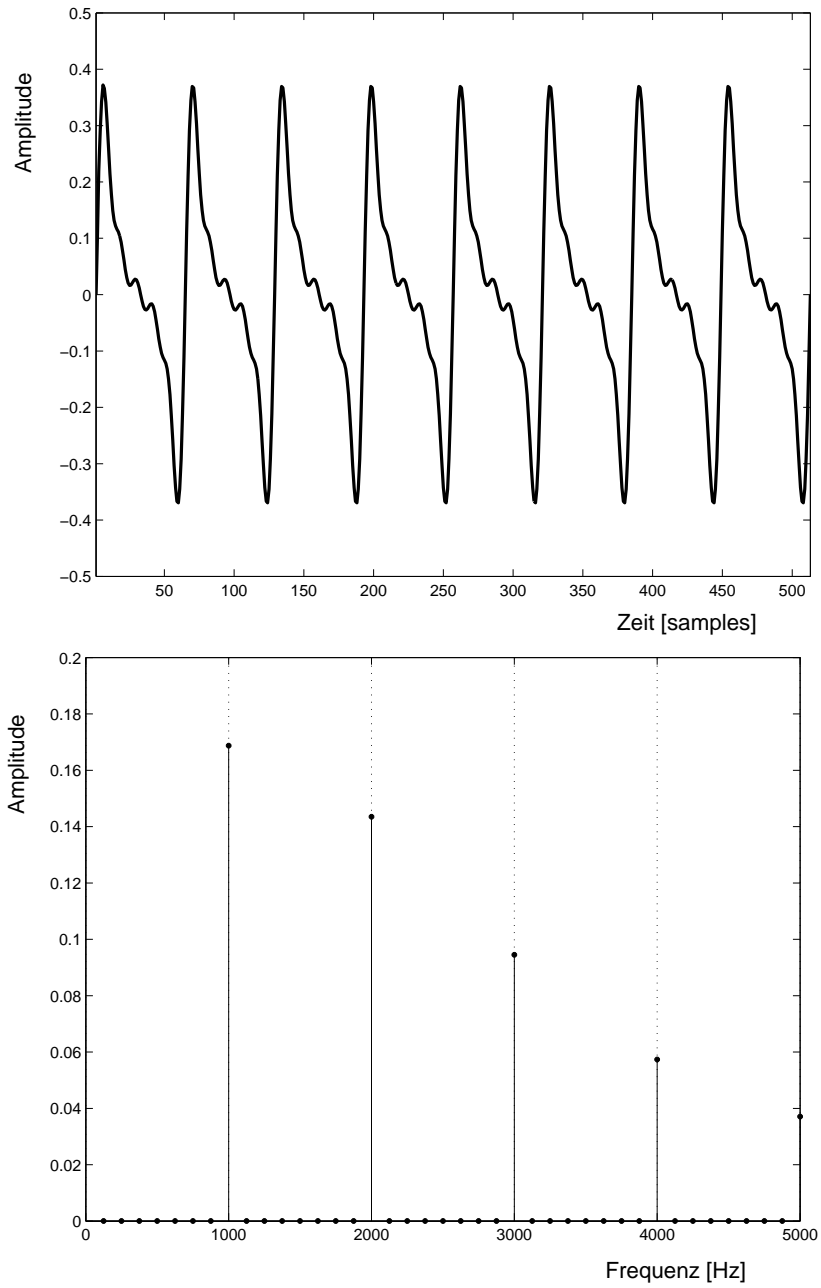


Abbildung 4.3: Zeitfunktion und Ausschnitt aus der Frequenzfunktion eines Testtons mit Grundtonfrequenz 1000 Hz und mehreren Teiltönen nach resampling @64000 Hz; N=512

daß die 1. FFT-Frequenz dem Gleichanteil und die 9. dem ersten Teilton (Grundton), die 17. dem 2. Teilton usw. entspricht. Zwischen den auf die Teiltöne synchronisierten FFT-Frequenzen erhält man so noch 7 weitere Werte, die Auskunft über nichtharmonische Anteile geben.

f_r wird hier also folgendermaßen berechnet:

$$f_r = f_G * 64 \quad (4.2)$$

In 4.2 sind die Grundfrequenzen und neuen Samplingraten der untersuchten Pfeifenklänge aufgeführt. Aus der Abtastratenänderung folgt, daß bei aufsteigender Grundtonhöhe die Zeitfenster nun nicht mehr die selben absoluten Zeitlängen haben, und damit die Zeitauflösung für tiefe Grundtonfrequenzen schlechter wird, was in Kauf genommen wurde, da hier auch die Einschwingzeiten länger werden. Zur Abtastratenkonversion wird die MATLAB-Standardfunktion „resample“ [11] verwendet, die einen anti-aliasing Filter benutzt und keine spürbaren Artefakte hinterläßt.

4.2.6 Fensterfunktion

Wie schon in 4.2.3 gesehen, treten bei der synchronisierten Transformation endlicher Ausschnitte periodischer Signale keine Leckeffekte auf. Das bloße Abschneiden eines Signalausschnitts entspricht einer Fensterung mit einem Rechteckfenster. Reale Orgelklänge enthalten jedoch auch nichtharmonische Anteile, die wiederum zu Leckeffekten führen können.

Dem kann durch spezielle Fensterfunktionen, sog. „smoothing windows“, entgegengewirkt werden. Im Gegensatz zum Rechteckfenster werden die Samplewerte des Signals an den beiden Enden des Abschnitts mit einer geeigneten Funktion nach Null heruntergeführt. Dadurch werden bei der Periodisierung durch die Transformation Sprungstellen und Leckeffekte verhindert.

Da bei der Fensterung die transformierte Signalfunktion mit der transformierten Fensterfunktion gefaltet wird, bringt die Charakteristik der Fensterfunktion im Frequenzbereich eine Abweichung von der Fensterung per Rechteckfenster mit. Jede Fensterfunktion hat andere Eigenschaften (siehe [12]). Wichtige Parameter sind die Breite der Hauptkeule, die die Frequenzselektivität vorgibt, sowie die Nebenzipfeldämpfung.

Hier wurde ein Hanning-Fenster der Länge N eingesetzt, seine Beschreibungsformel lautet:

$$w(n) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \right], 0 \leq n \leq N-1 \quad (4.3)$$

Es zeichnet sich durch eine hohe Nebenzipfeldämpfung und eine größere Abfallrate der Nebenzipfel bei gleichzeitiger spektraler Verbreiterung des Hauptzip-

fels gegenüber dem Rechteckfenster um den Faktor 2 aus. Dadurch ergibt sich im Frequenzbereich eine schlechtere Selektivität.

Abbildung 4.4 vergleicht die Frequenzfunktionen mit Rechteckfenster und Hanning-Fenster. Man erkennt die Verbreiterung durch das Hanning-Fenster. Zum Hauptmaximum kommen 2 Nebenmaxima hinzu, die ebenfalls die harmonische Teiltonfrequenz detektieren.

Die Entstehung der Nebenmaxima hat aber auch einen Vorteil. Man kann die Güte der Synchronisation testen, indem man die Werte der Nebenmaxima bei einem unmodulierten stationären Teilton vergleicht⁶. Sind sie symmetrisch gleich, dann erfaßt das Hauptmaximum exakt die Teiltonfrequenz.

4.3 Analyseparameter

Im Folgenden wird die Umsetzung der gezeigten Analysealgorithmen auf die zu untersuchenden Signale behandelt. Dadurch wird für jedes Signal eine Datenmatrix erzeugt, die zur weiteren Untersuchung der Klänge und Extraktion von objektiven Parametern geeignet ist.

Vorher müssen die Signale noch einander angepaßt werden. Sie wurden so geschnitten, daß sich der Beginn des Klangs ungefähr im Bereich des 10.000ten sample befindet (bei $f_s = 44100$). Das Analyseintervall wurde bis zu sample 55000 gewählt, um ca. 1s des Klangs zu detektieren, was den Einschwingvorgang und einen genügend langen Anteil des Stationärklanges beinhaltet.

Tabelle 4.2 zeigt neben den Grundfrequenzen und neuen Abstraten auch die Anzahl der Zeitfenster sowie die Sprungweite für 10 aufgenommene Klänge.

Der beste Kompromiß aus Zeit- und Frequenzauflösung war bei einer FFT-Länge von 512 gegeben. Der overlap sollte mit 500 hoch eingestellt werden, um eine kurze Sprungweite von 12 samples, also je nach Abtastrate mindestens 2,4 [ms] zu erzielen, um eine genaue zeitliche Abbildung zu gewährleisten.

⁶Der Grundton erfüllt in den meisten Messungen diese Voraussetzung.

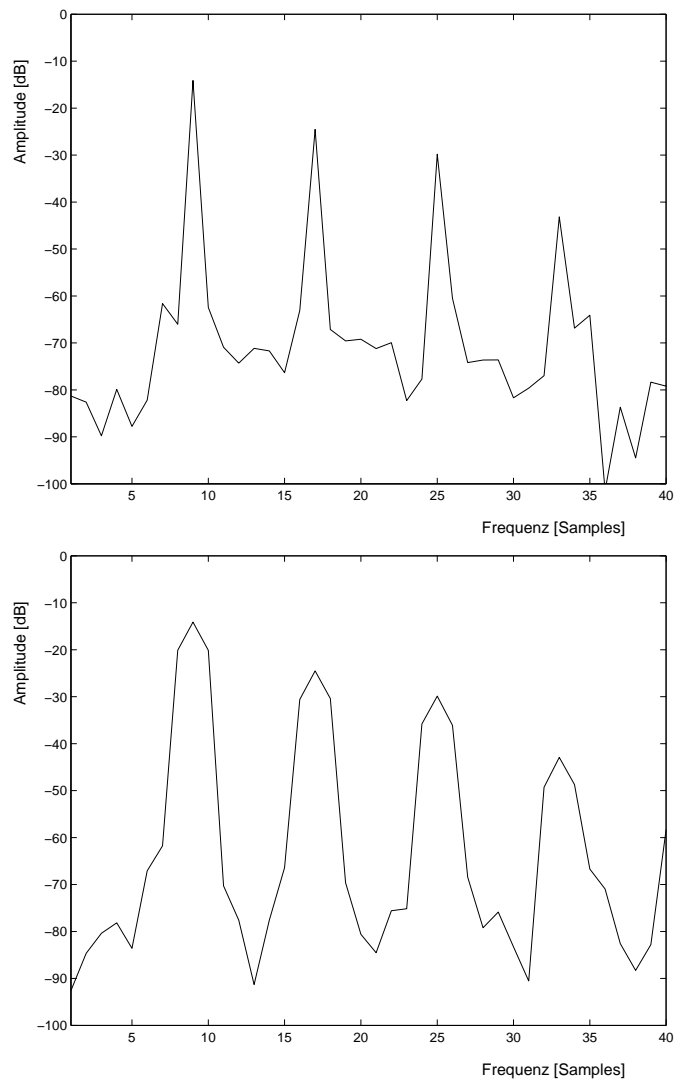


Abbildung 4.4: Ausschnitt aus der FFT eines Zeitfensters des Tons A einer offenen Metallpfeife. oben: mit Rechteckfenster, unten: mit Hanning-Fenster

Ton	Grundfrequenz [Hz]	f_r [Hz]	Anzahl Zeitfenster	Sprungweite [ms]
Dis	78.05	4996	477	2.402
E	82.50	5280	507	2.273
F	88.03	5634	543	2.130
Fis	92.18	5900	571	2.034
G	98.34	6294	612	1.907
Gis	103.65	6634	647	1.809
A	109.85	7030	689	1.707
Ais	116.57	7460	733	1.609
H	123.06	7876	776	1.524
c	130.83	8372	828	1.433

Tabelle 4.2: Grundfrequenzen, neue Samplingraten f_r , Anzahl der Zeitfenster im Analyseabschnitt und Sprungweite für 10 aufgenommene Klänge. Analyseintervall: 55000 samples @ 44100 Hz, FFT-Länge 512, overlap 500

4.4 Analysematrizen

Durch diese Analyseschritte gewinnt man den Datensatz, den man als Spektrogramm darstellen kann. Es handelt sich um eine Amplitudenbetrags-Matrix mit den Elementen $X_{i,j}$, wie Abbildung 4.5 zeigt. Dabei wird zunächst die lineare Betragsmatrix gebildet und anschließend die logarithmische Betragsmatrix mit dem Bezug auf den absoluten Schalldruckpegel gemäß 6.2.2.

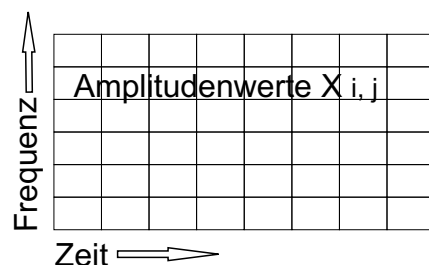


Abbildung 4.5: Analysematrix

Abb. 4.6 (oben) ist die 3-dimensionale Darstellung („surface plot“) der Matrix. Stellt man die Matrix nur 2 dimensional dar, erhält man die „Sonogramm“ Darstellungsweise wie in Bild 4.6 (unten) gezeigt.

4.4.1 Harmonische Untermatrix

Durch die Synchronisation sind die Reihen der Matrix, die auf die Teiltöne fallen immer im gleichen Abstand. Diese „harmonischen“ Frequenzreihen werden

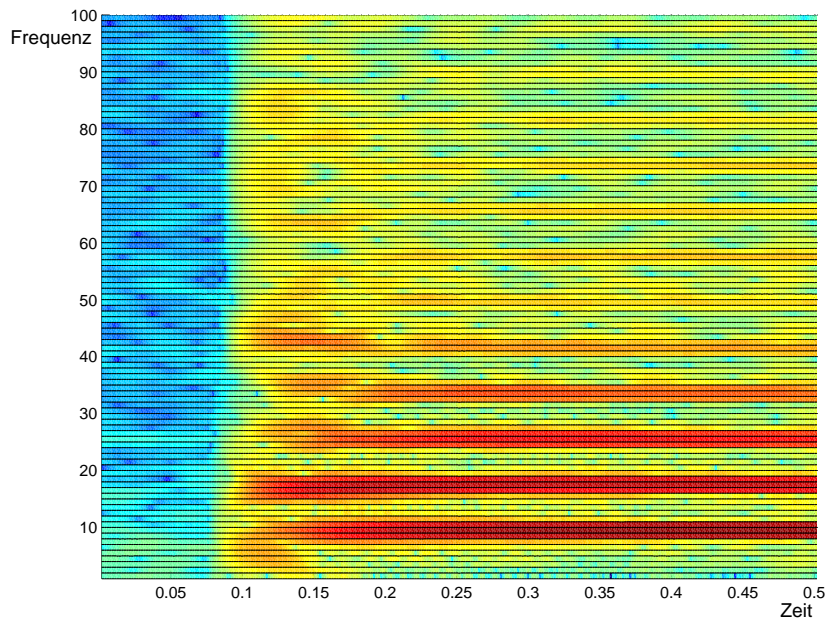
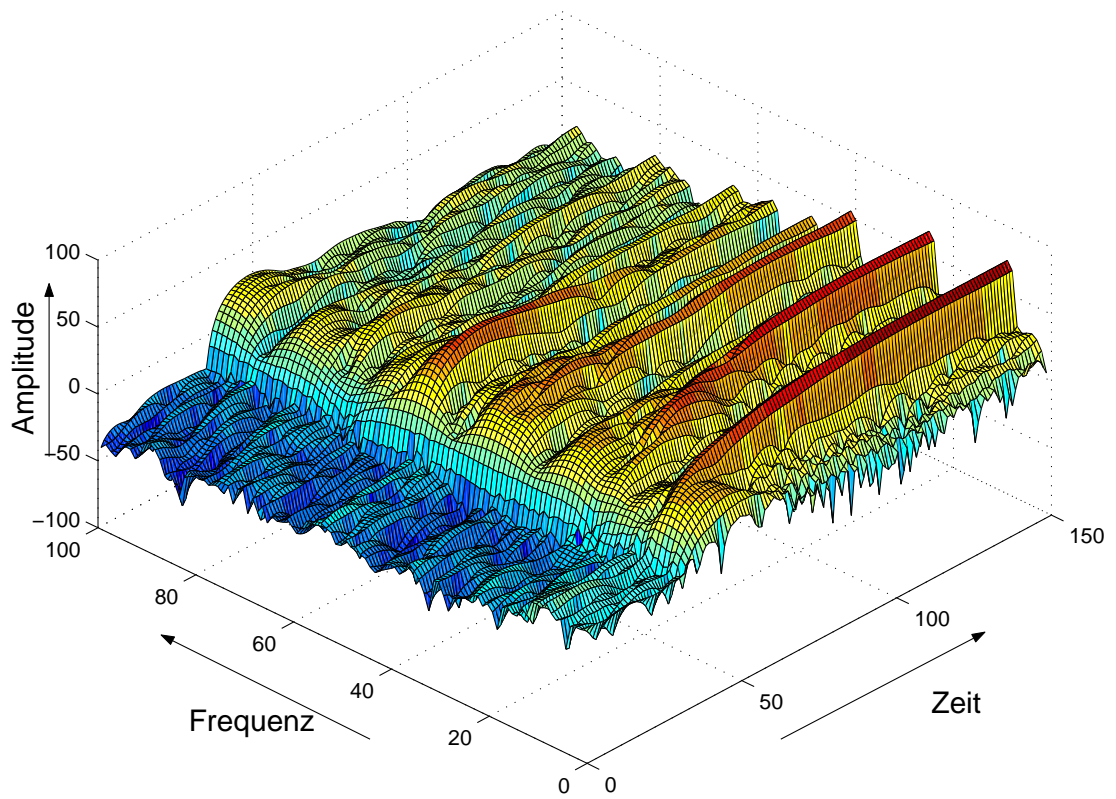


Abbildung 4.6: Zeit-Frequenz-Amplitudendarstellung des Klanges einer offenen Lippenorgelpfeife; oben: surface plot mit amplitudencodierten Farbwerten; unten: Sonogramm mit amplitudencodierten Farbwerten wie oben

selektiert und daraus eine neue Matrix aufgebaut (siehe MATLAB-Funktion „harmonics“ B.2). Stellt man sie dreidimensional dar, erhält man die Zeitfunktionen der Werte auf den Teiltonfrequenzen, was in Abb. 4.7 für den Einschwingvorgang und 9 Teiltonfrequenzen gezeigt ist.

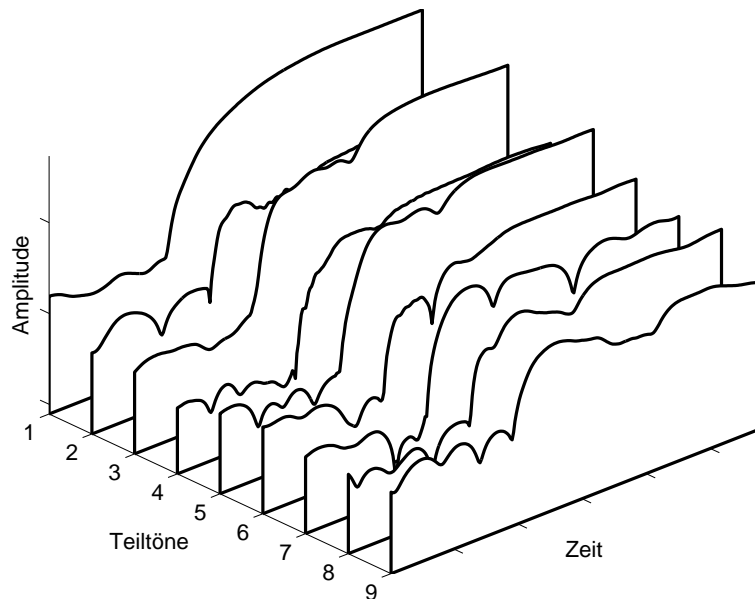


Abbildung 4.7: Zeitlicher Aufbau der ersten 9 Teiltöne einer gedackten Lippenorgelpfeife, gemessen im Nahfeld

4.4.2 Residualmatrix

Sie enthält nur noch die nichtharmonischen Elemente der ursprünglichen Matrix. Sie wird gebildet, indem man die harmonischen Reihenvektoren samt ihrer 2 Nebenreihen aus der ursprünglichen Matrix eliminiert (siehe MATLAB-Funktion „rhn“ B.6).

5 Objektive Größen

Die erstellten Datensätze sollen nun weiterverarbeitet werden um objektive Klangmerkmale zu extrahieren, die auch die Aufstellung numerischer Größen ermöglicht.

Dabei ist der Unterschied zwischen den gedackten Holzpfeifen und offenen Metallpfeifen Ausgangspunkt der Untersuchungen.

5.1 Lautstärke

Da die Lautstärke der Klänge nicht konstant ist, muß sie bestimmt werden, um ihren Einfluß und ihre Wechselwirkung mit den eigentlichen Klangparametern zu untersuchen.

Hier wurde als Meßgröße der Effektivwert des absoluten, A-bewerteten Schalldruckpegels eines Abschnitts im stationären Bereich des Signals berechnet (siehe MATLAB-Funktion „SPLeff“ in B.1).

Es wurde die A-Filterkurve nach ISO-Norm verwendet ¹. Die berechnete Größe ist für die Wahrnehmung nur annähernd aussagekräftig, da die Frequenzbewertung durch das A-Filter streng genommen nur für schmalbandige Signale des Lautstärkepegels 40 phon gilt. Auch die binauralen Effekte, die beim Hören auftreten, werden wegen ihrer Komplexität hier nicht berücksichtigt.

5.2 Stationäre Amplituden der Teiltöne

Die stationären Teiltonamplituden sollen bestimmt werden, um die Dominanz einzelner Teiltöne nachzuweisen. Einem analytischen Hörer ist das isolierte Hören der Teiltöne möglich. Die Teiltöne werden nach ihrem Intervallabstand zum Grundton benannt. Tabelle 5.1 zeigt diesen Zusammenhang für die relevanten ersten 7 Teiltöne. Dabei verschmelzen die Oktavtöne in der Wahrnehmung miteinander, Quint, Terz und Septime können jedoch herausgehört werden. Die Verteilung der Teiltonamplituden spielt eine Rolle bei der subjektiven Bewertung der „Homogenität“ und „Ausgewogenheit“ des Klanges.

Um die Teiltonamplituden zu bestimmen, wurde die harmonische Untermatrix der unbewerteten (linearen) Signale herangezogen und es wurde über schon zum

¹Die Implementierung in Matlab erfolgte über das Design des analogen A-Filters durch seine bekannten Kennwerte und eine anschließende Bilineartransformation, die die digitalen Filterkoeffizienten liefert

Teilton Nr.	Teiltonname
1	Grundton
2	1. Oktav
3	Quint
4	2. Oktav
5	Terz
6	3. Oktav
7	Septim

Tabelle 5.1: Benennung der Teiltöne

Stationärsignal gehörende Zeitfenster des Analyseintervalls der (Reihen-)Mittelwert gebildet (MATLAB Funktion „harmoamp“ siehe B.7).

Für Holz gedackt und Metall offen ergeben sich die bekannten Unterschiede, wie Abbildungen 5.1 und 5.2 zeigen.

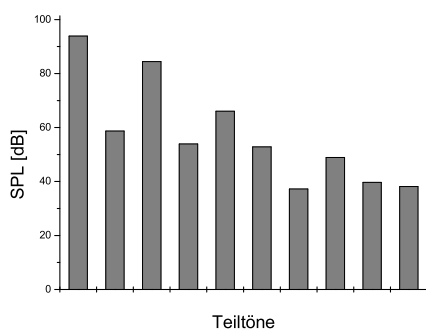


Abbildung 5.1: Stationäre Teiltonamplituden Ton G, Holz gedackt

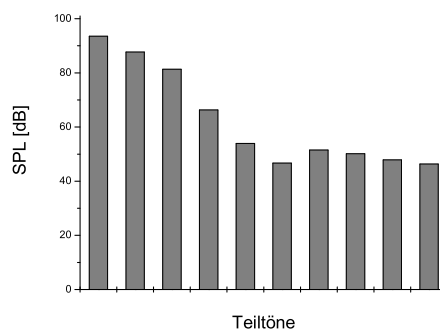


Abbildung 5.2: Stationäre Teiltonamplituden Ton Gis, Metall offen

5.3 Einschwingverhalten der Teiltöne

Das dynamische Verhalten der Teiltöne im Einschwingvorgang kann aus der Darstellung der harmonischen Matrix betrachtet werden. Es hat sich gezeigt, daß dies nur für die Signale aus der Nahmessung (Pos 1) sinnvoll ist. Die Signale aus den anderen Mikrofonpositionen weisen deutliche Modulationen auf, die durch Überlagerung mit Raumreflexionen oder mit Emissionen der anderen Pfeifenöffnung entstehen. Dadurch sind keine aussagekräftigen Analysen zum Einschwingvorgang der Pfeife mehr möglich. Abb. 5.3 und 5.4 zeigt die Einschwingvorgänge an der Übergangsstelle für die Nahmessung.

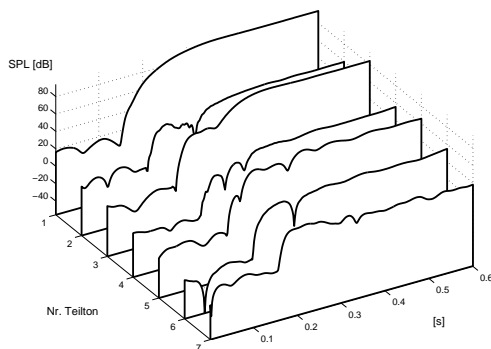


Abbildung 5.3: Einschwingvorgang Ton G, Holz gedackt

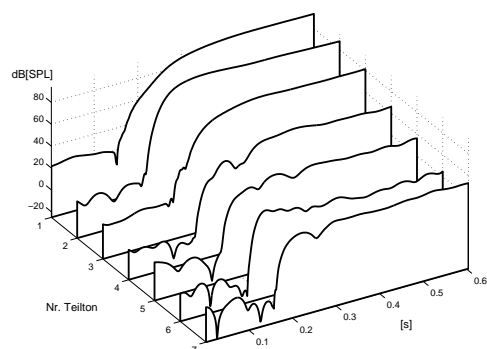


Abbildung 5.4: Einschwingvorgang Ton Gis, Metall offen

Die Amplituden der Holzgedackten steigen nicht wie bei Metall offen gleichmäßig auf stationäres Niveau, sondern zeichnen sich durch einen leichten „Vor-buckel“ aus.

Bei den offenen Pfeifen ist zu sehen, daß der 2. Teilton sehr früh und schnell auf maximale Amplitude steigt.

Abbildung 5.5 gibt für den selben Klang eine 2D Darstellung der ersten 7 Teiltöne und ihre Vergrößerung wieder. Man kann ihr anschaulich entnehmen, in welcher Reihenfolge die Teiltöne starten und welche zeitliche Streuung sie aufweisen.

5.4 Frequenzschwerpunkt

Der Frequenzschwerpunkt oder *centroid* ist ein Maß für die Balance aus tiefen und hohen Frequenzanteilen und wird folgendermaßen berechnet:

$$c = \frac{\sum_{k=1}^K k S_k}{\sum_{k=1}^K S_k} \quad (5.1)$$

wobei S_k k spektrale Amplitudenwerte darstellen.

Die Größe entspricht einer Frequenz, genauer dem amplitudengewichteten Frequenzmittelwert (Schwerpunkt) des Spektrums.

Ausgangssignale zur Berechnung sind die A-gefilterten Signale, da sie wiederum eine näherungsweise gehörrichtige spektrale Bewertung beinhalten.

Centroidspec Aus der Analysematrix kann man das centroid berechnen, indem man für S_k die Amplitudenwerte jeder Zeitspalte einsetzt. Damit erhält man zunächst einen zeitabhängigen centroid-Vektor, der das dynamische Verhalten dieses Parameters widerspiegelt, wie Abb. 5.6 zeigt.

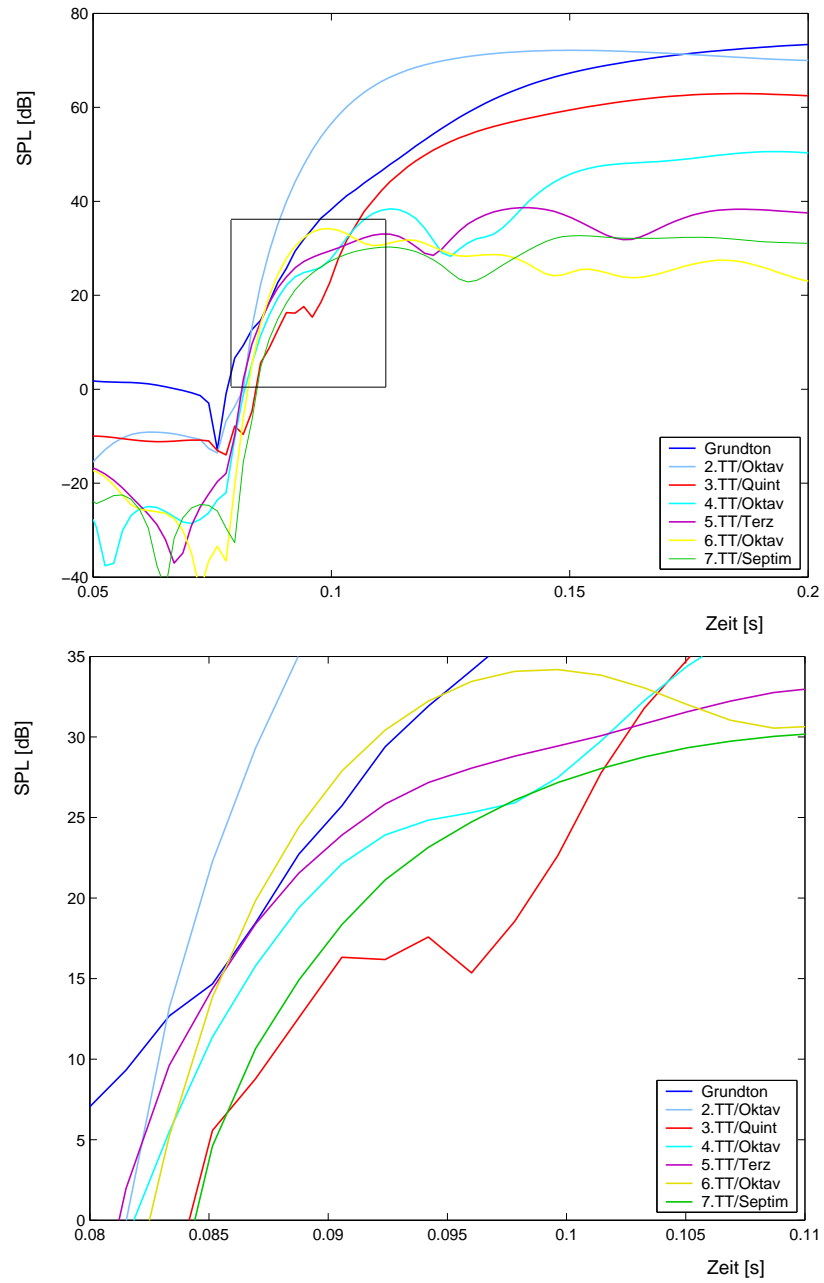


Abbildung 5.5: Einschwingverhalten der ersten 7 Teiltöne, Ton Gis, Metall offen;
 unten: angezeigter vergrößerter Ausschnitt

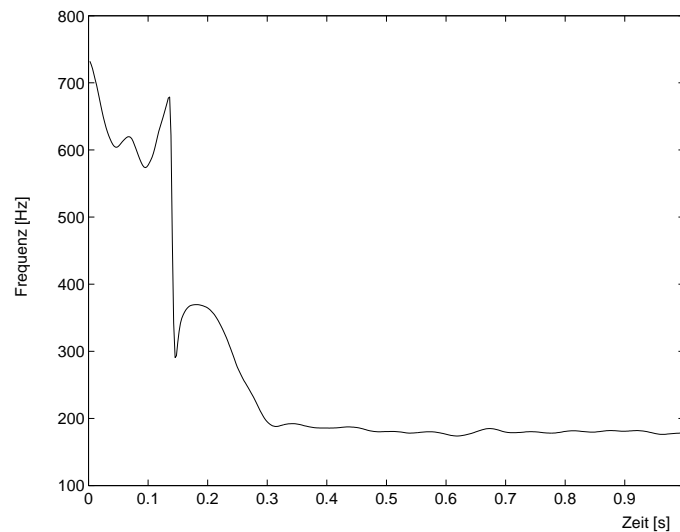


Abbildung 5.6: Frequenzschwerpunkt des Gesamtspektrums über der Zeit (Ton E)

Im Stationärklang ist der Parameter auf konstantem Niveau und es läßt sich über Mittelwertbildung eine numerische Größe für das stationäre centroid des Gesamtspektrums finden. Die Einheit ist die Nummer der FFT-Frequenzkomponente und kann daher über die Beziehung f_s/N (Samplingrate/ FFT-Länge) in Hz umgerechnet werden (MATLAB-Funktion „centroidspec“ siehe B.4).

Centroidharm Benutzt man analog zu 5.4 die harmonische Untermatrix als Datensatz, so erhält man den „harmonischen“ Frequenzschwerpunkt. Die Einheit der Größe ist hier die Teiltonnummer. Die Größe ist also frequenzunabhängig, was den Vorteil bietet, daß man unterschiedliche Tonhöhen vergleichen kann (MATLAB-Funktion „centroidharm“ siehe B.5).

5.5 Verhältnis harmonische - nichtharmonische Anteile

Zur Betrachtung des Verhaltens der harmonischen und nichtharmonischen Anteile werden die Beträge der harmonischen Reihenvektoren der Analysematrix inklusive ihrer 2 Nebenreihen linear addiert und man erhält einen zeitabhängigen Vektor h , der den harmonischen Anteil betragsmäßig beschreibt.

Aus den restlichen, nichtharmonischen Reihen erhält man auf gleiche Weise den Vektor r (für “residual“) (siehe MATLAB-Funktion „rhn“ B.6).

Die Vektoren werden logarithmiert und auf absoluten Schalldruckpegel skaliert, so daß man einen Eindruck hat, wie laut die harmonischen und nichtharmonischen Anteile sind.

Abb. 5.7 und 5.8 zeigen die Vektoren h und r für die verschiedenen Pfeifenarten an der Übergangsstelle. Man erkennt einen deutlichen Unterschied. Für Holz-gedackt gilt, daß der r-Vektor am Anfang des Klanges eine deutliche Überhöhung gegenüber dem h-Vektor aufweist. Dies ist bei Metall-offen nicht der Fall. Hier starten die beiden Vektoren eher gleichförmig.

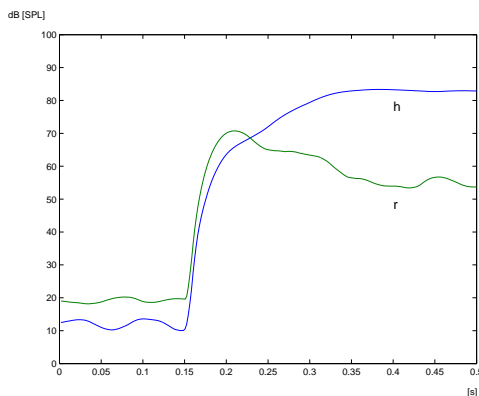


Abbildung 5.7: h und r Diagramm, Ton G, Holz gedackt

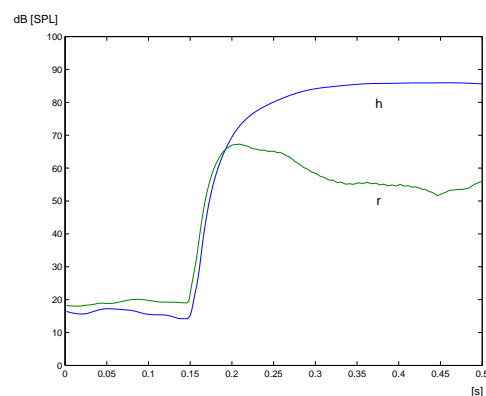


Abbildung 5.8: h und r Diagramm, Ton Gis, Metall offen

5.5.1 transnoise

Eine numerische Größe für dieses Charakteristikum des Einschwingvorgangs stellt der Parameter „transnoise“ dar.

Er beinhaltet die von r und h aufgespannte Fläche, die sich vom Start des Klanges, in dem r immer vor h startet, bis zur Überschneidung der Kurven, wenn r unter den Wert von h sinkt, ergibt. Die Größe der Fläche macht eine Aussage zur Stärke der nichtharmonischen Beiträge im Einschwingvorgang. Diese Beiträge können sowohl breitbandig rauschartig, als auch tonal sein, wie bei Schneidentonphänomenen zu beobachten.

Der Parameter wird berechnet, indem die Beträge der Differenzen der beiden Vektorenwerte vom Startpunkt bis zum Schnittpunkt aufsummiert werden. Da die verschiedenen Klänge verschiedene Abtastraten besitzen, wird der Wert auf die aktuelle Abtastrate normiert.

5.5.2 r/h stat

Eine numerische Größe für das stationäre Verhältnis harmonic - residual (h/r stat) wird über Mittelwertbildung und Quotientenbildung von stationären Werten von h und r berechnet. Dabei ist es sinnvoll, von den mit dem A-Filter bewerteten Signalen auszugehen, um eine gehörgerechte spektrale Bewertung des Parameters zu erhalten.

5.6 Einschwingzeit

Auch die Einschwingzeit des Klanges wurde über die Kurven von r und h gemessen. Abb. 5.9 illustriert die Vorgehensweise. 2 Marken wurden für Start- und Endpunkt des Einschwingvorgangs gewählt:

1. Startpunkt: 3 dB Anstieg des (stets vorausgehenden) r-Vektors
2. Endpunkt: 3 dB unterhalb Maximalwert des h-Vektors

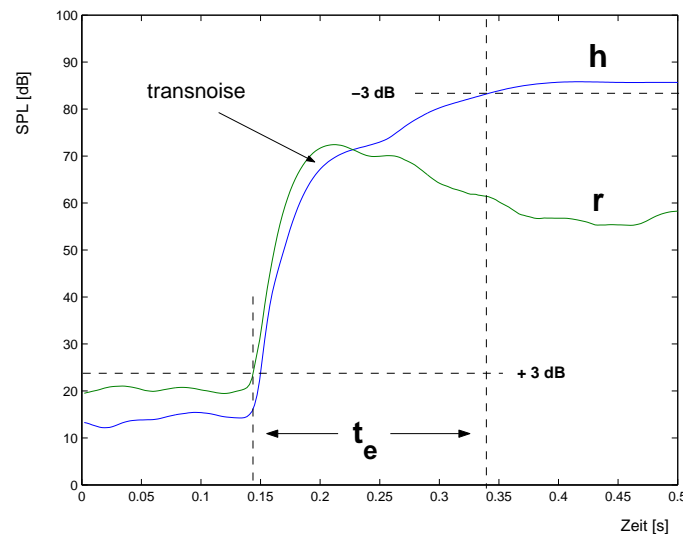


Abbildung 5.9: Vektoren h und r mit Marken zur Berechnung der Einschwingzeit

Die Länge des so definierten Bereichs ist mit der Anzahl der Zeitfenster m gegeben. Über die Sprungweite s und die Abtastrate f_r kann man die absolute Einschwingzeit t_e in [s] berechnen:

$$t_e = m * s / f_r \quad (5.2)$$

5.7 Modulationen

Modulationen wurden nicht quantitativ bestimmt. Man kann Modulationen aber in allen zeitabhängigen Größen qualitativ betrachten.

6 Hörversuch

Psychophysikalische Experimente haben das Ziel subjektive Wahrnehmungen zu messen. Ein Hörtest prüft die Reaktionen der Versuchspersonen auf dargebotene Reize oder Stimuli in einem sinnvollen Zeitrahmen und wird statistisch ausgewertet. Der durchgeführte Test sollte 2 Anforderungen erfüllen.

- Messung von Klangunterschieden
Der Hörversuch soll eine zuverlässige Aussage zu den innerhalb der Teststimuli vorkommenden Klangunterschieden machen.
- Sammlung von Klangattributen
Ein „auditives brainstorming“ soll mögliche verbale Beschreibungen für die Klangunterschiede, die von den Testpersonen spontan abgegeben werden¹, liefern.

6.1 Entwurf des Hörversuchs

6.1.1 Versuchspersonen

Es sollten Personen teilnehmen, die durch ihre Vertrautheit zu den Klängen eine bessere Urteilsfähigkeit und Möglichkeit zur verbalen Beschreibung mitbringen. Folgende Personengruppen waren interessant:

- Orgelintonateure. Sie beschreiben die Klänge oft mit technischen Ausdrücken aus der Intonation.
- Organisten

Anzahl Die Anzahl der Versuchsteilnehmer für einen statistisch auszuwertenden Test sollte möglichst hoch sein. Dem sind aber organisatorische Grenzen gesetzt. Eine Minimalzahl von 3 Teilnehmern pro Personengruppe wurde akzeptiert. Es wurden letztendlich 3 Orgelintonateure und 4 Organisten verpflichtet.

6.1.2 Testzeit

Die Testqualität hängt von der Aufmerksamkeit der Testpersonen ab. Erfahrungswerte sehen deshalb eine Dauer von nicht mehr als 90 Minuten vor.

¹Spontaneous Verbal Description [13]

6.1.3 Stimuli

Eigentlich sollten die Stimuli eines Hörversuchs in Lautstärke, Tonhöhe und Dauer konstant sein, denn diese Größen beeinflussen ja auch den Klangcharakter. Die aufgenommenen Klänge haben aber verschiedene Tonhöhen und obwohl die Pfeifen intoniert sind, variiert auch die Lautstärke. Auf eine Angleichung der Signalpegel und der Tonhöhe (Pitchshifting) wurde verzichtet, um keine zusätzlichen Klangveränderungen herbeizuführen.

Da eine konstante Tonhöhenänderung der Stimuli in Halbtonschritten vorliegt, ist es für die Versuchsperson möglich, die Tonhöhe perzeptiv vom Klangcharakter zu trennen und diesen isoliert zu bewerten. Orgelintonateure sind darüberhinaus sehr an aufsteigende Reihen zur Klangbeurteilung gewöhnt und der Tonhöhenunterschied bietet ihnen zusätzliche Vertrautheit und Sicherheit.

Signalaufbereitung Die Signale wurden auf 2 Längen geschnitten und konnten wahlweise in diesen Längen abgehört werden.

- 1 s : Dies entspricht der Abhörlänge während der Intonation, wo der Intonateur die Klänge kurz anspielen läßt um den Einschwingvorgang zu kontrollieren.
- 2 s : Diese längere Variante läßt einen genaueren Blick auf den stationären Klang und seine Klangfarbe zu.

Der Ausschwingvorgang wurde nicht dargeboten. Die Stimuli wurden mit einer linearen Ausblende von 100 bzw. 200 ms versehen.

6.1.4 Umsetzung

Es wurde ein Paartest in einer „Powerpoint“-Umgebung implementiert, wie Abb. 6.1 zeigt. Dabei konnten jeweils 2 im Halbtonabstand stehende Klänge gehört und auf ihren Klangunterschied beurteilt werden.

Die Computerumgebung sieht wiederholtes Abspielen der Stimuli und individuelle Zeiteinteilung vor. Die Versuchspersonen entscheiden selbst, wie lange sie für die Bewertung benötigen, was keinen Stress entstehen läßt.

Die Klangdateien werden als .wav Dateien ohne Qualitätsverlust in „Powerpoint“ eingebunden und über die Soundkarte auf einen geschlossenen Kopfhörer gegeben (Beschreibung in A).

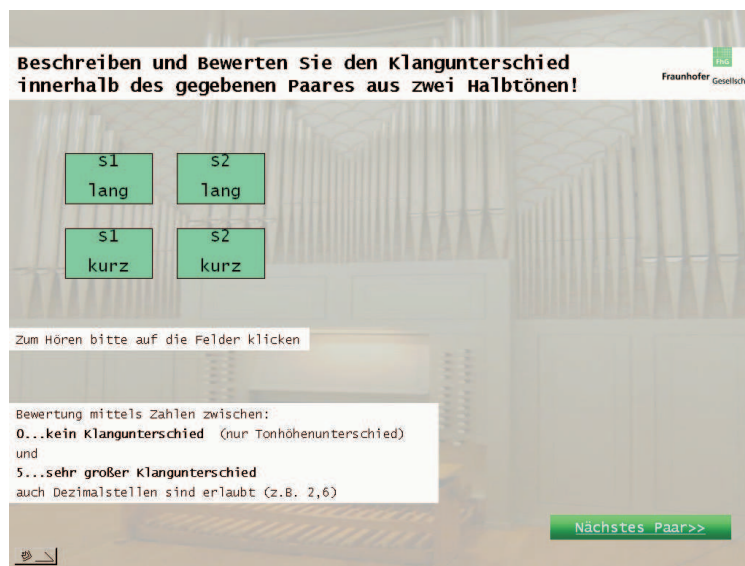


Abbildung 6.1: Versuchsoberfläche

6.1.5 Testaufgabe

Die Testperson hatte die Aufgabe, auftretende Klangunterschiede zwischen zwei nicht näher beschriebenen, im Halbtonabstand stehenden Orgeltönen auf einer Skala von 0 bis 5 zu bewerten. 0 entspricht dabei keinem Klangunterschied, 5 einem maximalen Unterschied. Dabei waren auch Dezimalstellen erlaubt, um der Testperson mehr Differenzierungsfreiheit zu geben.

Zugleich wurde gefordert, verbal zu beschreiben, in welchen Merkmalen sich die Klänge unterscheiden.

6.1.6 Training

Es hat sich als hilfreich erwiesen, die Testpersonen vor dem eigentlichen Test an die spezifischen Teststimuli zu gewöhnen. Deshalb durchlaufen sie zuerst eine deklarierte Trainingsphase, die 5 Trainingspaare enthält. Die Trainingspaare weisen die selbe Bandbreite von Klangunterschieden auf, wie die eigentlichen Testpaare.

6.1.7 Auswahl und Anordnung der Stimuli

Die Anzahl der zu untersuchenden Klänge mußte wegen der zu groß werdenden Testdauer eingeschränkt werden. Es wurden 3 Mikrofonpositionen ausgewählt,

die als am wichtigsten erachtet wurden und auch subjektiv die größten Unterschiede aufwiesen.

- Position 2: Am Spieltisch; Die direkteste der Stereo-Aufnahmen
- Position 3: Eine mittlere Position im Zuschauerraum.
- Position 5: Die räumlichste Position.

Von den 16 aufgenommenen Klängen wurden 10 ausgewählt, woraus 9 Tonpaare entstanden. Insgesamt sind also 27 Paare zu bewerten. Tabelle 6.1 gibt die Reihenfolge wieder.

Mikrofonposition	Testsignale	Tonpaar
Pos 2	1,2	1
	3,4	3
	5,6	5
	7,8	7
	9,10	9
Pos 3	2,3	2
	4,5	4
	6,7	6
	8,9	8
Pos 5	2,3	2
	4,5	4
	6,7	6
	8,9	8
Pos 3	1,2	1
	3,4	3
	5,6	5
	7,8	7
	9,10	9
Pos 2	2,3	2
	4,5	4
	6,7	6
	8,9	8
Pos 5	1,2	1
	3,4	3
	5,6	5
	7,8	7
	9,10	9

Tabelle 6.1: Verwendete Mikrofonpositionen und Stimuli

Wie Tabelle 6.1 zeigt, wurde eine gewisse Randomisierung der Teststimuli vorgenommen, aber trotzdem die aufsteigenden Tonhöhen beibehalten.

6.2 Statistische Grundlagen und Auswertung

Ziel der Statistik ist es, von einer erstellten Stichprobe auf die Grundgesamtheit zu schließen.

6.2.1 Datensatz

Der aus dem Hörversuch entstandene Datensatz besteht aus den 27 abgegebenen Bewertungen der 7 Testpersonen (mit A,B,...G abgekürzt) zu $P_i P_j$ Klangpaaren. Der Index $i=2,3,5$, steht dabei für die Mikrofon-Positionen und $j=1,2,...,9$ für die Klangpaare.

Tabelle 6.2 gibt dies wieder.

Paar	A	B	C	D	E	F	G	Median
P2P1	3	2	2	3.50	1.50	3.50	2	2
P2P2	.50	.50	1	.50	.30	.20	0	.5
P2P3	3	2	3	4	1	0	3	3
P2P4	2	1.50	3	2	1.50	4.50	3	2
P2P5	5	3.50	3.50	5	5	5	4	5
P2P6	2	1	2	1.50	1.50	2.50	2.20	2
P2P7	4.70	1.50	2.50	3	1	4	4	3
P2P8	.30	2	2	0	.50	0	2	.5
P2P9	1	2.50	2	1.50	.50	1	1.50	1.5
P3P1	2	2.50	2	4	1.50	.25	2	2
P3P2	.20	1	0	0	.50	0	.50	.2
P3P3	.20	1.30	0	0	.50	0	.80	.2
P3P4	.30	1.50	1	3	1	0	1	1
P3P5	5	4	4	5	5	5	3.80	5
P3P6	3	2.50	2.50	0	2	3	1.50	2.5
P3P7	3	3	2.50	3	2	3.50	3.50	3
P3P8	2.50	2	1.50	2	2	1	2	2
P3P9	2	2.50	2	3	.50	1.50	1.50	2
P5P1	.80	2.50	1.50	1.50	2.50	4.50	2	2
P5P2	.30	.50	.50	0	.75	0	.50	.5
P5P3	0	1	0	.50	.30	0	1.80	.3
P5P4	1.50	.50	1.50	4	.50	2.50	2.50	1.5
P5P5	5	3.50	4	5	5	5	5	5
P5P6	3	4	4	.50	2.50	4.50	4	4
P5P7	3.50	4.50	2.50	2.50	3	4.50	4	3.5
P5P8	1.50	2	2	3	.50	.50	1.50	1.5
P5P9	1.50	2	1.50	2	1	.20	.80	1.5

Tabelle 6.2: Datensatz der abgegebenen Bewertungen

6.2.2 Skalenniveau

Die Klangunterschiede können nicht absolut bewertet werden. Es ist nicht exakt möglich zu sagen, daß ein mit 2 bewerteter Klangunterschied halb so groß ist wie ein mit 4 bewerteter. Die Bewertungen stehen jedoch in einer bewußt gegebenen Reihenfolge und beinhalten die Information „größer als“ und „kleiner als“.

Man geht deswegen zur Ordinalskala über ². Diese Skala gehört zu den nicht-metrischen oder qualitativen Skalen [14], weil hier nur die Ränge, also Reihenfolgen aus den Bewertungen betrachtet werden. Dementsprechend sind nur bestimmte, nichtparametrische Auswertungsverfahren geeignet. Nichtparametrische Verfahren werden verwendet, um Daten aus kleinen Stichproben und Daten, über deren Verteilung nichts bekannt ist, zu verarbeiten [15]. Hierzu wurden Standardprozeduren aus der Statistik-Software „STATISTICA“ ³ verwendet.

6.2.3 Median und Quartile

In ordinalem Skalenniveau ist der Medianwert die Größe, die das Mittel der betrachteten Daten beschreibt. Er ist über das 50. Perzentil definiert, das aussagt, daß 50 Prozent der Meßwerte über und 50 Prozent unter diesem Wert liegen. In Tabelle 6.2 ist der Median der einzelnen Stichproben bereits berechnet.

Das untere Quartil ist über das 25. Perzentil, das obere Quartil über das 75. Perzentil definiert.

6.2.4 Varianz

Die Varianz einer Stichprobe mit den Werten x_i entspricht der Summe der quadrierten Abweichungen vom Gesamtmittelwert, hier dem Median \bar{x} , dividiert durch den Stichprobenumfang minus 1, wie 6.1 zeigt.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (6.1)$$

Sie ist ein Maß für die Streuung innerhalb einer Stichprobe.

6.2.5 Box plots

Im box plot werden die Werte einer Stichprobe zu $P_i P_j$ dargestellt. Jede Säule zeigt die beiden Extremwerte, das untere und obere Quartil, sowie den Medianwert. Abb. 6.2 zeigt beispielsweise den box plot für Mikrofon-Position 3.

²eine ausführliche Beschreibung der Skalenniveaus findet sich in [14]

³Produkt der Firma StatSoft, Version 6

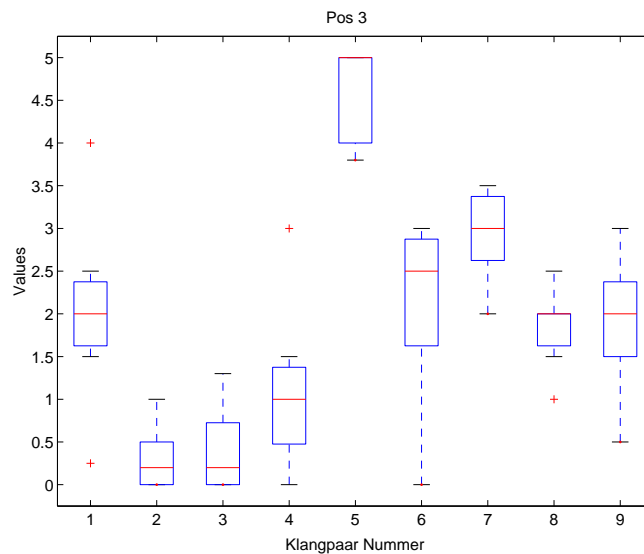


Abbildung 6.2: Box plot Pos 3

6.2.6 Nullhypothese

Im Datensatz steckt die Information, daß die Bewertungen der unterschiedlichen Klangpaare verschiedene Mittelwerte und verschiedene Streuungen besitzen. Dabei stellen die Bewertungen aller Testpersonen zu einem spezifischen Klangpaar eine Gruppe dar.

Nun ist statistisch zu prüfen, ob sich die Gruppenmittelwerte signifikant voneinander unterscheiden, oder ob sie nur die normale Streuung, die in jeder statistischen Erhebung vorkommt, widerspiegeln. Im letzteren Fall wäre die „Nullhypothese“ [16] gültig, die besagt, daß keine Mittelwertdifferenzen, also keine Klangunterschiede in der Grundgesamtheit auftreten. Der Test, ob die Nullhypothese eintritt, wird über die Varianzanalyse durchgeführt.

Varianzanalyse

Die Grundidee der Variananalyse (ANOVA) ist in [17] beschrieben. Sie basiert auf der Zerlegung der Gesamtstreuung (Varianz) in eine erklärte Varianz (Abweichung zwischen den Gruppen) und eine nichterklärte Varianz (Abweichung innerhalb der Gruppen). Zur Analyse der Varianz soll aus der Hilfe von STATISTICA zitiert werden:

„Der Zweck der Variananalyse besteht im Testen von Mittelwertdifferenzen (für Gruppen oder Variablen) auf statistische Signifikanz. Dies wird über die Analyse der Varianz (Streuung) erreicht. Dabei wird die gesamte Streuung in eine Kom-

ponente, die auf einen zufälligen Fehler (d.h. Summe der Quadrate innerhalb der Gruppen) zurückzuführen ist, und Komponenten, die auf unterschiedliche Mittelwerte zurückzuführen sind, zerlegt. Diese letzteren Varianzkomponenten werden auf statistische Signifikanz getestet. Sofern sie signifikant sind, wird die Nullhypothese (keine Mittelwertunterschiede) abgelehnt und statt dessen die Alternativhypothese (Mittelwerte in der Grundgesamtheit sind verschieden) angenommen.“ [17]

Diese Nullhypothese gilt es zu beweisen oder abzulehnen.

Kruskal-Wallis ANOVA

Dies ist eine nichtparametrische Standardprozedur der Varianzanalyse für ordinalskalierte Variablen (eine Beschreibung findet man in [18]). Es werden nur die Ränge der Werte benutzt, nicht die Werte selber. Ihr input ist der gesamte erschlossene Datensatz. Ihr output ist die Wahrscheinlichkeit, daß die Nullhypothese eintritt. Wird sie abgelehnt, so reicht der Datensatz aus, um allgemeingültige Aussagen über die Klänge zu machen.

6.2.7 Zusammenhangsmaße und Korrelation

Zur Untersuchung, in wie weit 2 Variablen zusammenhängen oder korrelieren, gibt es Zusammenhangsmaße [20]. Dabei werden immer 2 Größen berechnet:

- Die Stärke des Zusammenhangs, die zwischen -1 und 1 liegt. 0 bedeutet keinen Zusammenhang.
- Die Zuverlässigkeit des Zusammenhangs. Sie beschreibt die „Repräsentativität“ der Ergebnisse in einer Stichprobe für die Grundgesamtheit. Sie mißt die Wahrscheinlichkeit, daß bei größerem Stichprobenumfang ein ähnlicher Zusammenhang gefunden würde. Die Zuverlässigkeit wird auch als Signifikanzniveau in Prozent ausgedrückt [19].

Gamma (γ) Korrelationskoeffizient

Diese Größe ist ein Zusammenhangsmaß für ordinalskalierte Variablen. Es fußt auf einem Paarvergleich. Ein Wertepaar aus unterschiedlichen Stichproben ist konkordant oder gleichgerichtet, wenn es die selbe fallende oder steigende Tendenz besitzt. Streben die Werte in verschiedene Richtungen, so heißen die Paare diskordant oder ungleichgerichtet. Ein positiver Zusammenhang besteht, wenn die Anzahl der konkordanten Paare überwiegt.

Der Korrelationskoeffizient ⁴ wird berechnet, indem die Differenz der konkordanten und diskordanten Paare durch die Gesamtanzahl der Paare geteilt wird [20]. Welche Variablen aus der Matrix korreliert werden, hängt von der Fragestellung ab. Man erhält stets $\frac{n(n-1)}{2}$ korrelierte Variablen.

Reliabilität der Versuchspersonen

Hier werden die abgegebenen Bewertungen der Versuchspersonen korreliert. Tabelle 6.3 gibt die γ -Korrelationskoeffizienten der Variablen A bis G wieder.

	A	B	C	D	E	F
B	0.58					
C	0.84	0.65				
D	0.59	0.35	0.48			
E	0.71	0.67	0.62	0.35		
F	0.74	0.56	0.74	0.40	0.72	
G	0.70	0.49	0.71	0.50	0.60	0.67

Tabelle 6.3: Korrelationskoeffizienten der Variablen A bis G

Die Abhängigkeiten sind in allen Fällen positiv. Es sind alle γ signifikant auf dem 5 Prozent-Niveau.

Dies beweist einen starken und signifikanten Zusammenhang der Variablen. Die Testpersonen zeigen eine gute Übereinstimmung, so daß man ihren Bewertungen vertrauen kann.

6.3 Auswertung der verbalen Beschreibungen

Klänge vollständig verbal zu beschreiben ist naturgemäß schwierig und das Vokabular begrenzt. Dennoch lassen sich gewisse Merkmale im Klang mit Worten umschreiben. Die Vielfalt der Beschreibungen ist allerdings groß und individuell. Es werden einzelne Wörter, ganze Sätze, Vergleiche und Metaphern benutzt. Zur Findung von aussagekräftigen und unabhängigen Klangattributen müssen die abgegebenen Ausdrücke zusammengefaßt und kategorisiert werden.

6.3.1 Synonyme und Antonyme

Zur Findung von Zusammenhängen in den Beschreibungen wären vielfältige linguistische Analysen nötig, die nicht durchgeführt wurden. Deswegen wurde dieser

⁴Da der γ -Koeffizient speziell für Datensätze mit vielen Verknüpfungen, d.h. vielen gleichen Werten, geeignet ist, wird er etwas anders berechnet. Auf die Verknüpfungen soll aber nicht näher eingegangen werden.

Schritt auf die Zusammenfassung der offensichtlichen Synonyme und Antonyme beschränkt.

Synonyme werden gruppiert. Beispielsweise „obertonreich“, „obertönig“, „mehr Oberton“ oder auch „weniger Grundton“, „weniger Fundament“ wird zu „obertönig“, „quintiert kräftig“ und „quintbetont“ wird zu „quintbetont“.

Gegensätzliche Beschreibungen werden ebenfalls zu einem Attribut verknüpft, falls sie semantisch und lexikalisch das Gegenteil aussagen. Beispielsweise hell-dunkel oder grundtönig-obertönig.

Oft sind die Attribute schon durch Hilfsörter wie viel-wenig, weniger-mehr in Beziehung gesetzt und gewichtet. Diese Attribute sind dadurch besonders für eine Absolutskalierung geeignet. Diese soll in späteren Testreihen nach dem Prinzip der VAME⁵ durchgeführt werden.

6.3.2 Kategorisierung

Nun werden die Attribute in Kategorien eingeordnet:

1. Einschwingvorgang: Hier stehen Beschreibungen, die mit Zusätzen wie *Ansprache*, *Ansatz*, *Vorläufer* oder *Anblasgeräusch* explizit den Einschwingvorgang meinen.
2. Statements zum Stationärklang: Hier stehen offensichtlich dem Stationärklang, bzw. dem *laufenden Ton* und der Klangfarbe zuordbare Beschreibungen.
3. Statements zum Gesamtklang: Hier stehen die nicht eindeutig den beiden oberen Kategorien zuordbaren statements.
4. Intonationsparameter: Hier stehen Begriffe, die eindeutig aus dem Intonationsprozeß stammen.
5. Orgelspezifische Begriffe, die verwandt mit Begriffen aus dem Orgelbau sind.

Die gefundenen Kategorien wurden darüberhinaus in mehrere Unterkategorien aufgespalten, indem verwandte Wörter gruppiert wurden und versucht wurde, übergeordnete Begriffe dafür zu finden.

⁵Verbal Attribute Magnitude Estimation

6.3.3 Auftrittshäufigkeiten

Eine quantitative Untersuchung der verbalen Attribute ist nur durch Zählen, wie oft sie auftreten möglich. Häufig auftretende Attribute sind allgemeiner und verständlicher.

Tabelle 6.4 gibt die häufigsten abgegebenen Attribute zu jeder Kategorie wieder. Eine vollständige Aufstellung ist im Anhang unter C gegeben.

Einschwingvorgang	Stärke	weniger-mehr Spucken (26) hart-weich (25)
	Dauer	lang-kurz (32) schnell-langsam (18)
	Sonstiges	unruhig-ruhig (6) schnörkelig, wellenartig (3)
Stationärklang	Klangfarbe	grund- obertönig (48) dunkel-hell (41)
	dominante Teiltöne	terzbetont (11) quintbetont (7)
Gesamtklang	Lautstärke	stark-schwach (40) laut-leise (17)
	Fluktuationen	stabil-unstabil (6) zittert (5)
	Rausch	mehr - weniger Blasgeräusch (11) rauschig (10)
	Gesamteindruck	weich (10) prägnant (6)
Intonationsparameter		stark-schwach intoniert (9) Kern zu tief (4)
Orgelspezifische Begriffe		offen-gedackt (5) hölzern (3)

Tabelle 6.4: In Klangkategorien eingeteilte Attribute mit Häufigkeiten in Klammern

7 Ergebnisse

Die Ziele der Arbeit sollen noch einmal formuliert werden:

1. Nachweis vorhandener Klangunterschiede mittels Hörversuch
2. Sammeln von verbalen Attributen zur Beschreibung der Klangunterschiede
3. Aufstellung geeigneter objektiver Parameter zur Klangmessung
4. Vergleich der objektiven und subjektiven Ergebnisse

7.1 Ergebnisse des Hörversuchs

7.1.1 Test der Nullhypothese

Der Kruskal-Wallis-ANOVA Test gibt für alle Mikrofonpositionen eine Wahrscheinlichkeit von 0 Prozent aus, daß die Variablen, also die Klangunterschiede in der Grundgesamtheit den gleichen Medianwert besitzen. Daher wird die Nullhypothese in jedem Fall abgewiesen. Es existieren also signifikante Mittelwertunterschiede in den Klangpaaren.

7.1.2 Box plots

Abbildung 7.1 gibt die box-plots für die 3 untersuchten Mikrofonpositionen wieder.

Man kann folgendes feststellen:

- Klangpaar 5, das die Übergangsstelle Holz-Metall beinhaltet, besitzt für jede Mikrofonposition den höchsten Medianwert und damit auch den größten Klangunterschied.
- Es existieren auch an mehreren anderen Klangpaaren hohe Klangunterschiede.

7.1.3 Vergleich der Mikrofonpositionen

Will man die Mikrofonpositionen auf Ähnlichkeit untersuchen, so korreliert man die Werte einer Versuchsperson der beiden interessierenden Positionen, oder stellvertretend für alle Versuchspersonen die Medianwerte der beiden Positionen.

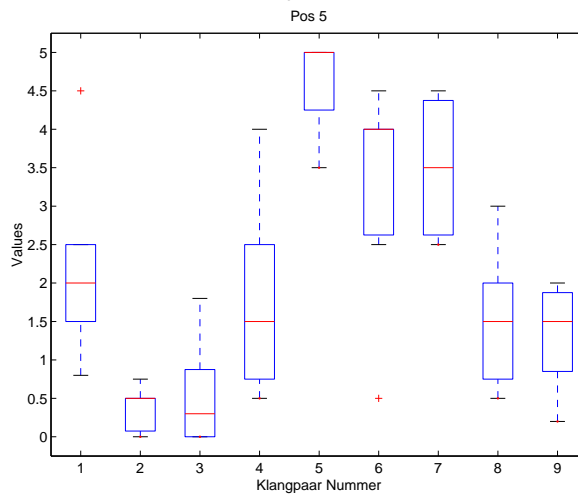
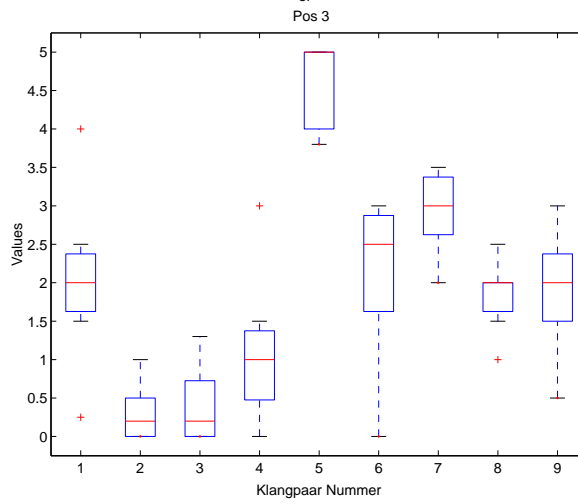
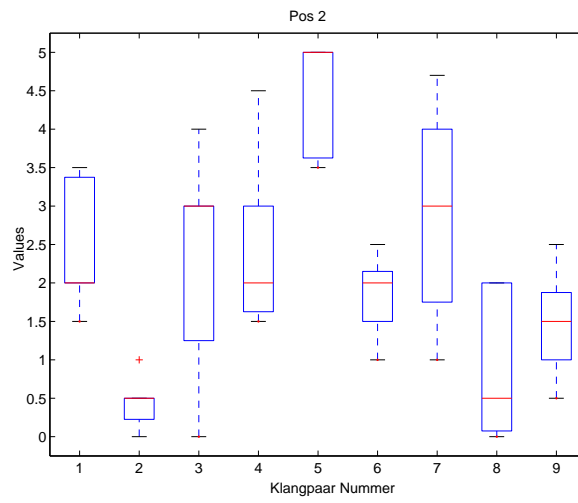


Abbildung 7.1: Box plots

Tabelle 7.1 zeigt dies beispielhaft für Versuchsperson E. In der oberen Dreiecksmatrix sind die Signifikanzniveaus in Prozent gezeigt. Man erkennt, daß P3 und P5 signifikant zusammenhängen. Der Zusammenhang von P2 und P3 ist schwächer und der von P2 und P5 am schwächsten.

	P2	P3	P5
P2	-	7	17
P3	0.60	-	3
P5	0.40	0.64	-

Tabelle 7.1: γ -Korrelationskoeffizienten der Mikrofonpositionen für Versuchsperson E

Die Auswertung für die anderen Versuchspersonen ergab, daß P3 und P5 immer in signifikantem Zusammenhang stehen.

Tabelle 7.2 zeigt nun die Korrelationen der Medianwerte. Es ergibt sich für alle Positionen ein starker und signifikanter Zusammenhang. Das bedeutet, daß alle 3 Mikrofonpositionen sensibel auf die vorhandenen Klangunterschiede reagieren.

	P2	P3	P5
P2	-	0	0
P3	0.40	-	0
P5	0.50	0.68	-

Tabelle 7.2: Korrelationskoeffizienten der Mikrofonpositionen für alle Versuchspersonen

Die Positionen 3 und 5 weisen dabei den stärksten Zusammenhang auf und sind sich am ähnlichsten.

7.2 Vergleich subjektiv - objektiv

Der Vergleich der subjektiven und objektiven Parameter ist das elementare Ziel der Klangmessung. Nur so können die objektiven Meßwerte auf ihre Qualität bezüglich der Perzeption geprüft werden.

Abbildung 7.2 gibt eine Aufstellung einiger subjektiver und objektiver Korrespondenzen wieder.

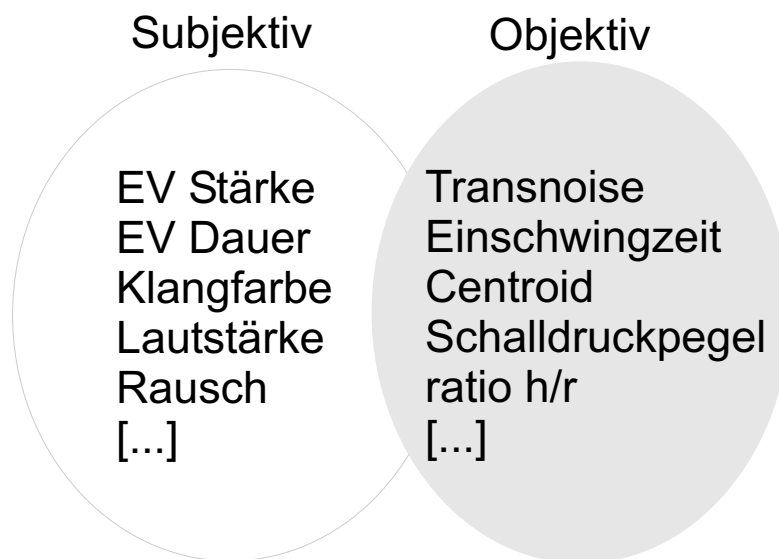


Abbildung 7.2: Korrespondierende subjektive und objektive Parameter

Zur numerischen Korrelation der objektiven Parameter mit subjektiven Parametern fehlt aber noch ein entscheidender Schritt, der nicht Inhalt dieser Arbeit war und weitere Hörversuche erfordert. Die Klänge müssen noch gezielt auf die gefundenen Klangattribute skaliert werden, so daß subjektiv gewonnene Zahlenwerte vorliegen, die mit den Meßgrößen der gleichen Signale korreliert werden können. Im jetzigen Stand kann man lediglich qualitative Zusammenhänge aufdecken. Man kann die objektiven Werte mit Häufungen subjektiver Attribute gegenüberstellen und so einen tendenziellen Eindruck über die Leistungsfähigkeit des objektiven Werts zur Erklärung des Hörphänomens gewinnen.

Eine weitere Einschränkung besteht bei den objektiven Größen, die den Einschwingvorgang beschreiben (Einschwingzeit, transnoise). Sie wurden mit den Signalen der Nahmessung berechnet, weil nur hier ein sauberer, unmodulierter Signalverlauf vorliegt. Man kann diese Meßwerte nur mit den subjektiven Aussagen der abgehörten Signale aus den anderen Mikrofonpositionen vergleichen, wenn es sich um stark hervortretende Charakteristika handelt, die über allen Positionen robust

bleiben. Dies ist beim „transnoise“ der Fall, jedoch nicht bei der Einschwingzeit.

7.3 Ergebnisse der Signalanalyse und Korrelationen mit subjektiven Aussagen

Es wurden die in Kapitel 5 definierten objektiven Parameter auf die 10 abgehörten Klänge angewandt und sollen nun im Vergleich mit den spontan gegebenen verbalen Attributen diskutiert werden¹

7.3.1 Lautstärkebetrachtung

Abbildung 7.3 zeigt die Werte des A-bewerteten Schalldruckpegels für die abgehörten Positionen 2, 3 und 5.

Es liegt ein Pegelunterschied zwischen den Klängen von bis zu 14 dB vor (Klänge A und Ais in Pos 5). Dies ist aufgrund der in 3.2.1 diskutierten Problematik mit Mono-Empfängern im Raum nicht erstaunlich. Auch unterscheiden sich linker und rechter Kanal beträchtlich.

Der qualitative Vergleich mit den subjektiven Beschreibungen zeigt, daß eine Übereinstimmung mit Attributen aus der Wahrnehmungs-Kategorie „Gesamtklang - Lautstärke“ meistens gegeben ist. Zum Beispiel wird der Klang Ais durchwegs lauter als A charakterisiert (siehe Anhang C.2), was mit der Messung übereinstimmt. Allerdings trifft dies nicht bei allen Klangpaaren zu, so sagen die Meßwerte von Klangpaar Dis/E das Gegenteil gegenüber den subjektiven Aussagen aus.

7.3.2 Dominante Teiltöne

Zur Identifikation dominanter Teiltöne werden die in 5.2 berechneten Teiltonamplituden betrachtet. Abb. 7.4 gibt ein sehr unterschiedliches Klangpaar wieder.

Die subjektiven Aussagen bestätigen dieses Klangbild. Beispielsweise wird im Klang Fis die Terz viermal als dominanter Teilton genannt (siehe Anhang C.2). Daher wird der Klang auch als heller und obertöniger beschrieben als G, was mit den Meßwerten aus 7.3.3 übereinstimmt.

¹Das Gesamtprotokoll aus dem SVD Test ist im Anhang unter C.2 zu finden.

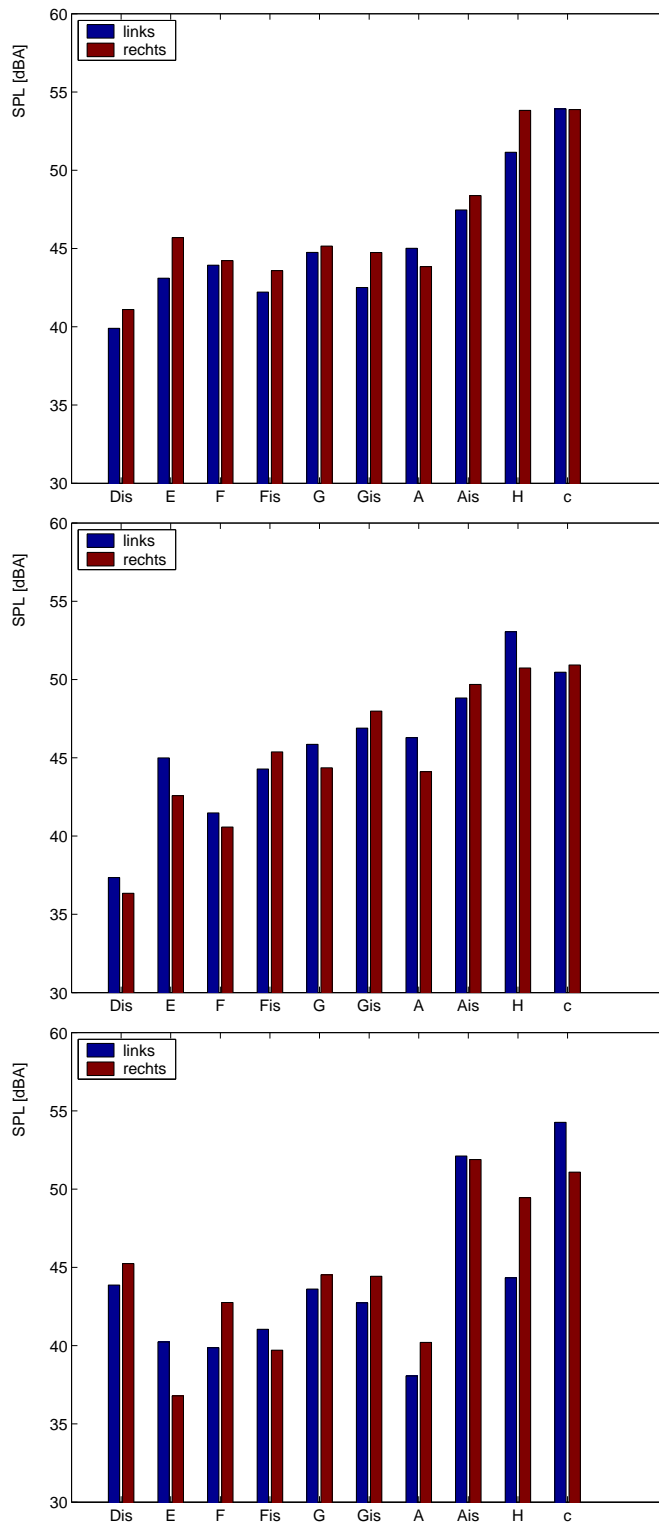


Abbildung 7.3: SPL Pos 2, 3, 5
61

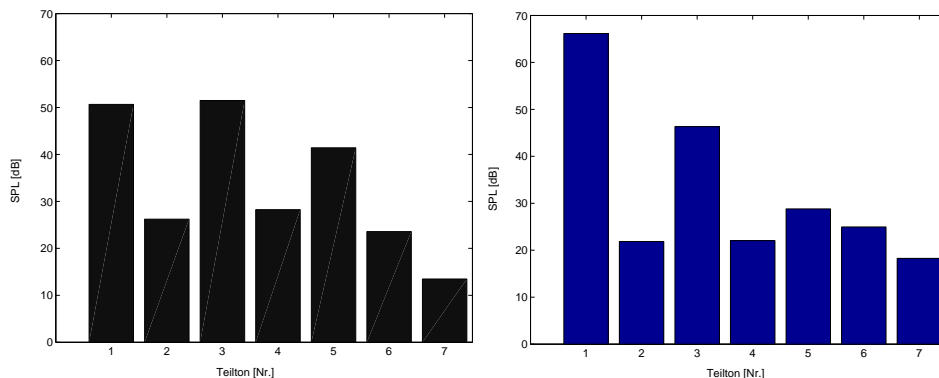


Abbildung 7.4: Stationäre Teiltonamplituden der Klänge Fis (links) und G (rechts) aus Position 2

7.3.3 Frequenzschwerpunkt

Die Meßwerte des „harmonischen“ Frequenzschwerpunktes für den linken Kanal der abgehörten Positionen 2,3 und 5 sind in Abb. 7.5 zu sehen.

Wenn man das gemessene centroid mit der subjektiven Kategorie „Stationärklang - Klangfarbe“ (dunkel-hell, grund- obertönig, siehe C.1) vergleicht, so erhält man sehr oft Häufungen in den entsprechenden subjektiven Attributen. Diese Korrespondenz zeigt sich qualitativ als sehr zutreffend.

7.3.4 Ratio Harmonic - Residual

Abb. 7.6 zeigt die Meßwerte des stationären Verhältnisses der harmonischen zu den nichtharmonischen Anteilen des linken Kanals der abgehörten Positionen 2,3 und 5.

Ist der Wert für h/r niedrig, so besteht ein niedriges Signal/Rauschverhältnis und es treten Häufungen bei den Attributen aus der Klangkategorie „Gesamtklang - Rausch“ (Blasgeräusch, rauschig, siehe C.1) auf.

Dies ist allerdings vereinfacht, weil die nichtharmonischen Komponenten auch schmalbandig tonal sein können und dann nicht als Rausch gehört werden, sondern als Modulationen. Dies kann man ebenfalls subjektiv nachweisen, weil sich ein niedriger Wert von h/r meist mit Attributen aus der Kategorie „Gesamtklang - Fluktuationen“ paart.

In jedem Fall ist ein hoher Wert von h/r ein Zeichen für einen hohen Grad an Homogenität und Harmonizität. So werden die Klänge mit hohem Wert h/r oft als „homogener“, „runder“ und „schöner“ bezeichnet (siehe C.2).

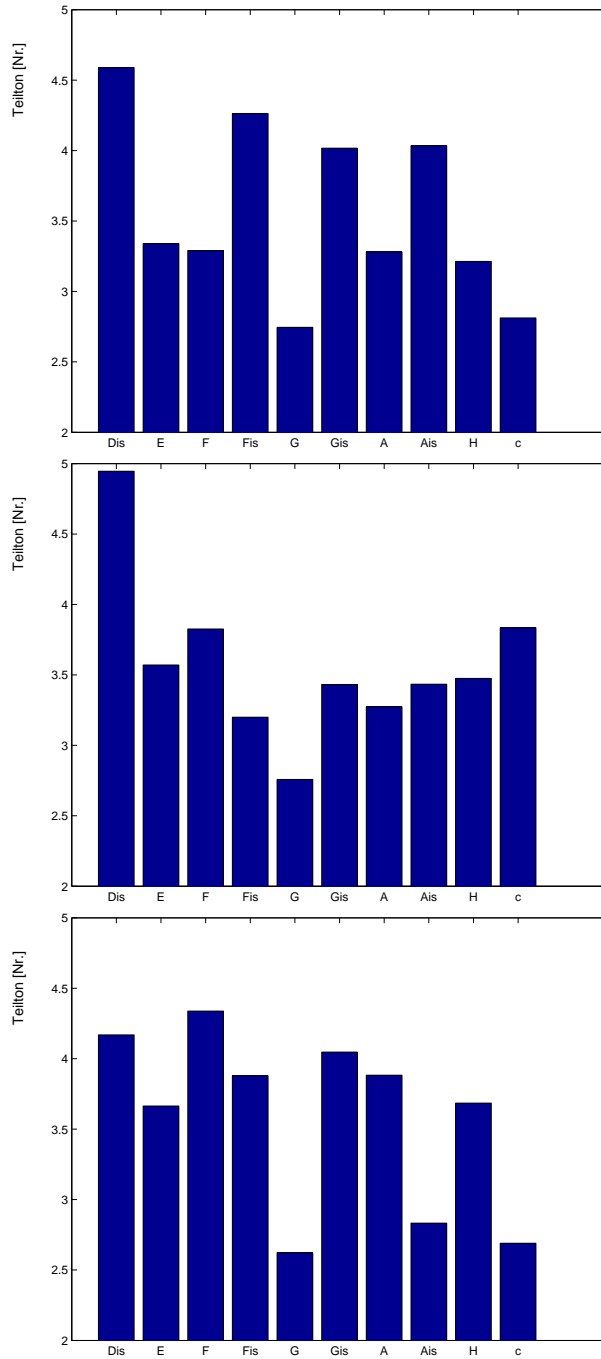


Abbildung 7.5: centroidharm, Pos 2,3,5

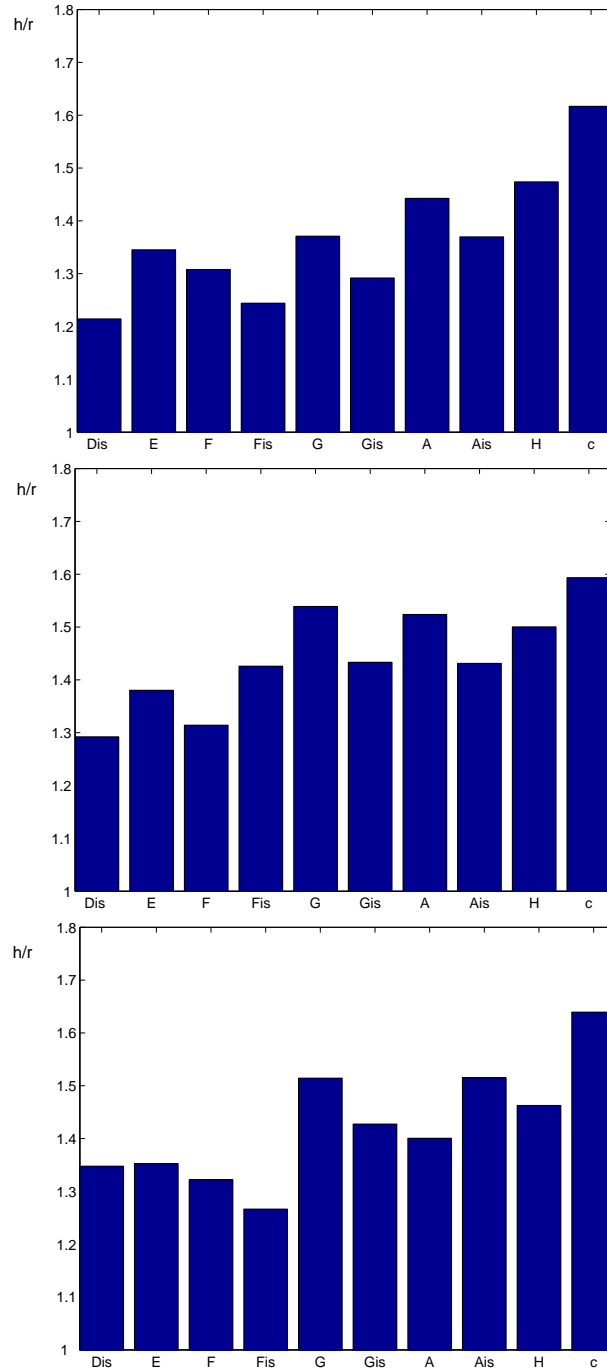


Abbildung 7.6: Ratio Harmonic-Residual, Pos 2,3,5

7.3.5 Einschwingzeit

Das Diagramm in Abb. 7.7 zeigt die absolute Einschwingzeit, berechnet für die Klänge von Position 1, der Nahmessung. Für die anderen Mikrofonpositionen konnte der Meßparameter wegen der Modulationen im Einschwingvorgang nicht präzise bestimmt werden.

Da tiefere Pfeifen generell einen längeren Einschwingvorgang besitzen, ist die absolute Einschwingzeit kein gutes Maß. Das Diagramm in Abb. 7.8 zeigt deswegen die Einschwingzeit bezogen auf die Periodenlänge der Grundfrequenz. Man erkennt, daß am Übergang, aber auch an anderen Stellen, ein deutlicher Unterschied vorhanden ist.

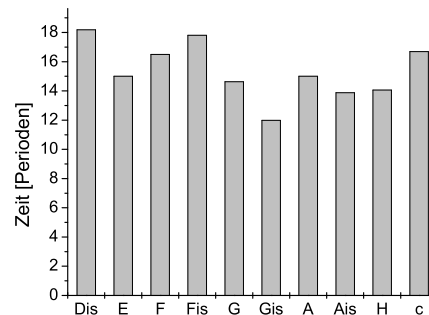
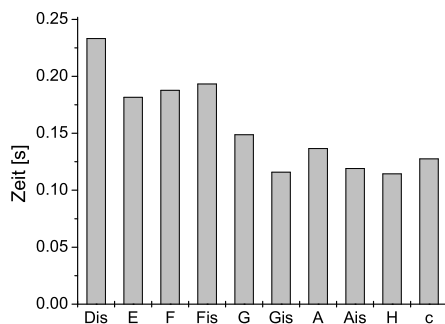


Abbildung 7.7: absolute Länge des Einschwingvorgangs, Pos 1

Abbildung 7.8: Länge des Einschwingvorgangs in Perioden, Pos 1

Die Korrespondenz der Meßwerte mit der subjektiven Kategorie „Dauer des Einschwingvorgangs“ ist nicht eindeutig nachweisbar.

Die Aussagen sind uneinheitlich (siehe Gesamtprotokoll im Anhang C.2). Die Wahrnehmung ist hier komplexer Natur. Die Hörer machen die Einschwingdauer teilweise an unterschiedlichen Kriterien fest.

Auch beeinflusst der einschwingende Raum die gehörte Einschwingdauer.

Dennoch gibt es eindeutige Fälle. Die Meßwerte für Klangpaar Dis/E und Gis/A weisen einen großen Unterschied auf. Dieser Unterschied bleibt über alle Raumpositionen stabil und kann subjektiv nachgewiesen werden.

7.3.6 Transnoise

Abb. 7.9 zeigt die Meßwerte des Parameters „transnoise“ für die Nahfeldmessung. Es ist ein guter Indikator für die unterschiedlichen Bautypen. Die Holzpfeifen haben hier einen durchwegs höheren Wert.

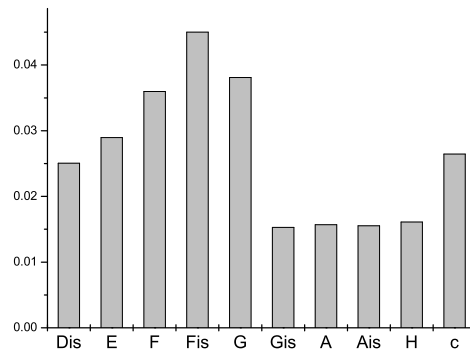


Abbildung 7.9: transnoise, Pos 1

Die subjektiven Aussagen bestätigen auf allen Mikrofonpositionen einen großen Unterschied zwischen dem Ansatzgeräusch der Holz- und Metallpfeifen. Die Holzpfeifen beinhalten immer ein „Spucken“ oder „Ploppen“. Dies ist ein so markantes Merkmal der Quelle selber, daß es durch die Raumwirkung nicht verschwindet. Die Metallpfeife „c“ wird ebenfalls subjektiv durch eine Häufung der Attribute „harter Ansatz“ oder „spuckend“ charakterisiert, was sie zu einer Ausnahmeerscheinung innerhalb der Metallpfeifen macht. Dieses Phänomen ist auch der Messung zugänglich, wie der hohe „transnoise“-Anteil dieses Klanges zeigt. Die Sonogrammdarstellung (in Abb. 7.10) zeigt die Unterschiede genauer auf. Der Pfeil markiert den deutlichen Unterschied im Einschwingvorgang der Klänge „H“ und „c“, wobei „c“ deutlich höhere nichtharmonische Anteile beinhaltet.

Grund für dieses Phänomen ist die schlechte Intonation der „c“-Pfeife. Ein Intonateur beschreibt diesen Klang mit der Aussage „Oberlabium zu weit draußen“.

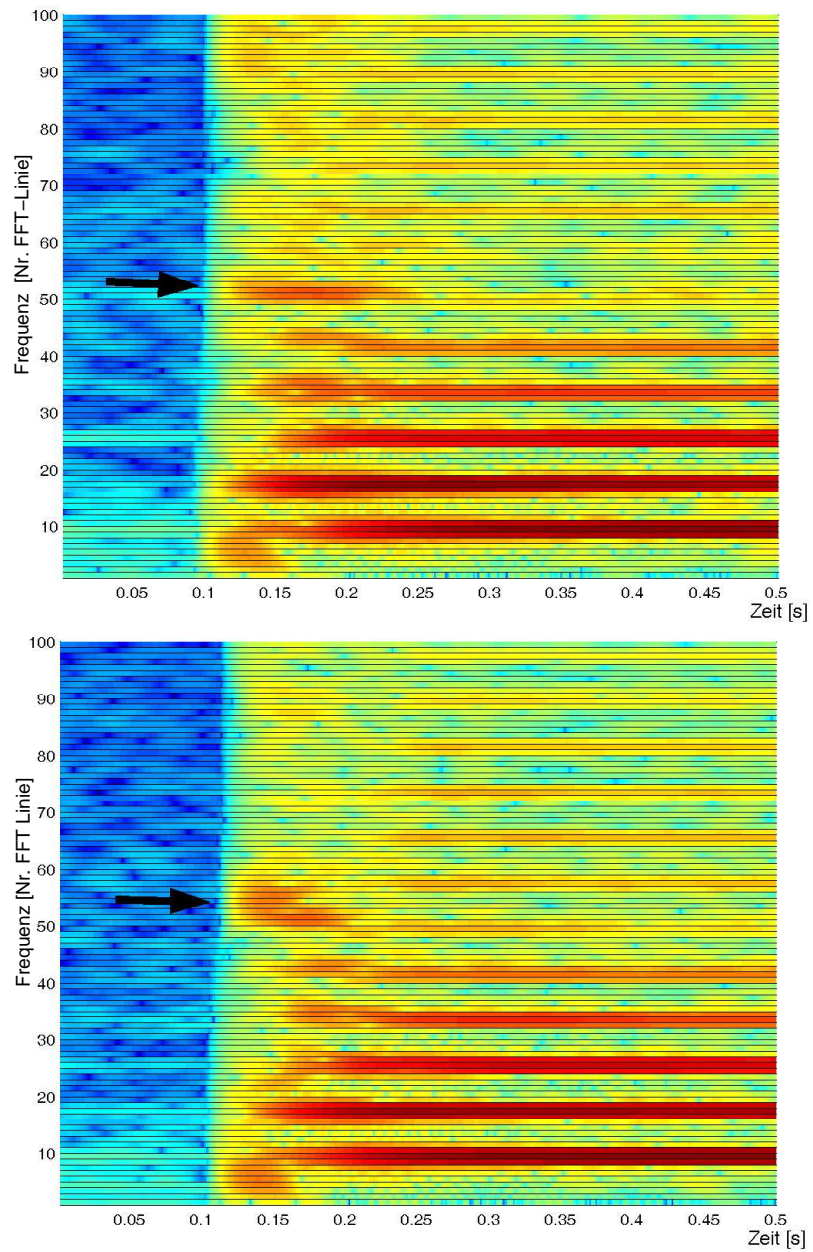


Abbildung 7.10: Sonogramme; oben: Klang H; unten: Klang c; Amplitudenwerte farbskaliert

7.4 Zusammenfassung und Ausblick

Zum Schluß ist zu sagen, daß die aufgenommenen Signale auch innerhalb des gleichen Bautyps hohe klangliche Differenzen aufweisen, was nach der Intonation eigentlich nicht so stark der Fall sein sollte. Dadurch waren sie aber gut geeignet, um Klangparameter aufzustellen.

Klangunterschiede innerhalb eines Registers können mit dem entwickelten Hörversuch zuverlässig nachgewiesen werden. Dabei werden nicht nur die deutlichen Unterschiede zwischen den verschiedenen Pfeifenarten aufgedeckt, sondern auch die feineren Unterschiede innerhalb gleicher Pfeifenarten, was wichtig für die spätere Untersuchung anderer Register ohne Übergangsstellen ist.

Es konnten viele verbale Attribute gesammelt und in Kategorien zusammengefaßt werden. Hier wäre ergänzend noch eine fundierte linguistische Analyse nötig, um die vielfältigen Beschreibungen zu reduzieren und sprachlich unabhängige Attribute aufzustellen. Darüberhinaus müßte eine gewisse Normung der Begriffe vorgenommen werden, damit die Begriffe eindeutiger werden und genau definierte Klangphänomene beschreiben.

Die benutzte Aufnahmemethode ist geeignet für in-situ Aufnahmen und liefert geeignete Stimuli für den Hörtest und kalibrierte Meßsignale.

Weitere Hörversuche können mit den erstellten Signalen unternommen werden, um die Klänge gezielt auf die gefundenen subjektiven Parameter zu bewerten. Dabei sind insbesondere die Intonationsparameter interessant, da sie schon Hinweise auf die physikalischen Pfeifenparameter geben. Danach können quantitative Zusammenhänge zwischen objektiven und subjektiven Parametern gefunden werden. Hier ist noch die Frage zu klären, in wieweit sich der Unterschied zwischen Mono- und Stereowiedergabe auf die abgegebenen Aussagen auswirkt.

Die implementierte Signalanalyse liefert eine Amplituden-Zeit-Frequenz Darstellung, die einen guten Blick auf den Einschwingvorgang zuläßt. Andere Analysetechniken könnten hier noch eine höhere Zeit- und Frequenzauflösung bringen.

Nach dem qualitativen Vergleich mit den subjektiven Aussagen kann man sagen, daß die gefundenen objektiven Parameter zur Messung von Klängen teilweise gut geeignet sind. Dies trifft für grundlegende Phänomene wie die Klangfarbe im Parameter „centroid“ oder die Stärke der nichtharmonischen Anteile im Einschwingvorgang im Parameter „transnoise“ zu. Allerdings sind die Zusammenhänge, die zu einer subjektiven Klangaussage führen meist komplexer Natur und beinhalten viele Einzelaspekte, die Findung der entscheidenden objektiven Parameter schwierig macht. Hierbei ist der wesentliche Fortschritt in der gehörrichtigen Weiterverarbeitung der Signale zu sehen, die auch die Beachtung der zeitlichen und spektralen Verdeckung und binauraler Effekte miteinbezieht.

All diese Erkenntnisse führen letztendlich zum Klangkörper selbst zurück, indem die Klangparameter den entscheidenden physikalischen Quellen- und Into-

nationsparametern an der Pfeife zugeordnet werden. Diese Verbindung ist wegen der komplexen Klangerzeugung und der komplexen menschlichen Wahrnehmung noch ein großer Schritt. Der Orgelbau und die Intonation sind auch deswegen eine Kunst.

Literaturverzeichnis

- [1] Pollard, H.F.: Feature Analysis of Musical Sound. *Acoustica*, Vol 65 (1988) pp. 232-244
- [2] Pitsch S., Angster J., Strunz M., Miklos A.: Spectral Properties of the Edge Tone of a Flue Organ Pipe International Symposium on Musical Acoustics, Edinburgh 1997 pp. 339-344
- [3] Rossing, T.D.: The Science of Sound. Addison-Wesley Publishing Company, 1982 pp. 49-57
- [4] Fletcher N.H., Rossing T.D.: The Physics of Musical Instruments. Second Edition Springer-Verlag New York, 1998 pp. 552-572
- [5] Miklós A., Angster J.: Properties of the Sound of Flue Organ Pipes. *Acustica*, Vol. 86 (2000) pp. 611-622
- [6] Castellengo, M.: Acoustical Analysis of Initial Transients in Flute like Instruments. *Acoustica*, Vol 85 (1999) pp. 387-400
- [7] Mahrenholz C.: Die Orgelregister. 3. Auflage Orgelbau-Fachverlag Rensch, 1968
- [8] J. Angster, G. Paal, W. Garen, A. Miklós.: Effect of Voicing Steps on the Stationary Spectrum and Attack Transient of a Flue Organ Pipe. Int. Symposium on Musical Acoustics, Edinburgh, 1997 pp. 285-294
- [9] van den Enden A.W.M., N.A.M. Verhoeckx: Digitale Signalverarbeitung. Vieweg Verlag, 1990 S. 115-159
- [10] Hilfe aus MATLAB.: „specgram“ Version 6 The Math Works Inc. , 2001
- [11] Hilfe aus MATLAB.: „resample“ Version 6 The Math Works Inc. , 2001
- [12] Hesselmann N.: Digitale Signalverarbeitung. Vogel-Buchverlag Würzburg, 1983

- [13] Stepanek J.: The Study of Violin Timbre using Spontaneous Verbal Description and Verbal Attribute Rating. Forum Acusticum Sevilla, 2002
- [14] Gehring U. / Weins C.: Grundkurs Statistik für Politologen. 3. , überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Westdeutscher Verlag, 2002 S. 34-38
- [15] Hilfe aus STATISTICA.: „Nichtparametrische Verfahren“ Version 6 StatSoft Inc.
- [16] Gehring U. / Weins C.: Grundkurs Statistik für Politologen. 3. , überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Westdeutscher Verlag, 2002 S. 223-237
- [17] Hilfe aus STATISTICA.: „Grundidee-Die zerlegung von Quadratsummen“ Version 6 StatSoft Inc.
- [18] Hilfe aus MATLAB.: „kruskalwallis“ Version 6 The Math Works Inc. , 2001
- [19] Hilfe aus STATISTICA.: „Grundbegriffe der Statistik“ Version 6 StatSoft Inc.
- [20] Gehring U. / Weins C.: Grundkurs Statistik für Politologen. 3. , überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Westdeutscher Verlag, 2002 S. 117-141

A Meß- und Wiedergabeequipment

- 1/2''- Meßmikrofone Norsonic, Mikrofonkapsel 1220 Druckempfänger, freifeldentzerrt
Empfindlichkeiten:
Kapsel 1: 51.5 mV/Pa Kapsel 2: 50.7 mV/Pa
- Mikrofonschiene mit 17 cm Mikrofonbasis
- 2 kanaliger Konditionierverstärker Brüel und Kjaer Nexus (Abb. A.1)
- Soundkarte RME Hammerfall (Abb. A.2), 8 Audio-Kanäle, Verbindung zum PC per Cardbus Schnittstelle
- Notebook Toshiba Satellite, PCMCIA Slot, Betriebssystem Windows 2000
- geschlossener Kopfhörer AKG K270 Studio



Abbildung A.1: Konditionierverstärker



Abbildung A.2: Soundkarte

B Matlab Funktionen

B.1 SPLeff

```
function SPLeff(sig) %gibt effektivwert des
                    %schalldruckpegels
                    %im stationären klang aus
                    %stationärer abschnitt
sig1=sig(100000:200000,:); %bildet Quadrat
sig1=sig1.^2; %bestimmt mittelwert
SPL=mean(sig1); %zieht die Wurzel
SPL=sqrt(SPL); %logarithmiert
SPL=20*log10(SPL); %skaliert auf kalibrierten wert
SPL=87.7+SPL; %gibt SPL aus
assignin('base','SPL',SPL);
```

B.2 harmonics

```
function harmonics_512(sig,f,k,a,e) %gibt zeit-frequenz-darstellung
                                   %aus
                                   %Eingaben:
                                   %sig...vektor des eingelesenen
                                   %wav files
                                   %f.....in freqmes bestimmte
                                   %genaue frequenz
                                   %k.....Anzahl der angezeigten
                                   %Harmonischen
                                   %a.....Anfangspunkt des
                                   %Einschwingvorgangs (samples)
                                   %e.....Endpunkt des
                                   %Einschwingvorgangs(samples)
sig2=sig(a:e); %hier die für den Einschwing-
               %vorgang relevante filelänge
s=1/[(1/f)/64]/2; %hier wird die neue (halbe)
                 %samplerate aus f berechnet
s=round(s)*2; %hier wird s auf den nächsten integer
              %gerundet,da resample nur integers annimmt
              %und wieder mit 2 multipliziert, damit ein
```

```

                                %gerader Wert vorliegt
assignin('base','s',s)          %gibt C im workspace aus
resig2 = resample(sig2,s,44100); %resampling
B = specgram(resig2,512,s,hann(512),500);
assignin('base','resig2',resig2) %berechnet die fft mit
                                %moving window
                                %hier fft size, fensterart, fensterbreite
                                %und overlap eingeben
                                %fensterbreite - overlap = hopsize h
C=abs(B);                        %bildet Betragsmatrix C aus der komplexen
                                %Matrix B
C=2*C/sum(hann(512));%Korrekturfaktor für die Fensterfunktion
assignin('base','C',C)          %gibt C im workspace aus
D=20*log10(C);                  %bildet logarithmierte Matrix D
D=87.7+D;                       %legt Amplitudenachse auf kalibrierte
                                %Werte fest
assignin('base','D',D);        %gibt D im workspace aus
n=1:k;                          %bildet Reihe von 1 bis k
g=[n*8+1];                      %selektiert jede 8. Spektrallinie
E=D(g,:);                      %bildet Matrix E mit denjenigen spekralen
                                %Werten
                                %die den Harmonischen entsprechen
E2=C(g,:);
assignin('base','E',E);
assignin('base','E2',E2);
h=512-500;                      %skaliert die Zeitachse
zeit=[1:size(E,2)]*(1/s)*h;
harm=[1:k];                    %skaliert die Frequenzachse auf die Nummer
                                %der Harmonischen
harm=fliplr(harm);             %flippt die harm Achse links rechts
waterfall(zeit,harm,E);        %gibt 3D Darstellung aus

```

B.3 freqmes

```

function freqmes(sig,a,e,g) %Frequenzmessung mit folgenden Eingaben:
                                %sig....vektor des Eingangssignals
                                %a.....Anfangspunkt (Samplenummer)
                                %im stationären Klang
                                %e.....Endpunkt (Samplenummer)

```

```

                                %Bereich (a:b) soll möglichst lang sein
                                %g.....ungefähre Grundfrequenz
sig1=sig(a:e);                    %legt filelänge fest
d=g*3;                            %neue samplerate d entspricht dreifacher
                                %grundfrequenz g
resig = resample(sig1,d,44100);    %resampling auf neue, möglichst
s=size(resig,1);                  %ermittelt die Länge s von dem
                                %resamplen file
o=s-1;                            %legt overlap auf s-1 fest
[Pxx,w]=pwelch(resig,s,o,[],d);  %Ermittlung des Leistungsdichte-
                                %spektrums nach Welch
                                %[] legt fft size N fest, auf
                                %nächstniedrigere 2er Potenz unter s
                                %Pxx ist ein Vektor mit N Amplitudenwerten,
                                %w ist ein gleichgroßer Vektor mit den
                                %zugehörigen Frequenzwerten
assignin('base','w',w)          %gibt w aus, damit man frequenzauflösung
                                %begutachten kann
x=find(Pxx == max(Pxx));        %Findet den Index x des Maximums in Pxx
f=w(x)                            %gibt den Frequenzwert an der Stelle x aus
assignin('base','f',f)          %gibt y im workspace aus

```

B.4 centroidspec

```

function centroidspec(C,s) %Stellt das Frequenzzentrum der
                                %gesamten FFT Linien, bezogen auf
                                %die Nr. der FFT Linie dar
                                %s...(re-)samplingrate
x=[1:size(C,1)];                %ermittelt die Zeilenzahl von C und
                                %bildet Reihe
for k=x                          %multipliziert jedes Element der Zeile k
                                %mit dem Laufindex k, erzeugt Matrix G
    G(k,:)=C(k,:)*k;
end
y=[1:size(C,2)];
for n=y                          %dividiert die Summe der n-ten Spaltenwerte
                                %von G durch die Summe der n-ten Zeilenwerte
c2(n)=sum(G(:,n))/sum(C(:,n));
end

```



```

                                %von C und erzeugt den Vektor c,
                                %der den Frequenzschwerpunkt für n Zeitpunkte
                                %darstellt
c2=c2*(s/512);                    %Normierung auf [Hz]
assignin('base','c2',c2)         %gibt c2 im workspace aus
c2s=sum(c2(n-49:n))/50; %berechnet Mittelwert aus letzten 50 Werten,
                                %entspricht stationärem Frequenzschwerpunkt
assignin('base','c2s',c2s)      %gibt c2s im workspace aus

```

B.5 centroidharm

```

function centroidharm(E2) %Berechnet das Frequenzzentrum der
                        %Harmonischen aus der harmonischen
                        %Betragsmatrix E2,
                        %genormt auf die Ordnungszahl

F=E2;
x=[1:size(F,1)];       %ermittelt die Zeilenzahl von F
for k=x                %multipliziert jedes Element der
                        %Zeile k
    G(k,:)=F(k,:)*k;   %mit dem Laufindex k,
end                    %erzeugt gewichtete Matrix G
y=[1:size(F,2)];
for n=y                %erzeugt zwei Summenvektoren,
                        %über die Spalten von G und über die
                        %Spalten von F
    c(n)=sum(G(:,n))/sum(F(:,n));
end                    %und dividiert diese Vektoren zum
                        %Vektor c,
                        %der den Frequenzschwerpunkt für n
                        %Zeitpunkte darstellt
assignin('base','c',c) %gibt c im workspace aus
cs=sum(c(n-49:n))/50; %berechnet Mittelwert aus letzten
                        %50 Werten,
                        %entspricht stationärem
                        %Frequenzschwerpunkt
assignin('base','cs',cs) %gibt cs im workspace aus

```

B.6 ratio harmonic to noise

```
function rhn(C) %ratio harmonic to noise
               %selektiert 3 Zeilen aus C
               %(Harmonische plus Nachbarzeilen)
               %und bildet harmonische Untermatrizen
               %dann wird jeweils zu einem Zeitpunkt
               %harmonischer Anteil und nichtharmonischer Anteil
               %(d.h. breitbandiges Rauschen und schmalbandige
               %tonale Komponenten) durch Summation über die
               %Amplitudenwerte bestimmt und der Quotient gebildet
k=1:20;        %erzeugt Reihe von 1 bis 20, so daß alle
               %harmonischen Frequenzen selektiert werden

Z1=C(k*8,:);  %erzeugt subset mit jeder 8. Spektrallinie aus C
Z2=C((k*8)+1,:); %erzeugt subset mit jeder 8+1. Spektrallinie aus C
Z3=C((k*8)+2,:); %erzeugt subset mit jeder 8+2. Spektrallinie aus C

Z11=sum(Z1); %summiert Ampl. d. Spalten von Z1 u. erzeugt Vektor Z11
Z22=sum(Z2); %summiert Ampl. d. Spalten von Z2 u. erzeugt Vektor Z22
Z33=sum(Z3); %summiert Ampl. d. Spalten von Z3 u. erzeugt Vektor Z33

H=Z11+Z22+Z33;%erzeugt zeitabhängigen Vektor H, der den harmonischen
               %Anteil darstellt
S=sum(C);      %erzeugt zeitabhängigen Vektor über die Summe der
N=S-H;         %erzeugt zeitabhängigen Vektor über die Differenz aus
               %Gesamtsignal und harmonischen Anteil und stellt somit
               %den nichtharmonischen Anteil dar

H=20*log10(H)+87.7; %Skalierung
N=20*log10(N)+87.7;

L(1,:)=H;
L(2,:)=N;
L=L';
plot(L);          %druckt L: Vektor H und N in einem Diagramm
assignin('base','L',L) %gibt L im workspace aus

rhn=H./N;        %erzeugt zeitabhängigen Vektor über den Quotienten aus
               %harmonischen Anteil und nichtharmonischen Anteil
```

```

assignin('base','rhn',rhn)    %gibt rhn im workspace aus

n=size(N,2);

rhns=sum(rhn(n-49:n))/50;      %berechnet Mittelwert aus letzten
                               %50 Werten, entspricht stationärem
                               %Signal-Rauschverhältnis
assignin('base','rhns',rhns)  %gibt rhns im workspace aus

```

B.7 harmoamp

```

function harmoAmp(E) %bestimmt die stationären Amplitudenwerte der
                    %Teiltöne
y=size(E,2);        %gibt Zahlenreihe z der 100 letzten
                    %Spalten-Indizes von E aus

z=y-99:y;
E2=E(:,z);          %generiert submatrix von E mit den 100 letzten
                    %Spalten
Astat=sum(E2,2)/100 %bildet Mittelwerte der Reihen von E2
assignin('base','Astat',Astat) %gibt Astat im workspace aus

```

C Attribute

C.1 Kategorien mit häufigsten Attributen

Einschwingvorgang	Stärke	weniger-mehr Spucken (26) hart-weich (25) wenig-viel Anblasgeräusch (16) ploppt (10) forciert (6) Anblasgeräusch härter (4) stark-schwach (3) viel-wenig Vorläufer (2) Anblasgeräusch obertöniger (2) fötenartiges Geräusch (2) schärfer (2)
	Dauer	lang-kurz (32) schnell-langsam (18) prompt(10)
	Sonstiges	unruhig-ruhig (6) schnörkelig, wellenartig (3) geht in Oktave (4) prinzipalig-bourdonartig (3) hölzern-metallisch (2) locker-verklemmt (3) direkt-indirekt (3) präzise (3) schlechtere Ansprache (2) Geräusch (3) gleichmässig (2)

Tabelle C.1: In Klangkategorien eingeteilte Attribute mit Häufigkeiten in Klammern, I

Stationärklang	Klangfarbe	grund- obertönig (48) dunkel-hell (41) dumpf (13) mehr Bässe, Mitten, Höhen (10) klar (6) A-O-U Vokal (5) hohl (4) schärfer (4) nasal (2)
	dominante Teiltöne	terzbetont (11) quintbetont (7)
Gesamtklang	Lautstärke	stark-schwach (40) laut-leise (17) kräftig (13) voller (8) zurückhaltend (6) fülliger (4) intensiv (2)
	Fluktuationen	stabil-unstabil (6) zittert (5) tremoliert(4) wackelt(3) Flattern (2) rauh (2)
	Rausch	mehr - weniger Blasgeräusch (11) rauschig (10) mehr-weniger Windgeräusch (5) blasig (2) hauchig (2)
	Gesamteindruck	weich (10) prägnant (6) rund (6) leerer (6) gut (4) mild (4) schön (2) homogen (2) Zurückhaltend (2) gesund (2)
Intonationsparameter		stark-schwach intoniert (9) gereizt, erregt (5) Kern zu tief (4) weniger-mehr gefordert (3) viel-wenig Wind (3) weitere Spalte (2)
Orgelspezifische Begriffe		streichend (9) ffüchtig (6) offen-gedackt (5) hölzern (3) kerniger (3) prinzipalisch (2)

Tabelle C.2: In Klangkategorien eingeteilte Attribute mit Häufigkeiten in Klammern, II

C.2 Gesamtprotokoll

Hier sind alle Äußerungen aus dem Hörversuch (SVD) nachzulesen. Es empfiehlt sich ein paralleles Hören der Klänge auf der beiliegenden CD.

SVD Alle
Paar Pos

1,2 2

S1
spuckiger, harter EV, stärkeres Anblasgeräusch(2),
prompter, langsamerer EV

obertöniger (3), ganz gering dunkler
quintbetonter (2), Terz stark (2)

stärker, kräftiger

moduliert, tremoliert ganz leicht

mehr Blasgeräusch, rauschender, Hauchiger

hölzerner Ton, fahler, kerniger

S2
weicher
EV schneller (2), kürzer

grundtöniger (3), Dunkler, dumpfer

schöner, runder (2), homogen, hölzerner Ton

schwächer, milder, luftiger, leerer, weicher

1,2 3

Ahnlicher Charakter

S1
weniger Spucken, schwingt wellenartig ein,

spuckt stärker,
härtester EV, schärferer Start, prompter,
forcierte Ansprache,
stärkeres Anblasgeräusch, spricht schlecht an
(bestimmt 1/8 Sekunde)
langsamerer EV

starker Oberton dabei, obertonreicher, Terz dominiert

lauter, stärker, zu stark, kräftiger

tremoliert ansatzweise, instabil, unruhig, zitterig
deutlich zu hörende 5. Oberton wackelt

wirkt unsauber

rauschend

überreizt von der Mensur her

S2

EV weicher (2), vorsichtiger

weniger Oberton (2), dumpfer (2), grundtönig

stabil (2), glatt,

schwächste, homogenste,
ist gut, klanglich weicher (2) (fast flötig), leiser,
weniger prägnant, verschleierter, nebeliger
5. TT kontinuierlich klingend

1,2 5

Klanglich gleich

S1

aggressives Spucken (3),
EV härter, giftiger
EV länger, extrem langsamer EV
schlechtere Ansprache, spricht aber viel schwerer an,

es fallen einige Nebengeräusche auf bis der wirkliche Ton
erkennbar wird,

Quintbetont (2), obertönig (4), hell,
Terz (2)

Wellen im Ton
fasrig.
zu stark,
Windgeräusche

S2
warmer, weicher (4) Ansatz, schwächer intoniert, schneller

dunkel, dumpfer, grundtönig
Pommerartig, schwächer, hölzerner Ton, ziemlich OK
Terz
voller und runder

2,3 2

Klanglich gleich
beide recht flötig
farblich gleich,

S1
EV härter, kürzer

meisten GT, minimal dumpfer
wenigsten Wind, klingt gedackter,

S2
EV forcierter, länger (2), ploppt wenig lauter, langsamer

geringfügig höherer Obertonanteil
kräftiger intoniert, Pfeife mehr gefordert (2), ausgereizt,
mehr wind
stärkeres Nebenblasgeräusch

2,3 3

nur Lautstärke;

Klang fast identisch, beide sind verschleiert, weich, leise, dunkel,

S1

blasiger, dezenter Spuckansatz; spricht nicht direkt nach vorne;
wenig Anblasgeräusche, längerer EV

schwächste,

S2

EV spuckiger, direkter, härter

kräftiger

etwas zittrig

2,3 5

Ähnliche Charakteristik.

Klang sonst ziemlich ähnlich

S1

minimal langsamer einschwingend
geringes Anblasgeräusch

stärkerer GT (2)

leicht gerundet

zittriger

S2

EV Spuckansatz (2), spricht locker an, wenig übererregt,
etwas mehr Anblasg., weicher, länger

wenig heller (3), dumpfer, obertöniger

bißchen stärker

ziemlich OK

stabiler

3,4 2

s1

EV länger

Dunkler (2), grundtönig (2)
voller Ton
in sich ruhender, konstanter
weicher

S2
bißchen stärkerer Ansatz, spuckt etwas, forcierter,
stärkeres Anblasgeräusch (2), ploppt deutlich lauter,
ist in der Ansprache präsenter, hat aber eine lange
Einschwingphase, schneller

heller(5), obertöniger, kerniger
5. Oberton etwas hervortretend

am meisten wind, obertöne nehmen zu, klingt überfordert,
stark intoniert
leerer, mehr blasgeräusche
am meisten gefordert

3,4 3

nur Lautstärke unterschiedlich
Klang Beider ähnlich
gute Pfeifen

S2
EV langsamer, minimal längeres Anblasgeräusch

grundtöniger (3), Terz
bißchen stärker, voller, kräftiger

3,4 5

S1, S2 Obertöne ähnlich
anblasgeräusch und Klang seher ähnlich,
Klanglich gut,

S1
längerer EV, prompter, mehr Spucken (minimal)

leicht quintbetont, zu wenig GT,
schwächer, mehr Windgeräusch

S2

EV weicher, wenigsten Vorläufer, deutlichere,
leicht schnellere Ansprache

grundtöniger

etwas mehr geräusch im höheren f-Bereich, Terz
kräftiger

4,5 2

S1

spucken (2), kürzeres und härteres Anblasgeräusch,
länger, langsamer

Quintbetont, Obertöniger (3), heller(2), terz (4)
mehr windgeräusch im laufenden Ton, rauschend
fasriger Ton, leerer,
zu stark intoniert, mehr ausgereizt
prägnant
zittrig

S2

EV weicher, kürzer

grundtöniger (6), dunkler, dumpfer

mehr gedackt, weicher (2),
gerundeter, runder Ton, weniger terz (2), dumpfer
mehr zurückgenommen, zittert, unruhiger

5. Oberton ist zwar noch vernehmbar, aber um einiges
leiser als der Grundton und fügt sich besser in den
Grundklang ein als bei S1.

4,5 3

Beides dunkle Töne

S1
spricht weicher an, blasige Ansprache;

obertöniger (2)
kräftiger

S2
stärkeres Spucken, Ansatz spaltet sich ab, ploppt sehr laut

grundtönig (5), heller, 3. Oberton schwächer
weitere Spalte, leerer, hohl
besser
Fremdresonanz

4,5 5

die Klangfarbe soll wohl die gleiche sein

S1
weicher; langsamer einschwingend

heller(2), obertöniger (2), Terz (4), Quint
hauchiger Ton,
übererregt, rauschiger (2),
Kerspalte müßte erweitert werden, fülliger

S2
spuckt (3), starker Vorläufer, stärkeres Anblasgeräusch,
lauterem Plop, langsamer, länger, spitzer

dunkler, grundtöniger (2), heller
hauchiger Ton.

Terz scheint bei S2 am Anfang da zu sein,
dann aber regelrecht zu verschwinden,

5,6 2

Pfeifen erkannt
Übergang erkannt,
klanglich gut gemacht;
Übergang erkannt
statischer Pfeifenklang sehr unterschiedlich,
beide sind Grundtönig,

S1
Spuckansatz (3), Klackgeräusch, Bourdonartig;

dunkler Ton, grundtönig (3), stationärer Klang ruhig, weich (3)
typischer Gedackt, flötig (3), instabiles blasgeräusch, zittrig
weitere Mensur

S2
metallischer Ansatz, prinzipalig (3), mittlererregt,
hat Mühe anzusprechen, forciert, Anblasgeräusch etwas stärker,
weicher, länger

heller(5), 3. Oberton deutlicher
offen, prinzipalig (3) , haut aus der Reihe, schärfer
vor allem stärker, stark streichend, rauschiger(2)
flatternd, rau, schroffer
Präsenter
kräftiger

5,6 3

"Übergang erkannt,
großer, gravierender Unterschied,
wie vorher, Übergang erkannt,
Klangcharakter völlig verschieden

S1
spuckt (2); sehr harter, starker EV, "ck", gedackt,
ploppt, Anblasgeräusch etwas obertöniger
flötenartiges Geräusch am Anfang,

grundtönig, Terz,
obertonreicher

ruhiger, dunkler (2), dumpf,
flötig, klarer, weicher, leerer
wackelt etwas
introvertiert
gedeckter
sägendes Nebengeräusch

S2

EV schneller(2), forciertes, kommt gut, weicher und langsamer

grundtönig (2), dunkler, heller
offener(3) Ton,
kräftiger (2), lauter (2), fülliger, klarer,
prinzipalig (2), streichend,
prägnanter, schärfer
rauscht (3)
extrovertierter
voller Grundklang mit einer sich homogen einfügenden Obertönigkeit

5,6 5

S1 und S2 differieren erheblich in Farbe und Ansprache.

S1 ein wenig Zeit benötigt, um auf seine Tonhöhe zu gelangen
und hier wieder ein terziger Anteil zu verzeichnen ist,
spricht S2 sehr prägnant an und ist unvergleichlich grundtöniger

Übergang erkannt, beide gut intoniert,
Übergang sehr gut hörbar,
unterschiedliches Anblasgeräusch,
völlig unterschiedlicher Klangcharakter:

S1

EV prinzipalischem Plop, flötenartigem Nebengeräusch
gedackt (3), spucken (2), länger, langsam

grundtönig, obertonreich
flötig,
nebelig

S2

im EV ist GT dominanter, prompter, Ansprache schneller (2) ,
direkter , kommt chefmässig gut,

obertönig, grundtöniger
prinzipalisch
offen , klar
stark, kräftiger, lauter, definitiver,
prägnanter, voller, runder

6,7 2

die farbliche Tendenz erscheint gleich,
ansprachlich gleich (sehr weich)
beide Grundtönig

S1

zu kurze Ansprache, geht in Oktave, schnell, Anblasgeräusch stärker
heller (2), Quinte

Kern etwas zu tief, kräftiger, stärker (2), mehr Windgeräusch (2),
weicher,
um einiges strahlender und offener
rauschend, unruhig

S2

EV langsam
schwächer intoniert

grundtönig(2), dumpfer
milder, runder Ton. eleganter, streichend, klarer (heller)
weich (2), rauschig, härter, ruhiger,
schwächer (3), harmonischer, müsste man stärker machen ,

gedackt, sauberer
matter
ist in sich rund
weniger farbig.
stabiler

6,7 3

Farbe an sich ist ziemlich ähnlich

"vor allem Lautstärke;

Ähnliche Klangcharakteristik

"großer Lautstärkeunterschied; Klang von s1 und s2 ähnlich,
beide eine sehr lange Einschwingphase, fast ist vor dem

eigentlichen

Ton noch ein anderer, etwas höherer hörbar

S1

Anblasgeräusch stärker, prompter, startet bestimmter
kräftiger (2)

Grundtönig, prinzipalischer
deutlich intensiver. heller ,
wesentlich voller intoniert. lauter
lebendiger
spontaner

S2

Ansprache zu kurz, verklemmt, spricht nicht locker, tut nicht frei,
Anblasgeräusch etwas stärker, ist etwas mehr ängstlich,
findet den Ton etwas unsicherer

zurückhaltender (2), dumpf, weniger scharf
milder Ton. klarer (heller), GT schwächer
Kern zu tief, , Schönheit weg,
wackelt, obwohl schwächer, Blasgeräusch "
matter

6,7 5

S1

prinzipalisch präsent, schwingt gut ein
bißchen zu schnell , Anblasgeräusch etwas stärker, prompter
kräftiger intoniert, hohler, gesund; kräftiger (2)

grundtönig
wesentlich voller(2)
stabiler

S2

EV länger

Prinzipalansprache, verklemmt, weicher, zittert ziemlich lang",
zurückhaltend

streicherhafter (2), hört sich entfernter an,
etwas zugeschnürter Ton. , eine Nuance heller
zu schwach, leise, weniger prägnant
schwächer (4), enger , zurückgenommen
leicht zittrig

7,8 2

"nur Lautstärkeunterschied;

S1

weicher(3); sehr lange Einschwingphase,
Ansprache verzögert, langsam
verhaltener Ton.,

grundtönig, dunkler, dumpfer,
rauschig
bißchen untererregt;

S2

EV längerer, lauter , schnell-langsam, schnörkel im Ansatz,
geht in Oktave, stärkeres Anblasgeräusch, schneller (2), prompter,
heller, 3. Oberton hervortretend
kräftiger (2), markanter, frischer , kratziger
etwas forsierter Ton, rausch
nicht so stabil, flattern, zittrig
prägnanter (2)
stärker (2), "offen", kerniger , fülliger
präsender
rauschend
engere Mensur

7,8 3

farblich haben jedoch beide die gleiche Richtung

S1

EV Wackler, Ton ist kurz in Bewegung bzw. braucht kurz,
bis er wirklich da ist
GT braucht länger,
grundtöniger
normal;
milder wie S2.
schwächer, leiser, weniger offensiv

S2

schnörkel im EV, forciertes, stärkeres Anblasgeräusch,
sofort präsent, knalliger EV
höherer Obertonanteil., heller (4), Quinte
instabiler laufender Ton, Wellenlinie, unruhiger
kontinuierliche Wellenbewegung, unruhig im Klang,
zittert, tremulant im stationären, rauschiger (2), prägnanter,
stärker, kräftiger (2), lauter (2)

7,8 5

Unterschiede in Farbe und Dynamik
Anblasgeräusch ähnlich, Klangcharakter ähnlich,
"

S1

EV langsamer
weiter weg, streichiger (2)
zittert, unruhig
verhalten, zurückhaltend, leerer, wesentlich leiser (2),
zu wenig wind
seltsam halblebig, fast gehaucht

S2

EV schneller, härter, prompter, Spucken mit Oktave,
gT dominant, heller,
prinzipalisch
nahe, füllig, stärker(2),
voller(2) Ton.
deutlich kräftiger (2), lauter(3)

guter Ton,
fetter
stabiler

8,9 2

Klang aber gleich

S1
unruhig beim EV, kurz
grundtöniger
A-Vokalfärbung.
schwächer, Windgeräusch, rauscht

S2
prompt, kommt sofort, kommt präzise, selbstverständlicher,
Anblasgeräusch etwas länger
ruhiger, EV kräftiger (2)

O-Vokalfärbung., grundtöniger, Quint
stärker, ideal intoniert
kräftiger
metallischer
stabiler

8,9 3

farblich gleich,
S1 und S2 unruhiger EV, meisten Blasgeräusch im Stationären,

S1
Ansprache kurz, Ton am Anfang unruhig, spuckt mehr,
gleichmässig, langsamer

GT zu kräftig, heller, obertöniger, 3. dominierend
klarer, präzise
zurückhaltender Charakter, nicht so präsent, rauschiger
Kern tief,

S2 markantere Ansprache, EV länger, stärkeres Anblasgeräusch,
härter

grundtöniger

Quinte wird deutlicher, wenig heller
wesentlich kräftiger (3), etwas intensiver, lauter", stärker

streichend

wackelt

ein wenig zu laut

8,9 5

anblasgeräusch ähnlich

Klingcharakter aber ähnlich (streichend)

S1

zu kurze Ansprache, spricht präzise an, prägnant, tonales spucken

grundtöniger (3), dunkler, dumpfer und voller
schwächer, weniger voll, schneidender, fülliger
stabiler

S2

EV schneller, langsamer, spuckt weniger, spuckt kürzer,
reibendes Ansprachegeräusch,
obertonreicher, heller (5) , 3. Oberton
zittert, dünner

9,10 2

relativ ähnlich, jedoch empfinde ich eine minimale
Unterschiedlichkeit in der Ansprache und der Klangfarbe

statischer Klang ähnlich,

"

S1

EV länger, spricht homogener an, Geräusch, etwas spuckiger

hat Strich, obertöniger(2) A-Vokalfärbung, grundtönig (2)
gut intoniert, weicher, undefinierter, mehr Rauschen)

S2

bißchen Oktave in Ansprache, etwas hart,
"k" bleibt stationär stehen, schräger, ruhiger,
spuckt Oberton in EV, "k", harte Ansprache"

dunkler, dumpfer, o-artig, leicht hohl (2) ,
U-Vokalfärbung. Quinte (2)
weniger rauschig
minimal lauter

Oberlabium zu weit draußen,

9,10 3

die farbliche Tendenz geht auch hier in die gleiche Richtung,
die Ansprache der beiden Töne weist jedoch erhebliche Unterschiede

auf

S1
zu schnell, zu kurzer Vorläufer, Anblasgeräusch länger, B und p
grundtöniger (2), Grundton weniger stark, Quint (2)
Kern zu tief,
mehr Windgeräusch, rauschig (3), undeutlicher

S2
EV lautem Plop, spuckt, eine Art Knacken dabei, härter, t oder k
grundtönig (3), mehr streichend, hellerem, klarer
nasaler(2)
in sich ruhender

9,10 5

Klangcharakter und Lautstärke aber sonst ähnlich
klanglich relativ gleich

s1
EV weicher, prompter, gleichmässiger
geht bißchen in die Oktave, etwas stärkerer Ansatz
Terz, Quinte, obertöniger
mehr Blasgeräusch

S2

deutliches Ansprachegeräusch., zu starkes Spucken, Plop,
Anblasgeräusch wesentlich obertöniger, härteste Vorsprache (2),
flötenartiges Nebengeräusch ganz am Anfang, scharf, kürzer,
tonaleres Spucken, EV länger, EV ähnelt Knall eines Flaschenkorkens

grundtöniger (2), minimal brillianter
rauher Ton.
stärker (3), voller
präsenster

D Trackliste der beiliegenden CD

Track	Klang Nr.	Mikrofonposition
1	1 Dis	2
2	2 E	
3	1 Dis	3
4	2 E	
5	1 Dis	5
6	2 E	
7	3 F	2
8	4 Fis	
9	3 F	3
10	4 Fis	
11	3 F	5
12	4 Fis	
13	5 G	2
14	6 Gis	
15	5 G	3
16	6 Gis	
17	5 G	5
18	6 Gis	
19	7 A	2
20	8 Ais	
21	7 A	3
22	8 Ais	
23	7 A	5
24	8 Ais	
25	9 H	2
26	10 c	
27	9 H	3
28	10 c	
29	9 H	5
30	10 c	